

Géomatique

Expert

TOUJOURS PLUS DE 3 D

Les GéoData Days

Cadastre 3D en Suisse

LiDAR et modèles 3D de végétation

N° 123 - Juillet-Août 2018 - 14 €

Abonnez-vous à l'e-Newsletter
bimensuelle et recevez gratuitement
toute l'actualité de la conception numérique





Image de couverture : © Adobe stock

Éditeur :

CiMax • 12, place G. Pompidou •
93167 Noisy-le-Grand Cedex
Tél. : 01 45 92 96 96
Fax : 01 49 32 10 74
Email : geomatique@cimaxonline.fr

Directrice de la publication :

Anne-Caroline Prévot-Leygonie

Rédaction : Vincent Habchi

PAO et maquette : PAO Corlet

Merci à : Afigéo, Françoise de Blomac

Ont collaboré à ce numéro :

A. Baillon, F. Wasser, A. Debray,
J.M. Follin, B. Bolland, C. Leblan

Publicité : Sébastien Guénée

Tél. : 01 45 92 99 96
Email : s.gueneee@groupe-cimax.fr

Abonnements :

Ana Dos Santos
Tél. : 01 45 92 98 98
France métropolitaine : 70 €
Communauté européenne : 85 €
Reste du monde : 95 €

Flashage et Impression :

CORLET Imprimeur
14110 Condé-sur-Noireau
ISSN 1620-4909

Commission paritaire : 0618 T 79345

Dépôt légal à parution

L'ensemble des textes, images,
clichés et autres documents
sont propriété de la rédaction,
sauf indication expresse.

Tous droits réservés, hormis
dans le cadre des dispositions
de l'article L. 122-5 du Code
de la propriété intellectuelle.
© Copyright CiMax 2018.



Géo | fantômatique

Être fantôme aujourd'hui n'est pas une sinécure : passer l'éternité enchaîné à hurler dans les châteaux du nord de l'Écosse où il pleut tout le temps et où plus personne ne dort, ça n'est pas très « fun ». Et puis ça ne fait pas terrible sur *LinkedIn*. Alors, certains ont décidé de tenter l'aventure dans des contrées méridionales plus civilisées. Et là, ces explorateurs ont appris que la modernité, c'était le numérique !

Fi des châteaux miteux ! Fi des bateaux piteux ! Coule, *Flying Dutchman* ! L'heure est aux sites *web* et aux bases de données. Le fantôme post-moderne s'infiltre au cœur des serveurs, fait des guili-guili aux processeurs qui se mettent à cafouiller, ou bien joue subrepticement avec vos données.

Bien sûr, si vous parlez des fantômes à des informaticiens, à des scientifiques ou même à monsieur tout le monde, ils vont vous rire au nez et vous croire un peu toqué. Et pourtant. Rappelons-nous avec émotion de la première victime célèbre, cet automobiliste polonais, dont le système de navigation primitif, infecté par un *poltergeist*, avait confondu un embarcadère de ferry en pont, forçant ainsi le malheureux à un bain de minuit bien involontaire. C'était là la première incartade des revenants dans les transports terrestres. Mais diable, ils y ont pris goût ! Et voici qu'ils ont découvert... le train.

Récemment, la RATP a mis en service sur le RER A une nouvelle version du SIEL, ce système d'information quai qui affiche des heures de passage des prochains trains. Sauf que... les spectres l'ont rendu totalement imprévisible. Souvent, les trains « reculent » brusquement. Parfois, ils se perdent, et sont remplacés par des petits points clignotants « • • • » qui ressemblent aux pastilles que grignotait *PacMan* à la belle époque. Parfois, ils se volatilisent. Certains réapparaissent. D'autres pas. Si Wagner vivait encore, il en écrirait peut-être un nouvel Opéra (Havre-Caumartin ?).

D'autres fantômes, plus ambitieux, se sont attaqués aux ordinateurs de notre exploitant ferroviaire national. Gardez-vous ainsi de réserver une place sur l'Intercité 3130 partant un peu avant 18 h du Havre pour gagner Paris (ou son compère de 13 h) : c'est un ectoplasme ! Pis, diablement pervers. De l'avis des agents commerciaux locaux, « *cela fait trois mois que l'on a signalé à la direction qu'il ne roulait plus, mais il résiste, le bougre !* » Trois mois donc que ce train hante le site SNCF, que des voyageurs ingénus y réservent des places, pour se voir notifier (ou pas) quelques heures avant leur départ que tout cela n'était que du vent. « *Tout le monde le sait, les agents commerciaux, les sédentaires, les ASCT...* », m'a expliqué une charmante vendeuse à la gare. « *Mais bon, vous savez, la direction informatique, là-haut, c'est un autre monde.* »

Moi, je l'aimais bien cette vendeuse. Je n'ai pas osé la contredire et lui avouer que la direction informatique de la SNCF n'y était pour rien, mais que c'était les fantômes qui étaient responsables. On ne sait jamais. Elle aurait pu me prendre pour un médium. Ou pire, pour un ingénieur informaticien. Et refuser de me changer mon billet. Comme dit le vieil adage : « Qui veut rentrer plus tôt, ménage son cheminot. »

Bonnes vacances !

Vincent Habchi



Recevez la e-news de Géomatique

Expert

La e-news mensuelle de **Géomatique Expert** vous propose les plus récentes actualités du monde de la géomatique : éditeurs, logiciels, manifestations, publications...

L'inscription est gratuite,
sur le site : **www.geomag.fr** n'hésitez pas !

Actus

- *GéoData Days 2018* 4
- La conférence francophone des utilisateurs *ESRI* 9
- *QGIS 3.2* 21
- *PostgreSQL 11* 35
- *Tour Builder*, un outil pour réaliser des visites virtuelles 54

SIG

- Mise en œuvre d'un SIG pour le projet FARMaine (Partie 1) 10

Carto

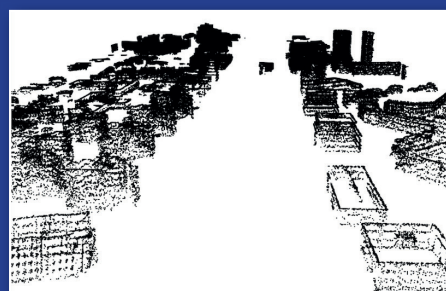
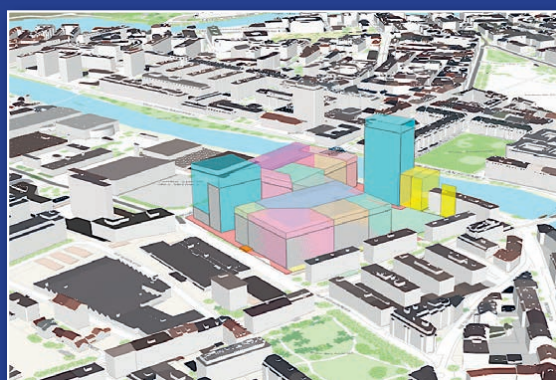
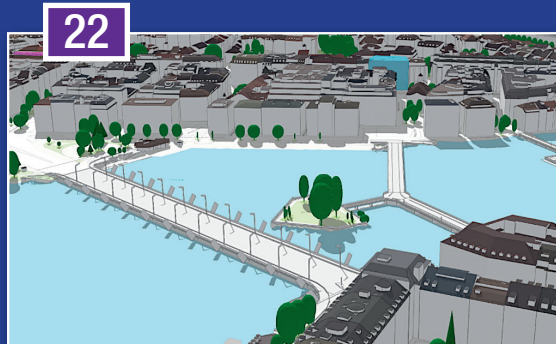
- La propriété en 3D : état des lieux 22

Mobilité

- Modélisation 3D de la végétation sur le territoire de Rennes Métropole (Partie 1) 36

Abonnement 55

TOUJOURS PLUS DE 3 D





Actus

@

CARRÉ
DES DOCKS
LE HAVRE NORMANDIE

GéoData Days 2018

Depuis la disparition du *GéoÉvénement*, les manifestations « généralistes » (lire : non organisées par un éditeur) se sont succédé, avec plus ou moins de succès. 2018 marque le début des « *GéoData Days* », un nouveau rendez-vous co-organisé par l'Afigéo et DécryptaGéo, dont la première avait lieu début juillet au Havre. L'occasion de faire le point sur le futur rapport parlementaire concernant la production et la gouvernance des données géographiques « souveraines ».

Il y eut d'abord le MARI, une manifestation un peu confidentielle : c'étaient les temps héroïques où le terme « géomatique » ne parlait à personne en dehors de quelques universitaires. Puis vint le *GéoÉvénement*, qui, petit à petit, gagna en postérité jusqu'à devenir la référence dans le domaine de l'information géographique à la française, avant que l'intérêt individuel de certains éditeurs ne casse la belle machine et ne condamne le salon à mourir prématurément.

Depuis cette époque (2008), les tentatives de recréer une manifestation « agnostique » se sont multipliées, certaines couronnées de succès, d'autres moins. Cette année, l'*Afigéo*, qui semble la mieux placée pour organiser une telle manifestation, et notre « confrère en ligne » *DécryptaGéo* se sont associés pour créer les *GéoData Days*, une manifestation sur deux jours réunissant un grand nombre d'exposants

(de tous les horizons, ce qui est rare) et conférenciers autour de thèmes multiples (les données souveraines, l'*open data*, le PCRS, le *deep learning*...).

L'un des temps forts de la première journée des *GéoData Days* était l'intervention très attendue de Valéria Faure-Muntian, députée de la Loire et chargée par le Premier ministre d'un rapport parlementaire sur les données « souveraines ». Ce rapport n'ayant pas encore rendu public, la députée s'est juste contentée d'en indiquer les grandes lignes.

Le futur rapport sur les données géographiques souveraines

La notion de souveraineté est importante, particulièrement quand il s'agit de données à usage régulier. Cette donnée se doit

d'être massive (complète), homogène (pas de zones blanches) et interopérable (on doit pouvoir l'utiliser dans différents contextes). Reste cependant le problème de rendre cette donnée opérationnelle. Or, les besoins et les techniques utilisées en géomatique ont fortement évolué : on est passé d'un modèle où l'on pouvait se contenter d'échanger des informations sous forme de fichiers de temps en temps à un modèle où la fraîcheur des données est primordiale, ce qui suppose des « flux tendus » entre producteurs et consommateurs.

Le rapport parlementaire a identifié une échéance, 2022, pour mettre en place une nouvelle sémantique de la donnée et moderniser sa mise à disposition. En tant qu'agence cartographique nationale, l'IGN est un point incontournable de la production de données géographiques en France. Elle doit même en devenir la pièce maîtresse. Mais pour



Cette première édition avait réussi à rassembler un nombre d'exposants remarquable.

cela, il va falloir définir la position exacte de chaque acteur : qui produit quoi, et sur quelle zone de compétences. Il faut donc rationaliser la production et la certification, et revoir le mode de financement de l'Institut.

Cette modernisation de l'agence nationale géographique n'est pas un problème franco-français. Il se pose également ailleurs, et la mission parlementaire a examiné le cas de nos voisins. Tous les pays ne sont cependant pas pertinents : par exemple, en Allemagne, aux États-Unis, en Espagne ou en Suisse, la production est délocalisée et confiée à des agences régionales, un modèle qui n'a pas été retenu en France.

L'enjeu derrière les données souveraines est bien entendu celui de la décision, particulièrement de la décision publique. Cette dernière doit être motivée, et se fonde la plupart du temps sur des informations mettant en jeu des données géolocalisées.

Or, en ces temps où la décision se prend souvent dans des délais courts, il n'y a plus vraiment de réflexion sur la justesse des données géographiques : on les considère d'emblée comme correctes, et reflétant exactement le territoire qu'elles représentent. Il faut donc que les données géographiques soient fiables et expertisées.

C'est dans ce cadre que va s'inscrire la future mission de l'IGN. Il ne s'agira plus pour l'Institut d'être la source unique de la donnée géographique nationale, mais plutôt d'agir comme un filtre ou un organisme de certification. La donnée estampillée IGN sera ainsi reconnue comme validée et donc utilisable. Quant à son stockage et à son utilisation, elle devra faire l'objet d'une politique définie par la délégation interministérielle au numérique, afin de trouver des pistes de mutualisation avec les autres données publiques.

Quelques points méritent une attention plus approfondie :

- La notion de « souveraineté » ;
- Le rôle de l'IGN dans l'organisation et la coopération des producteurs ;
- Le financement des produits et des mises à jour ;
- La structure de la gouvernance.

Qu'est-ce qu'une donnée « souveraine » ? On peut entendre deux choses par ce terme. Le premier revient à évaluer le terme souverain avec indépendant. C'est un peu l'esprit du rapport Langagne de 1999 : l'État ne doit dépendre de personne pour produire ses données. Il doit donc être maître de toutes les étapes, depuis le recueil jusqu'au stockage et à la diffusion. Mais « souverain » peut aussi s'analyser comme « exemplaire », c'est-à-dire faisant autorité de par la qualité, la précision, les méta-données et la mise à jour. Si l'on s'en tient à cette définition, dans ce cas une co-production des données avec le secteur privé est envisageable.

400 personnes environ avaient répondu présent pour cette première édition.



Il est à noter que « souveraine » n'implique pas de norme. Des données souveraines peuvent être publiées ou utilisées sous n'importe quel format. « Souveraine » est un adjectif opérationnel, non normatif. Il y a également une différence entre une donnée souveraine et une donnée de référence. Cette dernière notion s'appuie davantage sur l'usage qui en est fait. On pourrait ainsi dire que *Google Maps* est une donnée de référence au vu des nombreux sites *web* qui l'utilisent. La donnée de référence s'impose au citoyen, mais cela n'en fait pas nécessairement une donnée souveraine. Qui, parmi le grand public, utilise le *GéoPortail* pour afficher des données géographiques ?



Valéria Faure-Muntian (à droite), députée de la Loire et rapporteuse de la mission parlementaire des données, en compagnie de Françoise de Blomac et Jean-Marie Sèité, président de l'Afigéo.

Enfin, il est clair qu'il existe un besoin de coopération entre les différentes structures, que ce soit au niveau des différents ministères, que des collectivités territoriales, le tout sous la houlette du CNIG. Une réflexion approfondie devra déterminer quel est le besoin derrière chaque donnée produite, à quoi sert-elle ? Un autre point sur lequel l'expertise de l'IGN pourrait se révéler indispensable.

Qu'en pense le ministère de l'Écologie ?

Après ce bref résumé du contenu du futur rapport, Serge Bossini, secrétaire du CNIG, présente la vision du ministère de l'Écologie. Il remarque que « souveraine » a une troisième connotation, juridique celle-ci. La donnée souveraine est celle sur laquelle s'appuie l'État de droit. À l'heure où le « jumeau numérique », copie « conforme » du « jumeau ontologique », ce dernier constituant la réalité factuelle, cette notion a son importance. Car il n'est pas possible d'autoriser ou d'interdire

sur des zones qui ne sont pas précisément représentées : c'est le cas, par exemple, des documents d'urbanisme. La donnée souveraine est celle sur laquelle se fonde la certitude juridique, et donc les décisions « numériques ».

La notion de donnée souveraine ne signifie pas que l'État doit détenir cette donnée. On pourrait même avancer qu'il serait contradictoire que l'État soit à la fois garant de la qualité de la donnée et propriétaire de celle-ci. La notion de souveraineté s'appuie sur l'exhaustivité et la qualité, deux choses qui, par exemple, font de *Google Maps* le prototype de la donnée non souveraine : il n'existe aucune certitude de la fiabilité des données *Google*, pas plus qu'il n'existe de certitude quant à la continuité dans le temps de ces dernières.

Bien sûr, il ne doit pas non plus y avoir confusion entre donnée souveraine et donnée librement accessible : les données militaires, par exemple, doivent rester protégées par le secret défense. Cependant, si l'on veut que les

politiques publiques, à tous les niveaux de décision, s'appuient sur le même socle de données, alors donnée souveraine implique également libre accès. En allant même au-delà, la méthode de génération de certaines données devrait être rendue publique : supposons, par exemple, que la DREAL publie une nouvelle liste des zones inondables à partir d'un nouvel algorithme d'évaluation des risques. Plutôt que d'attendre une éventuelle contestation, cet algorithme pourrait être publié afin que toutes les parties prenantes (collectivités, associations...) puissent discuter de la planification avant que celle-ci ne soit publiée, et non après.

La production de la donnée souveraine ne doit pas être dépendante de contraintes économiques, car cette dernière est cruciale. Par exemple, la base nationale d'adresses, l'un des produits les plus attendus de ces dernières années, est toujours suspendue à l'octroi de quelques millions d'euros pour être achevée. De même, on dénombre encore quelques milliers de communes françaises où le cadastre n'a pas été numérisé : il faut les aider !

Quant à l'IGN, même s'il est, de par sa fonction, l'acteur de référence essentiel, il ne faut pas qu'il profite de sa position dominante pour « écraser l'écosystème » de la production de données. L'IGN doit, au contraire, agir comme un catalyseur et proposer des outils qui puissent faire monter en compétence les autres acteurs.

Enfin, à l'heure du numérique, il ne faut pas non plus oublier la politique de développement de tous les territoires : il y a encore, en France, des mairies où l'ADSL n'arrive pas, ou mal, et où le

Les Géolnnovations

En marge des conférences, plusieurs événements avaient été organisés, notamment le « festival des Géolnnovations » où l'on a pu voir tour à tour présentés :

- *IGNFab*, l'incubateur de *start-ups* de l'IGN ;
- *AD Consulting*, une société spécialisée dans les acquisitions *LiDAR* et les caméras, qui présente un drone de poids inférieur à sept kilogrammes capable d'effectuer lui-même des traitements du nuage de point grâce à un GPU embarqué dans l'électronique du drone ;
- *Scalían*, qui a réalisé une application de réalité augmentée grâce à laquelle les techniciens terrains peuvent visualiser la position des réseaux en temps réel (grâce à des lunettes) : en planimétrie aujourd'hui, mais bientôt en 3D ;
- L'ULM écologique avec lequel l'*Europe Vue du Ciel* réalise une bonne partie de ses missions de photographie aérienne ;



Jean-Luc Kaiser, le patron de l'*Europe Vue du Ciel*, présente son ULM *Green Observer*.

- *E-Cassini*, une application *web* permettant de visualiser simultanément des référentiels vectoriels, raster, des nuages de points, etc., à la manière d'*iTowns* ;
- *MagOSM*, une façon d'accéder par WMS/WFS à des données thématiques extraites d'*Open Street Map* et mises à jour quotidiennement sur la France, sans avoir à passer par les moulinettes assez lourdes d'importation des données OSM ;
- Et bien d'autres encore...

Signature de la convention CRIGE Normandie

À la fin de la matinée du premier jour, treize représentants de l'État, de la région et des autres collectivités territoriales normandes ont signé l'avenant 2 de la convention CRIGE qui organise la production, le partage et la diffusion des données géographiques dans la nouvelle région Normandie (fusion des deux anciennes régions Basse- et Haute-Normandie).



numérique reste un rêve lointain. Avant même de parler de bases de données, il faudrait s'assurer que tout le monde puisse y avoir accès.

Toujours le problème du financement

Dominique Caillaud, ancien député et président de GéoVendée, « renchérit » sur le problème du financement. « Imposer un référentiel comme le PCRS aux communes sans

prévoir le financement adapté, c'est nul ! » martèle-t-il. Les besoins vont avec les moyens, et la politique du « donnez-moi votre montre et je vous donnerai l'heure » ne fonctionne pas.

La production totalement décentralisée est-elle possible ? Peut-être, mais elle nécessite une coordination entre les acteurs et le développement d'outils d'échanges transversaux. « Nous y sommes arrivés en Vendée, où cinquante-quatre acteurs participent à la plate-

forme. Pourquoi une telle solution ne serait-elle pas généralisable à une base nationale comme la BAN ? », s'interroge Dominique Caillaud.

Jean-Marie Séité, le président de l'Afigéo, note également des progrès du côté du RPCU, le futur référentiel de Représentation Parcellaire Cadastre Unique qui devrait unifier le cadastre et le RGE. Un département test (le Val-de-Marne) a été choisi, et la DGFIP a décidé de co-financer un marché afin d'améliorer les futures méthodes de production. Sur la base adresse, Jean-Marie Séité rappelle que la spécificité française joue contre nous : dans d'autres pays, comme le Luxembourg ou le Royaume-Uni, il est impossible, par exemple, d'obtenir le raccord d'une nouvelle habitation aux réseaux si celle-ci n'a pas d'adresse valide à fournir aux exploitants. Mais le résultat actuel n'est pas si mauvais : sur les vingt-cinq millions d'adresses contenues dans la BAN, on ne recense que 2 % d'erreurs. Certes, c'est un pourcentage qu'il faut améliorer, mais le premier pas est désormais largement franchi. ■

La conférence francophone des utilisateurs ESRI

Comme tous les ans début octobre, ESRI France vous donne rendez-vous à l'occasion de la Conférence francophone des utilisateurs ESRI « SIG », qui se tiendra cette année les 10 et 11 octobre. Pour la deuxième fois, la manifestation se tiendra aux Docks de Paris, à Aubervilliers, à deux pas du terminus de la ligne 12 (« Front Populaire »), ou bien de l'arrêt de

tram de la Porte d'Aubervilliers. À noter que l'espace sera à nouveau élargi, avec davantage de salles de formation et un espace repas dédié.

Le matin sera consacré, en séance plénière, à l'exposé des nouveautés de la gamme de l'éditeur. L'après-midi, les « Grands témoins » prendront la parole. Cette année, ESRI a invité Alain

Bougrain-Dubourg, journaliste animalier et président de la ligue de protection des oiseaux, et Philippe Croizon, premier athlète amputé des quatre membres à avoir traversé la Manche à la nage.

Enfin, la conférence sera également ponctuée de nombreux témoignages utilisateurs, auxquels vous pouvez encore contribuer en vous inscrivant ici. ■



Mise en œuvre d'un SIG pour le projet FARMaine¹ (Partie 1)

Adèle Debray, Chercheuse post-doctorale - Projet FARMaine (PSDR 4) - CNAM/ESGT
Laboratoire Géomatique et Foncier

Jean-Michel Follin, Maître de Conférences CNAM/ESGT
Laboratoire Géomatique et Foncier

Benjamin Balland, Élève CNAM/ESGT en 5^e année

¹ Projet coordonné par Marie Fournier, Maître de conférences au Laboratoire Géomatique et Foncier, ESGT-CNAM.



Le projet FARMaine est un projet pluridisciplinaire financé dans le cadre du Programme de recherche PSDR 4 (Pour et Sur le Développement Régional) décliné à l'échelle du Grand Ouest. Il cherche à étudier les impacts fonciers, agricoles et paysagers des politiques publiques environnementales sur les fonds de vallée du bassin versant de la Maine, plus particulièrement sur les systèmes d'élevages extensifs. Ce projet s'appuie sur l'étude de quatre zones : les Basses Vallées Angevines (BVA), la vallée du Loir, la vallée de l'Oudon et la vallée du Sarthon-Alpes mancelles. Les outils mis en place dans le cadre de cette étude devront pouvoir être réutilisés dans des bassins versants similaires. Le présent travail vise à évaluer, grâce à un SIG, quel est l'impact des politiques publiques environnementales sur le paysage et le parcellaire des zones concernées.



La mise en place d'un SIG dédié à l'analyse de l'évolution dans le temps des espaces agricoles en lien avec les politiques publiques environnementales nécessite une connaissance fine du territoire étudié. La monographie du bassin versant de la Maine (Debray, 2017) en dresse une étude précise. Ce territoire englobe la Maine et ses trois principaux affluents : le Loir, la Mayenne et la Sarthe. Son périmètre comprend les villes d'Alençon au Nord, d'Angers au Sud, de Laval à l'Ouest et du Mans.

Le bassin de la Maine est un territoire constitué de paysages de plaines à l'Est et de paysages vallonnés à l'Ouest (influencés par le massif armoricain) dont les vallées ne sont pas homogènes. Les tendances paysagères relevées dans cette étude montrent une fermeture des milieux humides ouverts du fait de l'enfrichement et une réduction du bocage au profit des cultures annuelles en raison de la conversion des prairies et de la simplification du maillage bocager.

L'analyse de l'occupation du sol met en évidence deux tendances : la partie est du bassin est principalement cultivée (grandes cultures) et la partie ouest avant tout herbagée (élevage bovin et ovin). Ces tendances sont liées aux spécificités topographiques : le plateau de la Beauce est propice aux grandes cultures à l'Est, tandis qu'à l'Ouest, des vallons favorisent l'activité d'élevage. De même, l'Ouest est constitué de prairies parfois humides maillees d'un bocage et de haies, alors que l'Est offre un paysage d'*open field* qui tend à se généraliser avec le temps. Cette expansion engendre une diminution des prairies permanentes et une réduction progressive du bocage sur l'ensemble du bassin.

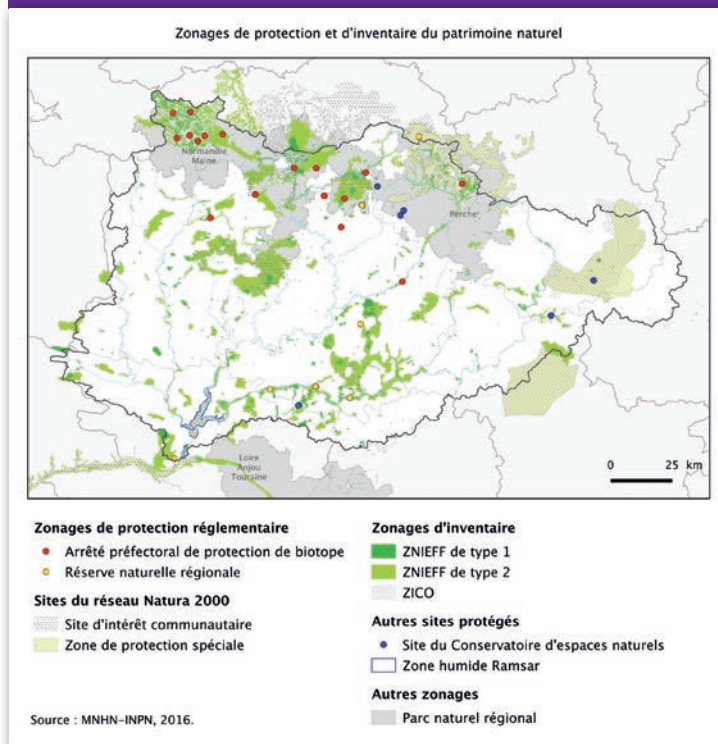
Le territoire du Bassin de la Maine est l'objet d'un certain nombre de politiques publiques environnementales qui ont pour principaux objectifs la protection et la gestion de la biodiversité et des milieux naturels, la gestion de la ressource en eau et des milieux aquatiques, et enfin la prévention du risque inondation. Certains de ces objectifs ont conduit à la mise en place de mesures agro-environnementales territorialisées entre 2007 et 2013 et climatiques à partir de 2015.

La protection et la gestion de la biodiversité et des milieux naturels nécessitent l'identification de zones d'intérêt. Ces espaces sont délimités par des zonages correspondant à des dispositions réglementaires (arrêté préfectoral de protection de biotope et réserve naturelle), à des sites du réseau *Natura 2000* (zone spéciale

de conservation, zone de protection spéciale), à des zonages d'inventaire (ZNIEFF de type 1 et 2, ZICO), à des sites gérés par le Conservatoire des espaces naturels, à des zones humides classées au titre de la Convention internationale de *Ramsar* et à des parcs naturels régionaux. Ces zones sont inégalement réparties sur le bassin de la Maine et parfois superposées.

En revanche, force est de constater une concentration de zonages dans les espaces de fonds de vallée, conséquence de la patrimonialisation soutenue des paysages de vallée de l'Ouest de la France (Germaine, 2009). Le champ d'action, le type d'instrument et les effets de l'ensemble des politiques publiques environnementales s'appliquant sur le bassin de la Maine sont définis dans le tableau 1.

Figure 1 : Carte des zonages du patrimoine naturel.



Champ de l'action publique environnementale	Instrument d'action publique	Type d'instrument	Effets directs ou indirects sur le foncier agricole
Protection et gestion de la biodiversité et des milieux naturels	Arrêté préfectoral de protection de biotope et réserve naturelle (APB)	Zonage réglementaire	Direct : contrainte sur la gestion du territoire
	Zone spéciale de conservation (ZSC)	Zonage réglementaire/ dispositif contractuel	Direct : contrainte sur la gestion du territoire
	Zone de protection spéciale (ZPS)	Zonage réglementaire/ dispositif contractuel	Direct : contrainte sur la gestion du territoire
	ZNIEFF de type 1 et 2	Zonage de connaissance	Indirect : oriente les politiques locales d'urbanisme
	Zones d'intérêt communautaires pour la protection des oiseaux (ZICO)	Zonage de connaissance	Indirect : oriente les politiques locales d'urbanisme
	Zones humides Ramsar	Zonage de connaissance	Indirect : oriente l'action de l'État et les politiques locales
	Sites du conservatoire d'espaces naturels	Instrument de maîtrise foncière	Direct : contrainte sur les pratiques agricoles
	Espaces naturels sensibles des départements (ENS)	Instrument de maîtrise foncière	Direct : contrainte sur les pratiques agricoles
	Parcs naturels régionaux (PNR)	Zonage de projet et instrument de planification	Indirecte : oriente les politiques locales d'urbanisme
	Trame verte et bleue définie dans le Schéma régional de cohérence écologique (SRCE)	Zonage réglementaire	Indirecte : oriente les politiques locales d'urbanisme
Protection de la ressource en eau et des milieux aquatiques	Schémas directeurs d'aménagement et de gestion des eaux (SDAGE)	Instrument de planification	Indirect : oriente les politiques locales
	Schémas d'aménagement et de gestion des eaux (SAGE)	Instrument de planification	Direct : contrainte sur la gestion de l'eau
	Contrats territoriaux	Dispositif financier	Indirect : financement d'actions de mise en œuvre de la politique de l'eau
	Mesures de protection des aires d'alimentation de captage	Zonage réglementaire	Direct : contrainte sur les pratiques agricoles
	Zones vulnérables aux nitrates	Zonage réglementaire	Direct : contrainte sur les pratiques agricoles
	Zones d'action renforcées	Zonage réglementaire	Direct : contrainte sur les pratiques agricoles
Gestion du risque d'inondation	Plan de prévention des risques d'inondation (PPRI)	Zonage réglementaire	Direct : contrainte sur l'utilisation du sol
	Territoire à risque important d'inondation (TRI)	Zonage de connaissance	Indirect : oriente les politiques locales



Champ de l'action publique environnementale	Instrument d'action publique	Type d'instrument	Effets directs ou indirects sur le foncier agricole
Action agro-environnementale	Mesures agro-environnementales territoriales et climatiques (MAEC)	Dispositif contractuel	Direct : prise en compte des enjeux environnementaux dans la gestion agricole
	Indemnisation compensatoire des handicaps naturels (ICHN)	Dispositif contractuel	Direct : prise en compte des enjeux environnementaux dans la gestion agricole

Tableau 1 : Récapitulatif des politiques publiques environnementales en vigueur sur le bassin versant de la Maine.
Sources : Projet FARMaine-Adèle Debray.

Le présent article décrit comment, à l'aide d'une base de données géographiques spatio-temporelles, nous allons tenter de mesurer l'impact de ces différentes politiques sur le paysage et le parcellaire du bassin de la Maine. Cette étude se focalisera sur le site des BVA pour lequel nous disposons de données sur les Mesures Agro-Environnementales (MAE).

Données utilisées

Les données utilisées sont issues d'une part des Fichiers fonciers et du Registre Parcellaire Graphique (RPG) provenant respectivement du Cerema Nord-Picardie et de l'Agence de Service et de Paiement (ASP).

D'autre part, les données sur les parcelles déclarées en MAE proviennent de la DDT 49. Elles permettent ainsi de spatialiser à une échelle fine les zones concernées par la mise en œuvre des objectifs des politiques publiques environnementales.

Comme nous souhaitons créer une base de données spatio-temporelle entre 2009 et 2016, il faut disposer de données existantes ou mises à jour dans cet intervalle. De plus, il est obligatoire de s'assurer de la cohérence spatiale et attributaire de nos données

entre les différents millésimes. En effet, dans le cadre d'une analyse spatio-temporelle, l'utilisation de données sur plusieurs années nécessite qu'elles aient une emprise et des attributs similaires pour chaque année étudiée.

Les fichiers fonciers

Les données foncières fournies comprennent seize tables principales par département pour le millésime 2016 et dix-neuf pour le millésime 2009, ainsi que des tables annexes réalisées par des agrégations selon différentes échelles administratives ou géométriques, selon des regroupements fonciers ou encore des regroupements de locaux se situant dans le même bâtiment. Les tables principales comprennent un volet d'identification puis des agrégations d'informations similaires déclinées à des échelles différentes, comme le nombre de parcelles, les années de construction des locaux, la surface de subdivision fiscale, un recensement des locaux et finalement la géométrie des entités, qui peuvent être utiles pour l'analyse du foncier au niveau parcellaire. La figure 2 montre une parcelle vectorisée et les informations associées disponibles issues des fichiers fonciers.

Les fichiers fonciers apportent donc une quantité conséquente

d'information, qui proviennent des déclarations des contribuables. Ils doivent donc être utilisés avec prudence : les attributs ne sont pas tous mis à jour annuellement et peuvent manquer de fiabilité. En outre, ils ne concernent que les parcelles cadastrées, et non le domaine public. Il est également possible que certaines variables se retrouvent dans plusieurs tables, ce qui peut entraîner des conflits lors de la visualisation et du traitement. Le CEREMA DTER Nord Picardie a réalisé un guide décrivant les principales variables et leur degré de fiabilité, qui pourra constituer une aide pour la réalisation des traitements.

D'un point de vue de l'analyse temporelle, il est primordial d'avoir des géométries comparables aux différentes dates. Cependant, la vectorisation des parcelles n'est pas complète dans les données de 2009 : les parcelles dont on ne connaît pas la géométrie sont représentées sous la forme de carrés. Cette caractéristique géométrique constituera donc un frein à l'exploitation de ces données.

Le référentiel parcellaire graphique

Le Registre Parcellaire Graphique (RPG) est une donnée permettant l'instruction des aides de la

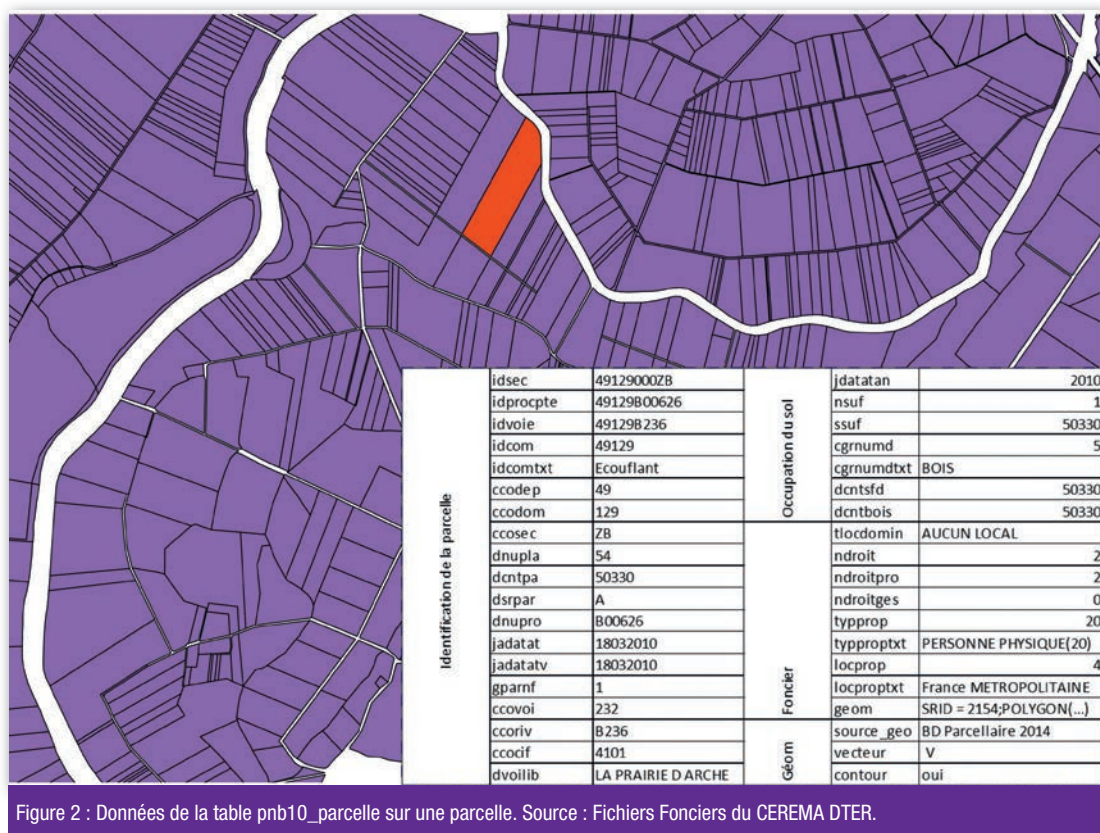


Figure 2 : Données de la table pnb10_parcelle sur une parcelle. Source : Fichiers Fonciers du CEREMA DTER.

politique agricole commune. Le RPG est mis à jour tous les ans dans le cadre des déclarations à la politique agricole commune. De 2006 à 2015, le registre était basé sur l'îlot d'exploitation c'est-à-dire le groupe de parcelles contiguës cultivées par le même agriculteur. À partir de 2016, il s'affine en s'appuyant sur la parcelle agricole. Le RPG comprend donc les données graphiques des îlots d'exploitation avant 2015 et des parcelles à partir de 2015, ainsi que leur culture principale.

Le registre parcellaire graphique dérive du « dessin des exploitants agricoles, sur fond de papier A3 réalisé par orthophotographies de la *BD Ortho*™ au 1:5 000, des îlots ou parcelles d'exploitation, ou bien par numérisation directe grâce au service *Télépac* » (Cantelaube *et al.*, 2014). Ces données sont millésimées

et contiennent les parcelles et îlots déclarés par les exploitants pour la campagne N dans leur situation connue et arrêtée par l'administration au 1^{er} janvier de l'année N+1. Ce registre est produit et mis à jour annuellement par l'agence de services et de paiement (ex-ONIC) depuis 2006. Il est disponible dans le système géodésique RGF93 en projection Lambert-93 pour la métropole et dans le système légal en projection UTM pour l'outre-mer.

Le registre parcellaire graphique possède donc une grande précision sémantique de par le classement de l'occupation agricole qu'elle définit mais aussi par la qualité des acteurs qui la renseignent. Cette donnée est très fiable, car personne n'est mieux placée que l'exploitant pour connaître ses cultures. De plus, l'utilisation du RPG comme

déclaration pour l'obtention des aides de la PAC implique des contrôles qui augmentent encore le degré de fiabilité de ces données. Cependant, le RPG ne concerne que les îlots d'exploitation déclarés à la PAC, donc n'est pas exhaustif spatialement. Les attributs utilisés pour le millésime 2009 et 2016 sont définis dans le tableau 2.

Les attributs du RPG définis en 2009 et en 2016 sont différents. Toutefois, le classement des cultures agricoles au sein des champs *CODE_CULTU* et *CODE_GROUP* est identique comme le montre le tableau 3.

Les données des politiques publiques environnementales

Les données qui représentent les politiques sont au format vecteur, dans le système géodésique RGF93 en projection



Attribut du RPG en 2009	Explication	Attribut du RPG en 2016	Explication
NUM_ÎLOT	Identifiant de l'îlot	ID_PARCEL	Identifiant de la parcelle
COMMUNE	Numéro INSEE de la commune		
FORME_JURI	Forme juridique de l'exploitation		
SURF_DECLA	Surface déclarée		
DEP_RATTAC	Département de rattachement		
SURF_GRAPH	Surface de l'îlot	SURF_PARC	Surface en hectares de la parcelle
SURF_CULTU	Surface du groupe de cultures majoritaire		
CODE_CULTU	Code du groupe de cultures majoritaire	CODE_CULTU	Code culture principale
NOM_CULTU	Nom du groupe de cultures majoritaire	CODE_GROUP	Code groupe de la culture principale
		CULTURE_D1	Code culture dérobé 1
		CULTURE_D2	Code culture dérobé 2

Tableau 2 : Attribut du RPG en 2009 et 2016. Source : IGN.

Lambert-93. Elles décrivent les zonages réglementaires qui sont mis en place par les textes de loi définissant les politiques publiques françaises et européennes en matière d'environnement. L'ensemble de ces données ont pour la plupart été recueillies par les collaborateurs du projet FARMaine sur les plates-formes de partage des données des institutions publiques en charge de la mise en place des différentes politiques environnementales. Ces données ne sont pas toutes utilisables à l'échelle parcellaire.

Les données utilisées plus particulièrement dans cette étude représentent les parcelles agricoles déclarées en MAET (Mesures agro-environnementales territorialisées) et MAEC (Mesures agro-environnementales climatiques). Celles-ci se basent sur le RPG, sont détectées par les Directions Départementales des Territoires (DDT)

CODE CULTU et CODE_GROUP

01-Blé tendre
 02-Mais grain et ensilage
 03-Orge
 04-Autres céréales
 05-Colza
 06-Tournesol
 07-Autres oléagineux
 08-Protéagineux
 09-Plantes à fibres
 10-Semences
 11-Gel (surfaces gelées sans production)
 12-Gel industriel
 13-Autres Gels
 14-Riz
 15-Légumineuse à grain
 16-Fourrage
 17-Estives landes
 18-Prairies permanentes
 19-Prairies temporaires
 20-Vergers
 21-Vignes
 22-Fruits à coques
 23-Oliviers
 24-Autres cultures industrielles
 25-Légumes - fleurs
 26-Cannes à sucre
 27-Arboriculture
 28-Divers

Tableau 3 : Classement des cultures. Source : IGN.

et contiennent pour chaque parcelle concernée le code de la mesure adoptée et l'année d'adhésion à cette mesure.

Modélisation de la base

Notre base de données devra être organisée selon un modèle conceptuel permettant de prendre en compte les phénomènes spatiaux et temporels. (Vangenot, 1997) a défini le modèle MADS de représentation de données grâce à des méthodes qui ont déjà fait leurs preuves, comme les types d'objets, les attributs, les types d'associations et les contraintes d'intégrité. Le principe d'orthogonalité, qui implique qu'un choix fait dans une dimension ne doit pas limiter les choix dans les autres, permet d'associer aux types d'objets une spatialité et une temporalité. Ce modèle conceptuel se veut également explicite et ergonomique. Il s'appuie pour cela sur des pictogrammes. Ce modèle rend possible la représentation des phénomènes spatio-temporels et leurs évolutions de manière claire, ce qui constitue l'objectif d'un modèle conceptuel.

D'autres modèles conceptuels ont également été proposés pour la représentation d'informations géographiques. Miralles *et al.*, 2010 ont réalisé un état des lieux des formalismes utilisés pour la représentation de ces informations. Ils citent notamment *Modul-R* (1993) utilisant un formalisme entité-relation se basant sur *Merise* et des pictogrammes pour décrire les différents types de spatialité et de temporalité, ou le langage *GeoOOA* (1996) qui utilise des diagrammes de classes pour concevoir des applications géomatiques permettant la description de l'évolution

temporelle d'objets. Deux ans après la conception de MADS, le modèle STUML, *extended Spatio-Temporal UML* (1999), a été créé. Ce n'est qu'en 2006 qu'apparaît STGL, une autre extension du langage UML utilisant les pictogrammes PVL définis pour représenter la temporalité et la spatialité de certaines données.

La conceptualisation MADS est un modèle relativement simple à comprendre des non-informaticiens car il ne se base pas sur le langage UML mais sur la logique entité-relation.

Modélisation logique

Le modèle des composites spatio-temporels (Tran *et al.*, 2017) permet la description de l'évolution des parcelles sur une zone par intersection des données disponibles à plusieurs instants donnés. Ces intersections créent

des micro-parcelles auxquelles on associe des séquences d'information, comme la variation des exploitants ou encore des types de cultures. Le croisement entre les parcellaires et leurs informations réalisées lors de la méthode *Space-time Composite* est décrite par la figure 3.

Cette philosophie se retrouve dans l'outil *RPG explorer* qui fonctionne par intersection spatiale de millésimes afin de créer des îlots affiliés. Il reconnaît aussi des séquences de cultures (Martin *et al.*, 2017). Ce processus de filiation des parcelles du RPG peut être repris pour la modélisation spatio-temporelle de l'évolution des parcelles de nos zones d'étude : il est possible de lier de nombreuses données entre elles pour réaliser des séquences d'occupation du sol. Dans ce but, l'UMR AGIR a mis en place un processus de décision, basé sur des règles d'étude de la

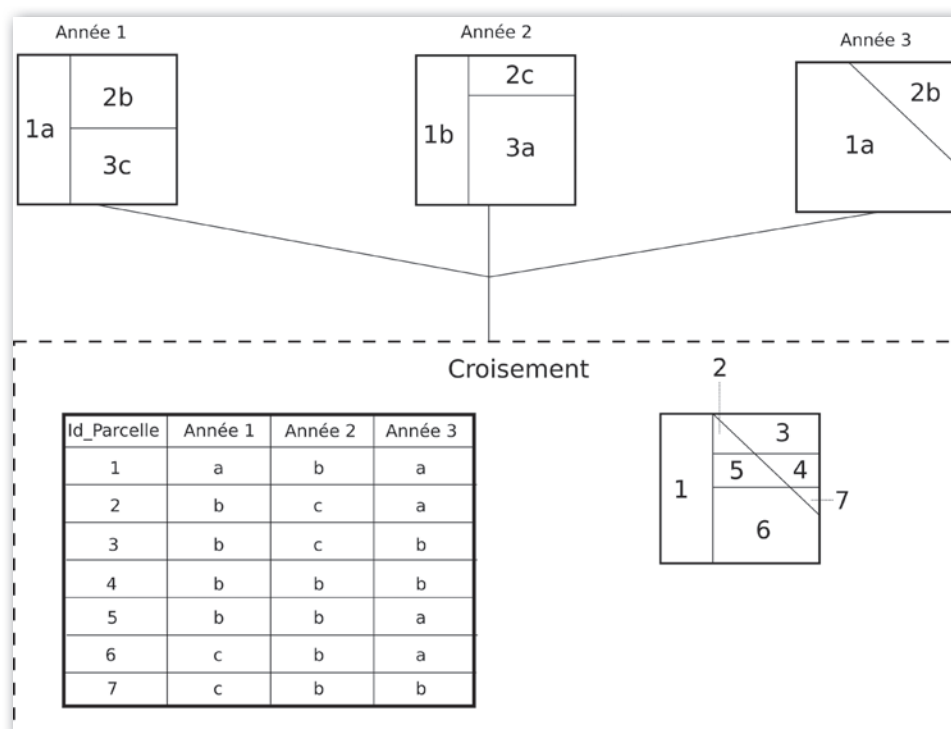


Figure 3 : Méthode Space-Time Composite. Source : Tran *et al.*



variation des surfaces des assolements et de leur pérennité, permettant la reconnaissance de séquences d'assolement (Martin *et al.*, 2017).

Méthodes et outils d'analyse utilisés

Les indicateurs décrivant le foncier et le parcellaire

Pour décrire le foncier, nous nous sommes basés sur l'approche développée par (Guéringer A., 2013²). Cette méthode fait apparaître les diverses caractéristiques du foncier susceptibles de constituer des facteurs de blocage ou de facilitation des projets. Elle exploite les fichiers MAJIC et emploie des critères fondés sur la dimension de la propriété, le nombre des propriétaires par comptes de propriétaire, la situation juridique de la propriété et la domiciliation des propriétaires. Ces critères définissent une typologie de la propriété dont ressortent trois caractéristiques principales : le degré d'éclatement, la dissociação des natures des biens et la domiciliation du propriétaire.

L'analyse de l'organisation du territoire doit permettre l'étude de son évolution sous l'influence des politiques publiques environnementales. Elle porte sur deux caractéristiques : le parcellaire et la structure du paysage. L'analyse du paysage est basée sur trois critères principaux : l'ouverture, le patrimoine (l'analyse de l'évolution temporelle du paysage) et la diversité. Ces

critères peuvent être décrits par des indices statistiques dérivés de l'occupation du sol, et des indices de diversité comme le rapport de la surface en herbe à la surface boisée.

Le parcellaire sera caractérisé par la surface, le périmètre ou bien par des indices de formes géométriques comme l'indice de Gravelius (Caloz, 2011) défini par l'équation suivante : $G = P \div \sqrt{\pi S}$, où P est le périmètre de la parcelle et S sa surface. Cet indice permet d'évaluer la compacité des parcelles : il tend vers 1 lorsque la parcelle se rapproche d'un cercle, et augmente quand la parcelle s'allonge. Le parcellaire peut également être décrit par l'indice fractal (Caloz, 2011) défini par l'équation suivante : $I_{fractal} = 2 \bullet \log P \div \log S$, où P et S ont la même signification que ci-dessus. L'indice fractal permet d'analyser la complexité de la forme de la parcelle. Il varie entre 1 et 2. Une parcelle de forme complexe aura un indice proche de 2.

Définition des outils statistiques utilisés

L'ACM décrit les relations que p variables qualitatives entretiennent deux à deux à travers une représentation des groupes d'individus correspondant aux diverses modalités de ces variables. La base de cette analyse statistique est la représentation des données, soit dans un tableau disjonctif complet, soit dans un tableau de Burt. Le tableau disjonctif complet comporte une colonne pour chaque modalité des variables étudiées et une ligne pour chaque individu, et ne contient que des 0 ou des 1. Le tableau de Burt comporte une ligne et une colonne pour chaque modalité des variables étudiées, chacune des

cellules indique le nombre d'individus statistiques qui possèdent en même temps la modalité de la ligne et de la colonne (F.-G. Carpentier, 2014).

Cette analyse peut être réalisée au moyen du logiciel R, dédié à l'analyse statistique. Des distances entre individus, entre modalités et les inerties des nuages de points à l'aide d'une distance mathématique telle que la distance du χ^2 , ainsi que les contributions d'une modalité à l'inertie du nuage de points associé aux tableaux sont calculées à partir de ces tableaux. Ces variables quantifient la ressemblance entre les différents individus et modalités.

L'analyse à composante multiple peut être réalisée à partir de l'un des deux tableaux présentés précédemment. L'ACM produit des axes factoriels associés aux valeurs propres de ces tableaux ainsi que, pour chaque ligne et colonne, des coordonnées, des contributions à la formation des axes et des qualités de représentation. Les résultats graphiques montrent les contributions des différentes modalités de l'étude aux dimensions définies précédemment.

La classification ascendante hiérarchique (CAH) est une technique statistique visant à rassembler une population en différentes classes ou sous-groupes de façon à ce que les individus d'une même classe soient les plus semblables possibles, et que ceux appartenant à des classes différentes soient le plus dissimilaires (Larmarange, 2018). Cette méthode considère, dans un premier temps, que chaque individu représente une classe, pour ensuite les regrouper ces classes dans des sur-classes et ainsi de suite, d'où le terme de classification ascendante.

² Guéringer A., 2013, *Propriété et propriétaires en espace périurbain ou la gouvernance foncière à l'épreuve des logiques privatives*, Terres agricoles périurbaines, p. 250, Chapitre 2, Quae édition.

Son but est donc de classer des individus selon un critère de ressemblance défini par une matrice de distance, calculée à l'aide d'une analyse en composante multiple. La distance entre deux individus sera d'autant plus grande que les observations seront divergentes. La classification ascendante hiérarchique est un processus itératif produisant un arbre de classification appelé « *dendrogramme* ». Les sections du *dendrogramme* représentent la répartition des individus dans les classes. La hauteur à laquelle le *dendrogramme* est découpé permet de définir le nombre de classe que l'on crée. Cette classification peut être réalisée à l'aide du logiciel **R**.

Bases de données

Modélisation conceptuelle de la base de données spatio-temporelle

La base de données à créer devra nous permettre de mener une analyse de l'évolution des caractéristiques du foncier et

de l'organisation spatiale de nos zones d'études.

La modélisation MADS permet de rendre compte de la nature des différentes données liées aux parcelles et des liens qui les unissent. Elle sera donc assez différente de la mise en œuvre technique finalement réalisée. Néanmoins, les logiques menant à la construction du modèle et de la base de données seront toujours présentes. Ainsi, les propriétaires possèdent des parcelles, qui sont intégrées dans un type d'occupation du sol et dont le regroupement compose des îlots d'exploitation.

La majorité des parcelles de nos zones d'études seront concernées par des politiques publiques environnementales quelles que soient leurs formes.

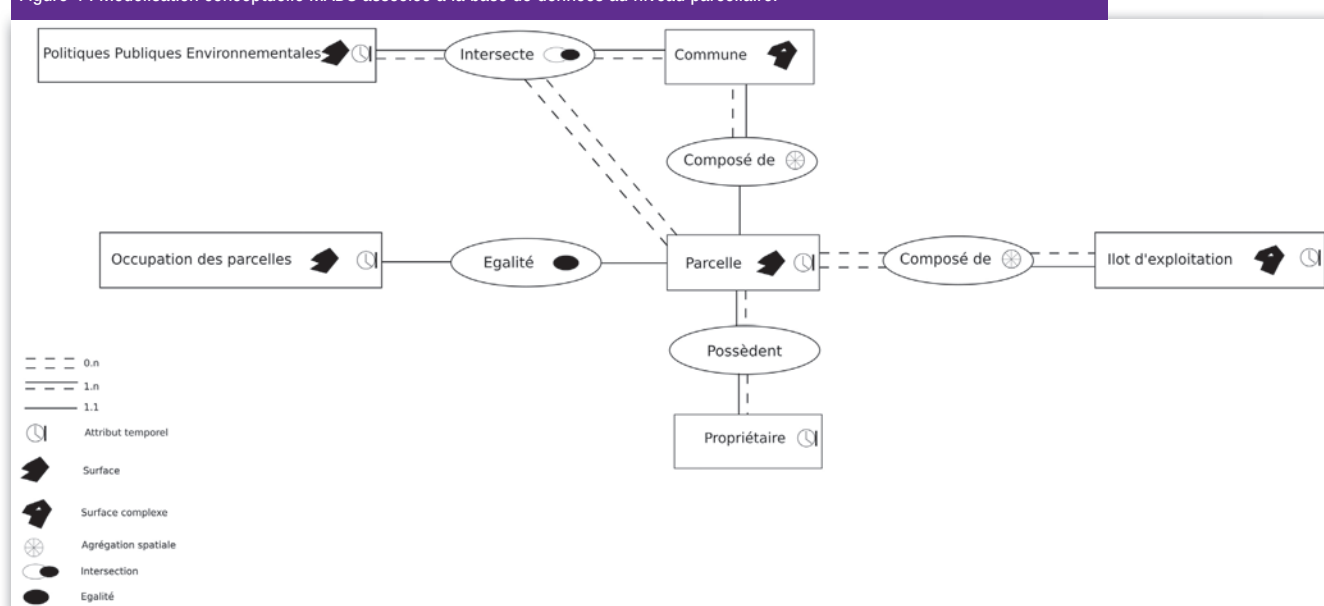
Modélisation logique de la base de données spatio-temporelle.

La base de données est composée de tables réalisées à l'aide de

la méthode « *Space-Time Composite* » (B.H. Tran *et al.*, 2016). Cette méthode permet la description de l'évolution spatio-temporelle de données prises à un instant *t*. Cette approche est la plus adaptée à la modélisation de nos données foncières.

Les données des politiques publiques environnementales seront modélisées d'une manière différente. En effet, ces données ne sont pas définies par des mil-lésimes similaires à ceux dont on dispose pour les fichiers fonciers et le RPG, mais par des dates de début et de fin d'application sans préciser de variations spatiales de leurs emprises. Cette modélisation est réalisée en regroupant l'ensemble des géométries associées aux données concernant les politiques publiques environnementales dans une table. Ces géométries sont ensuite liées à une table regroupant les informations définissant ces politiques. On arrive au modèle logique de la base de données visible sur la figure 5.

Figure 4 : Modélisation conceptuelle MADS associée à la base de données au niveau parcellaire.





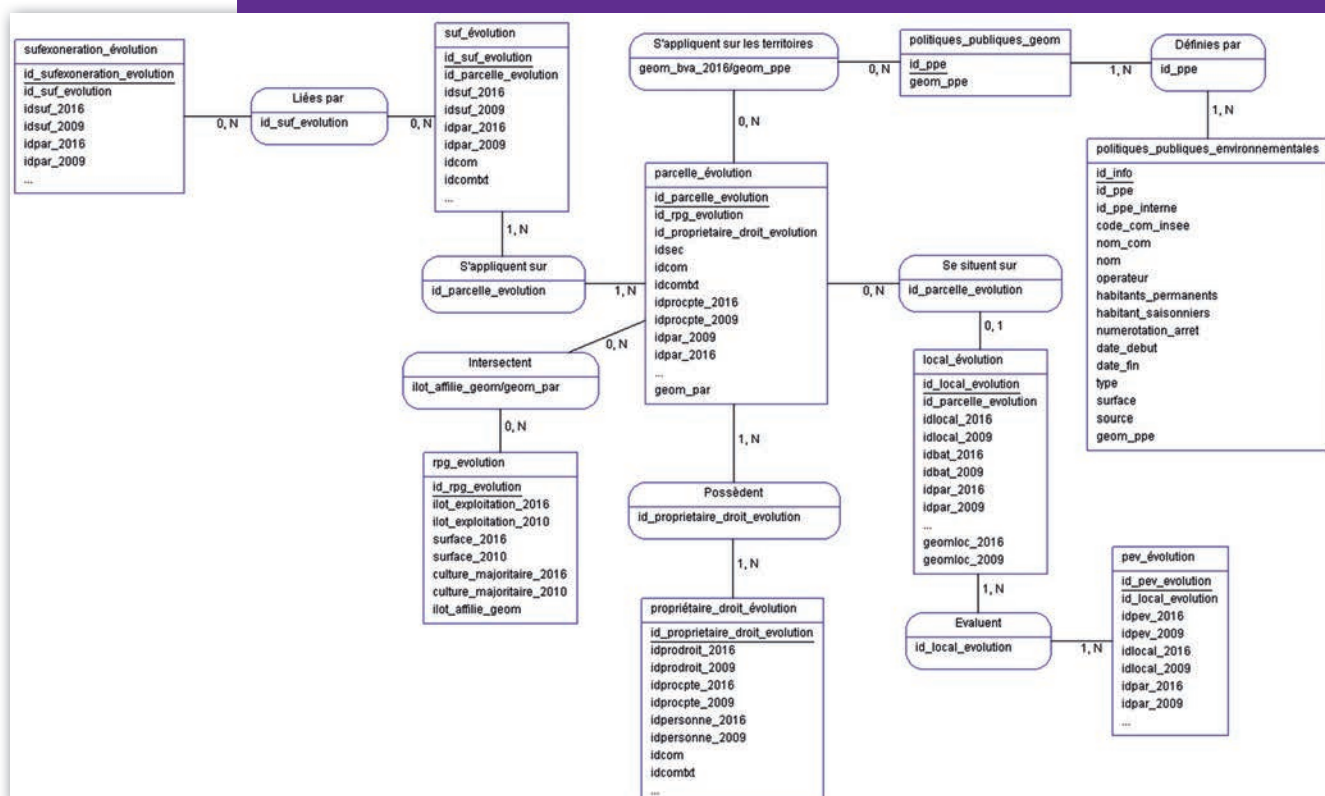
Les tables ne possédant pas de géométries sont issues de la sélection des attributs des fichiers fonciers réalisés précédemment. Ces tables regroupent donc l'ensemble des attributs utiles à la définition des caractéristiques foncières pour chaque millésime étudié. Par exemple, la table des subdivisions fiscales exonérées (*sufexoneration_evolution*) définit dans un premier temps l'entité qui est concernée par l'exonération : les identifiants des subdivi-

sions, des parcelles, de la section cadastrale, de la commune de la subdivision concernée par l'exonération en 2009 et 2016, puis, dans un second temps, l'exonération : le type d'exonération, la collectivité accordant ainsi que les années de début et de fin de cette exonération pour ces deux mêmes années. Les tables issues des croisements des deux millésimes des fichiers fonciers sont liées aux contraintes entre clefs primaires et étran-

gères définies sur les identifiants (identifiants numériques s'incrémentant à chaque ligne de la table de la forme *id_nom_de_la_table*). Le lien entre données des parcelles et données des politiques publiques environnementales sera réalisé au moyen d'une jointure spatiale. ■

(À suivre)

Figure 5 : Modélisation logique de la base de données.



Recevez la newsletter

Géomatique

Expert

La newsletter de Géomatique Expert vous propose les plus récentes actualités du monde de la géomatique : éditeurs, logiciels, manifestations, publications...

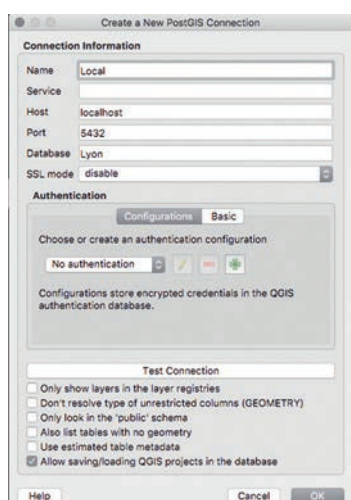
L'inscription est gratuite sur le site : www.geomag.fr, n'hésitez pas !

QGIS 3.2

La nouvelle version du SIG *Open Source* phare a été officiellement publiée à la fin juin. Cette version marque le véritable début de la branche 3 du logiciel : la précédente version, 3.0, était plutôt une version « d'essai » dans laquelle toutes les nouvelles fonctionnalités n'avaient pas été intégrées.

Cette version, baptisée *Bonn* en référence à l'ancienne capitale de l'Allemagne de l'Ouest, apporte un grand nombre de nouveautés par rapport à la précédente. En voici quelques-unes :

- Un format compressé pour les projets ;
- La possibilité de sauvegarder les projets dans une base *PostgreSQL*. Cette possibilité doit être explicitement autorisée lors de la définition de la connexion avec la base : elle ne l'est pas par défaut ;



Il est désormais possible de sauver les projets en base de données.

- La possibilité de créer des buffers variables suivant les objets, en paramétrant la distance en fonction d'un attribut ;

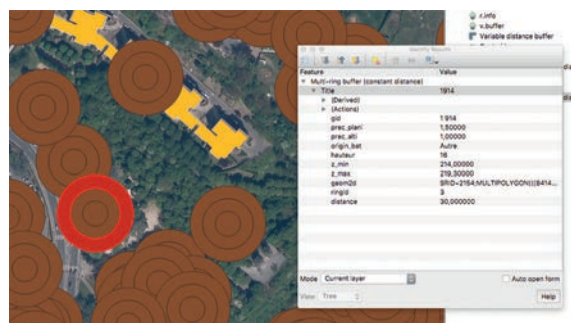


- La possibilité de définir des buffers « morceaux de camembert » (section de disque), ce qui peut être utile, par exemple pour calculer des visibilités orientées ou des portées d'ondes électromagnétiques, etc.



- Le calcul de buffers en anneaux : plutôt de créer un seul buffer (par exemple circulaire) autour d'un objet, celui-ci est divisé en plusieurs anneaux, chacun correspondant aux points compris entre deux distances régulièrement espacées ;

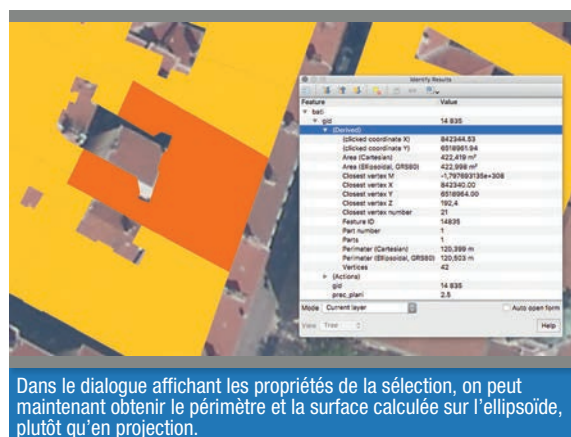
- La sélection affiche maintenant également le périmètre et la surface « vraie » de chaque objet (comprendre : calculée sur l'ellipsoïde) ;



Exemple de buffers multiples autour de points. Chaque disque est divisé en anneaux concentriques.

- QGIS peut maintenant ouvrir des données disponibles sur de simples serveurs HTTP(S) ou FTP ;

- Et beaucoup d'autres encore !



L'ensemble des nouveautés est consultable ici : <http://changelog.qgis.org/en/qgis/version/3.2.0> (en anglais). Quant à la nouvelle version, vous la trouverez comme d'habitude sur le site <http://qgis.org> en libre téléchargement. ■



En Suisse comme partout ailleurs, la densification du tissu urbain implique de construire des bâtiments élevés qui sont ensuite co-gérés par plusieurs propriétaires. Se pose alors le problème de la représentation cadastrale, et SIG, de ces divisions en volumes.

La propriété en 3D : état des lieux

Anthony Baillon, ESGT/DMO Genève
Frédéric Wasser, JC Wasser S.A.

Crédit : udc-ge.ch

Genève compte environ deux cent mille habitants pour une superficie de seulement 15,93 km² (soit 12 680 hab/km²). Ce chiffre, relativement élevé, témoigne de la forte densité du territoire et ne devrait pas diminuer, puisque la population genevoise augmente. Cette croissance représente un défi important pour les collectivités, notamment une demande de logement en constante augmentation et un besoin d'infrastructures. L'État doit prendre en compte cette problématique et réfléchir à l'aménagement de son territoire. Des zones de renouvellement urbain offrant un grand nombre d'habitations, des écoles, des emplois doivent être planifiées au cœur même de la ville afin de limiter l'étalement urbain. C'est le cas de l'opération appelée PAV.

Le projet *Praille-Acacias-Vernets* représente le plus grand potentiel de logements du canton genevois et une opportunité de développement unique. Située au sud-ouest du centre-ville sur les communes de Genève, Carouge et Lancy, cette opération a pour but de transformer la plus grande et ancienne zone industrielle de la ville en un espace mixte, sans dégrader la dynamique actuelle (cf. figure 1). Sa proxi-

mité du centre, sa superficie de 230 hectares et sa desserte sont autant d'atouts favorisant sa future urbanisation.

Genève est une ville « de location » puisque seulement 20 % de son parc immobilier sont habités par des propriétaires occupants. La plupart du temps, des investisseurs (sociétés immobilières, assurances, etc.) sont propriétaires des immeubles et les mettent en location. Ce sera le cas pour ce projet. Un appel à investisseurs a été réalisé et remporté par un groupe de huit investisseurs, d'univers différents, qui se sont associés pour l'occasion.

Les bâtiments C et D ne vont pas poser de difficultés de répartition des droits de propriété puisqu'une entité distincte va en détenir la totalité. Ce n'est pas le cas des îlots A et B. Chacun des deux sera réparti en cinq entités, ce qui impose une réflexion quant à la manière de les diviser. Or, la programmation des immeubles et leur affectation engendrent quelques difficultés. Il s'agit de bâtiments de dix niveaux hors-sol et de deux en sous-sol. Un parking privé occupera le niveau -2 et un public le -1, au rez-de-chaussée on trouvera des locaux

d'activités ou de commerces et, aux niveaux supérieurs, des logements. Un passage souterrain reliera les parkings des différents îlots. Il y a donc une diversité d'affectation des locaux à prendre en compte lors de la division. En résumé, nous nous trouvons dans un ensemble immobilier complexe avec une multitude d'acteurs désirant leur indépendance.

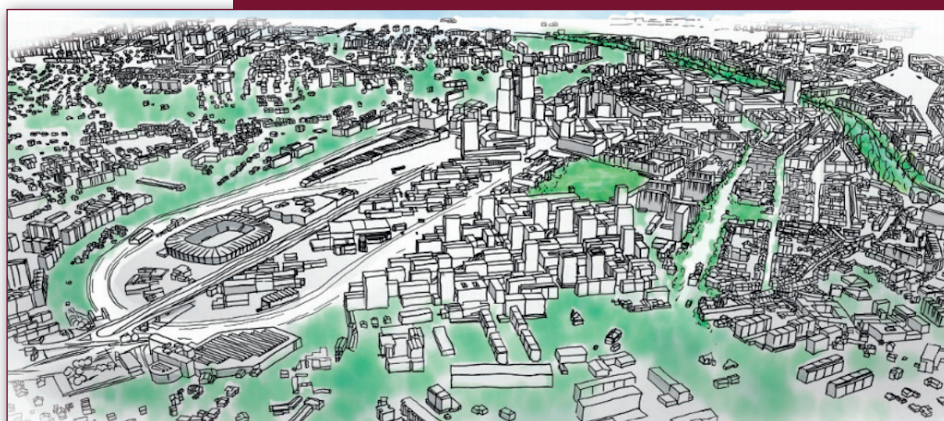
L'État de Genève a investi dans les technologies 3D. L'intégralité du territoire a été numérisée par photogrammétrie et vol LiDAR (bâtiments, ouvrages d'art, MNT, végétation) permettant de représenter, par le biais d'un système d'information géographique, la ville en 3D (cf. figure 2). Ajoutons que le canton fait également office de précurseur dans la définition du cadastre 3D.

Tout cela nous conduit naturellement à poser la question de la représentation de la propriété en trois dimensions – autrement dit du cadastre 3D –, pour le cas des Vernets, mais aussi, plus généralement, sur le territoire suisse et même au-delà.

L'intérêt de la propriété 3D ?

Genève met tout en œuvre pour développer les données 3D et désire le faire très rapidement. Possédant déjà un socle de la ville en 3D, la transition du foncier présente un fort intérêt pour les différents services du cadastre, mais aussi pour de nombreux professionnels et politiciens. Cette base de données cadastrale 3D devra être une copie de la version papier et doit contenir les mêmes informations. Outre le fait de rendre plus facile le transfert des données entre les acteurs, elle représentera sous forme

Figure 1 : Projet d'aménagement du PAV. Source : www.ge.ch.



tridimensionnelle différentes unités d'étages. Les attributs récoltés par les géomètres, comme l'altitude des niveaux ou les hauteurs sous plafond, y seront intégrés.

Avec cette prise en compte de la dimension verticale, il sera possible de discerner et de positionner dans l'espace un lot par rapport à un autre, de mettre en évidence les parties communes ou encore de situer une cave de la rattacher à son appartement (cf. figure 3). Il s'agira donc d'un outil de représentation réaliste et concret des projets. Cette représentation semble aujourd'hui quasi indispensable pour les cas complexes tels que l'est le PAV.

Intégrée dans un SIG, elle permettra de réaliser des analyses spatiales (cf. figure 4) : par exemple, se rendre compte de la vue qu'aurait une personne qui occupe un appartement au dernier étage d'un immeuble. Dans ce cas, la prise en compte de la dimension verticale deviendra un outil de communication et de promotion. Elle permettra aussi de partager ses observations et propositions plus aisément. Elle améliorera la compréhension, la consultation, la discussion, l'anticipation, conduisant à une prise de décisions adaptée au projet.

Des situations internationales diverses

Les États et collectivités territoriales disposent aujourd'hui d'outils puissants de modélisation. Sous l'effet cumulé d'une population mondiale grandissante, d'une urbanisation permanente et d'une recherche d'espaces constante, la gestion et représentation de propriétés en volume devient une nécessité. La prise en compte



Figure 2 : Genève en 3D. Source : SITG.

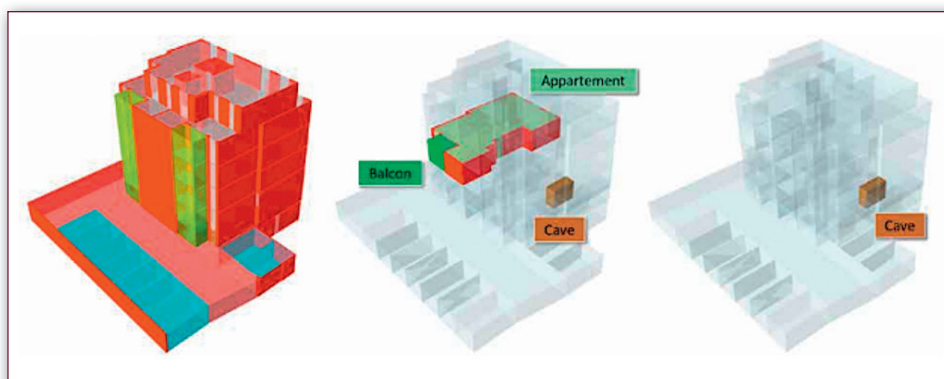


Figure 3 : Représentation de la propriété en 3D. Les différents lots appartenant au même propriétaire sont facilement visibles.

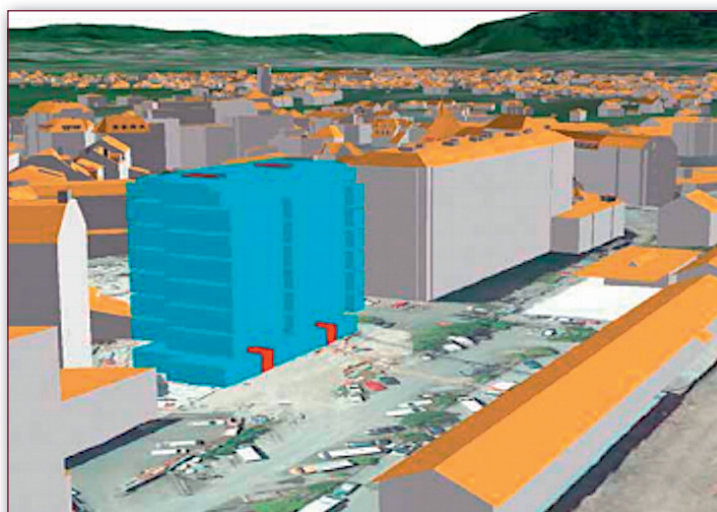


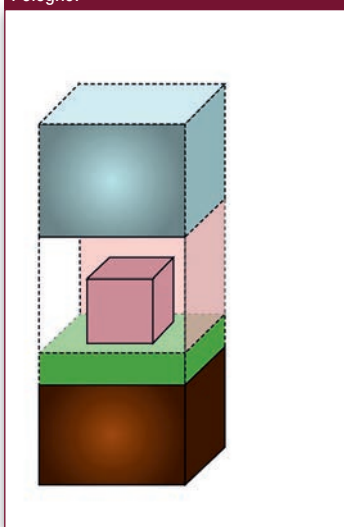
Figure 4 : Intégration d'un bâtiment 3D dans son environnement.

des parcelles 3D permettrait de développer un cadastre 3D et de s'en servir pour répondre aux besoins en termes d'aménagement ou d'administration du territoire. Certains États se sont déjà penchés sur la question et disposent de réflexions intéressantes.

La Pologne au stade de la réflexion

Le système cadastral polonais est intéressant puisqu'il distingue trois types d'objets : les parcelles, les bâtiments et les lots. Cependant, la modélisation n'est réalisée qu'en 2D. Quelques propositions de centres universitaires existent. Le modèle 3D polonais a été élaboré par Marcin Karabin. Il s'agit uniquement de réflexions qui proposent de nouveaux objets cadastraux, notamment des parcelles 3D, délimités par des niveaux minimum (z-) et maximum (z+) qui définissent l'étendue verticale de la propriété dans un système métrique. Cela permet la mise en œuvre d'une approche « en couches » des droits et des restrictions dans le cadastre (cf. figure 5).

Figure 5 : Modélisation du concept de propriété 3D telle que proposée en Pologne.



La Pologne commence tout juste sa réflexion sur la parcelle volumique. Les pistes évoquées sont intéressantes. Une fois les éléments bien définis, la mise au point de la représentation 3D sera plus facile. Néanmoins, comme aucune loi ne traite cette notion, une refonte législative sera obligatoire.

La Norvège dispose de solutions restreintes...

Contrairement à la Pologne, la Norvège dispose d'un mode d'occupation de son sous-sol intéressant, traitant déjà, en quelque sorte, la notion de volume.

Les tunnels routiers ou ferroviaires, ou autres infrastructures creusées dans le tréfonds, n'influencent pas la valeur économique de la surface. Ils sont pratiqués sans subdivision de la propriété ni inscription officielle au cadastre et au registre foncier. C'est-à-dire que l'État, pour des opérations de grande envergure, peut, sans rachat ou expropriation, utiliser le sous-sol de n'importe quelle parcelle, lui appartenant ou non. Les propriétaires des terrains ne sont indemnisés financièrement que si la propriété de surface est endommagée.

Une loi promulguée en 2006 intègre la notion de parcelle 3D et de ses caractéristiques. Une propriété en volume ne peut être établie qu'après une division du terrain, et peut s'étendre sur plusieurs parcelles. Cette propriété 3D doit impérativement porter sur un bâtiment et non une partie de celui-ci. Un lien direct entre la nouvelle parcelle et la construction neuve doit exister. Les volumes « vides » ou « d'air » sont interdits par la réglementation.

Cette notion permet d'introduire la parcelle 3D pour des situations où l'affectation est différente de celle du logement. Elle permet, par exemple, la mise en place de volume en sous-sol traversant plusieurs parcelles comme les garages, zones commerciales, ou encore de constructions en hauteur sur des piliers, comme les routes et chemins de fer.

La représentation pose cependant problème. Si les unités 3D sont prises en compte dans le registre foncier du pays, aucune norme de cartographie n'est imposée, provoquant une grande divergence et certaines incompréhensions. Enfin, sur le plan cadastral, les volumes en tréfonds sont représentés uniquement par leurs limites. Ils sont numérotés différemment (parcelles finissant par 300) pour permettre leur identification rapide. Le cadastre ne prend pas en compte les volumes situés au-dessus de la surface.

Si le cadre juridique prend en compte la parcelle 3D, cette notion reste cependant assez limitée. Un volume doit être affecté à un bâtiment entier et ne permet pas de gérer les cas de copropriété par exemple. Des questions sur la représentation et l'incorporation des informations tridimensionnelles dans le plan cadastral demeurent.

... tout comme la Suède

La réglementation de la Suède se rapproche fortement de celle de son voisin scandinave. Il s'agit ici d'un pays peu peuplé par rapport à sa superficie. La majorité de sa population est localisée aux abords des grandes villes. Cela conduit à la création d'ensembles immobiliers complexes, comme c'est le cas à Genève ou dans toute autre métropole

mondiale. Afin de gérer au mieux ces ensembles, le concept de la propriété 3D a été introduit dans la législation suédoise en 2004, avant d'être élargi en 2009 en y ajoutant son application à la copropriété.

La propriété 3D est définie dans le Code foncier comme une unité foncière délimitée horizontalement et verticalement. Elle peut se diviser en sous-volumes et contenir des affectations différentes (commerces, logements, bureaux ou encore des grandes infrastructures type tunnel). Il est important de souligner que cette propriété 3D peut s'étendre sous ou sur une ou plusieurs parcelles, comme en Norvège. Elle n'est donc pas tenue de se situer dans les limites d'une propriété 2D. Elle convient aux infrastructures de transport (tunnels, métros).

La formation de la propriété 3D n'est, là aussi, permise que sur la notion de bâtiment (existant ou envisagé) avec la création de droits, type servitudes. Pour éviter les unités de propriété dans l'espace aérien vide, cette notion doit se rapporter à une construction réelle. La principale différence avec la Norvège est qu'il est possible de créer des volumes sur des parties d'un bâtiment. La répartition des propriétés dans le cas de copropriété est bien plus complète. Cependant, le système juridique actuel ne permet pas d'hypothéquer de manière indépendante les lots, ce qui empêche l'investissement dans des immeubles à usages multiples.

Comme cette notion est nouvelle dans ce pays, le nombre de propriétés 3D est encore limité.

Notons tout de même que ces deux pays ont choisi, il y a une dizaine d'années, d'associer la

notion de propriété en volume aux parcelles particulièrement complexes, tout en gardant une base de données cadastrale 2D. Leur territoire respectif étant très étendu, les zones denses sont beaucoup plus rares.

La Colombie-Britannique (Canada) manque d'un support technique

Au Canada, chaque province possède sa propre organisation foncière. En Colombie-Britannique, située sur la côte ouest, la Couronne Britannique possède 90 % des terres. Il faut alors user de baux à long terme pour être propriétaire.

L'existence, comme dans les exemples précédents, de constructions superposées et d'ensembles immobiliers complexes a conduit à réfléchir à la répartition des droits et de la propriété sur ces parcelles. Le système juridique a autorisé le propriétaire d'un terrain à subdiviser ses terres en volumes. Ces derniers doivent être créés à l'intérieur de la parcelle, aussi bien en sous-sol qu'en hors-sol. Des servitudes seront dressées si l'accès au volume le nécessite. Contrairement à la Suède et la Norvège, le volume n'est pas obligatoirement associé à un bâtiment : celui-ci peut simplement être constitué d'air.

Un document graphique doit par ailleurs être établi. Il s'agit d'un plan de division 3D qui détaille les limites des volumes et prouve qu'ils se situent bien sur une seule parcelle.

Que se passerait-il si cette parcelle initiale était divisée ? Une côte altimétrique est nécessaire au sol pour les coins de la surface terrestre ainsi que pour chaque coin des volumes. Ce mode de

division peut être utilisé pour les copropriétés.

Comme la Colombie-Britannique ne possède pas de plan cadastral, la visualisation et les informations sur ces parcelles 3D ne sont consultables que dans le registre foncier. Il est impossible de les représenter et de prendre correctement en compte le concept de propriété en volume.

L'Espagne, l'information 3D en 2D

En Espagne, contrairement à la Colombie-Britannique, il existe un plan cadastral numérisé, consultable sur le web. Aujourd'hui le cadastre espagnol prend en compte la notion de parcelle 3D, mais la représentation ne se fait qu'en 2D.

Pour la retranscription des bâtiments, les Espagnols utilisent une codification. Sur chaque parcelle, les constructions sont indiquées par des sous-parcelles sur lesquelles des numéros sont inscrits. Chaque polygone possède ainsi un chiffre romain associé indiquant la nature et/ou le nombre de sous-sols et d'étages. La hauteur des niveaux est standardisée à trois mètres. Une reconstitution 3D peut donc être effectuée à partir des informations du plan (cf. figure 6).

En cas de superposition, la combinaison des attributs permet la reconstitution et la répartition des volumes aux bons propriétaires, comme illustré figure 7. Sur la parcelle 10, nous pouvons lire IV indiquant la présence de quatre étages. Sur la 11 est écrit IV 10 II 11 II. Ici il y aura également quatre niveaux, deux reliés à la propriété 10 et deux autres à la 11. Cependant ce type de numérotation a ses limites, car la disposition des lots n'est pas



Figure 6 : Reconstitution 3D à partir du plan cadastral espagnol (FIG).

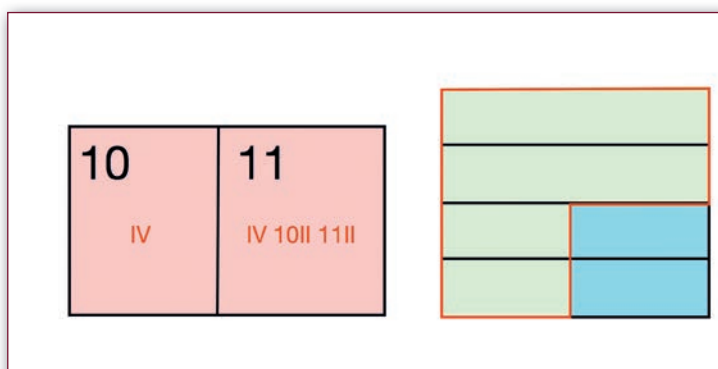


Figure 7 : Coupe nécessaire dans le cas de superposition de propriétés (FUCHS).

indiquée. Nous ne pouvons pas savoir si les deux étages appartenant à 10 sont au-dessus ou au-dessous de ceux du 11. L'utilisation de plans et coupes reste nécessaire.

La méthode utilisée par le cadastre espagnol permet de prendre en compte l'idée de parcelle 3D. Cependant elle est établie sur une base 2D et sa représentation n'est pas claire. De plus cette notion de division en volume n'est pas présente dans les textes législatifs. Une évolution à ce sujet est attendue.

Le Queensland (Australie), une prise en compte développée

Au Queensland, en Australie, l'enregistrement 3D a été en partie résolu. Depuis 1997, il est possible de créer des parcelles

avec des géométries 3D. Le cadre juridique a permis d'établir des unités de propriété tridimensionnelle. Cependant, le cadastre n'inclut que l'empreinte de ces parcelles 3D sur son plan, et donc le problème cadastral des unités de propriété en trois dimensions n'est pas réglé.

Prenons comme exemple le stade de cricket de Gabba à Brisbane. Ici, trois propriétés 3D ont été établies en conséquence de l'intersection de l'infrastructure avec deux rues (cf. figure 8).

Il s'agit de propriétés à bail. Cela signifie que le détenteur du bien immobilier a le droit d'usage et la possession exclusive de la propriété pour une durée déterminée. Cependant, il convient de noter que, dans ce pays, la plupart des parcelles volumétriques sont liées à des

propriétés en pleine propriété. Ce procédé oblige de fournir des informations très détaillées sur la définition du volume. Des coupes et diagrammes 3D accompagnés de toutes les coordonnées nécessaires pour délimiter la propriété 3D sont fournis. La définition planimétrique et altimétrique se fait dans le système de référence officiel du pays. Les empreintes de ces volumes sont ensuite projetées sur le plan cadastral comme visible sur la figure 8.

Cet exemple montre le potentiel de la propriété 3D. Cependant, bien que cette méthode soit fonctionnelle, elle peut rapidement devenir complexe dans le cas de plusieurs superpositions. La lisibilité du plan 2D serait alors très compliquée et une représentation 3D faciliterait la lecture et la compréhension.

La France, une notion existante non prise en compte par le cadastre

La France dispose d'un cadastre ancien appelé « napoléonien », institué en 1807. Il s'agit d'un outil fiscal qui a servi de modèle à beaucoup d'États. Depuis le milieu du XX^e siècle, la partie graphique est mise à jour, mais sa conception et son mode de représentation ne changent pas. Bien qu'entre 2002 et 2006, le cadastre ait été entièrement dématérialisé, aucun texte ou article ne laisse présager un changement et une intégration de la notion de parcelle 3D.

Le pays dispose toutefois de dispositions pour gérer les ensembles immobiliers complexes et établir de la propriété dans l'espace. Le terme de volume apparaît dans la loi du 10 juillet 1965 depuis sa modification par la loi ALUR (voir notamment l'article 28).

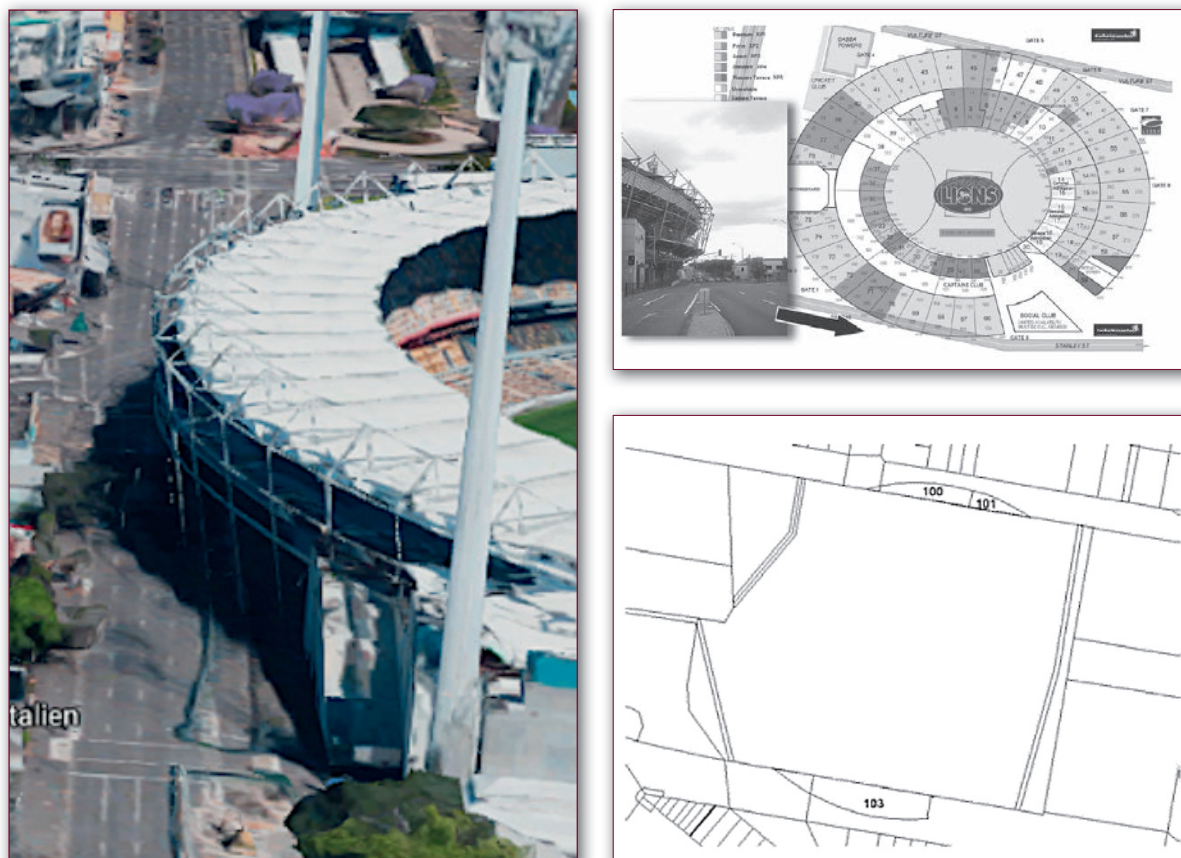


Figure 8a/b/c : Différentes vues du stade empiétant sur les rues (Google Maps / FIG).

C'est donc une consécration indirecte de la volumétrie dans la législation.

La « division en volumes » est une organisation particulière de la propriété immobilière qui s'appuie sur des notions de droit sans qu'un texte de loi ne la définisse. Chaque volume est l'objet d'un droit de propriété constituant une propriété distincte qui peut être grevée de servitudes, être hypothéquée ou vendue. Son application permet de répondre à des situations telles que l'imbrication de propriétés privées dans le domaine public ou les ensembles immobiliers complexes. Cependant, l'établissement des documents techniques est très complexe et leur visibilité peut vite devenir difficile (cf. figure 9).

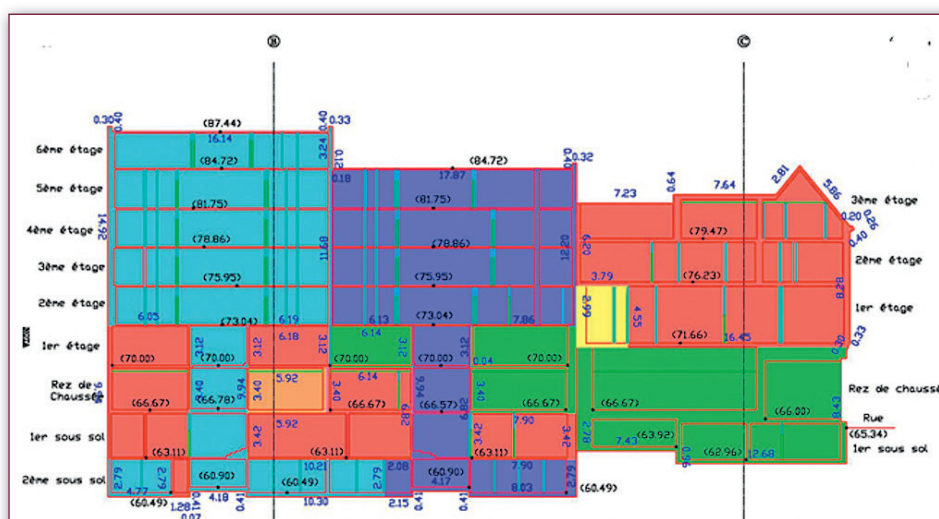


Figure 9 : Exemple de plan illustrant une division en volumes. Le document est complexe et difficile à lire.



Le tableau 1 résume et compare les phases d'avancement des différents pays vis-à-vis de l'intégration de la notion de propriété 3D.

Représenter la propriété en 3D

Le cas des Vernets a trouvé une solution pragmatique, qui a le mérite d'être juridiquement incontestable. Il a été décidé de

créer des doubles murs entre les immeubles, afin de respecter l'indépendance structurelle des bâtiments. Une parcelle correspondant à l'emprise du passage sous-terrain entre les deux îlots sera créée. Les servitudes d'empiètement, représentant la surface des parkings, seront rattachées à cette dernière.

Deux logiciels pourraient modéliser cette solution : *Revit* et *ArcGis*.

Le BIM et Revit, une alternative peu adaptée

Le BIM est un processus de gestion de projet reposant sur le travail collaboratif des différents acteurs autour d'une maquette numérique. Cette dernière contient la géométrie, la sémantique et les informations associées, tout au long du cycle de vie de l'ouvrage. Le sigle BIM peut signifier :

	Suisse	Pologne	Norvège	Suède	Canada (Colombie-Britannique)	Espagne	Australie (Queensland)	France
Notion de volume prise en compte dans la loi	0	0	0	0	0	0	0	0
Cadre juridique adapté à la parcelle 3D	X	X	0	0	0	X	0	X
Champ d'application des volumes	N/A	N/A	Bâtiment entier	Tout ou une partie du Bâtiment	Toutes possibilités	N/A	Toutes possibilités	N/A
Possibilité de s'étendre sur plusieurs parcelles	N/A	N/A	0	0	X	N/A	0	N/A
Obligation de fournir un plan de ces volumes	N/A	N/A	X	X	0	N/A	0	N/A
Type d'objets enregistrés dans la base cadastrale	Parcelles Bâtiments PPE	Parcelles Immeubles Appartements	Parcelles Bâtiments Souterrains	Parcelles Bâtiments Appartements Servitudes	Parcelles Bâtiments	Parcelles Bâtiments	Parcelles Bâtiments	Parcelles Bâtiments
Dimension de représentation de ces objets	3D	2D	3D	3D	3D	2,5D	3D	2D
Type de représentation cadastrale	2,5D	2D	2,5D	2,5D	2D	2D	2D	2D

Tableau 1 : État de la propriété/cadastre 3D dans différents pays.

- *Building Information Modeling*, définition la plus courante, décrivant le processus collaboratif ;
- *Building Information Model*, en référence à la maquette numérique ;
- *Building Information Management*, se référant à la gestion des flux de travaux et l'interopérabilité.

Le BIM permet de travailler sur un document unique regroupant toutes les informations nécessaires à la construction et à la gestion d'un bâtiment. Il évite les échanges de plans 2D pouvant conduire à des erreurs préjudiciables. Ce mécanisme permet l'anticipation des achats, une production documentaire plus rapide, l'amélioration de la qualité et des échanges.

Contrairement au plan 2D, le BIM offre une possibilité de visualisation 3D d'un bâtiment, facilitant la compréhension d'un bien ou encore lors de la description d'ouvrages compliqués tels que d'anciens édifices. La maquette 3D est un outil de représentation plus simple et intuitif que le plan 2D, et surtout plus complet. Il est caractérisé par un *Level Of Detail* (LOD) qui définit la finesse du détail attachée à la modélisation lors des différentes phases de projet. Le LOD va de 100 à 500, du plus grossier au plus détaillé. La figure 10 illustre la différence entre les LOD.

Pour échanger entre logiciels BIM, l'association *Building SMART* a publié des normes dites IFC qui encodent les objets BIM (avec leurs propriétés internes) sous forme de fichier pouvant ensuite être lu par tous les logiciels compatibles.

Revit est un logiciel de CAO/BIM, édité par *Autodesk*, qui permet de créer un modèle 3D d'un bâtiment. Dans le cas des Vernets, on disposait des maquettes des différents architectes au format IFC (une pour le bâtiment A et une pour le B). Mais celles-ci pesant plusieurs dizaines de giga-octets chacune, étaient impossibles à importer directement sur le logiciel. Il a donc fallu créer plusieurs sous-fichiers IFC (terrain, volumes, bâtiments).

Si l'interface et la modélisation 3D sont des atouts pour les architectes, *Revit* souffre cependant de nombreuses limites (cf. tableau 2).

Il serait intéressant d'intégrer les bâtiments dans un environnement SIG, mais le BIM n'offre pas cette possibilité, d'autant que

les problèmes d'interopérabilité SIG/BIM sont très nombreux. Ne pouvant compiler tous les éléments sur le même fichier *Revit*, du fait de leur taille, il a fallu recourir à des *viewers* afin de comparer les différentes représentations possibles. Les qualités/défauts des deux principaux *viewers* sont présentés dans le tableau 3.

Si *BIMvision* est un outil intéressant, qui permet de n'afficher que les niveaux souhaités, il ne propose pas grand-chose de plus. Il ne permet de combiner, par exemple, que deux IFC, ce qui n'est pas acceptable dans notre cas. *Tekla*, en plus d'intégrer autant d'IFC que désiré, offre la possibilité de retravailler la texture des différentes couches. Ce point est important, car l'export au format IFC présente encore des

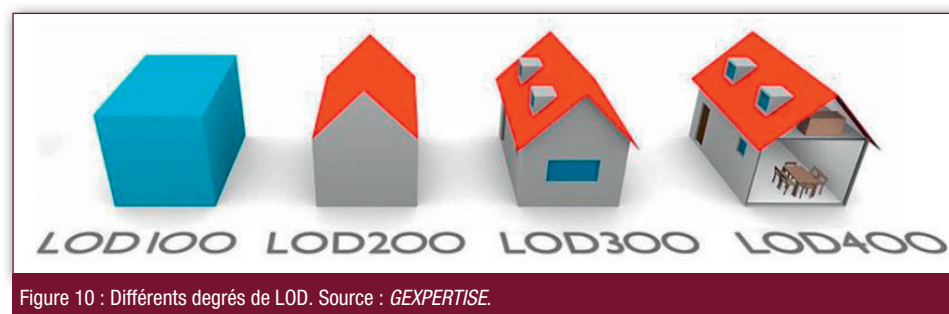


Figure 10 : Différents degrés de LOD. Source : *EXPERTISE*.

+	-
Création directement en 3D	L'assistance Autodesk
Gestion des familles	Géoréférencement
Ajout et modification des volumes	Prise en compte uniquement du bâtiment
Lecture .DWG	Difficultés à modéliser des servitudes
	Problème d'interopérabilité pour l'intégrer dans un environnement
	Le format IFC ne prend pas en compte la texture
	La modélisation du terrain naturel

Tableau 2 : Points forts/faibles de *Revit*.

Viewer	Lecture IFC	Découpage par étage	Retravailler l'apparence	Ajouter des commentaires	Combiner tous les fichiers
	0	0	X	X	X (max : 2)
	0	X	0	0	0

Tableau 3 : Comparaison des *viewers* BIM.

pertes, notamment les textures. Les figures 11 et 12 montrent deux images produites par ce *viewer*.

Le BIM permet de représenter le découpage souhaité. Cependant, l'intégration du bâtiment dans l'environnement ainsi que le vrai

découpage au niveau foncier manquent. Il faut alors se tourner vers les logiciels SIG.

Le SIG, l'outil idéal

Les SIG existent depuis plus longtemps (1960) que le BIM et permettent de représenter le territoire en son entier, plutôt qu'une unique maquette. Le portail SITG de l'État de Genève diffuse des informations en *open data*, dont celles de la mensuration officielle.

Les logiciels SIG permettant de travailler en 2D ou 3D se généralisent (*QGIS*, *ArcGIS Pro*). Dans le cadre de ce travail, pour des raisons de facilité, tout a été fait en 2D avant d'ajouter la composante verticale. Il est moins aisé de travailler directement en 3D qu'avec les logiciels BIM, quoiqu'il soit il est possible d'extruder les bâtiments en ajoutant un attribut de hauteur. Un des avantages des SIG tient dans la possibilité de créer des services *web* cartographiques, c'est-à-dire de publier une carte interactive sur *Internet* pour permettre à des tiers de la visualiser. Dans le cadre de cette étude, les données étant privées, la modélisation n'est pas consultable à des personnes étrangères au service. Dans le cas de données publiques,

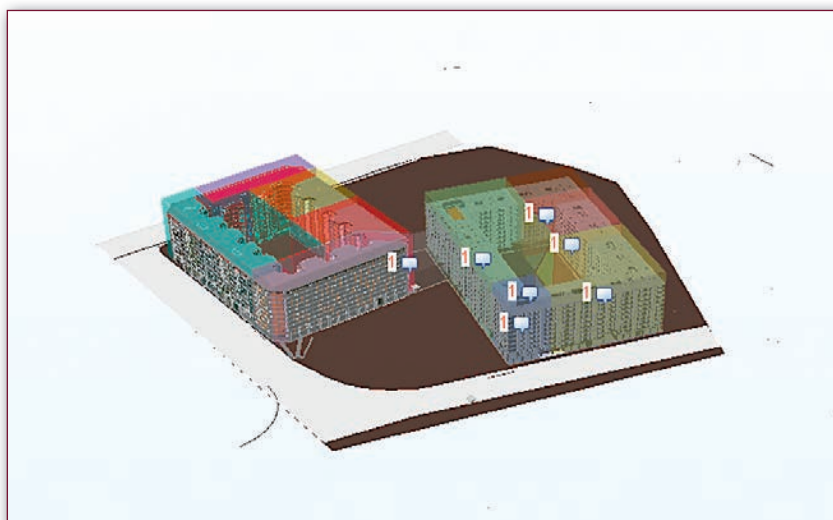


Figure 11 : Modélisation des Vernets en BIM et visualisation avec le *viewer* Tekla.



Figure 12 : Modélisation des Vernets en BIM et visualisation avec le *viewer* Tekla.

cette manière de procéder offre la possibilité de diffuser des informations à l'aide de cartes, comme le fait le SITG en Suisse ou le *Géoportail* en France. Le tableau 4 résume les avantages et inconvénients des SIG (ici, *ArcGIS Pro*).

La figure 13 illustre la modélisation réalisée.

Cette fois, le résultat est satisfaisant : il permet de représenter la division foncière souhaitée et de l'intégrer dans son environnement. De plus, en cliquant sur un volume, on obtient les informations enregistrées dans la base de données. On retrouve par exemple, dans la figure 14, le numéro du DDP attribué, le superficiaire et le numéro de la parcelle grevée.

L'outil SIG semble aujourd'hui plus adapté à notre attente. Nul doute que l'interopérabilité BIM/SIG permettra bientôt d'intégrer une maquette de bâtiment dans un environnement existant sans rencontrer de difficulté. On se dirigera alors vers le *City Information Modeling* (CIM).

Conclusion

Nous avons pu voir dans ce rapport qu'au niveau international beaucoup de pays se penchaient sur la propriété tridimensionnelle. Aucun cadastre n'est actuellement parfaitement défini en 3D, bien que chaque pays ait formulé des idées intéressantes sur la représentation et l'intégration au niveau juridique. Il est important de noter que la Fédération Internationale des Géomètres (FIG) a compris ce besoin et réfléchi sur le sujet. Parallèlement, la récente norme LADM fournit différents modèles conceptuels de représentation 3D à adopter. Il s'agit là d'une initiative sur

+	-
La modélisation du terrain naturel repose sur des MNT de grande extension	Création plus simple dans un premier temps en 2D en 3D
Aide ESRI	Prix
Ajout et modification des volumes simple	
Lecture .DWG	
Service Webcarto ArcGis Online	
Intégration à un environnement	

Tableau 4 : Points forts/faibles d'*ArcGis Pro*.

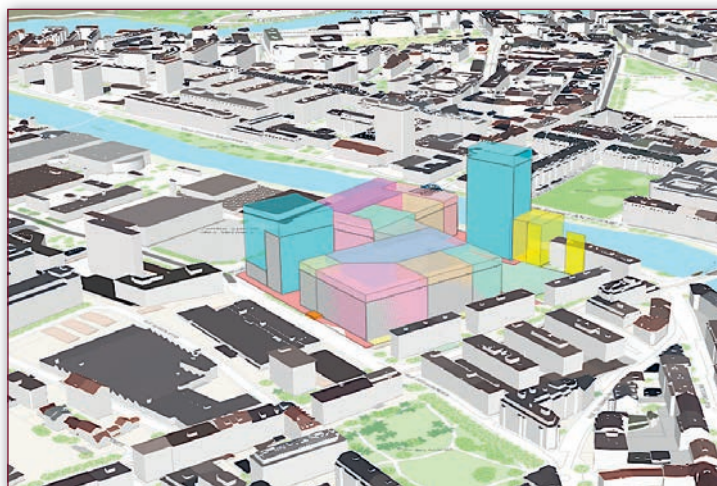


Figure 13 : Modélisation des Vernets et visualisation avec *ArcGis*.

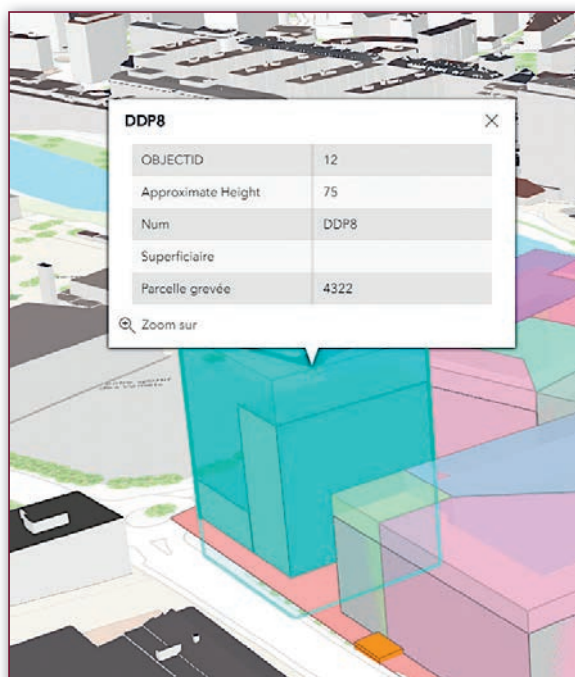


Figure 14 : Interrogation d'un bâtiment et affichage des attributs associés.



GREEN OBSERVER

Avion d'observation multi-capteurs nouvelle génération

la **NOUVELLE SOLUTION** pour :

Vos **ORTHOPHOTOS** sur commande
De 0,1 km² à 1000 km²
Pixel 3 cm à Pixel 30 cm
Capteurs 40 à 100 Mpix RVB et PIR

Mais aussi... **MODÈLES 2D/3D, AÉROMAGNÉTISME, RECHERCHES, COMPTAGES ET SURVEILLANCE...**

INTERVENTIONS FRANCE ENTIÈRE, DROM ET ÉTRANGER

✓ Jusqu'à **15x** plus rapide qu'un drone
&
✓ **2x** plus économique au km² photographié

ILS NOUS FONT DÉJÀ CONFIANCE :
Le Grand Angoulême, le Département de Haute-Corse, la DREAL de Charente-Maritime, la C.A. Côte Basque-Adour, la DREAL Centre, le CNRS, GRT-Gaz, l'Office National de la Chasse et de la Faune Sauvage...

EN SAVOIR PLUS / DEMANDER UN DEVIS SUR :
www.green-observer.com

Green Observer est une solution innovante développée par :
L'Europe vue du Ciel + 33 (0) 3 82 46 04 25
info@leuropevueduciel.com
Fournisseur d'images aériennes depuis 1999.

laquelle s'appuyer à l'avenir. Ira-t-on vers des cadastres aux fonctionnements identiques à travers le monde ? Chaque cadastre conservera-t-il ses propres spécificités foncières et/ou fiscales ? Ce sont là des questions à examiner.

Le passage à la propriété volumique entraînera une réflexion sur la définition du volume. Comment modéliser la composante verticale ? Quel système altimétrique choisir ? Faudra-t-il utiliser un bornage virtuel ou numérique ? Qu'en sera-t-il de la matérialisation ? L'enjeu pour les géomètres est de garder un certain monopole dans ce domaine.

Au niveau de la représentation 3D, les évolutions technologiques de ces dernières

années ont conduit à l'apparition d'outils très intéressants. La représentation 3D permet une meilleure compréhension et un positionnement dans l'espace. Les SIG semblent être l'outil le plus adapté, actuellement, pour intégrer du foncier en 3D dans un environnement existant. Cependant l'émergence du BIM laisse entrevoir d'autres possibilités. Il sera sans doute plus aisé, à l'avenir, de travailler sur une maquette unique pour ensuite l'intégrer dans son environnement existant.

Pour finir, bien que ce sujet soulève beaucoup d'interrogations et de scepticisme chez certains, la question actuelle n'est plus de savoir si la transition vers la propriété tridimensionnelle va avoir lieu, mais bien de savoir quand elle va se produire ! ■

Bibliographie

- V. Fuchs : *Visualisation 3D du cadastre québécois : cas d'une copropriété*. Mémoire de travail de fin d'études. Le Mans, ESGT, 2013, 61 p.
- S. Magnard : *Potential d'utilisation d'une maquette BIM dans le cadre de la constitution d'une PPE et dans les procédures d'autorisation de construire à Genève*. Mémoire de travail de fin d'études. Le Mans, ESGT, 2016, 100 p.
- V. Michaud : *Étude et suivi de l'évolution des premières « divisions en volumes » : Analyse de l'organisation de la propriété complexe*. Mémoire de travail de fin d'études. Le Mans, ESGT, 2014, 68 p.
- I. Adrien, N. Chauvin et L. Niggeler : *La propriété foncière en 3D*. *Géomatique Expert* n° 76, 2010.
- *Convergence BIM-SI*. *Géomatique Expert* n° 109, 2016.
- G. Bizouard, J. Lopez et L. Niggeler : *De la PPE papier à la PPE numérique 3D à Genève*. *Cadastre* n° 20, 2016.
- A. Fantuzzi : *Un cadastre pas comme les autres*. *Géomètre* n° 2142, 2016.
- Aalders, Ploeger, Stoter et Van Oosterom : *Conceptual 3D cadastral model applied in several countries*. *FIG Working Week*, 2004.
- El-Mekawy, Karabin, Kitsakis, Paasch, Paulsson, Navratil et Vučić : *3D real property legal concepts and cadastre*. *5th International FIG 3D Cadastre Workshop*, 2016.

PostgreSQL 11

Avec l'été, une autre brique fondamentale des SIG *open source* s'apprête à faire son entrée. Il s'agit de la nouvelle version majeure de la base de données PostgreSQL, PostgreSQL 11. Comme toujours lors d'un tel saut de version, les bases de données gérées par le SGBD devront être mises à jour avec l'utilitaire `pg_upgrade` avant le lancement de ce dernier.

Avec cette nouvelle version, ce sont plus de cent soixante nouveautés qui ont été ajoutées au logiciel. Voici les principales, pour celles qui concernent particulièrement les géomaticiens :

- PostgreSQL 11 gère mieux les longues requêtes. La capacité de parallélisation a été étendue à des requêtes complexes, comme celles qui mettent en jeu un ordre *SELECT INTO* ou un « *hash join* ». Le calcul des index de type *BTREE* (*CREATE INDEX*) s'exécute désormais également en parallèle ;
- Une des principales améliorations est la mise en place d'un compilateur JIT utilisant LLVM. LLVM (*Low Level Virtual Machine*), initialement conçu chez Apple comme alternative à GCC, puis reversé en *open source* sous licence BSD, est un compilateur générique qui accepte du pseudo-code généré par un front-end dépendant du langage (par exemple CLANG pour le C et le C++) et le transforme en langage machine. Le module JIT (*Just In Time*) réalise des compilations « à la volée ». Ici, PostgreSQL peut décider qu'une requête mettra trop de temps à s'exécuter avec le moteur classique ; il enverra alors le code SQL au module JIT de LLVM, qui le compilera puis lancera le *snippet* exécutable

sans passer par le moteur de requête, ce qui permettra de gagner en performance ;

- Un verrouillage prédictif pour les index *GIN*, *GiST* et *HASH* permet de réduire le nombre de lignes verrouillées par une requête et donc d'améliorer le parallélisme entre sessions différentes ;
- PostgreSQL 11 améliore le support des partitions des grandes tables de données. Depuis PostgreSQL 10, les grandes tables peuvent être divisées en sous-sections logiquement indépendantes qui peuvent recevoir des clefs primaires spécifiques, par exemple. La partition peut se faire selon divers critères, en particulier suivant la valeur d'un *hash* calculé sur l'une des colonnes de la table, ou bien selon des valeurs seuils. En PostgreSQL 11, une nouvelle partition *DEFAULT* stocke les *t-uples* qui ne correspondent à aucun des critères de découpage déjà spécifiés. En outre, les *UPDATE* effectués sur les lignes peuvent changer la partition à laquelle la ligne appartient si le *UPDATE* modifie la colonne qui sert de critère à la partition ;
- Une nouvelle syntaxe *INSERT INTO ... ON CONFLICT ... DO UPDATE*, compatible avec les partitions, permet de spécifier des alternatives à une requête si une

condition d'erreur survient, par exemple si l'on tente d'insérer un *tuple* avec la même valeur de clef primaire qu'un *t-uple* déjà existant : *INSERT INTO table VALUES (100, 'update') ON CONFLICT ON CONSTRAINT primary_key DO UPDATE SET valeur = 'update' ;* va soit insérer les valeurs 100 et 'update' si aucune donnée numérotée 100 n'existe, sinon elle mettra à jour la valeur déjà existante. *ON CONFLICT ... DO NOTHING* permet au contraire d'ignorer l'erreur en rejetant silencieusement la requête ;

- *VACUUM* et *ANALYZE* peuvent opérer simultanément sur plusieurs tables ;
- La clause *LIMIT* est maintenant appliquée directement à une sous-requête si son effet était de limiter le nombre de *tuples* sélectionnés par cette sous-requête (comme dans : *SELECT * FROM (SELECT * FROM sort1 ORDER BY 1) AS a LIMIT 5*) ;
- Et plein d'autres...

À ce stade, PostgreSQL 11 est encore à la version bêta 2. Cette version de test est téléchargeable sur le site <http://postgresql.org> pour les plus aventureux. Sur les serveurs de production, il est conseillé d'attendre la sortie officielle, probablement à l'automne. ▣

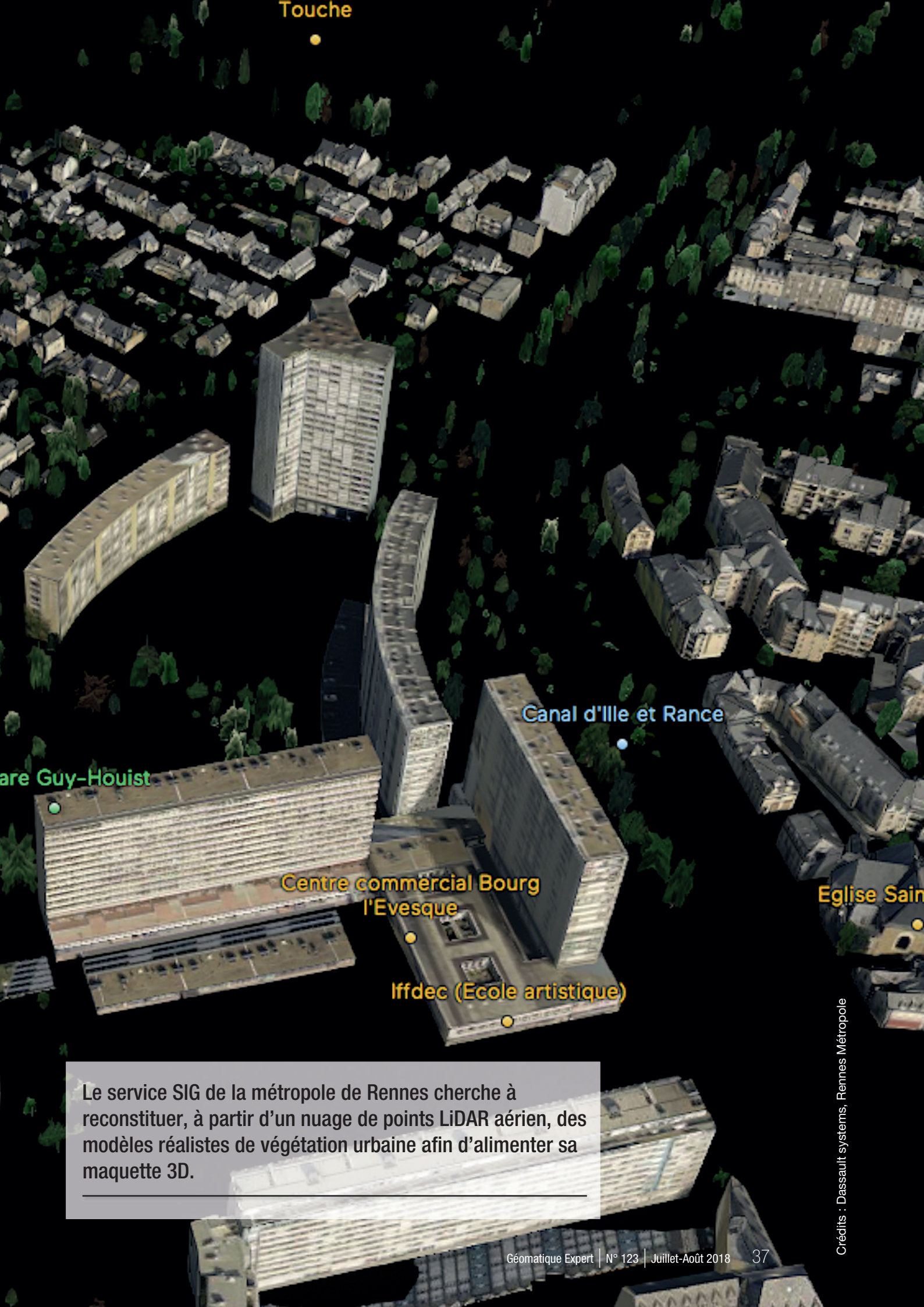
Square de La Touche

Mobilité

Modélisation 3D de la végétation sur le territoire de Rennes Métropole (Partie 1)

Coralie Leblan, ESGT/Service SIG de Rennes Métropole

Institut Confucius de
Bretagne



Le service SIG de la métropole de Rennes cherche à reconstituer, à partir d'un nuage de points LiDAR aérien, des modèles réalistes de végétation urbaine afin d'alimenter sa maquette 3D.

En 1999, pour fêter le passage à l'an 2000, les élus rennais proposent aux habitants une reproduction numérique de la ville en 3D. Face à l'engouement du grand public, deux autres maquettes historiques, qui représentent la ville telle qu'elle était dans les années 1740 et 1860, sont réalisées. Une fois encore, le succès est au rendez-vous et la maquette 3D se révèle un outil permettant l'appréhension du territoire dans son ensemble et dans son histoire. Aujourd'hui, les maquettes en ligne « *Rennes 2030* » et « *De Condé à Rennes* » présentent respectivement les grands projets urbains prévus d'ici à 2030 et des représentations historiques de la ville du XVII^e siècle à aujourd'hui.

Au-delà de son aspect ludique, la maquette 3D constitue un support d'analyse. Ces analyses, cependant, sont encore souvent réalisées en isolation et ne tiennent pas compte de l'influence d'un facteur urbain sur un autre (à l'image de l'influence des modes de déplacements sur le taux de pollution de l'air par exemple). Pour réaliser des analyses transversales, il est nécessaire de fédérer tous les acteurs urbains autour d'un socle de données commun.

Depuis juin 2015, la maquette 3D de Rennes se transforme en une plateforme collaborative dans le cadre du projet *3D EXPERIENCE City Virtual Rennes*, développé en partenariat avec la société *Dassault Systems*.

La maquette 3D de Rennes Métropole

Cette maquette a été conçue avec *Rhinoceros*, un logiciel de CAO édité par *Robert McNeel & Associates* autour

des courbes et des surfaces NURBS (*Non-Uniform Rational B-Spline*), ainsi que des solides, des nuages de points et des maillages. Il utilise le format 3DM (*Three Dimensional Modeling*). Rennes Métropole utilise également les extensions *RhinoTerrain* et *RhinoCity*, développées par la société *RhinoTerrain*. Ces extensions créent et affichent la maquette 3D à partir d'importants volumes de données et exportent textures et géométries au format *CityGML*. La maquette 3D de Rennes Métropole est ainsi disponible au format *CityGML* LoD 2.

La reconstruction 3D des bâtiments sur Rennes diffère de celle des autres communes de la métropole. Avant 2005, le bâti de Rennes était défini par des lignes de toiture (faîtage et arêtes) et des emprises au sol. Depuis, ce sont principalement les plans joints aux permis de construire et, parfois, des orthophotographies ou des levés topographiques qui servent de référence. L'objectif est de renseigner quatre types de primitives géométriques à l'aide du logiciel *TopStation* (tableau 1).

Sur la base de ces primitives, le module *RhinoCity* génère des objets 3D au format *CityGML*, puis opère une texturation automatique à partir de photographies aériennes qui sont renouvelées tous les trois ans par l'IGN.

Sur les autres communes de la métropole, le service SIG fait appel depuis 2011 à un prestataire en charge de la mise à jour (tous les trois ans également) des primitives propres aux lignes de toitures de la totalité du bâti, par photogrammétrie et ajustements manuels. Une fois les toitures définies, l'emprise au sol correspondante est obtenue par projection. *RhinoTerrain* utilise ces primitives pour reconstruire et texturer les bâtiments.

La végétation dans la maquette 3D

La modélisation de la végétation dans la maquette 3D repose actuellement sur un processus interne combinant une chaîne de traitement FME avec le logiciel *Rhinoceros*. À partir des positions du centre des troncs des arbres modélisés par un *Shapefile* de ponctuels, ainsi que leurs hauteurs et envergures (diamètre de couronne), le module reconstruit les arbres selon des *billboards* (croisillons) texturés en piochant aléatoirement dans une bibliothèque d'images d'une vingtaine de modèles.

Chaque arbre est alors représenté par deux faces perpendiculaires qui, vues du dessus, forment une croix ; d'où la dénomination de modélisation « en croisillon » (figure 1).

Désignation	Primitive à renseigner
Emprise au sol	Polygone
Lignes de découpe de toiture	Point
Ligne d'arêtes	Point
Ligne de faîtage	Polygone

Tableau 1 : Primitives géométriques des bâtiments sur le territoire de la ville de Rennes.



Figure 1 : Représentation de type *billboard* (ou « croisillon ») texturé des arbres.

Les travaux de détection et de segmentation de la végétation réalisés par C. Doceul (voir plus loin) conduisent aujourd'hui à la génération de deux couches *Shapefile*, l'une propre aux cimes détectées (points) et l'autre aux couronnes segmentées correspondantes (polygones), qui servent à l'extraction des paramètres nécessaires à la modélisation « en croisillon » des arbres.

Bien que beaucoup moins fidèle à la réalité qu'une reconstruction géométrique maillée (ou en volume), la modélisation en « croisillon » n'en reste pas moins rapide à produire, et peut s'avérer utile dans des cas spécifiques de représentation simplifiée.

Extraction de la végétation : l'existant

Depuis les vingt dernières années, de nombreux algorithmes semi- et totalement automatiques ont été développés pour extraire la végétation à partir de nuages de points *LiDAR*. Ils peuvent être classés en quatre grandes catégories d'approches : orientée *raster* (66 %), orientée nuage de points

(20,6 %), mixte (9,6 %) ou encore visant à reconstruire la forme des arbres (3,7 %).

Comme l'utilisation de données passives a prédominé jusque dans les années 2005, ces méthodes reposent sur un socle théorique solide. Elles consistent à calculer des modèles numériques de canopée (CHM) à partir desquels les cimes et couronnes sont ensuite détectées puis segmentées à l'aide de maxima locaux et d'algorithmes de « bassins versants ». Le service SIG de Rennes Métropole dispose d'un nuage de points *LiDAR* aérien acquis par l'IGN durant l'été 2017 ainsi que de couches de données (relatives au bâti et à la végétation). L'IGN a réalisé une pré-segmentation automatique du nuage. Une deuxième segmentation plus fine de la végétation est en cours de réalisation par un prestataire privé. Elle doit être livrée à la fin du mois de juin.

L'algorithme de reconstruction de la végétation développé précédemment par C. Doceul comprend six phases succinctement présentées dans le tableau 1.

Pré-traitement

La phase de pré-traitement a pour objectif d'isoler les points végétation du reste du nuage *LiDAR*. Cette étape ne consiste qu'en la sélection des points labellisés selon l'un des trois codes numériques (3, 4 ou 5) associés aux classes de végétation basse, moyenne et haute. Toutefois, la pré-classification réalisée par l'IGN confond parfois bâti et végétation. Un nettoyage complémentaire est donc nécessaire. Celui-ci est effectué grâce à une intersection spatiale : les points empiétant sur le bâti, tel que défini dans les autres couches vectorielles de référence, sont éliminés (figure 2).

Si, à première vue, cette méthode semble efficace, elle présente néanmoins un inconvénient majeur : un arbre recouvrant d'un bâtiment se voit amputé d'une partie de sa couronne. Cette troncature aura des conséquences néfastes sur la segmentation de l'arbre, et donc sur sa reconstruction 3D. Dans un objectif d'extraction fine de la végétation, il est nécessaire de réfléchir à un nouveau protocole de pré-traitement du nuage de points *LiDAR*.

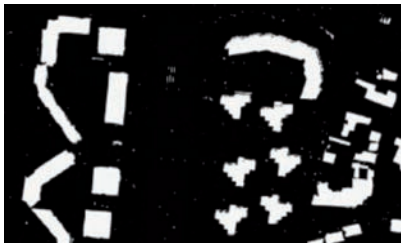
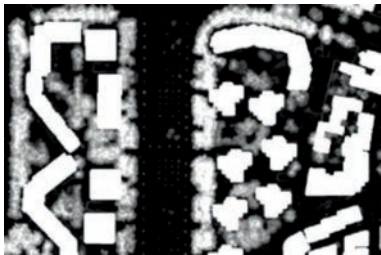
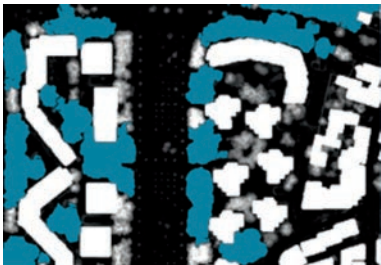
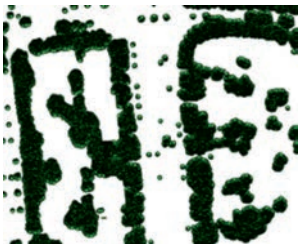
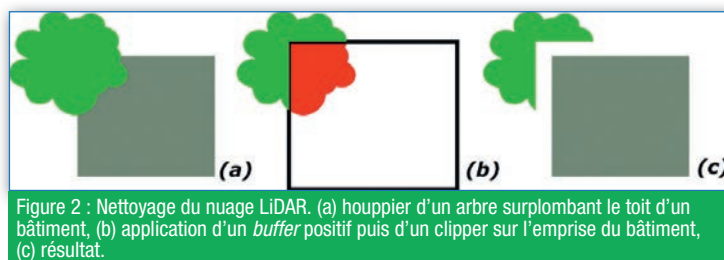
Illustration	Phase/Explications
	Phase 1 : Prétraitements Nettoyage du nuage de points LIDAR avant le calcul du MHC. Suppression des points de bâti autres mobiliers urbains.
	Phase 2 : Calcul du MHC Transformation des données discrètes en raster. Calcul d'un MHC puis amélioration par application filtres et pondération.
	Phase 3 : Détection et segmentation de la végétation en zones ouvertes Détection des maxima locaux d'abord pour identifier les cimes. Segmentation des houppiers ensuite par application d'un algorithme de bassin versant. Résultats sous forme de fichiers <i>Shapefiles</i> .
	Phase 4 : Partition « zones ouvertes »/« zones fermées » Distinction d'arbres isolés et de regroupements selon un label « zone ouverte » ou « zone fermée ».
	Phase 5 : Détection et segmentation de la végétation en zone fermée Nouveau calcul de détection et de segmentation avec ajustement de paramètres de calculs en zone fermée.
	Phase 6 : Préparation à la modélisation Normalisation du nuage LIDAR et export au format <i>Shapefile</i> . Labélisation de chaque point par l'identifiant unique du houppier auquel il appartient.

Tableau 1 : Algorithme de C. Doceul.



Le modèle numérique de hauteur de canopée (MHC)

Le MHC et le MNT comptent parmi les principaux produits dérivés des levés LiDAR aériens. Cette transformation de la donnée discrète (nuage de points) en une donnée *raster* constitue la phase dite « de rasterisation », réalisée avec le logiciel *Fusion/LDV*. Développé par l'*USDA Forest Service (USFS)*, *Fusion/LDV* est un logiciel *Open Source* permettant de combiner la manipulation de données LiDAR et leur analyse cartographique grâce à une interopérabilité avec des logiciels SIG.

Dans notre cas, nous choisissons une grille de 50 cm pour rasteriser les données LiDAR.

On aperçoit sur la figure 3 que certains pixels sans points LiDAR peuvent rester sans valeur. C'est une situation courante à laquelle il est possible de remédier soit par une interpolation du nuage de points, soit par un filtrage numérique du MHC. Dans notre cas, l'algorithme prévoit un filtrage numérique médian du MHC.

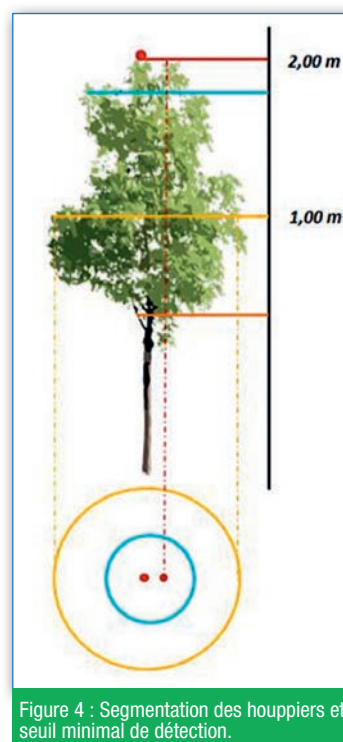
Détection et segmentation de la végétation

La détection et la segmentation de la végétation selon une approche traditionnelle orientée *raster* comprend deux étapes utilisant le MHC : la détection des cimes par recherche de maxima locaux, puis la segmentation des couronnes associées par un algorithme de bassin versant. L'algorithme utilise successivement les fonctions *TreePeaks* et *TreeWatershed*, développées par Matthew Parkan et disponibles dans la *Digital Forestry Toolbox (DFT)* du logiciel *Matlab*.

Dans un premier temps, la fonction *TreePeaks* parcourt le MHC et recherche des maxima locaux dans une fenêtre circulaire d'un rayon fixe de 3,5 m et un seuil de hauteur minimal de 3,0 m. Il produit une couche de points des cimes au format *Shapefile*. Puis, à partir de chacun des sommets détectés, l'algorithme *TreeWatershed* segmente les couronnes correspondantes selon un principe de bassin versant et un seuil minimal de hauteur de 3 m. Il en résulte

une nouvelle couche *Shapefile* représentant les emprises de couronnes.

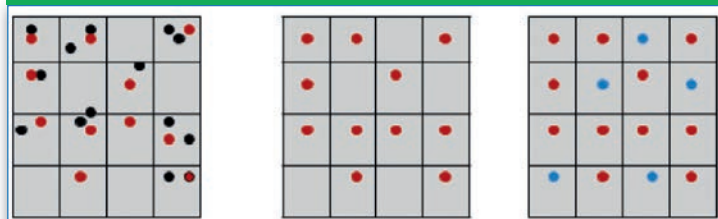
Nous remarquons sur la figure 4 qu'un seuil unique de hauteur minimum pour la recherche des cimes et des couronnes peut réduire la segmentation à un point, voire rater des arbres. Une adaptation du *script* est donc nécessaire pour distinguer deux seuils différents de recherche.



Partition des arbres en zones dites « ouvertes » et « fermées »

Par zones « ouvertes » on entend « arbres individuels », c'est-à-dire des arbres isolés. Par zone « fermée », on entend à l'inverse « arbres regroupés », c'est-à-dire des arbres à proximité immédiate les uns des autres et pour lesquels les houpiers s'entremêlent pour former des amalgames. L'algorithme distingue de ces zones en enchaînant

Figure 3 : Rasterisation de donnée discrète.



l'application de buffers de tailles variables sur les couronnes (figure 5).

Les résultats présentent deux sortes de confusions : le regroupement d'arbres individuels d'une part, et la considération de regroupements comme des arbres isolés d'autre part. Cette dernière se traduit visuellement par des formes géométriques complexes en zones ouvertes, très éloignées de la forme circulaire attendue pour un houppier isolé. La méthode de partition des arbres ne tient pas compte de la vraisemblance géométrique de la segmentation. Elle mérite d'être revue pour gagner en cohérence.

Tentative d'amélioration de la segmentation

Ayant remarqué des phénomènes de sur- ou de sous-segmentation dans les zones de végétation denses, C. Doceul avait envisagé d'accentuer les sommets du MHC par une pondération avec

un *raster* de pente. Les pentes, approximativement nulles à la cime des arbres (maximum local), constituent théoriquement un moyen efficace d'identifier ces points stratégiques.

L'algorithme prévoit donc un lissage du MHC initial (MHC médian) par l'application d'un filtre gaussien (MHC dit « gaussien »), à partir duquel un *raster* de pentes est calculé, puis utilisé pour pondérer le MHC initial (MHC dit « pondéré ») (figure 6). Le coefficient de pondération, noté X, est adapté en fonction du type de zone (« ouverte » ou « fermée »).

Cependant, C. Doceul concluait à l'inefficacité de la méthode, en remarquant d'une part que les transformations successives appliquées au MHC risquaient de modifier le positionnement original des cimes et, d'autre part, qu'en dépit de cette tentative seulement 35 % des arbres étaient correctement détectés en zones « fermées ».

Tenant compte de ces observations et jugeant la méthode trop longue, nous décidons de ne pas l'utiliser.

Un manque de gestion des systèmes de coordonnées

Actuellement, l'algorithme n'est pas en mesure de gérer les systèmes de coordonnées. En entrée comme en sortie, les variables doivent être (et sont) projetées dans le système WGS84-UTM30. Il serait intéressant d'adapter l'algorithme pour qu'il soit en mesure de gérer différents systèmes de coordonnées en entrée tout en produisant des résultats projetés dans le système RGF93-CC48 (EPSG : 3948), utilisé par le service SIG de Rennes Métropole.

Reconstruction 3D de la végétation : état de l'art

La reconstruction 3D des arbres ne fait pas l'objet d'une littérature abondante. Néanmoins, nous pouvons y distinguer deux types d'approches, chacune susceptible d'utiliser des données satellitaires à haute résolution, photogrammétriques ou encore lasergrammétriques : la reconstruction architecturale d'une part (Lande *et al.*) et celle de la canopée d'autre part (Zhen Zhen *et al.*). La première approche s'appuie sur des nuages terrestres de plusieurs millions de points pour chaque arbre. À l'inverse, la reconstruction de la canopée s'appuie sur des acquisitions aériennes moins denses mais couvrant des zones très vastes.

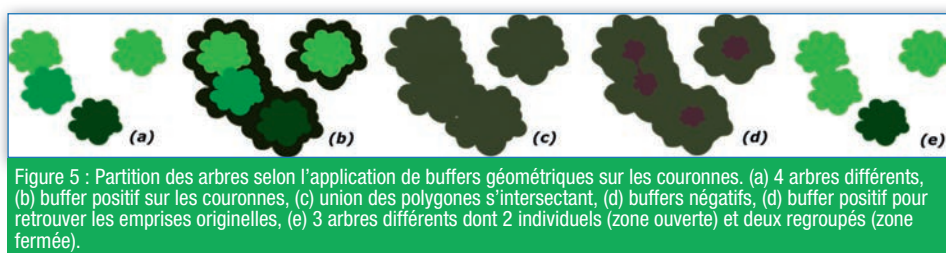


Figure 5 : Partition des arbres selon l'application de buffers géométriques sur les couronnes. (a) 4 arbres différents, (b) buffer positif sur les couronnes, (c) union des polygones s'intersectant, (d) buffers négatifs, (d) buffer positif pour retrouver les emprises originelles, (e) 3 arbres différents dont 2 individuels (zone ouverte) et deux regroupés (zone fermée).

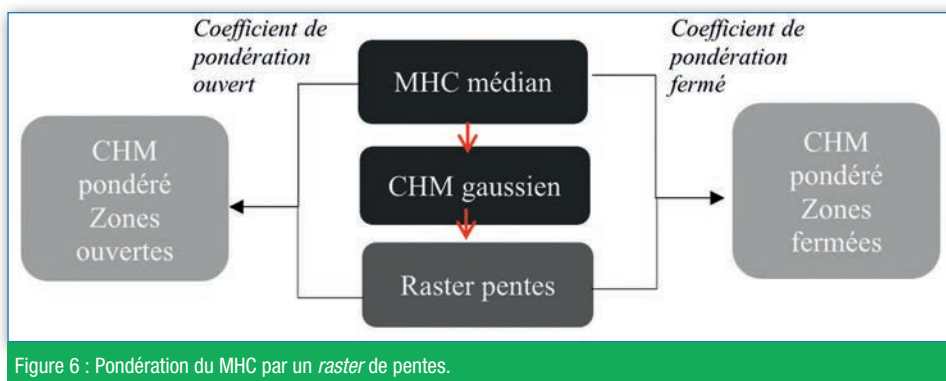


Figure 6 : Pondération du MHC par un *raster* de pentes.

Reconstruction d'après des données terrestres

Considérant des nuages de points très denses (plusieurs millions de points) acquis par système LiDAR terrestre, Bournez *et al.* écartent l'hypothèse de la reconstruction surfacique (ou « *meshing* ») qui produit un volume de données trop important et ne facilite pas l'interprétation des caractéristiques géométriques des arbres. Ils citent en revanche deux autres approches majeures : l'ajustement de primitives géométriques à un nuage de points et la squelettisation.

Il existe aujourd'hui de nombreuses méthodes de reconstruction d'arbres individuels basées sur l'ajustement de primitives géométriques à des nuages terrestres denses. Le cylindre est généralement privilégié (Rahman *et al.*, Piefer *et al.*) car considéré comme seul apte à reconstruire le tronc et les branches d'un arbre selon un modèle réaliste rendant compte des connectivités et produisant des volumes de bois précis (figure 7).

La squelettisation consiste à construire des modèles filaires d'épaisseur nulle (1D) traduisant une version simplifiée de

la géométrie et de la topologie d'objets 3D. S'inspirant fortement des travaux de Au *et al.*, produisant une forme contractée à partir d'une surface volumique, Cao *et al.* ont développé un algorithme permettant de calculer un squelette à partir d'un nuage de points, sans passer par une reconstruction surfacique intermédiaire.

Utilisé (Lande *et al.* [10]) pour reconstruire les arbres, l'algorithme de squelettisation développé par Cao *et al.* [3] a permis de modéliser jusqu'aux pousses des arbres de manière très précise (figure 9).

Il existe donc des algorithmes très précis en matière de reconstruction volumique de la structure d'arbres individuels. Toutefois ces approches nécessitent des nuages de points denses et supposent donc des acquisitions terrestres.

Clustering du nuage de points LiDAR aérien

La reconstruction 3D des arbres depuis un nuage de points LiDAR aérien nécessite un « *clustering* » préalable de la donnée discrète en sous-ensembles indépendants (*clusters*). Le *clustering*

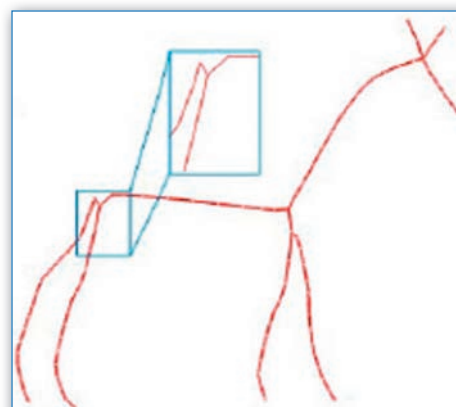
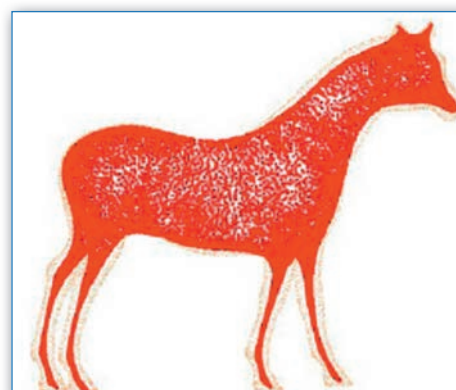
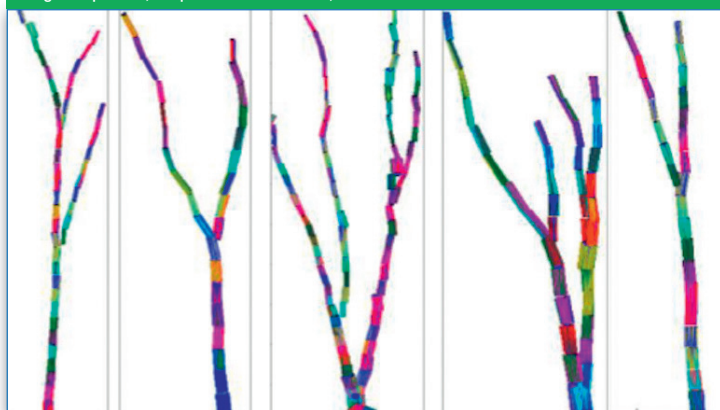


Figure 8 : Illustration du principe de la squelettisation selon Coa *et al.*, 2010. En haut un nuage de points, en bas le squelette et ses connexités.

Figure 7 : Reconstruction de tronc et de branches par approximation cylindrique d'un nuage de points ; d'après Rahman *et al.*, 2015.



consiste en un découpage de la donnée LiDAR en sous-groupes réunissant l'ensemble des points appartenant à un même arbre. L'identification des différents arbres au sein d'un nuage de points constitue une problématique séparée dite de « *segmentation* » de la végétation, abordée par C. Doceul selon une approche dite « *basée raster* » (Zhen Zhen *et al.*, op. cit.).

Cette approche de la segmentation constitue la première des quatre approches définies par Zhen Zhen *et al.* Une deuxième approche, dite « *mixte* », intègre la donnée LiDAR en la découpant suivant les polygones issus de la première. Par cette opération

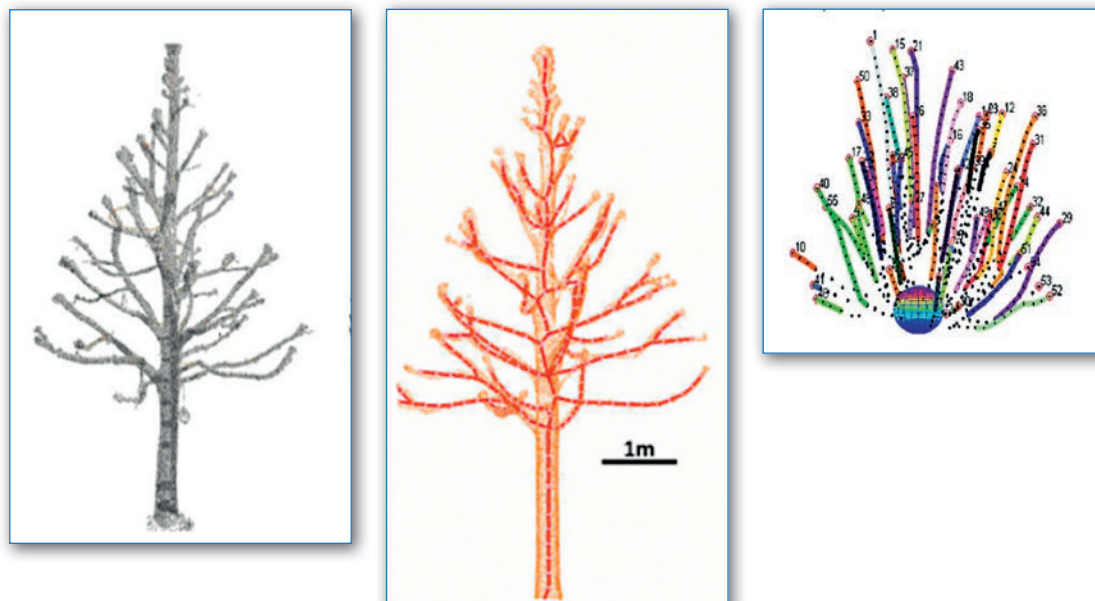


Figure 9 : Résultats obtenus par l'implémentation de l'algorithme de Cao *et al.* à un arbre individuel. De gauche à droite ; le nuage de points LiDAR, le squelette, le squelette de pousses (extrémité des branches). Crédit : Tania *et al.*

(Reitberger *et al.*, C. Doceul), nous réalisons le « *clustering* » de notre nuage de points et obtenons les sous-ensembles (*clusters*) propres à chaque arbre. La troisième approche est dite « orientée nuage ». Ici, les clusters sont directement identifiés au sein de la donnée LiDAR grâce à des algorithmes de K-moyenne ou de *voxelisation*. Disposant déjà de sous-ensembles générés selon une approche mixte, nous ne développerons pas plus ces techniques.

Enfin, la quatrième approche est dite « orientée reconstruction de forme ». Elle s'appuie sur des *clusters* réalisés au préalable par l'une des techniques précédentes et regroupe différentes techniques géométriques de reconstruction 3D de formes à partir de données discrètes. Parmi les deux plus connues : les techniques de « *convex hull* » et d'« *α -shape* » ont déjà très largement fait leurs preuves dans le domaine de la reconstruction 3D d'arbres individuels.

Reconstruction 3D d'arbres individuels d'après des données LiDAR aériennes

Les techniques géométriques de reconstruction *convex hull* et *α -shape* sont étroitement liées à triangulation dite « de Delaunay » et à son graphe dual, le diagramme de Voronoï. En 2016, la ville de Montréal a expérimenté un processus automatisé de génération d'un modèle numérique de canopée par corrélation dense d'images photogrammétriques aériennes. La reconstruction 3D de la canopée (figure 10) reposait alors sur une approche de type « *meshing* » consistant à construire une surface triangulaire (TIN) d'après une triangulation de Delaunay (figure 11).

En géométrie computationnelle, la reconstruction de surfaces (ou de volumes) à partir de données discrètes suppose la définition d'un estimateur de la forme attendue tenant compte de contraintes géométriques. À titre d'exemple,

la couronne d'un arbre peut être typiquement considérée comme présentant une forme convexe, faisant de l'enveloppe convexe son estimateur naturel.

La figure 12 illustre les résultats obtenus par Rahman *et al.* [15] après combinaison d'une reconstruction de tronc par des cylindres et du houppier avec un estimateur de type convexe. On observe une forte simplification du volume des houppiers. En effet, les points formant la frontière de la couronne d'un arbre n'appartiennent pas tous à son enveloppe convexe (figure 13). La reconstruction selon un estimateur convexe entraîne alors une forte généralisation de leur forme.

Estimateur α -convexe

Présentons brièvement la généralisation de l'enveloppe convexe d'un ensemble discret de points : l'enveloppe α -convexe.

Soit un espace métrique E . On appelle une *boule ouverte centrée en C de rayon r* l'ensemble des

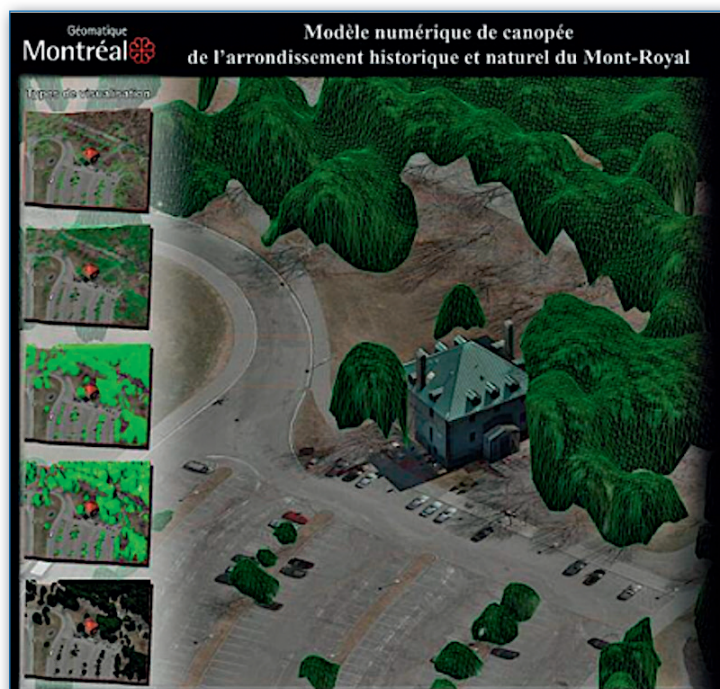


Figure 10 : Reconstruction de la canopée d'après une surface TIN.

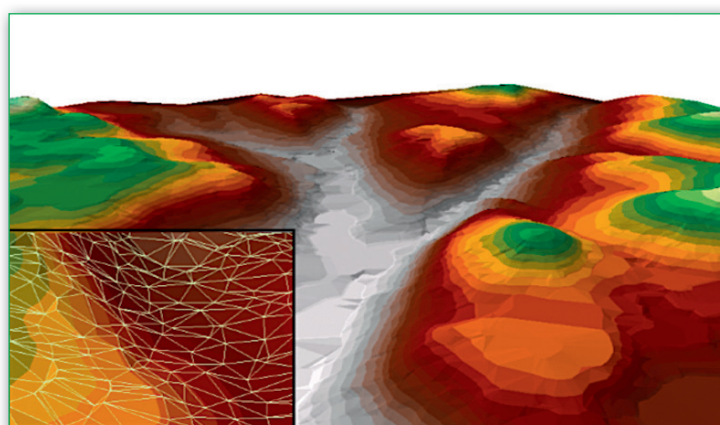


Figure 11 : Structure TIN. Crédit : Stéphane R. U LAVAL.

points P dont la distance à C est strictement inférieure à r ($d(C, P) < r$).

Soit $X = \{P_0 \dots P_n\}$ un échantillon de points de E et C_X l'enveloppe convexe de X . Pateiro-Lopez *et al.* [13] définissent l'enveloppe α -convexe de X , notée $C_\alpha(X)$, comme l'intersection des complémentaires de toutes les boules ouvertes de rayon α ne contenant aucun point de X . Le complémentaire de $C_\alpha(X)$, noté $C_{X\alpha}$, est alors

simplement l'union de l'ensemble des boules ouvertes de rayon α ne contenant aucun point de X . Celui-ci caractérise les espaces où il n'existe aucun point de X .

On a alors (Edelsbrunner *et al.*, 1983) : soit B une boule ouverte ne contenant aucun point d'un ensemble X : soit B se trouve entièrement à l'extérieur de C_X , soit il existe une boule ouverte disjointe de X contenant B et centrée sur un segment « de

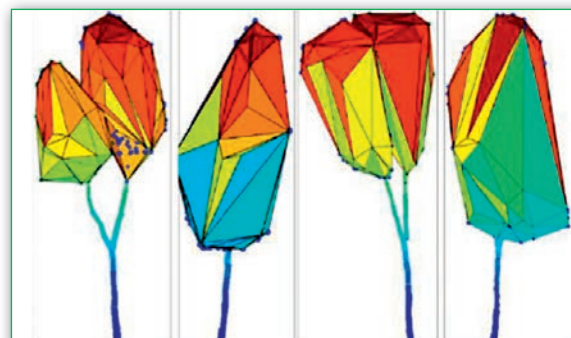


Figure 12 : Reconstruction d'arbres individuels par combinaison d'enveloppe convexes et de modèles cylindriques. Crédit : Rahman *et al.*

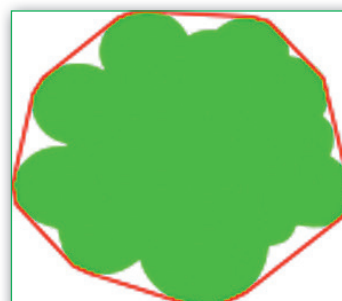


Figure 13 : Forme irrégulière des couronnes.

Voronoi » (c'est-à-dire un segment de médiatrice appartenant au diagramme de Voronoi de X). Définir le complément de l'enveloppe α -convexe consiste donc à déplacer une boule ouverte de rayon α centrée sur la frontière commune à deux régions « de Voronoi ». Deux points voisins de X seront alors reliés par un arc de cercle (figure 14).

Sur la figure 15, pour les trois points A , B et C , nous posons l'hypothèse d'une boule ouverte centrée sur la frontière commune aux régions de Voronoi correspondantes. Appartenant chacun à la frontière de la boule ouverte, les points sont reliés par un arc de cercle.

La figure 16 illustre les nouvelles perspectives de reconstruction de formes offertes par l'enveloppe α -convexe. Néanmoins, définies par des arcs de cercles (en 2D) ou des capuchons sphériques

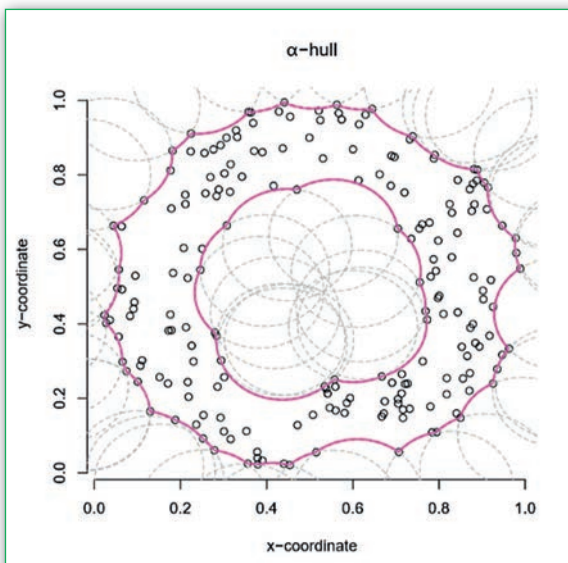


Figure 14 : Enveloppe α -convexe et son complément.

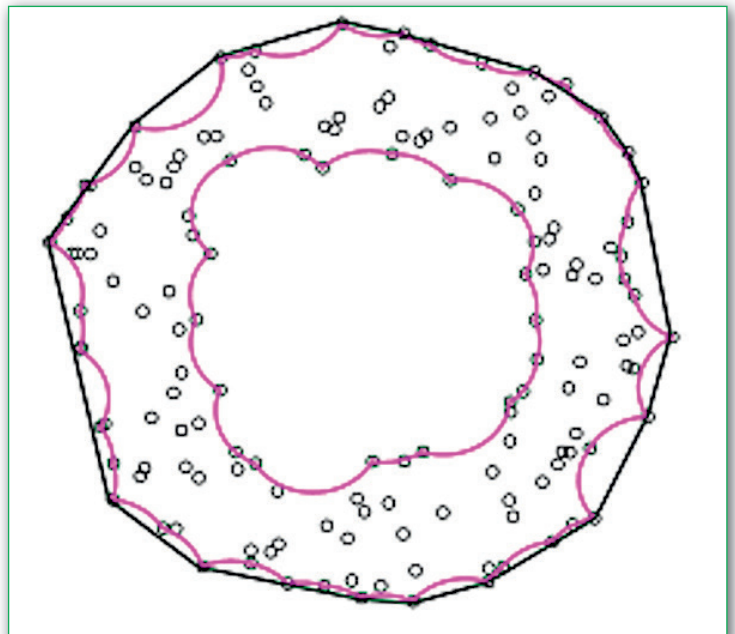


Figure 16 : Comparaison des critères convexes stricte (noir) et alpha (rose) dans un espace 2D.

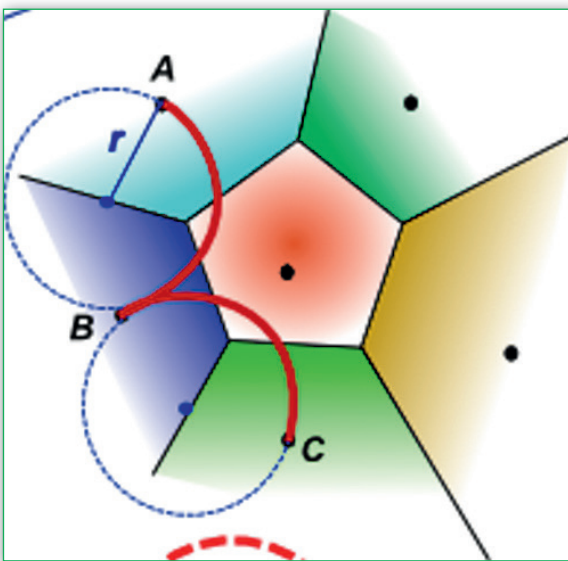


Figure 15 : Voisins de Voronoï joints par un arc de cercle.

(en 3D), les formes géométriques générées par une enveloppe α -convexe peuvent rapidement devenir lourdes à traiter. Ainsi, dans un souci de simplification, nous considérerons la reconstruction par « formes α » qui remplace les arcs de cercles par des polygones et les capuchons sphériques par des surfaces polyèdres.

Reconstruction par formes « alpha »

D'abord développées dans un espace euclidien 2D (Edelsbrunner, Kirkpatrick et Seidel) avant d'être étendues à un espace 3D (Edelsbrunner et Mücke), les formes α constituent une deuxième généralisation de l'enveloppe convexe d'un ensemble E .

Soit $X = \{P_0 \dots P_n\}$ un échantillon de points E , C_X l'enveloppe convexe de X , V_X le diagramme de Voronoï de X et TD_X la triangulation de Delaunay associée.

L'algorithme d'Edelsbrunner et Mücke (1994) repose sur deux notions principales : les α -extrêmes, appartenant à la forme α que l'on cherche à reconstruire, et les α -voisins qui sont des paires de points α -extrêmes reliés par un segment de droite.

Définition : soit P un point de X , et W l'ensemble des voisins de P au sens de Voronoï (c'est-à-

dire, l'ensemble des points de X dont la région de Voronoï associée partage un segment avec la région associée à P). P est un α -extrême si l'une des deux conditions suivantes est vérifiée :

- $P \in C_X$
- $\forall Q \in W, d(P, Q) \geq \alpha$

Dans l'exemple de la figure 17, les points X_1 , X_2 et X_3 appartiennent à l'enveloppe convexe (en rouge) et sont donc des α -extrêmes pour tout α . Le point X_4 est un α -extrême si $d_{\max}$ (en bleu) est supérieur à α .

Une fois les α -extrêmes identifiés, l'algorithme recherche parmi eux les points constituant les α -voisins à relier par des segments de droite pour former la forme α .

Considérant un segment dans TD_X reliant deux α -extrêmes X_i et X_j et $[a, b]$ son segment dual dans V_X , les points X_i et X_j sont des α -voisins si, parmi les quatre

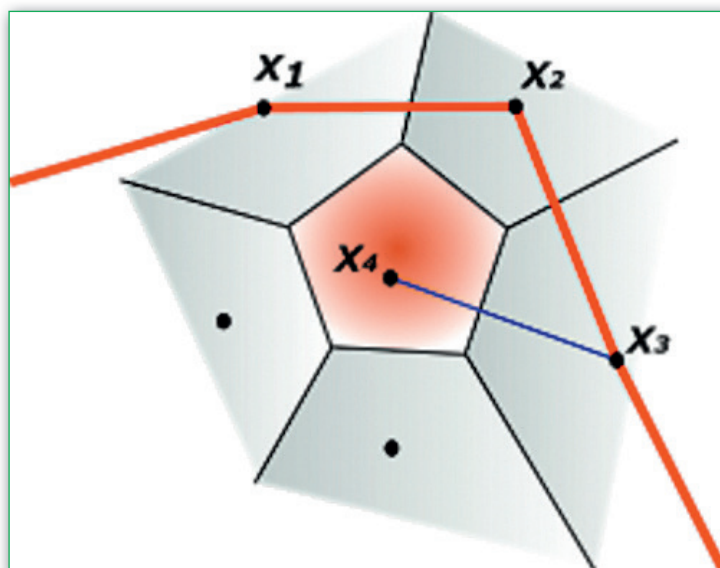


Figure 17 : α -extreme.

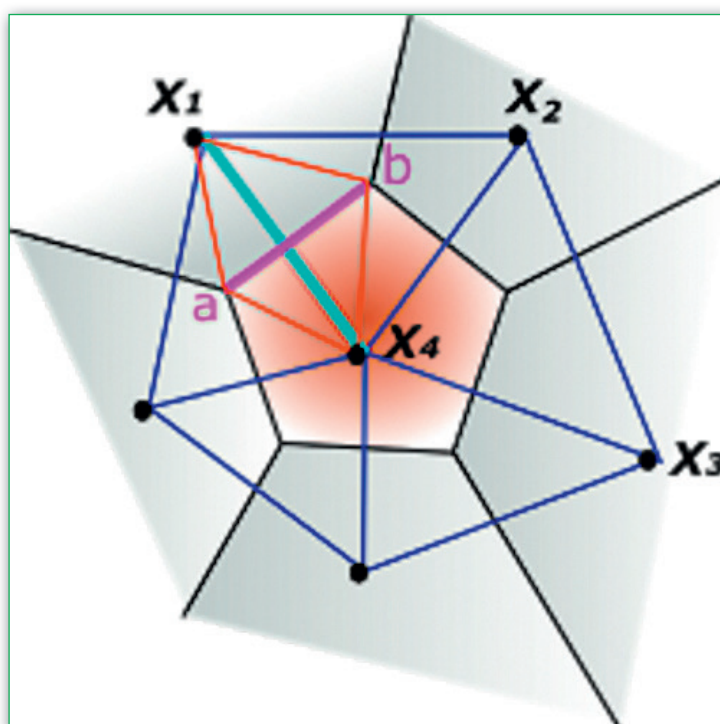


Figure 18 : α -voisins.

distances en rouge sur la figure 18, les distances $d_{\min}$ et $d_{\max}$ respectent la condition $d_{\min} \leq \alpha \leq d_{\max}$.

Finalement, la « forme α » définit le graphe en ligne droite reliant les α -voisins. Ainsi pour un rayon infiniment grand, la forme α sera

identique à l'enveloppe convexe. À l'inverse, plus le rayon considéré sera petit, plus la forme α rétrécira jusqu'à se résumer au nuage de points initial.

Pour une étude approfondie des algorithmes d'enveloppes convexes, α -convexes et des

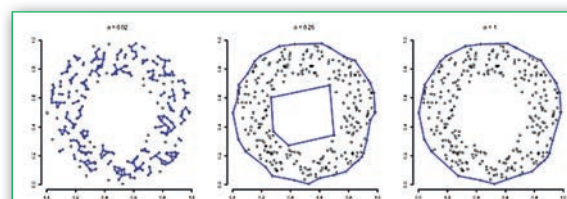


Figure 19 : Influence du rayon sur la forme α . Valeur croissante du rayon de la gauche vers la droite. Crédit : Lafarge *et al.*

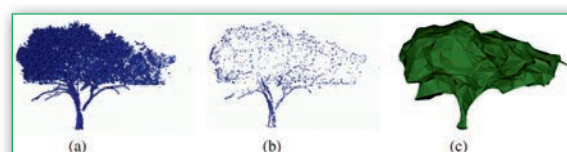


Figure 20 : Reconstruction de type α -shape d'un érable. Résultats obtenus par expérimentation de la reconstruction géométrique de type α -shape. Extraction de la forme de la canopée d'un érable : (a) le nuage de points source, (b) les points appartenant à l'enveloppe convexe (limite extérieure du nuage), (c) limite maillée finale. D'après C. Zhu *et al.*, 2008.

formes α , nous nous référons notamment à Pateiro-Lopez *et al.* ou à Lafarge *et al.*

Implémentée par Zhu *et al.*, la reconstruction de type forme α appliquée à un érable conduit au résultat visible en figure 20.

On l'aura remarqué, ces algorithmes de reconstruction 3D (aussi bien l'approximation par primitives géométriques que la squelettisation, l'enveloppe convexe ou encore les formes α) supposent de renseigner des nuages de points constituant un arbre individuel (*clusters*). Profitant des travaux antérieurs de détection et de segmentation de la végétation, nous « *clustérisons* » notre nuage de points LiDAR d'après les emprises de couronnes définies géométriquement par C. Doceul sur la base d'une analyse de CHM.

Modélisation de la végétation

Parmi les différentes méthodes présentées, nous considérons l'utilisation des formes α comme

la solution la plus adaptée à notre problématique. En effet, capables d'estimer au plus près la forme suggérée par un nuage de points selon un niveau de détail paramétrable, elles présentent un intérêt particulier pour la reconstruction d'objets destinés à être intégrés dans une maquette 3D.

Pré-traitements : extraction de la végétation

L'objectif principal de cette première étape est d'extraire du nuage LiDAR le sous-ensemble constituant la végétation.

Dans l'algorithme de C. Doceul les points résiduels des bâtis sont détectés à l'intérieur de surfaces définies par les emprises des bâtiments. D'un point de vue 3D, cette technique supprime l'ensemble des points se trouvant à l'intérieur d'un volume de hauteur infinie, y compris la végétation pouvant surplomber certains bâtiments. Pour limiter l'impact du nettoyage sur la végétation, il est nécessaire de limiter la hauteur de ce volume à celle des constructions. Or, la modélisation des bâtiments en LoD 2 rend compte de la forme de leur toit. La couche

de données correspondante est exploitable dans la plupart des logiciels de manipulation de donnée 3D, dont *CloudCompare*. On peut alors sélectionner les points se trouvant dans un intervalle de distance fixé par rapport aux faces constituant les bâtiments (plugin *Cloud/Mesh*). En considérant une profondeur de balcon de 1,5 m, nous sélectionnons puis supprimons les points se trouvant dans un buffer 3D de 1,5 m autour des bâtiments (figure 23).

Cette méthode n'est pas parfaite : des résidus de lucarnes de toits, structures non modélisées en LoD 2, persistent. Nous observons également la présence de bruit dans le nuage, qu'il est donc nécessaire de filtrer.



Figure 21 : Ligne d'horizon présentant la classe « végétation » du nuage de points LiDAR.

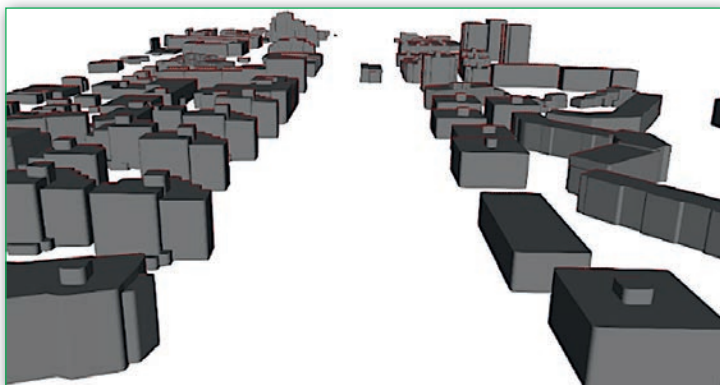


Figure 22 : Couche objet de bâtis de Rennes Métropole.

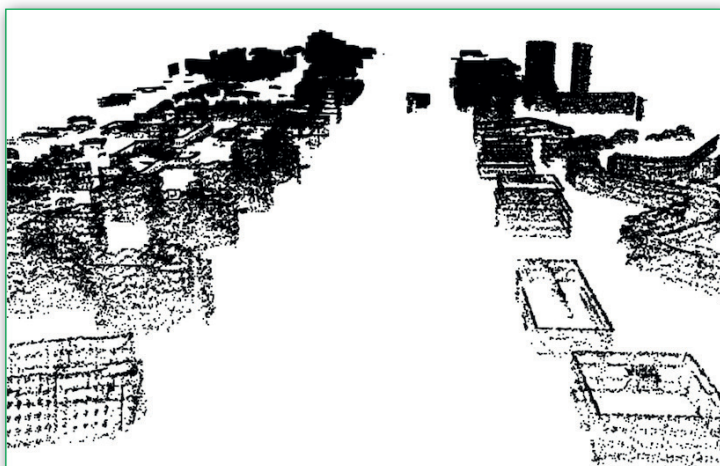


Figure 23 : Points résiduels identifiés par le plugin *Cloud/Mesh* de *CloudCompare*.

Nettoyage par test statistique : *Statistical Outlier Removal*

Le bruit est traité par un test statistique de type SOR (*Statistical Outlier Removal*), disponible dans *CloudCompare*, fortement inspiré de l'algorithme implémenté dans la *Point Cloud Library* (PCL). Le principe consiste à éliminer les points isolés. On calcule pour chaque point la distance moyenne de ses voisins. En considérant que les distances moyennes du nuage suivent une distribution gaussienne, on identifie comme points aberrants (*outliers*) tous les points éloignés de leurs voisins d'une distance dépassant un certain nombre de sigmas.

Les plus petits arbres présentant un intérêt en termes de reconstruction 3D comportent une vingtaine de points. Si le nombre de voisins est trop important, on risque de fausser la distance moyenne en recherchant des points jusque dans un arbre



Figure 24 : Lucarne de toit.



Figure 25 : Résidus liés aux lucarnes de toits dans le nuage de points LiDAR.

voisin, par exemple. Nous calculons donc la distance moyenne sur un échantillon de vingt voisins et pour une déviation standard de un sigma.

Nettoyage par analyse de densité

Les petits agglomérats peuvent inclure des résidus de bâti (lucarnes de toits) ou des arbres caractérisés par trop peu de points pour espérer être correctement segmentés et reconstruits en 3D. Pour les nettoyer, nous utilisons un nouvel outil disponible dans *CloudCompare* : *Density*. Celui-ci analyse de la densité d'un nuage de points selon trois méthodes :

- Le nombre de voisins : analyse du nombre de pixels voisins dans un rayon R donné autour d'un pixel source ;

- Une densité de surface : nombre de pixels situés dans un cylindre vertical infini de rayon R ;

- Une densité en volume : nombre de pixels voisins divisé par le volume de la sphère de rayon R.

On comprend naturellement que les points frontières des couronnes ont un nombre de voisins beaucoup plus faible que ceux situés au centre. De ce fait, un simple dénombrement des voisins n'est pas adapté au filtrage car il entraîne la suppression des frontières des huppier (figure 27).

L'analyse par densité de surface, en revanche, détecte bien les petits agrégats isolés. En effet, on ne compare plus le nombre de voisins propre à chaque point mais, la densité de points présents dans une surface centrée sur ce point.

Figure 26 : Statistical Outlier Removal. Crédit : PCL.

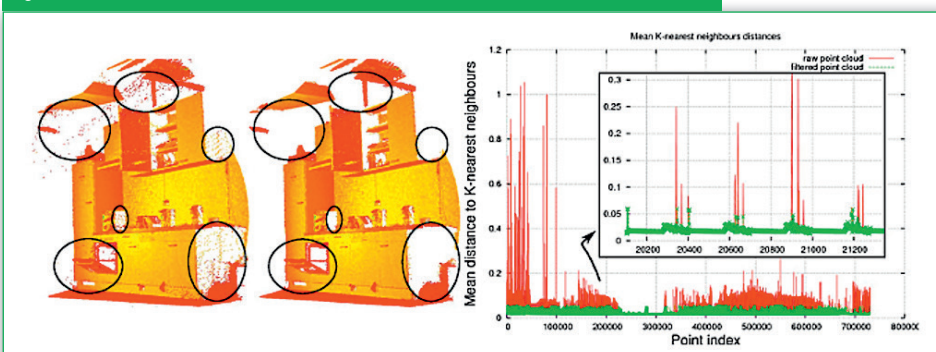
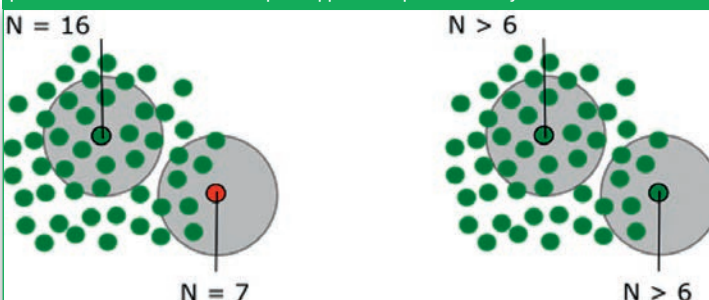


Figure 27 : Comparaison de l'analyse de densité par nombre de voisins ou par surface.

Dans la situation (a), un point sur la frontière de la couronne n'a que sept voisins par rapport à un point au centre du huppier en présentant 16. Il sera supprimé par une analyse de type « nombre de voisins ». Dans le cas (b), chacun des deux points étudiés présente plus de six voisins dans un cylindre de hauteur infini centré sur ces points. Le point à la frontière ne sera donc pas supprimé d'après une analyse de densité.



Considérant un rayon R de 1,5 m et un seuil de densité de 2,8, nous supprimons du nuage de points tous les agrégats présentant moins d'une vingtaine de points dans un cylindre infini de 3 m de diamètre.

Finalement la combinaison des tests SOR et densité permettent d'affiner l'extraction du sous-ensemble constituant la végétation en y filtrant le bruit ainsi que les points résiduels de bâti, tout en minimisant l'impact du nettoyage sur les couronnes. Le sous-ensemble « végétation » est alors extrait en tant que nouveau nuage de points indépendant appelé « nuage végétation ».

Détection et segmentation des arbres

Considérant à présent deux nuages de points en entrée : le nuage LiDAR brut et le « nuage végétation », nous adaptons les étapes de calcul du CHM et de détection et segmentation de la végétation.

Initialement prévue pour ne considérer qu'un seul nuage de points

en entrée, nous adaptons la méthode de calcul du CHM développée par C. Doceul pour que celle-ci accepte nos deux nuages de points : le LiDAR brut comme source de calcul du MNT, et le « nuage végétation » comme source de calcul du MHC.

Sur la base du nuage LiDAR brut, la fonction *GroundSurfaceCreate* de *Fusion* génère d'abord une grille MNT avec une résolution de 50 cm. S'appuyant ensuite sur ce MNT et sur le nuage de points « végétation », la fonction *CanopyModel* génère un CHM de résolution identique. Enfin, un filtre médian est appliqué pour affecter une valeur interpolée aux pixels vides de la matrice. Nous pouvons observer l'impact positif de notre phase de pré-traitement des données sur le calcul du CHM où nous distinguons que peu de résidus (figure 28).

Il est intéressant de noter que si la fonction *CanopyModel* propose par défaut de réaliser elle-même une interpolation pour renseigner des valeurs aux pixels vides, celle-ci dégrade la qualité du CHM en sortie en assignant des

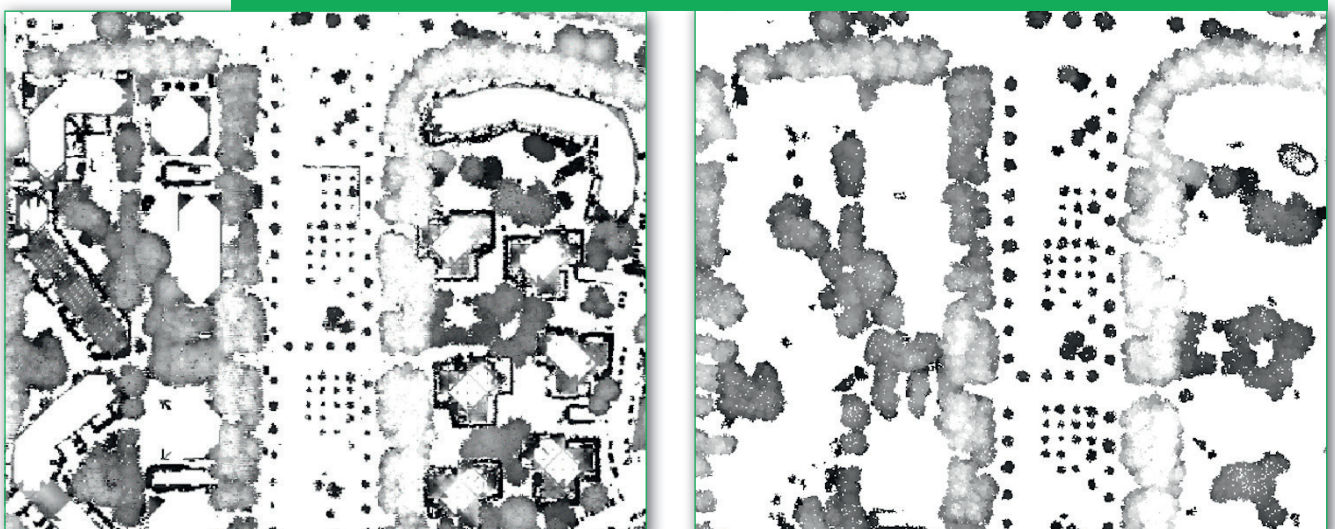
valeurs à des pixels censés rester nuls (espaces entre les arbres).

La détection et la segmentation des arbres est réalisée d'après la méthode développée par C. Doceul. Néanmoins, nous distinguons deux seuils différents de hauteurs minimales de recherche pour les cimes et les houppiers. Cette distinction offre la possibilité de mener des analyses en tenant compte d'un critère de hauteur paramétrable.

Dans un objectif de segmenter la végétation dans sa globalité, nous appliquons des seuils de recherche très larges : 1,5 m pour les cimes et 1 m pour la canopée. On obtient alors deux couches au format *Shapefile* : la première (*Cime_all.shp*) stocke l'emplacement des cimes détectées, la seconde (*Couronnes_all_clean*) représente les emprises des couronnes segmentées. Il est important de noter que pour une cime détectée, une unique couronne est segmentée.

Une analyse visuelle de la couche *Couronnes_all_clean* nous amène à définir quatre catégories d'enti-

Figure 28 : Calcul de CHM sur le secteur de l'avenue Henri-Freville. À gauche le résultat obtenu par C. Doceul, à droite le nôtre.



tés segmentées : les houppiers individuels (caractérisés par une couronne sensiblement circulaire et d'un seul tenant), les houppiers fragmentés (caractérisés par plusieurs entités proches formant un cercle fragmenté), les « tores » (houppiers pour lesquels la surface est trouée) et enfin, les amalgames (caractérisés par des formes géométriques complexes résultant du regroupement de plusieurs entités). Ces différentes catégories, illustrées par la figure 29, traduisent une limite propre à la détection et la segmentation de la végétation par une approche orientée *raster*.

Préparation des données

L'algorithme de détection et de segmentation prévoit une phase de partition de la végétation en secteurs plus ou moins denses, mais ne tient pas compte de la vraisemblance géométrique des couronnes. Nous proposons dans la suite d'adapter la méthode existante en observant comme critère principal non plus un enchaînement de buffers mais la cohérence géométrique des couronnes segmentées. Bien que ce postulat ne soit pas applicable sur des arbres taillés (cas très

minoritaire sur la métropole de Rennes), nous considérons à présent qu'un houppier « correctement » segmenté doit avoir une forme sensiblement circulaire.

La partition de la végétation fait l'objet du script *Partition* développé sous FME. L'idée générale consiste à définir le plus petit cercle englobant propre à chacune des couronnes segmentées puis à comparer les aires de chacun des couples cercle/houppier, car plus une couronne aura une forme circulaire, plus sa surface se rapprochera de celle de son plus petit cercle englobant (figure 30).

Les tores ne constituent toutefois pas des surfaces pleines sur lesquelles cette analyse fonctionne. Nous commençons donc par nous assurer que les surfaces sont toutes pleines en traitant les tores à l'aide du *transformer DonutHoleExtractor*.

Après avoir calculé l'aire de chacune des surfaces et supprimé les petits éléments (surface inférieure à 10 m²), nous générons leurs plus petits cercles englobants (*transformer MinimumSpanningCircleReplacer*). Nous

appliquons alors un filtre considérant appartenir à une zone ouverte les entités respectant la condition $\text{surface (couronne)} \div \text{surface (cercle)} \geq 0,6$.

En réalité, la forme d'une couronne étant souvent allongée, nous ne pouvons pas appliquer une condition trop stricte sur le rapport des aires. Sur la base d'un contrôle visuel de notre échantillon, un seuil de 0,6 apparaît être un bon compromis pour distinguer les formes sensiblement circulaires des formes trop complexes. Pour chaque couronne, la valeur de ce rapport constitue un attribut nommé « probabilité ».

Les couronnes ne respectant pas ce critère sont considérées comme trop complexes, et associées aux regroupements d'arbres. Les houppiers à proximité les uns des autres de moins de 50 cm sont fusionnés au sein d'agrégats par un buffer positif de 50 cm, une union des frontières communes puis un buffer négatif de 50 cm. Nous obtenons ainsi les emprises globales des secteurs dits « fermés ». Notons qu'après une nouvelle application d'un *transformer DonutHoleExtractor* nous nous assurons que ces surfaces sont compactes.

Figure 29 : Quatre catégories de houppiers segmentés. De la gauche vers la droite : houppier individuel ; tore (ou *doughnut*) ; houppier fragmenté ; amalgame.

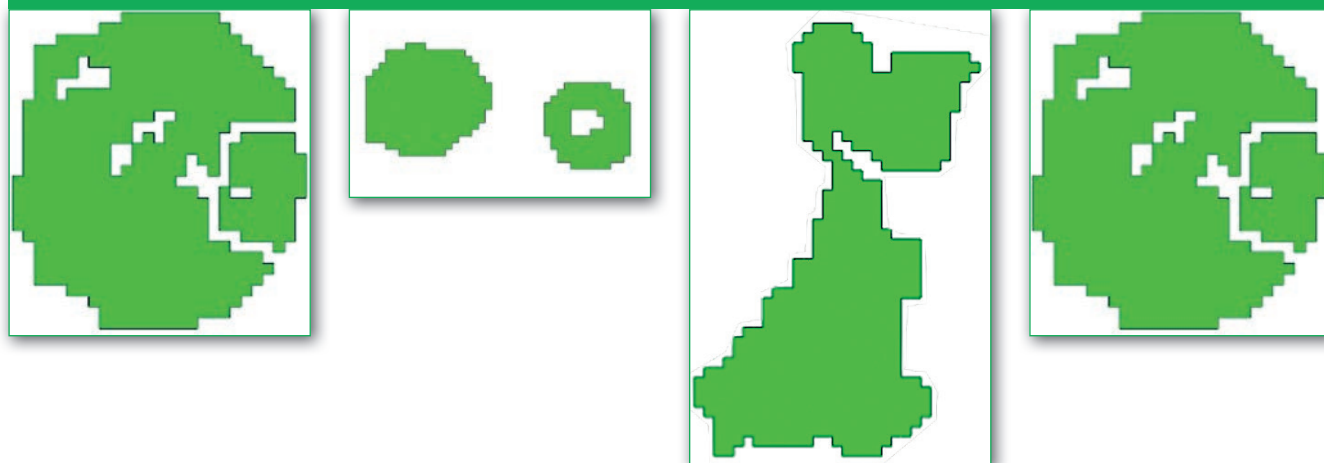




Figure 30 : Suppression des objets incohérents d'après leur forme. De gauche à droite : un houppier bien segmenté, amalgame d'arbre, résidu divers.

Le traitement des zones fermées nécessite de récupérer l'ensemble des couronnes fusionnées en zones fermées. Cette étape consiste simplement à extraire de la couche de données *Couronnes_clean_all* les couronnes empiétant sur les surfaces de la couche *Zones_fermees* à l'aide d'une analyse spatiale (figure 32).

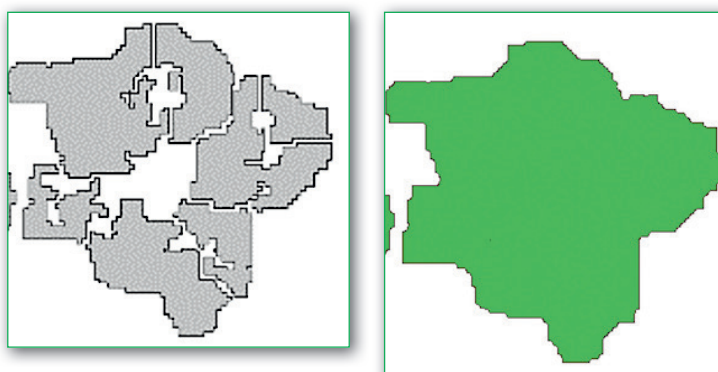


Figure 31 : Regroupement des zones fermées.

Dans un premier temps, pour les deux types de zones, les couples cimes/couronnes (ainsi que leurs attributs respectifs) sont réunis à l'aide d'une analyse spatiale (*transformer SpatialFilter*). Les coordonnées (x, y, z) de chaque cime incluse dans l'emprise d'un houppier s'ajoutent aux attributs de la couronne. La coordonnée z est considérée comme la hauteur de l'arbre.

Finalement, nous disposons de deux couches, *Zones_ouvertes* et *Zones_fermees.shp*, représentant les emprises pleines et fermées des couronnes réparties dans chacune des zones.

Reconstruction *billboards* des arbres

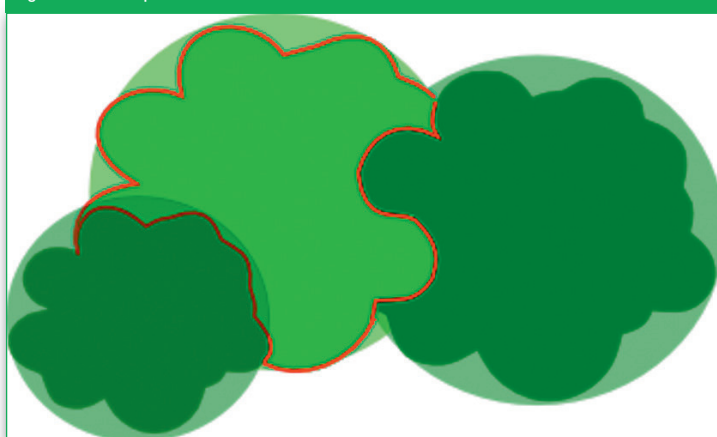
Rennes Métropole dispose déjà d'un module interne de modélisation des arbres par *billboards* utilisant une couche de points au format *Shapefile* qui contient la position, la hauteur et le diamètre de la couronne des arbres.

En ne considérant que le diamètre de couronne, nous pouvons écrire un module qui reconstruit les arbres selon une forme circulaire. Cependant, si les couronnes individuelles tendent plus ou moins vers la circularité, ce n'est pas le cas de celles segmentées en

zone de végétation dense, qui présentent des formes très complexes. Fort de ce constat, nous distinguerons deux scripts FME d'extraction de paramètres dendrométriques en fonction des zones ouvertes et fermées, respectivement intitulés *Modélisation_ouverte* et *Modélisation_fermee*.

Dans le cas de zones ouvertes, les houppiers sont généralement considérés comme des ellipses et sont définis par deux longueurs, grand axe et petit axe. Bien que le module n'en considère qu'un seul, le service trouve intéressant d'avoir connaissance de ces deux valeurs, pour n'en garder que la maximale. À l'aide du *transformer BoundsExtractor*, nous calculons la plus petite boîte englobante des couronnes,

Figure 32 : Récupération des couronnes en zones fermées.



isolons les extrema de chaque houppier et en déduisons alors deux valeurs de diamètres (D_1 et D_2), lesquels viennent ensuite s'ajouter à la liste des attributs.

Dans le cas des zones fermées (regroupements d'arbres), la définition d'un diamètre est plus complexe. Cependant, comme la modélisation « en croisillons » n'est destinée qu'à la représentation et non à la simulation, ce n'est pas tant la forme exacte des houppiers qui importe que leur emprise globale.

Nous modélisons la forme de chaque houppier par son plus petit cercle englobant (*transformer Minimum-SpanningCircleReplacer*) et en déduisons un diamètre unique de couronne. Cette méthode est également applicable aux zones ouvertes.

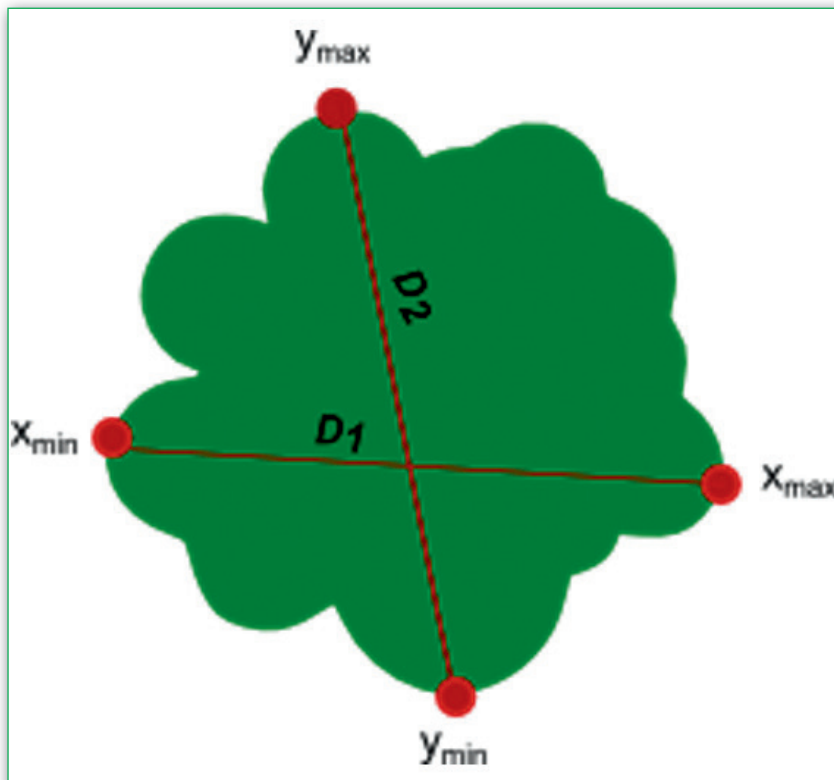


Figure 33 : Extraction des diamètres de couronnes en zone ouverte.

Positionnement des arbres

À ce stade, nous disposons de couches *Shapefiles* représentant l'emprise des couronnes et renseignant la hauteur (coordonnée z de la cime détectée) et le diamètre de couronne. Mais, le module ne gérant que des ponctuels, nous devons remplacer les couronnes par des points indiquant la position de l'arbre (et donc le centre du tronc). Deux approches sont envisageables : la position de l'arbre est définie par celle de la cime détectée ou bien par le centroïde de la couronne segmentée.

Pour tenter de déterminer quelle est la meilleure approche, nous considérons la position définie par le service DJB comme référence et observons les écarts pouvant exister avec les cimes détectées d'une part et, les centroïdes de couronnes d'autre part (tableau 2).

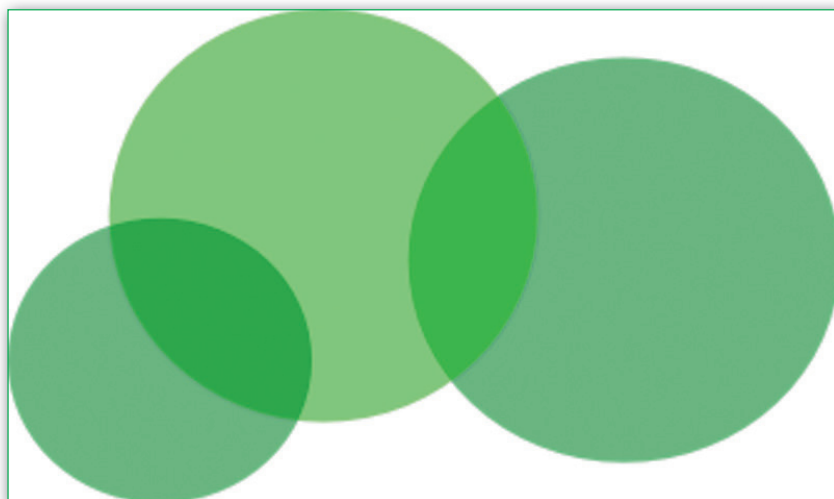
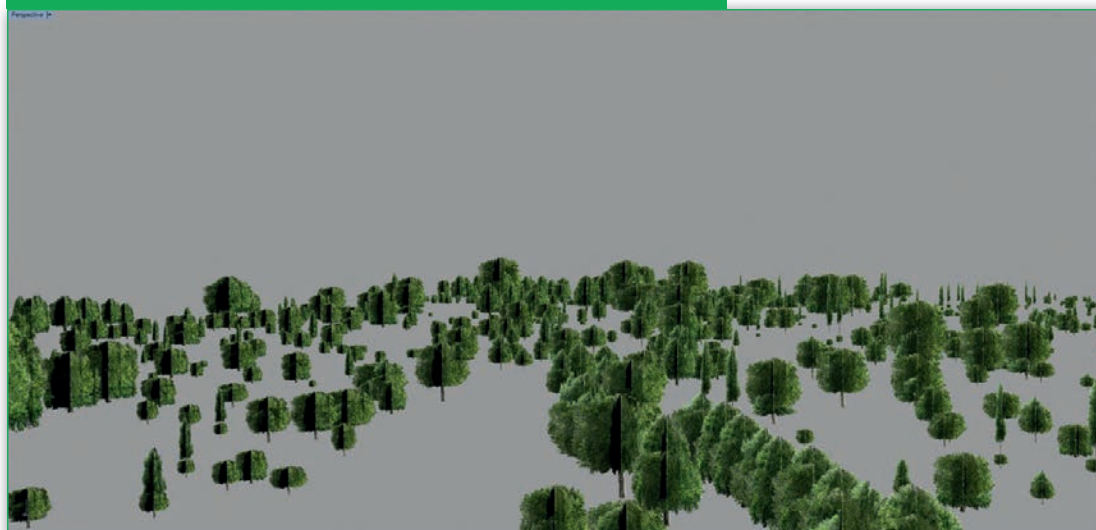


Figure 34 : Considération de l'emprise des houppiers en zones fermées.

Moyenne des écarts avec la couche de référence (DJB) (m)		
	Cimes	Centroïdes
Zones ouvertes	1,7	1,8
Zones fermées	4,4	3,9

Tableau 2

Figure 35 : Résultat de la modélisation « en croisillon ».



Pour les zones ouvertes, la considération de l'une ou l'autre des deux options n'a pas d'impact majeur. Cette remarque permet d'ailleurs d'apprécier la cohérence de la détection des cimes en zones ouvertes, les écarts pouvant être dus à une courbure du tronc. En zones fermées par contre, les écarts sont plus marqués et l'on observe que les centroïdes améliorent la position de 50 cm. Nous décidons donc d'associer

le centre des troncs à la position du centroïde de leur houppier.

De plus, un faible écart entre la cime et le tronc traduit une forte cohérence entre la position de la cime détectée et la segmentation de la couronne lui étant associée. À l'inverse, un écart important pourra indiquer des troncs très courbés ou des erreurs (de détection et de segmentation). Nous décidons alors de renseigner la valeur suivante

comme attribut de fiabilité : $F = 100 - ||\text{position (cime)} - \text{position (centroïde)}||$.

Il résulte de ces scripts deux couches de ponctuels, *Modelisation_ouverte* et *Modelisation_fermee*, exploitables par le module de reconstruction en interne. ■

(À suivre dans le prochain numéro)

Tour Builder, un outil pour réaliser des visites virtuelles

Pour ceux qui désirent mettre en valeur le patrimoine de leur ville, parc, région... *Concept 3D*, un éditeur américain basé à Boulder, dans le Colorado, propose un outil de type CMS (publication de contenu sur le web) qui permet de réaliser des parcours virtuels en quelques clics seulement.

Tour Builder, le nom de ce produit, supporte aussi bien les images classiques que pano-

ramiques (360°) pour illustrer chaque arrêt. Le CMS détecte automatiquement l'emploi d'images panoramiques et propose alors une vue immersive lorsque l'utilisateur dispose du matériel adéquat. Réaliser un parcours virtuel ne consiste qu'à charger les images puis à cliquer sur la position géographique des différentes étapes. Un assistant guide ensuite le « créateur » pour lui proposer des options supplémentaires, comme l'ajout

d'autres images ou de fichiers multimédia.

Quand le tour virtuel est créé, un lien permet de le publier, et l'utilisation de *MapBox* ou d'*OpenStreetMap* permet d'ajouter une « mini-carte » incrustée qui montrera la position de toutes les étapes et permettra de sauter aisément de l'une à l'autre.

Le CMS est disponible à l'adresse <https://tour.concept3d.com> ■



Tarifs TTC	1 an	1 numéro
FRANCE	70 €	14 €
Education (TVA 2,1 % incluse)	55 €	
Union Européenne	85 €	16 €
Etranger	95 €	18 €

***Le premier bimestriel français consacré
entièrement aux technologies et aux applications
des systèmes d'information géographique***

OUI, je souhaite m'abonner 1 an à **Géomatique Expert** au prix de €

Mon abonnement comprend : 6 numéros + 10 eNewsletters

Je règle mon abonnement par : ☐ chèque ci-joint à l'ordre de CIMAX ☐ à réception de facture ☐ virement ou mandat administratif

Prénom Nom Fonction

Société

N° TVA intracommunautaire

Adresse

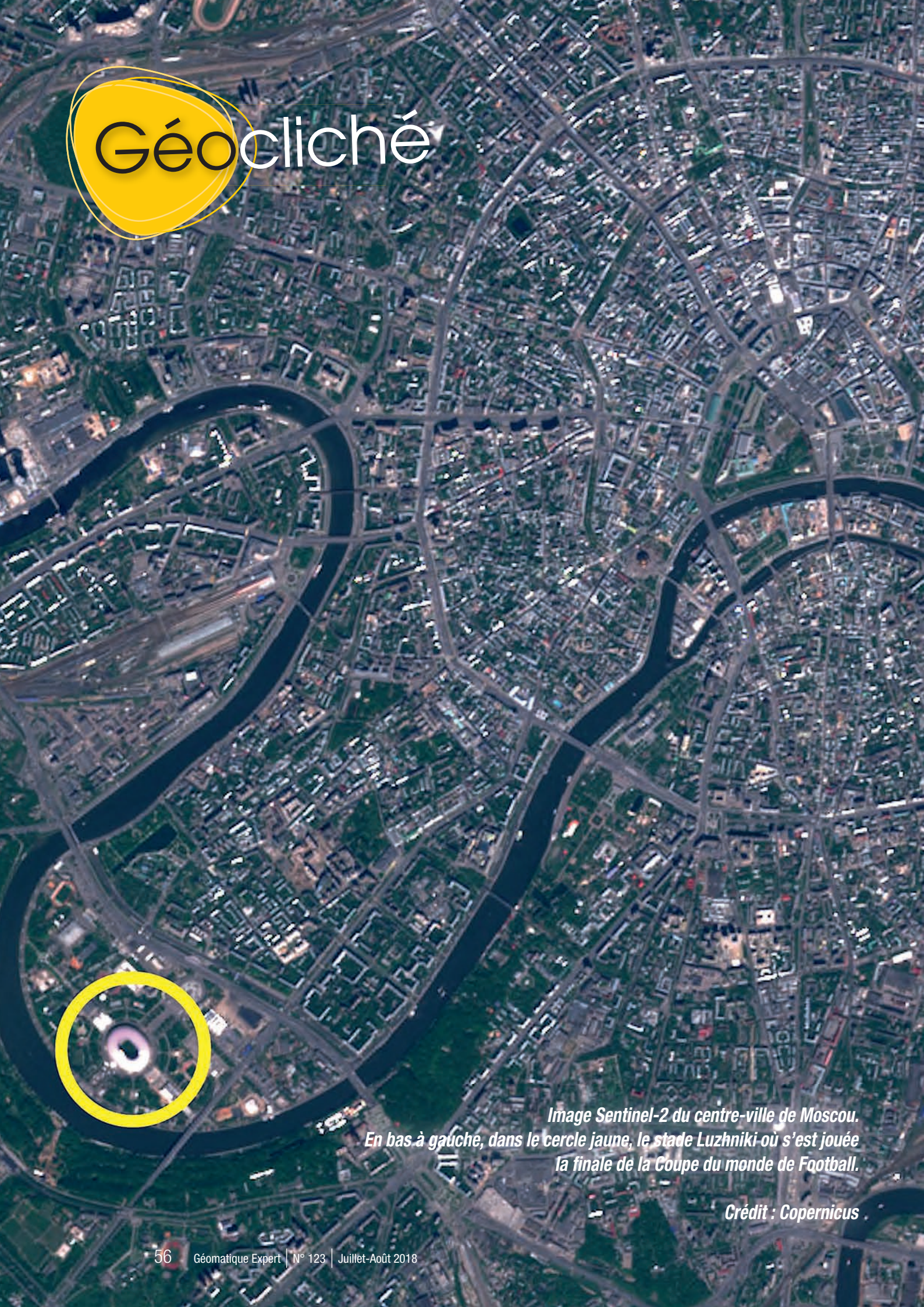
Code postal Ville

Tél. eMail (pour recevoir les newsletter)

L'abonnement ne sera pris en compte qu'accompagné de son règlement. ☐ Je souhaite recevoir une facture acquittée.

À renvoyer sous enveloppe affranchie au tarif en vigueur à : **Géomatique Expert** Service Abonnements

12, place G. Pompidou • 93167 Noisy-le-Grand cedex • Tél. : 01 45 92 98 98 - Fax : 01 49 32 10 74



Géocliché

*Image Sentinel-2 du centre-ville de Moscou.
En bas à gauche, dans le cercle jaune, le stade Luzhniki où s'est jouée
la finale de la Coupe du monde de Football.*

Crédit : Copernicus



CADxp

CAO et nouvelles technologies



* LE SEUL FORUM
EN FRANÇAIS DE
DISCUSSION ET
D'ENTRAIDE DE LA
COMMUNAUTÉ CAO



TROUVEZ DES RÉPONSES
SUR **CADxp*** ET REJOIGNEZ
LES 40 000 MEMBRES !

www.CADxp.com

Retrouvez les principaux articles
de la revue en ligne sur le site

Géomag.fr

