

# Cartographie semi-automatisée des toitures végétalisées de la Ville de Genève

J. MASSY ■ P. MARTIN ■ N. WYLER

Conservatoire et Jardin botaniques de la Ville de Genève  
Chemin de l'Impératrice 1-Case postale 60  
CH-1292 Chambésy-Genève

L'objectif de notre travail est de cartographier les toitures végétalisées de la Ville de Genève. De la même manière que pour une approche en télédétection, nous calibrons un modèle statistique par rapport à des objets connus d'apprentissage. Nous extrapolons ensuite sur l'ensemble des objets « *candidats* ». Les données disponibles dans le périmètre de notre étude sont les orthophotographies à quatre canaux (rouge, vert, bleu et proche infrarouge; résolution seize centimètres), les modèles numériques de surface (MNS) et de terrain (MNT) (résolution métrique). Quatre variables pertinentes ont été retenues pour modéliser les toits verts, à savoir : la pente des toitures, leur luminosité, la présence de végétation (NDVI), et la surface de ces toitures. Nous caractérisons ensuite chacun des 60 000 toits de la ville par ces variables afin de filtrer les toits potentiellement verts.

## Contexte

Le développement durable, la protection de la biodiversité et l'augmentation de la qualité de vie dans les villes sont des thèmes d'actualité qui mobilisent autant le grand public, les gestionnaires que les pouvoirs publics. Dans cet

optique, la Ville de Genève a signé les engagements d'Ålborg en 2010 [<http://www.ville-geneve.ch>] : elle vise ainsi à inscrire son développement dans la durabilité. Par conséquent, la Ville s'engage notamment à améliorer la qualité et la quantité

d'Informations du Patrimoine Vert [SIPV : <http://www.ville-ge.ch/cjb/sipv/>], les Conservatoires et Jardin botaniques de la Ville de Genève (CJB) synthétisent l'ensemble de la connaissance sur la biodiversité végétale.



Figure 1 : Exemple d'un toit extensif (bâtiment de Rolex aux Vernets).

des habitats pour la faune et la flore. Les toits végétalisés sont des habitats naturels qui participent à l'amélioration de la biodiversité en ville. Pour les gestionnaires, il est donc important d'inventorier et de localiser ces toitures afin d'en examiner les caractéristiques et d'en évaluer les potentiels. Dans le cadre du projet Système

Les toits verts sont une composante souvent oubliée des habitats naturels, qui participent à cette biodiversité. Ils ne peuvent pas être cartographiés de la même manière qu'un milieu naturel au sol. C'est pourquoi la méthode suivante a été développée et testée dans le périmètre de la Ville de Genève.

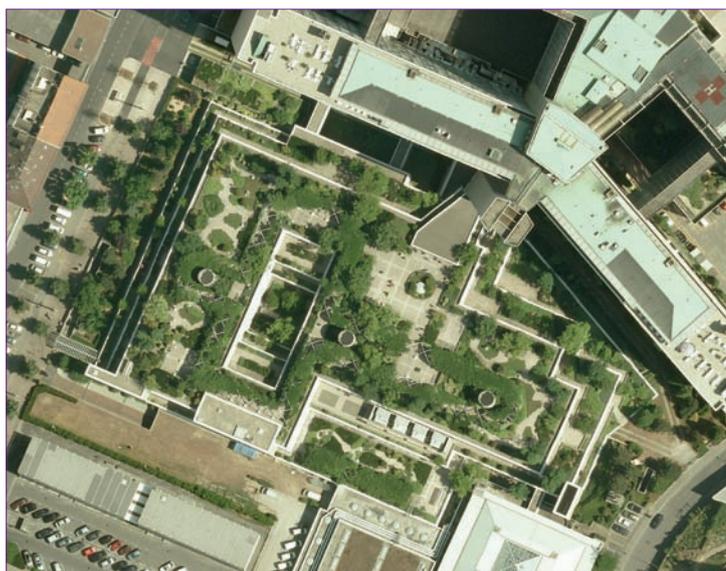


Figure 2 : Exemple d'un toit intensif (bâtiment de l'Opéra de l'Hôpital universitaire de Genève).

## Un toit vert ?

Un toit vert est une structure construite sur la toiture d'un bâtiment qui permet l'installation d'une végétation, tout en protégeant la structure du bâtiment de la détérioration que pourrait engendrer les racines des plantes.

Il existe classiquement deux types de toitures vertes :

- Les extensives, qui ont une épaisseur de terre ou de substrat faible (moins de 10 cm) et demandent peu d'entretien car elles abritent des espèces résistantes aux conditions de sécheresse et de chaleur (espèces xérophiles) ainsi qu'aux parasites (Figure 1);
- Les intensives qui ont des épaisseurs de terre plus conséquentes (plus de 20 cm) et sont recouvertes d'arbustes et/ou d'herbacées voire d'arbres. Ce type de toiture demande un entretien plus important (Figure 2).

De nombreux intermédiaires existent entre ces deux principaux types de toitures végétalisées [<http://www.toiture-vegetalise.com>]. Nous pouvons également trouver des toits couverts d'une végétation

spontanée apparue grâce à l'apport de graines issues de la végétation environnante. Dans notre étude, nous avons considéré ce type de toiture également comme « verte » (Figure 3). D'un point de vue écologique, ces différentes toitures végétalisées assurent plusieurs rôles : réservoir de biodiversité pour de nombreuses espèces, réseau de surfaces vertes complémentaire avec les surfaces au sol, diversité structurelle des habitats en milieu urbanisé, zones de compensation naturelle...



Figure 3 : Exemple d'un toit colonisé spontanément par de la végétation (route de Malagnou).

Avoir un toit végétalisé peut présenter des avantages dans de nombreux domaines. Les améliorations les plus souvent mentionnées concernent le climat urbain, la régulation thermique et l'entretien du bâtiment, la qualité de vie et la biodiversité. Il n'y a pas encore d'études complètes qui permettent de quantifier précisément l'ensemble de ces avantages. Toutefois, ils ont été observés dans la plupart des cas [<http://www.toiture-vegetalise.com>].

## Méthode

L'objectif était d'automatiser au maximum la cartographie, en minimisant les étapes nécessitant l'intervention d'un opérateur. Pour cela, chaque toiture est qualifiée selon les variables retenues : elle se voit attribuer une valeur moyenne de pente, de présence de végétation (indice NDVI), de luminosité et de surface. À partir d'un lot d'objets connus, des valeurs seuil sont choisies pour chacune de ces variables afin de sélectionner les toits végétalisés. Le choix des limites pour les quatre variables est volontairement large afin de limiter au maximum les omissions : on préfère ainsi retenir des toits verts qui n'en sont pas, que d'en

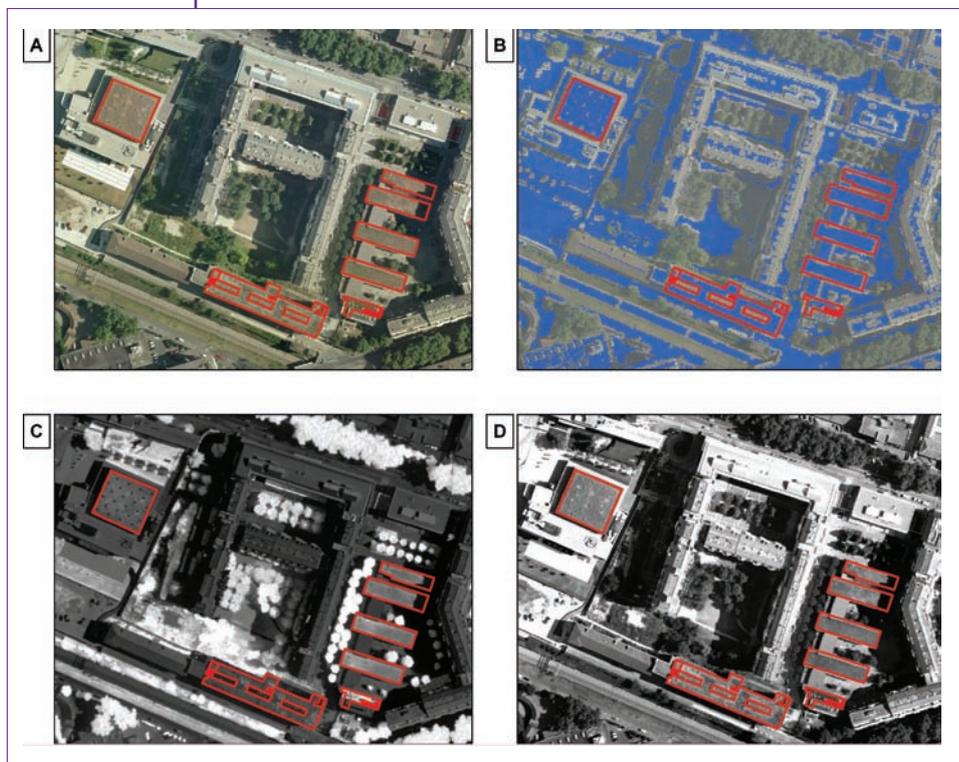


Figure 4 : En encadré rouge, trois bâtiments avec toits végétalisés ; A : Orthophoto de base ; B : raster de pente, en bleu les zones plates (moins de 8°) ; C : raster de NDVI ; D : Raster de luminosité.

manquer, car le modèle de reconnaissance des toits doit en effet posséder une bonne sensibilité. Pour simplifier les manipulations d'outils, plusieurs *Model builder* (ESRI/ArcGIS) ont été réalisés.

## Rassemblement des données

En premier lieu, il faut identifier, chercher et rassembler les données dont nous avons besoin. Une couche des toits de la ville (environ 60 000 objets) était disponible en format numérique. Afin d'utiliser la fonction *Zonal statistic as table* de ArcGIS™, nous avons dû au préalable éliminer les éventuelles doublons et superpositions de polygones qui existaient. En effet, certaines hyperstructures des toits créent des superpositions qui ne peuvent être prises en charge par l'outil *Zonal statistic as table*. Nous avons exploité les orthophotographies acquises

en juin 2009, ainsi qu'un modèle numérique de surface (MNS). Les clichés ont une résolution de dix centimètres dans les quatre canaux (rouge, vert, bleu, proche infrarouge) ; étant donné la taille des objets à cartographier, nous avons agrégé les orthophotographies à 60 cm afin de limiter les temps de calcul. En outre, nous avons constaté un léger décalage entre les images et la couche vecteur des toits, qui résulte essentiellement du géoréférencement. Ce décalage n'est pas isotrope et induit des artefacts dans le calcul des variables.

## Création des couches d'entrées (Figure 4)

Pour faciliter les éventuels changements dans le modèle, le processus a été découpé en plusieurs étapes. La première est la création

de quatre sous-modèles qui préparent les variables de sélection.

En premier lieu, un indice de végétation fondé sur l'intensité de l'activité photosynthétique est calculé ; le *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI). Il se calcule par la formule suivante [Trucker, 1979] :

$$\text{NDVI} = (\text{IR} - \text{R}) \div (\text{IR} + \text{R})$$

**IR** : Intensité lumineuse en bande infrarouge

**R** : Intensité lumineuse en bande rouge

Cet indice utilisé pour identifier la végétation varie de -1 à 1 : plus l'indice est élevé, plus l'activité photosynthétique est forte. Pour information, l'eau présente des valeurs négatives et les sols nus des valeurs autour de 0. Nous avons choisi de prendre, pour la sélection, les toits qui ont des valeurs comprises entre -0,08 et 0,3. Au-delà de 0,3, l'activité correspond plutôt à une végétation arborée et n'est plus considérée comme une toiture végétalisée.

Si nous ne mettons pas de limite supérieure, le modèle sélectionne également des toits qui ne sont pas verts mais qui sont situés sous des arbres par exemple. Cet indice de végétation est généralement utilisé en télédétection à des échelles plus larges. Ce calcul est rendu possible par l'amélioration des capteurs embarqués lors des campagnes de prises de vues aériennes, qui prennent des clichés en proche infrarouge, sans lesquels le calcul du NDVI serait impossible.

Puis la luminosité est obtenue en additionnant des trois canaux visible : rouge, vert et bleu. Un toit avec de la végétation est moins réfléchissant qu'une surface de béton ou de tôle. La luminosité d'une toiture végétalisée est donc plus faible qu'un toit nu : les valeurs varient entre 0 et 768 ; plus la valeur est élevée, plus le

toit est réfléchissant. Nous avons choisi des seuils entre 230 et 470 : lorsque les valeurs sont plus importantes, cela indique souvent des toits bétonnés. Les maxima sont détenus par les toitures en tôles qui ont des surfaces très réfléchissantes. Les valeurs basses, quant à elles, sont pour la plupart des zones d'ombre et des surfaces de couleurs sombres.

Pour la pente, certaines difficultés apparaissent. Les effets de bords sont importants et faussent la moyenne, car les façades des bâtiments ont des pentes de 90°. Pour palier ce problème, un pourcentage de surface de toit ayant une pente en dessous de 8° est calculé. La limite de 8° nous a semblé être un bon compromis ; en effet, l'implantation optimum d'un toit vert se situe aux alentours de 5°. Au-delà de cette valeur l'eau ruisselle et ne sert pas à la végétation.

Le choix du seuil à 8° laisse une marge d'erreur pour ne pas omettre certains toits. Le calcul utilise la fonction *Less than equal* de ArcGIS™ et la création d'un *raster* constant. Le *raster* constant correspond à une grille d'une valeur fixe de 8° pour chaque pixel. Avec la fonction *Less than equal*, la couche de pente obtenue par le MNS est comparée au *raster* constant. Le résultat est une couche *raster* présentant des pixels de valeur 1 pour les surfaces de moins de 8° et de 0 pour celle plus abruptes. Ensuite, pour chaque toit, nous calculons le pourcentage de surface qui présente moins de 8° de pente : tous les toits avec, au minimum, 25 % de leurs surfaces de pente inférieure à 8° sont retenus.

Enfin, la dernière variable qui entre en jeu est la surface. En général, les toitures végétalisées ont des surfaces de taille moyenne : cela nous permet d'éliminer les petites superstructures des toits, c'est-à-dire celle qui font moins de 16 m<sup>2</sup>.

## Modèle principal

### Création des cartes des variables

La valeur moyenne des quatre variables retenues est attribuée à chaque toit. Ceci est effectué par le modèle principal, à l'aide de la

côté de la ville pour valider les choix. Cette validation est nécessaire car l'ensemble de l'emprise urbaine n'est pas couverte par une seule photo. Il y a donc des différences de luminosité ou d'ombrage suivant à quel moment de la journée les différentes photographies aériennes sont prises.

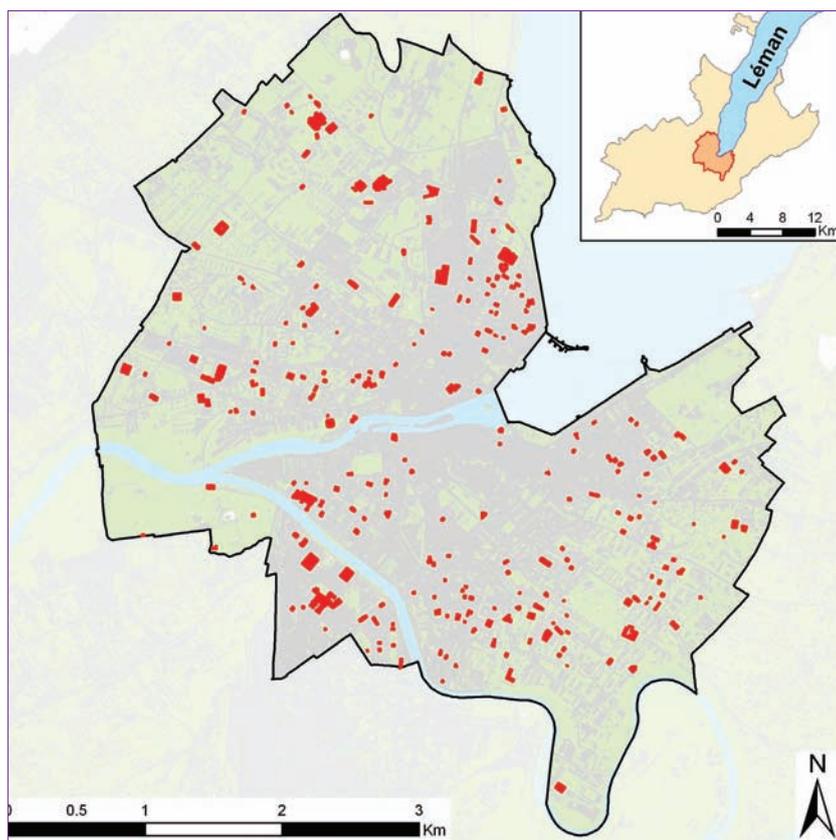


Figure 5 : Carte des toitures végétalisées (en rouge) trouvées pour la Ville de Genève.

fonction *Zonal statistic as table* de ArcGIS™. Cet outil calcule des statistiques de base (moyenne, écart-type, médiane...) sur des surfaces définies. Nous avons choisi de prendre comme paramètre la moyenne et l'écart-type de chaque variable.

### Paramétrage : choix des valeurs seuils

Le paramétrage est d'abord accompli sur une petite zone test dont l'ensemble des toitures végétalisées est connue. Puis, les paramètres établis sont testés sur une seconde zone test de l'autre

Les seuils, supérieurs et inférieurs, pour les quatre variables sont choisis suffisamment larges afin de limiter au maximum l'omission de toits verts (faux négatifs). Ce choix entraîne, en contrepartie, la sélection de faux toits verts (faux positifs). On a ainsi une cartographie « optimiste » des toits végétalisés.

### Sélection des toits potentiellement verts et tri

Lorsque les valeurs seuils sont appliquées sur les 60 000 objets initiaux de la ville, la sélection des toits verts est possible. Cette

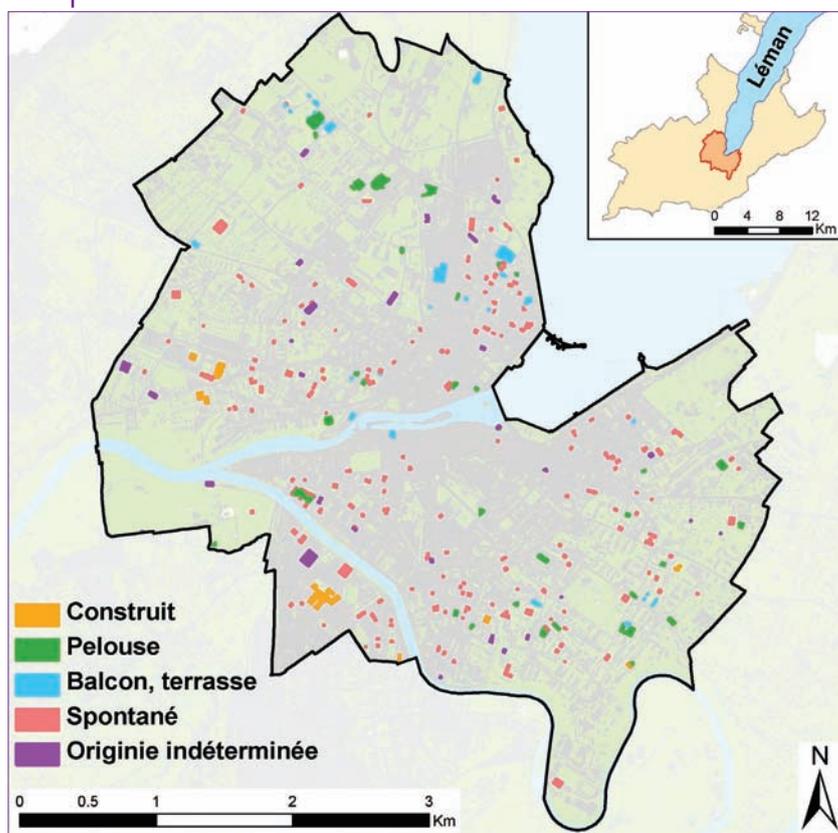


Figure 6 : Carte des toitures végétalisées classifiées selon le type de végétation.

étape conserve 1747 objets qui sont potentiellement des toitures végétalisées : notre modèle rejette donc 97 % des toits de la ville comme non végétalisés. Une seconde étape manuelle est effectuée sur ces 1747 toits retenus pour éliminer les faux positifs : au final 365 toits sont réellement végétalisés. Cela représente 21 % des toits sélectionnés par notre modèle et seulement 0,6 % de l'ensemble des toits de la ville. Sans notre sélection automatique des toits potentiellement verts, une recherche manuelle de ces objets sur les 60 000 polygones n'aurait, évidemment, jamais été envisageable. Cependant, lors de la phase de vérification manuelle, 21 toitures vertes non retenues par notre approche ont été localisées (faux négatifs) : ces toitures présentaient généralement une valeur extrême pour l'une de nos quatre variables de sélection. Ces écarts sont imputables à un ombrage important ou à un déca-

lage entre l'orthophotographie et la couche vectorielle des toits (Tableau 1 et Figure 5).

|        |                 | Réalité               |                         |                |
|--------|-----------------|-----------------------|-------------------------|----------------|
|        |                 | Toits verts           | Non-toits verts         | Total          |
| Modèle | Toits verts     | 365<br>Vrais positifs | 1'382<br>Faux positifs  | 1'747          |
|        | Non-toits verts | 21<br>Faux négatifs   | 58'158<br>Vrai négatifs | 58'179         |
|        | Total           | 386                   | 59'519                  | Total : 59'926 |

Tableau 1 : Tableau comparatif montrant l'efficacité du modèle

Des analyses plus fines ont pu être conduites sur l'ensemble des toitures végétalisées répertoriées. En effet, la sélection comprend de nombreux types de toits. En premier lieu, nous avons donc procédé à une classification manuelle selon le type de végétation car les tentatives de classification automatique classique (*cluster*, *classification supervisée...*) n'ont

pas donné de résultats satisfaisants. Ainsi, nous avons distingué des balcons et terrasses, des pelouses, des toitures extensives agencées, ainsi que de nombreux toits colonisés spontanément par la végétation. Ce dernier type est le plus fréquent (environ 60 % de la sélection) et se retrouve sous la mention de toiture spontanée

Il est à noter que les quartiers récents (du siècle dernier) abritent un nombre plus important de toitures végétalisées, phénomène essentiellement lié à l'évolution architecturale de l'urbanisation. Ainsi le quartier de la « *Vielle Ville* » ne possède aucun toit vert en raison de la forte pente de ses toitures.

Finalement, afin de mieux visualiser l'insertion de ces toitures dans le réseau vert de la ville, une carte de densité (*Kernel density*) a été dressée. Cette carte, couplée aux espaces verts existants et aux forêts, illustre bien la complémentarité des différents éléments verts du paysage. Les toitures végétalisées, outre leur fonction de milieux de substitution,

constituent des zones relais de valeur dans les réseaux biologiques (Figure 7).

## Conclusion

Cette méthode est qualifiée de semi-automatique, car elle nécessite néanmoins quelques étapes manuelles. Cependant,

elle présente l'avantage de limiter le tri et la recherche manuelle de ces toits végétalisés parmi un ensemble restreint de candidats potentiels. Ce tri est indispensable en raison du caractère « optimiste » de la méthode, qui privilégie l'identification de faux positifs, afin de limiter l'omission de vrais positifs.

La méthode ne prend pas en compte les toitures dites « intensives », qui comportent notamment des arbres et arbustes. Ce type de végétation se traduit, dans le MNT, par des valeurs de pente élevées : les pentes calculées à partir du MNS sont celle de la surface la plus haute ; étant donné que la végétation arborée cache le toit, c'est la pente des arbres et arbustes qui est prise en compte.

Certaines tentatives d'affinement ont été évaluées afin d'améliorer la résolution, par exemple choisir la médiane à la place de la moyenne : la médiane est moins influencée par les valeurs extrêmes que la moyenne. Un rognage des bord des toits a également été tenté afin d'éviter les erreurs dues aux effets de bord et au décalage du géoréférencement (*Inner buffer*). Cependant, aucune de ces manipulations n'a fourni de résultats statistiquement meilleurs.

En conclusion, cette analyse a été rendu possible grâce à l'acquisition de données qui n'existaient pas avant, comme les orthophotographies contenant une bande infrarouge, ou le MNS acquis simultanément (données *LiDaR*). Ces informations étaient, jusqu'à

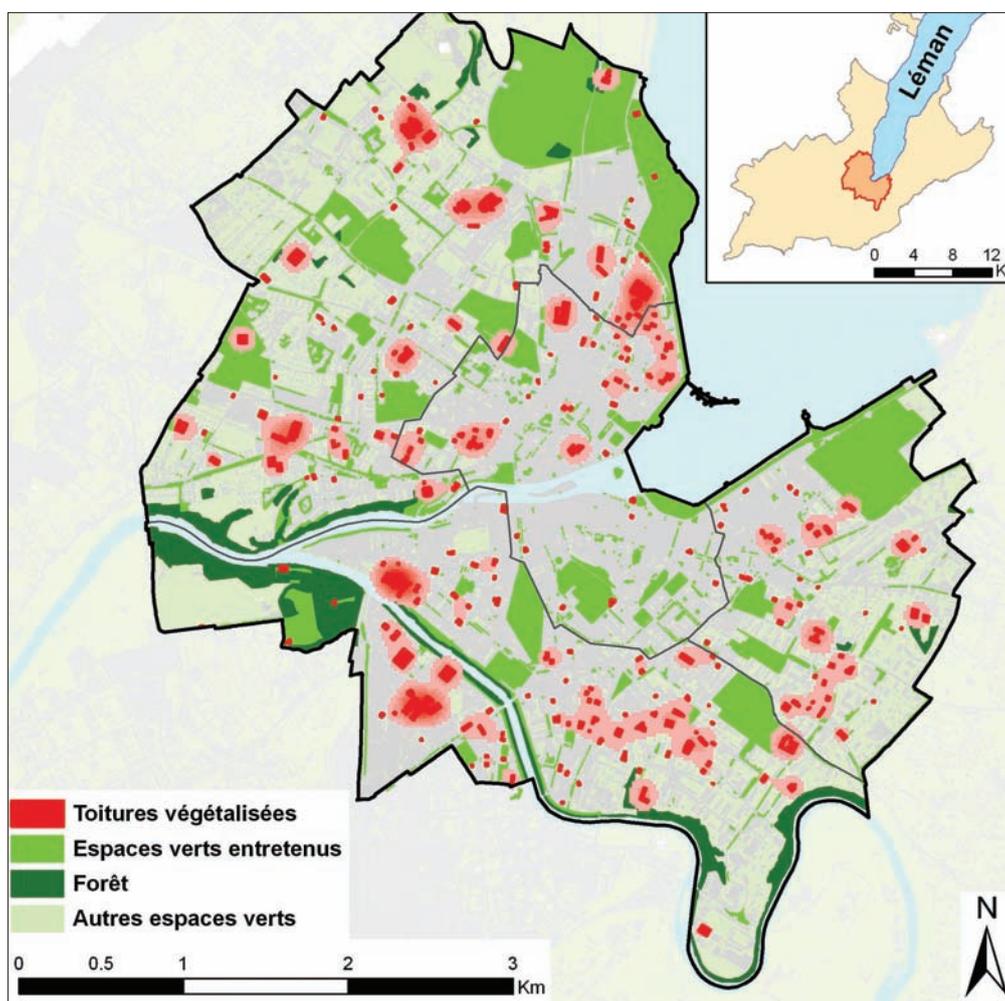


Figure 7 : Carte des toitures végétalisées réparties selon le quartier.

maintenant, réservées à la télédétection et la cartographie à petite échelle. Avec l'amélioration récente de la résolution des orthophotographies, il est possible d'utiliser des techniques de télédétection en zones urbaines des objets de petite taille. Ces apports techniques ouvrent des perspectives nouvelles, notamment pour la gestion de la nature en milieu

urbanisé. Cette approche, sans être complètement automatisée, permet de limiter grandement le travail manuel ; sans une sélection préliminaire, la recherche d'objets aussi rares qu'une toiture végétalisée représenterait un travail trop coûteux. À l'échelle d'une agglomération importante, la recherche uniquement manuelle devient tout simplement impossible. ■

## BIBLIOGRAPHIE

- Office fédéral de l'environnement des forêts et du paysage (OFEP), 1995, Cahier de l'environnement 216  
 Tucker, C.J., 1979, Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of the Environment*, 8 : 127-150  
 Système d'informations du Patrimoine vert (SIPV) : <http://www.ville-ge.ch/cjb/sipv/>  
 Aji concept : toitures végétalisées : <http://www.toiture-vegetalise.com/>  
 Ville de Genève : <http://www.ville-geneve.ch/themes/developpement-durable-energie/engagements-aalborg/>