

Table des matières

1	Introduction.....	3
2	Déroulement de l'étude	4
3	Présentation et typologie des toitures végétalisées	4
4	Préparation de la couche toits	6
4.1	Méthodes	6
4.1.1	Nettoyage des erreurs topologiques.....	6
4.1.2	Mise à jour des toits en 2009	8
4.2	Résultats	10
4.2.1	Nettoyage des polygones qui se superposent	10
4.2.2	Mise à jour des toits en 2009	10
5	Préparation des données sources (Raster)	11
5.1	Méthodes	11
5.2	Résultats	14
6	Digitalisation et analyse des toitures végétalisées.....	15
6.1	Méthodes	15
6.1.1	Analyses séparées des trois variables	15
6.1.2	Analyse globale et classification des toitures.....	18
6.1.3	Photo-détection manuelle.....	21
6.2	Résultats	22
7	Discussions	23
7.1	Analyse de la procédure.....	23
7.1.1	Analyses des résultats obtenus avec Definiens.....	23
7.1.2	Analyses de la classification selon Definiens.....	25
7.1.3	Comparaison des données entre l'analyse par Definiens et l'étude de 2011.....	26
7.1.4	Analyses des toits verts provenant de la couche bâtiment.....	29
7.1.5	Etape finale : Rapatriement de données non comprise dans l'analyse	29
7.2	Analyse des surfaces de toitures végétalisées par commune.....	29
7.3	Les toitures végétalisées sur quels type des toits, qu'en est-il des perspectives ?.....	31
7.3.1	Quels types de toitures végétalisées sur quels types de toits ?.....	31
7.3.2	Quelles sont les perspectives d'utilisation de cette couche ?.....	32
8	Problèmes rencontrés	33
9	Perspectives d'amélioration de la détection.....	35

Cartographie des toitures végétalisées du canton de Genève

10	Conclusion	36
11	Bibliographie.....	37
12	Annexes	39

1 Introduction

Au regard de plusieurs lois fédérales et cantonales (LEaux¹, LPE², LEaux-GE³, LaLPE⁴), de la proposition d'une motion pour une promotion des toitures végétalisées et d'un projet de loi modifiant la LCI⁵ déposé le 29 octobre 2012, les toitures végétalisées sont aujourd'hui un sujet qui fait débat. Les propriétés de ces toitures dites « vertes » sont bien connues : perméables, drainantes en cas de crue, isolantes, tampon thermique et siège d'une bonne biodiversité (Motion pour une promotion active des Toitures végétalisées, Terre et nature, Article Pic Vert). Ce sont autant d'arguments qui pèsent en faveur d'une promotion des toitures végétalisées afin de suivre l'exemple de Berne, Bâle ou encore Lucerne qui sont en avance dans ce domaine.

Dans le cadre de la nature en ville, le canton de Genève va utiliser entre autres, les toits « verts » comme indicateur de biodiversité, mais qu'en est-il de l'état actuel des toitures végétalisées sur l'ensemble du canton de Genève ? La Direction Générale de la Nature et du Paysage (DGNP) a donc mandaté les Conservatoire et Jardin Botaniques de la ville de Genève (CJB) afin de cartographier les toitures végétalisées sur la totalité du canton. Le stage de géomatique s'inscrit ainsi dans ce projet.

Il est important de mentionner qu'un travail de détection semi-automatique des toitures végétalisées a déjà été effectué début 2011 par J. Massy à l'échelle de la ville de Genève.

Ce précédent travail a servi de modèle et de ligne directrice au cours de ce mandat. Toutefois, l'échelle très différente des deux études ainsi que les résultats obtenus en 2011 nous ont confortés dans le choix de développer une méthode n'utilisant pas les mêmes procédés afin d'être plus efficient dans une zone d'étude aussi grande et hétérogène qu'est le canton genevois.

Le travail s'est scindé en trois étapes clés que sont la préparation la couche « toits », la préparation des données raster dites « sources » puis la digitalisation et l'analyse proprement dite des toitures végétalisées.

1 Loi fédérale sur la protection des eaux (LEaux) RS 814.20

2 Loi fédérale sur la protection de l'environnement (LPE) RS 814.01

3 Loi sur les eaux (LEaux-GE) L 2 05

4 loi d'application de la loi fédérale sur la protection de l'environnement (LaLPE) K 1 70

5 Loi sur les constructions et les installations diverses (LCI) L 5 05

2 Déroulement de l'étude

Les Conservatoire et jardin botaniques de la ville de Genève m'ont engagé pour effectuer mon stage sur la cartographie des toitures végétalisées sur l'ensemble du canton de Genève.

Le stage a débuté le 1^{er} novembre 2012 pour se terminer le 31 janvier 2013 (3 mois). Au cours de ce stage j'ai été appuyé deux jours par semaine par Sophie Pasche (indépendante, mandatée par les CJB). Cet appui a permis d'augmenter la force de travail et d'être plus performant dans l'apprentissage des différents logiciels. Une grande partie du stage a été vouée à la préparation de la couche toit (Chapitre 4) et des couches rasters (chapitre 5) nécessaires à l'étude. Le premier travail a consisté au nettoyage et à la mise à jour de la couche toit qui sert de périmètre d'étude à notre analyse. Le but étant de détecter les toitures végétalisées, nous devons disposer de la limite des toits pour ensuite pouvoir travailler sur les variables des rasters situées à l'intérieur de ces toitures. La deuxième étape a concerné la préparation de quatre couches raster (luminosité, indice de végétation, pente, orthophoto) qui soient utilisables par les différents logiciels de traitement. Ce sont les valeurs de pixel de ces rasters qui seront étudiées pour définir si un toit est végétalisé ou non. Finalement, l'étape finale consiste, via le logiciel Definiens, à définir de manière automatique les toitures végétalisées en les classant par type de végétalisation. La clé de cette étude a été de définir les bons paramètres pour obtenir la relation optimale entre la taille des zones d'études et le temps machine (Definiens).

3 Présentation et typologie des toitures végétalisées

Selon l'Office Fédéral de l'Environnement, des Forêts et du Paysage (OFEPF), les toitures végétalisées sont décrites en 3 grands types de végétalisation : la végétalisation intensive, la végétalisation semi-intensive et la végétalisation extensive. La description de ces types de végétalisation (Annexe 1) se réfère à différents paramètres tels que l'épaisseur du substrat, le type d'entretien ou encore le type d'espèces végétales susceptibles d'être implantées.

Notre étude se base sur une détection des toitures végétalisées basée sur des photographies aériennes. La classification des types de végétalisation des toitures va donc légèrement varier de celle proposée par l'OFEPF. D'après l'étude de 2011 les quatre variables retenues pour détecter des toitures végétalisées sont les suivantes : la luminosité, l'indice de végétation, la pente des toitures ainsi que leur surface (Chapitre 5). Par conséquent nous avons essayé de définir quels types de toitures végétalisées nous pourrions potentiellement détecter et sous quelles formes (Photos 1, 2, 3, 4, 5). Grâce à cette analyse nous avons déterminé 3 classes de toitures végétalisées qui peuvent être détectées par la méthode automatique. Puis, avec l'accord de la DGNP, nous avons affiné la classification avec cette fois-ci onze classes de type de végétalisation différentes (Chapitre 6.1.3) reconnaissables lors de la vérification manuelle.

Cartographie des toitures végétalisées du canton de Genève

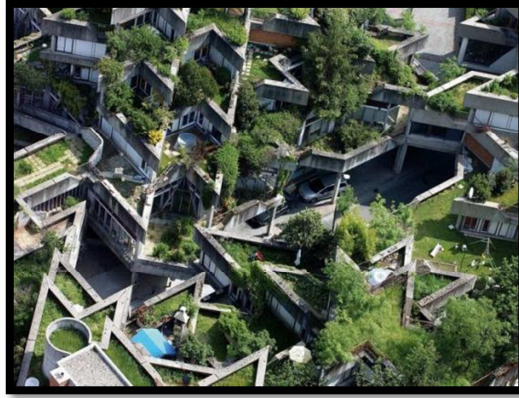


Photo 1 : Toitures végétalisées intensives : végétation dense, structure hétérogène (arbustes, gazons, massifs)



Photo 2 : Toitures végétalisées semi-intensives : végétation dense rase, structure très homogène



Photo 4 : Toitures végétalisées extensives : végétation assez dense, très couvrante et structure homogène (verdure moins éclatante)



Photo 5 : Toitures végétalisées spontanées : végétation peu dense mais très couvrante, structure homogène



Photo 3 : Toitures végétalisées spontanées partielles : végétation très éparse (patch de végétation), structure homogène

4 Préparation de la couche toits

La couche «SDO.CAD_BATIMENT_HORSOL_TOIT » mise à disposition par le Service de la Mensuration Officielle (SEMO) est l'élément clé qui va permettre de définir la limite des toitures du canton (289'343 objets). Lors de l'analyse des toitures végétalisées c'est cette couche, entre autre, qui va être traitée avec le logiciel Definiens : pour cela, chaque polygone doit être unique et ne pas se superposer à un autre.

A la base, la couche «SDO.CAD_BATIMENT_HORSOL_TOIT » renferme beaucoup d'erreurs topologiques de superposition ainsi que de chevauchement. Il a donc fallu dans un premier temps nettoyer la donnée afin d'annuler tous ces conflits. Dans un deuxième temps, nous constatons que la couche «SDO.CAD_BATIMENT_HORSOL_TOIT » n'est pas à jour en 2009 (année durant laquelle a été effectuée les vols LIDAR et orthophoto utilisés pour la suite du travail, cf. chapitre 5.1). Ceci a pour conséquence des toits existants en 2009 mais non digitalisés et des toits absents alors qu'ils sont bien présents en 2009. C'est par l'intermédiaire de plusieurs manipulations sur Arcmap qu'une couche de toits cohérente a pu être produite.

4.1 Méthodes

Le canton a été divisé en trois zones afin de minimiser l'incidence du poids des fichiers au niveau des logiciels de traitement utilisés pour ce mandat (FME, Definiens). Cette séparation a été choisie en fonction des barrières naturelles que sont l'Arve, le Rhône, le lac Léman et de la frontière avec la France (Soit : Rive droite, Rive Gauche, Rhône-Arve) afin d'éviter la probabilité de couper un toit en deux. Nous verrons par la suite qu'il a fallu encore diviser nos zones (cf. chapitre 5.1). De plus, notons que les toits de l'enclave de Céligny ont subi un nettoyage des erreurs topologiques mais ne seront pas intégrés au niveau de l'analyse par Definiens (cf. chapitre 7.1.5).

4.1.1 Nettoyage des erreurs topologiques

La sélection des polygones toits qui présentent des conflits de superposition est la première étape de ce nettoyage. Pour ce faire, l'outil « topology » (Arcmap) a été utilisé avec pour règle « must not overlap ». Tous les polygones impliqués sont ensuite sélectionnés et exportés en tant que couche à part entière. Ensuite, l'outil « Union » sur l'EGID⁶ suivi d'un « Multipart to Singlepart » (Arcmap) permet d'individualiser les polygones impliqués dans ces chevauchements. Par l'intermédiaire du logiciel FME les toits qui se superposent et ceux qui ne se superposent pas peuvent être identifiés (Figure 1).

Les trois sorties du transformer « Matcher » sont envoyées dans une Géodatabase personnelle (mdb) : « matched », « not matched » et « single matched ».

⁶ Numéro fédéral du bâtiment (EGID) qui est unique à chaque bâtiment (SITG)

Cartographie des toitures végétalisées du canton de Genève

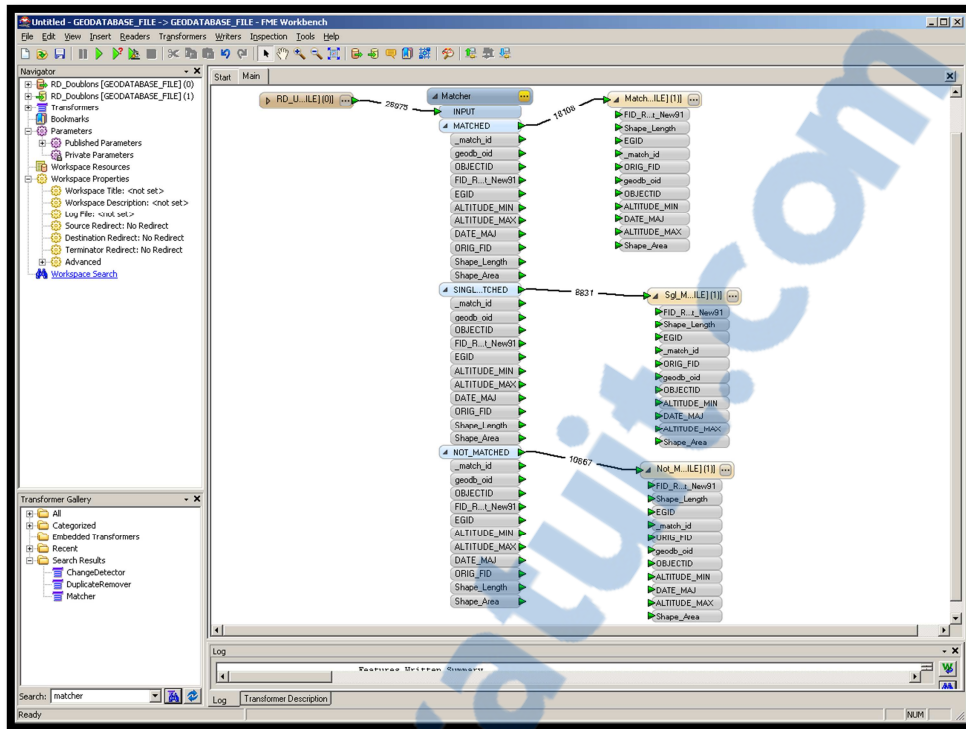


Figure 1: Présentation du transformeur Matcher permettant de définir les polygones qui se superposent et ceux qui ne se superposent pas

Une requête SQL dans Access sur la couche « matched » permet de déterminer les doublons, triplons voir quadruplons puis de sélectionner le polygone dont l'altitude maximale est la plus élevée (Figure 2). En effet, ce choix de l'altitude maximale permet, dans le cas où deux, trois voire quatre polygones se superposent, de ne garder que celui du dessus car c'est ce dernier qui est visible sur l'orthophoto et sur le modèle numérique de Surface (MNS).

Champ	Table	Opération	Tri	Afficher	Critères	Ou
match_id	Matched	Regroupement	Compte	<input checked="" type="checkbox"/>	>1	
OBJECTID_1	Matched			<input checked="" type="checkbox"/>		
ALTITUDE_MAX	Matched			<input checked="" type="checkbox"/>		

Figure 2 : Figure représentant la requête graphique effectuée sur Access

Une fois ce travail effectué, un « join » entre la table de la couche « single matched » et celle de la nouvelle couche « matched sans doublons » est appliqué sur l'ID des polygones afin de rapatrier l'altitude correcte dans la couche « single matched ». Cette dernière subit un « merge » avec la

couche « not matched », suivi d'un « dissolve » par l'EGID qui permet d'obtenir une couche propre des toits impliqués auparavant dans les conflits de superposition. Cette dernière couche est fusionnée avec celle des toits non impliqués dans des problèmes de superposition.

Finalement un « Multipart to Singlepart » est appliqué pour séparer les polygones qui n'avaient pas subi ce traitement auparavant.

4.1.2 Mise à jour des toits en 2009

Plusieurs problèmes de mise à jour ont été identifiés en comparant la couche des toits avec la couche des bâtiments « SDO.CAD_BATIMENT_HORSOL_2009 » ou avec la réalité de l'orthophoto 2009. Constations faites, beaucoup de différences existent et doivent être minimisées. Pour cela, les toits qui n'ont plus de bâtiments affiliés ont dû être purement et simplement éliminés. Enfin les bâtiments existant et n'ayant pas d'équivalent dans la couche toits ont été rapatriés en tant que toiture.

4.1.2.1 Etape 1 : Elimination des toits qui ne correspondent plus à un bâtiment en 2009

La figure 3 permet de visualiser le type de problèmes rencontrés. Pour éliminer ce genre de toits erronés nous avons analysé la couche toits avec la couche bâtiment « SDO.CAD_BATIMENT_HORSOL_2009 »⁷.

Une sélection inversée d'un select by location (Arcmap) sur l'intersection des polygones toits avec les polygones bâtiments nous donnent tous les toits qui n'ont pas d'intersection avec le bâti. Un join permet de lier la couche toit avec la couche bâtiment sur l'EGID. Un select by attribute « EGID IS Null » sur la sélection du « selection by location » permet de déterminer tous les toits qui ne correspondent plus à un bâtiment, ils pourront être définitivement éliminés.

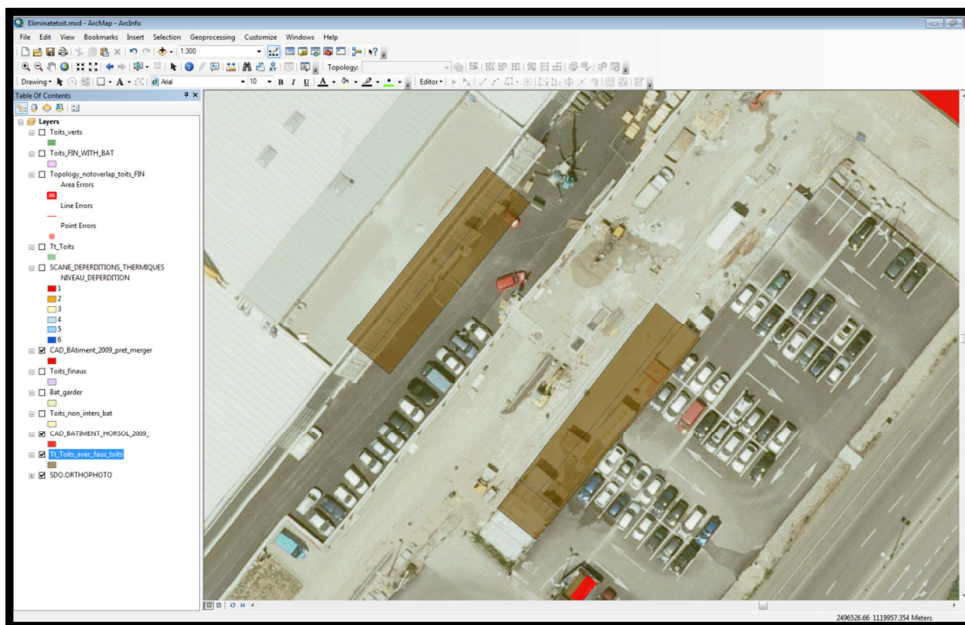


Figure 3 : Exemple de deux toits de bâtiments qui n'existent plus en 2009

⁷ La couche « SDO.CAD_BATIMENT_HORSOL » disponible est « trop à jour » (nouvelles constructions) car trop de bâtiments sont identifiés alors qu'en 2009 ils n'existaient pas. C'est pourquoi elle n'est pas utilisée.

Une fois effacée, une bonne partie des toits initialement sélectionnés par le « select by location » restent sans réponse, la même sélection par attribut mais cette fois en tant que nouvelle sélection permet de sélectionner les polygones toits qui n'ont pas d'EGID.

Deux raisons expliquent cet EGID « Null »:

- Le bâtiment n'existe plus mais touche ou coupe un autre bâtiment du shape « SDO.CAD_BATIMENT_HORSOL_2009 »
- Le bâtiment n'a pas changé de toitures en revanche une rénovation a pu être effectuée, ce qui a engendrer une réaffectations de l'EGID.

Un dernier travail est tenté pour éliminer une partie des toits sélectionnés précédemment. Une « selection by location » est utilisée pour définir les bâtiments qui sont complètement inclus sous les toits, ces objets sont scannés manuellement pour les contrôler afin de les effacer si la situation le demande.

4.1.2.2 Etape 2 : Rapatriement des bâtiments existants en 2009 dont les toits n'existent pas encore

Avec la couche « SDO.CAD_BATIMENT_HORSOL_2009 » un join d'EGID est effectué avec la couche Toits précédemment délestée des toits n'existant plus. Grâce à un « selection by attributes » avec « Toits_EGID Is Null » suivis d'un « select by location » sur l'inverse de l'« intersect », tous les bâtiments sélectionnés qui ne touchent pas les toits peuvent être ainsi importés dans la couche des toitures (ex. : Figure 4).

Là aussi un travail manuel est effectué sur les plus gros éléments afin de vérifier si leur toits correspondant existent ou non.

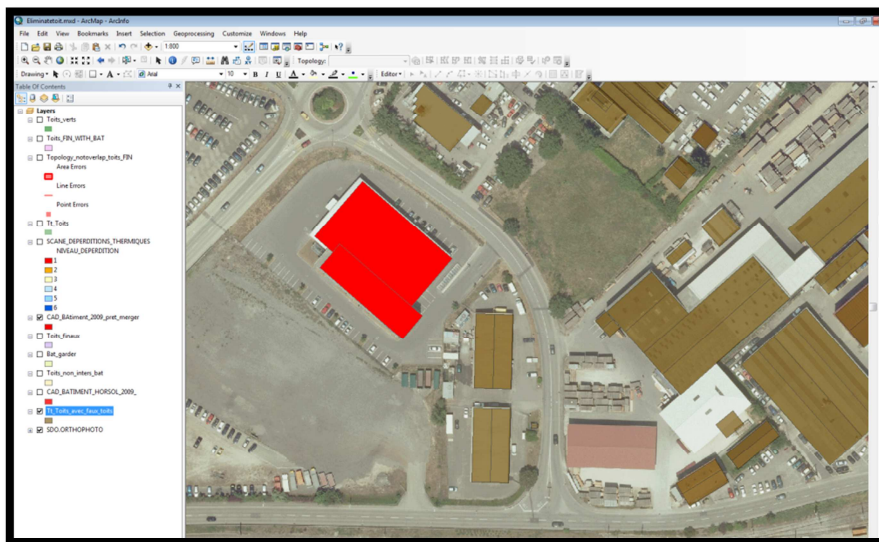


Figure 4 : Exemple de toits non digitalisés sur un bâtiment bien présent en 2009 (en rouge)



4.2 Résultats

4.2.1 Nettoyage des polygones qui se superposent

Le tableau 1 permet de visualiser ce qu'a représenté le travail de nettoyage des polygones toits

Tableau 1 : Récapitulatif du nombre de polygones après chaque étape lors du nettoyage des polygones qui se superposent

	Nombre polygones initiaux	Polygones présentant des erreurs topologiques	Polygones sans erreur topologique	Polygones dans couche Matched	Polygones dans couche Sgl_Matched	Polygones dans couche Not Matched	Nombre polygones finaux
Rive Droite	93'486	11'370	82'116	18'108	8'831	10'867	91'586
Rive Gauche	112'491	7'788	104'703	11'704	5'629	7'171	111'367
Rive Rhône-Arve	82'006	15'252	66'754	23'898	11'755	14'653	78'930
Total	287'933	34'410	253'573	53710	26'215	32'691	281'883

Une partie des erreurs trouvées lors de ce travail ont été envoyées au SEMO afin de les aider et les encourager à une mise à jour de leurs données.

4.2.2 Mise à jour des toits en 2009

4.2.2.1 Etape 1 : Elimination des toits qui ne correspondent plus à un bâtiment en 2009

Un nombre de 1'350 polygones ont été éliminés car n'avaient pas d'EGID et d'intersection commune avec la couche « SDO.CAD_BATIMENT_HORSOL_2009 ». 1'659 objets présentaient malgré cela un litige, 236 ont été passés en revue manuellement pour en éliminer au final 251 éléments. En effet, si un polygone faux était à côté d'autre présentant une erreur non sélectionnée dans les 236, ils étaient à leur tour éliminés. Il reste finalement 1'418 polygones sur lesquels le doute sur leur justesse est toujours présent. Sur les 280'288 objets toits finaux cela représente 0.5% d'erreur, ce qui est acceptable au vu du travail que cela aurait demandé de vérifier les 1'692 éléments.

4.2.2.2 Etape 2 : Rapatriement des bâtiments existants en 2009 dont les toits n'existent pas encore

Notons que 5'026 éléments ont été importés directement car ils n'avaient pas d'EGID et d'intersection avec la couche Toits. 2'019 éléments toits présentaient encore un litige, 349 éléments sont vérifiés à la main. Au total, 5'080 éléments supplémentaires sont importés dans la couche toits, il reste encore 1'660 éléments litigieux. Ce qui correspond là aussi à un faible pourcentage du total des bâtiments (2%). Notons qu'en scannant manuellement, une grande partie des bâtiments ne devaient pas être importés en tant que toits, on considère donc que le nombre de bâtiments de cette couche finale présentant une erreur reste faible.

En sortie, nous obtenons une couche Toits n'ayant plus de problème de topologie et qui minimise au maximum les erreurs de toits et de bâtiments existant ou non.

La couche « SDO.CAD_BATIMENT_HORSOL_TOIT » comprenait initialement 287'933 objets toits. Après la première étape de nettoyage des doublons, 281'883 objets subsistaient. Suite à la deuxième et troisième étape d'élimination de toits et d'importation de bâtiments ont finalement mis en avant une couche finalisée « Toits » 2009 comprenant 284'826 objets.

4.2.2.3 Étape 3 : Limiter l'effet de marge dû au décalage avec les orthophotos

Le travail de J. Massy a démontré qu'il pouvait exister un effet de marge. Il implique au bord des toits des valeurs de pente extrêmes dues au décalage entre le bâti et le MNS. Il est important de noter qu'initialement, un décalage de parfois quelques mètres existe entre la couche toits et l'orthophoto situé en dessous. Ce phénomène va réduire indéniablement l'efficacité de l'analyse des toitures végétalisées. C'est ainsi que le choix de rogner de 60 cm les bords des toits s'est révélé nécessaire, car il permet d'éliminer l'incidence d'une partie des valeurs pentes extrêmes de pixel.

Enfin, le parti a été pris d'éliminer les polygones toits inférieurs à 15 mètres carrés car ils ne correspondent pas à la demande du canton (outil Erase, Arcmap), 155'919 éléments seront finalement analysés par le logiciel Definiens.

5 Préparation des données sources (Raster)

Cette étape vise à automatiser le traitement (dégradation de la taille des pixels et de la résolution graphique) et l'assemblage des différentes tuiles rasters sources utiles à notre analyse. Le cahier des charges du mandat ainsi que le travail de J. Massy indique que quatre variables principales servent à modéliser les toitures « vertes » : **la pente, la luminosité, la présence de végétation et la surface**.

5.1 Méthodes

Sachant que la variable surface a été réglée dans la préparation de la couche toit (chapitre 4.2.2.3), les trois autres variables découlent des deux données de base suivantes : l'orthophoto et le modèle numérique de surface (MNS).

En effet, l'orthophoto formée de 4 canaux (rouge, vert, bleu, proche infrarouge) nous permet de calculer deux variables indispensables à notre travail :

- raster de l'Indice de végétation (Normalized Difference Vegetation Index ou NDVI) ;
- raster de luminosité (Brightness).

Le MNS permet d'obtenir la troisième variable qu'est le raster de pente (Slope). Les caractéristiques des données sources mises à disposition par le SEMO sont résumées dans le tableau 1.

Tableau 2 : Caractéristiques des données brutes mises à disposition par le canton (SITG)

Type	Format	Nombre de tuiles	Taille de la tuile (en m)	Taille de pixel (en m)	Résolution graphique (en bit)	Nombre de canaux	Géo-référencement
Orthophoto 2009 (juin)	.tif	479	1000 X 1000	0.1	32	4 (Vert, Rouge, Bleu, Infra-Rouge)	CH 1903+_LV95
Orthophoto 2011 (mars)	.tif	381	1000 x 1000	0.05	32	3 (Vert, Rouge, Bleu)	CH 1903+_LV95
MNS 2009 (juin)	.tif	1616	500 x 500	0.1	32	1	CH 1903+_LV95

Notons que l'orthophoto 2011 n'a pas pu être utilisée en tant que donnée source car il n'y avait pas de canal proche Infra Rouge nécessaire au calcul du NDVI. De plus, aucun vol LIDAR n'a été effectué en 2011, ceci aurait impliqué des décalages et des incohérences lors du traitement de la pente sur des bâtiments construits après 2009.

Tout d'abord, une décision délicate à due être prise sur le choix de la taille de pixel ainsi que la résolution graphique qui devaient rester précise tout en gardant des fichiers assez léger pour être compatible avec les différents logiciels utilisés (principalement Definiens et FME). Nous avons dégradé sur une zone test les pixels à 60, 50, 40, 30 cm. Puis une trentaine de points situés au niveau des bords de toits ou des contrastes de couleur ont été interrogés pour obtenir leur valeur. En comparant la moyenne des résultats ainsi que l'écart type des valeurs nous avons remarqué que la résolution 40 cm est le meilleur compromis entre une dégradation minimum et une définition suffisante.

Avec ces conditions et grâce au logiciel FME, la sélection, le traitement (dégradation à 40 cm) des tuiles concernées et leur transfert dans un nouveau dossier ont été automatisés (Figure 5 et 6). Notons que deux étapes dans FME diffèrent entre le traitement des MNS et des orthophotos car ces dernières sont trop lourdes. Si l'on veut qu'FME acceptent de mosaïquer les tuiles par la suite, nous devons les dégrader en 8 bit. De plus les canaux sont traités séparément puis sont rassemblés dans le bon ordre : pour cela, un système de boucle a été utilisé (« Custom Transformer », FME).

L'étape suivante consiste à assembler des tuiles traitées avec le premier script FME. Pour des raisons de compatibilité avec FME et Definiens nous avons été contraints de subdiviser en trois les trois zones initialement prévues. En effet, FME ne supporte pas les fichiers de plus de 4 GB alors que Definiens utilise trop de temps machine avec des gros fichiers dont la résolution est élevée (pas de données précises, mais avéré avec la pratique). C'est grâce au Transformer « mosaicker » que les tuiles ont été mosaïquées en une nouvelle et unique tuile.

Une fois les orthophotos des zones obtenues, le raster NDVI et le raster de luminosité sont calculés pour chaque zone. Nous avons constaté à posteriori que le calcul du NDVI et de luminosité ne fonctionnent pas avec des rasters en 8 bit, il a donc fallu redéfinir les quatre canaux des orthophotos en 32 bit avec des valeurs en « floating point » (outil copy raster, ArcMap)(Figure 6).

Le NDVI se calcul par la formule suivante :

$$\text{NDVI} = (\text{canal PIR} - \text{canal rouge}) / (\text{canal PIR} + \text{canal rouge})$$

Les valeurs de NDVI s'échelonnent entre -1 et 1 sachant la végétation est décelée au-dessus de la valeur 0.

La luminosité(Brightness) a été calculée par cette formule :

$$\text{Brightness} = \text{canal rouge} + \text{canal vert} + \text{canal bleu}$$

Note : ces deux couches ont été obtenues avec l'outil Raster calculator (ArcMap)

Pour créer le raster de pente (Slope), l'outil Slope d'Arcmap permet d'obtenir une couche raster avec pour chaque pixel une valeur de pente en degré.

Cartographie des toitures végétalisées du canton de Genève

Figure 5 : Affichage sur FME de la fonction "loop"

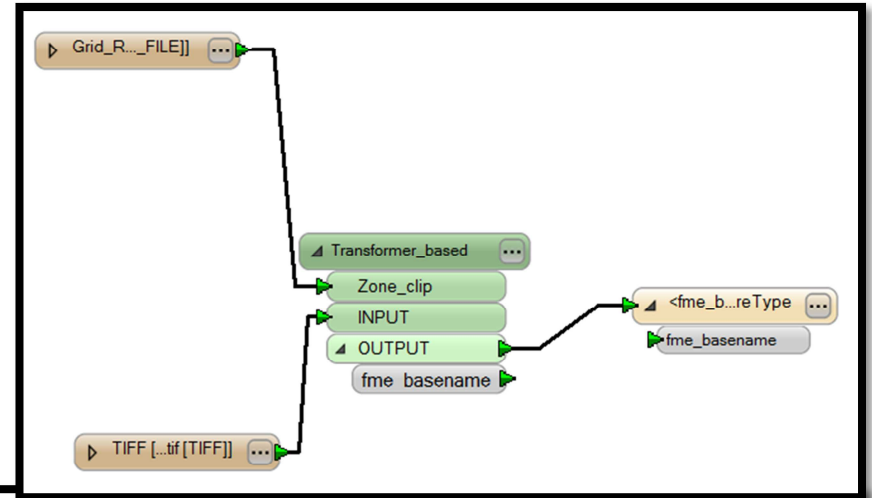
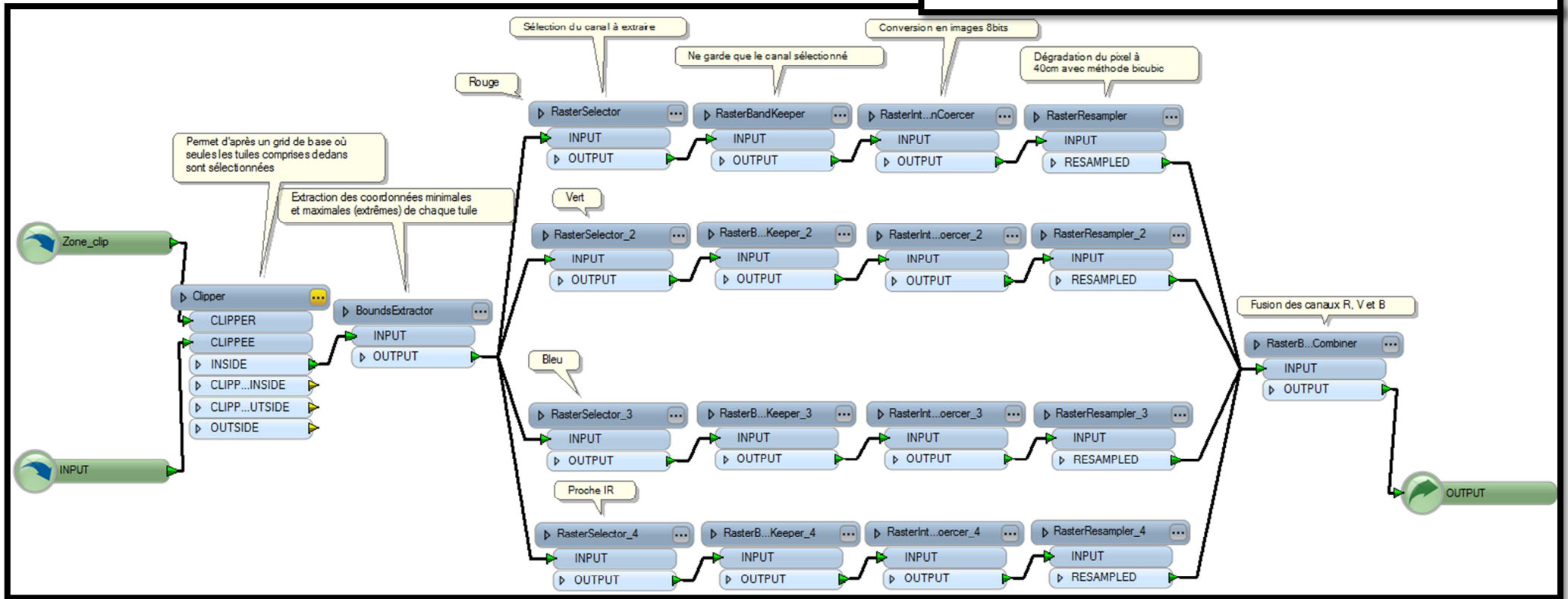


Figure 6 : Vision sur FME des transformateurs présents à l'intérieur de la fonction "loop"



5.2 Résultats

En sortie, pour chaque des 9 zones (Annexe 2), nous avons en format .tif les rasters suivant : NDVI (32 bit, floating point), Brightness (32 bit, signed) et Slope (32 bit, floating point) ainsi qu'une orthophoto 2009 (8 bit, unsigned). Ce sont ces fichiers qui seront les fichiers utilisés par Definiens dans l'analyse des toitures végétalisées.

Nous avons remarqué par la suite, que Definiens a beaucoup de difficultés à segmenter une zone dont les valeurs de pixels sont identiques quand la majeure partie de la zone est très hétérogène. Une solution a été trouvée, elle consiste à remplacer par des valeurs fictives les valeurs constantes situées hors du champ des orthophotos. Pour cela, l'élimination des valeurs non voulues est rendue possible par l'outil « extract by mask » (Arcmap). Ensuite, un raster de valeurs aléatoires (« create random raster », Arcmap) est créé avec une taille de pixel de 1.2 m, avec un algorithme de calcul de type « integer » (avec deux valeurs : 1 et 2). Finalement, l'outil « mosaic to new raster » permet d'assembler les deux précédents rasters (Figure 7, 8 et 9) avec une taille de 0.4m avec la condition que les valeurs fictives remplacent les « nodata » du raster découpé.



Figure 7 : NDVI avec les valeurs constantes correspondant au gris foncé (pixel value : 0.000) et en blanc (pixel value : no data)

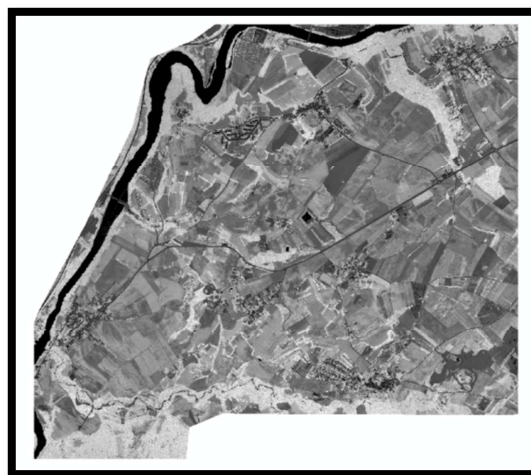


Figure 8 : NDVI ayant subi un extract by mask (Arcmap)

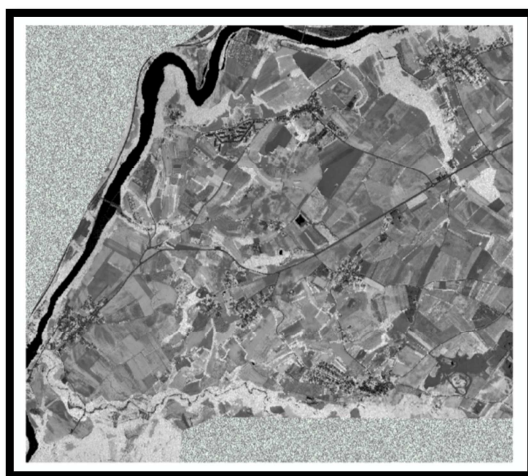


Figure 9 : NDVI ayant subi un "Mosaic to new raster" (Arcmap) entre le NDVI découpé et un raster « random »

6 Digitalisation et analyse des toitures végétalisées

Le travail de classification s'appuie sur la couche des toits nettoyés et les rasters produits lors des étapes précédentes (Bright, NDVI, Slope, Orthophoto). Le logiciel Definiens permet une segmentation des valeurs des différents rasters en fonction d'une « thematic layer » (ici la couche toit). Les toitures végétalisées doivent être classées en grande catégories telles qu'intensifs, extensifs ou spontanés et Definiens est un logiciel qui permet d'effectuer ce type de hiérarchisation. Il faut noter que les neuf zones sont traitées séparément pour que Definiens puisse fonctionner correctement.

Ce travail s'est déroulé en deux étapes :

Etape 1 : Analyses séparées des trois variables

Elle consiste à segmenter l'intérieur des objets toits en fonction des trois variables (Brightness, NDVI et Slope) de manière indépendante. Chaque variable est analysée pour en définir un intervalle de valeurs qui permet de sélectionner les toitures potentiellement vertes de façon peu restrictive. Le résultat est transféré sur Arcmap pour que les trois couches liées aux trois variables d'études soient jointes entre elles puis avec la couche toit initiale. Ainsi, la couche de sortie permet de différencier les toits qui répondent positivement aux trois variables et les autres.

Etape 2 : Analyse globale et classification des toitures

Elle permet l'analyse globale de toutes les variables de façon plus précise avec comme « thematic layer » cette nouvelle couche. C'est avec une utilisation plus ciblée des valeurs de chaque variable que l'affinage sur la potentialité qu'un toit soit vert s'effectue. La mise en place d'une classification permet de cibler la sélection par type de toitures potentiellement vert. Malgré tout, nous allons constater qu'un travail non négligeable d'analyse manuelle des toitures végétalisées est inévitable pour vérifier le choix du logiciel et ajouter une typologie des toitures végétalisées plus cohérente.

6.1 Méthodes

6.1.1 Analyses séparées des trois variables

Pour chaque variable (Brightness, NDVI, Slope) le même procédé est utilisé avec des valeurs seuils différentes. La Brightness va être utilisée comme exemple dans la suite de l'explication de la procédure.

Une segmentation est effectuée par l'outil « chessboard » qui permet de segmenter les rasters en fonction des périmètres des polygones toits (figure 10). Nous assignons un 1^{er} niveau de travail appelé « ToitsYN » et une couche appelée « Toits » dont les paramètres de classification permettent de visualiser les valeurs des rasters à l'intérieur de la couche « Toits ».

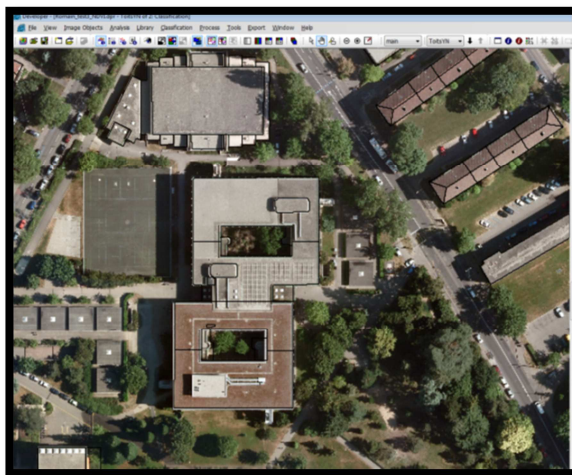


Figure 10 : Segmentation des toits à un niveau 1 avec l'outil "chessboard"

Les rasters subissent une nouvelle segmentation effectuée par l'outil « multiresolution segmentation », elle se base, dans notre cas sur la valeur des pixels de la variable Brightness uniquement. La finesse de la segmentation a été définie de manière empirique, le but étant de segmenter au plus juste en évitant une sur-segmentation. Cette segmentation est assignée à un 2^{ème} niveau : ici appelé Bright (Figure 11). Elle aussi, est liée à une couche «Toits_Bright » dont la classification permet de visualiser le découpage du 2^{ème} niveau à l'intérieur de la couche « toits ».

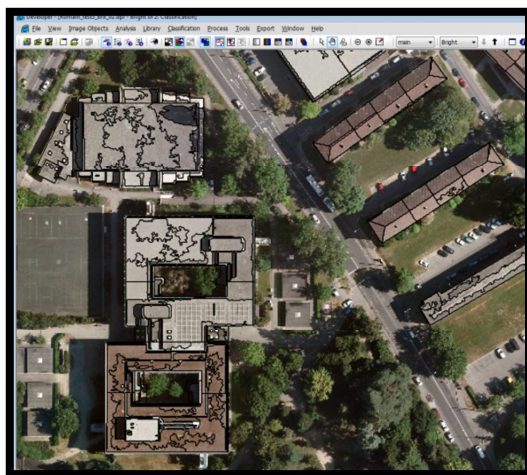
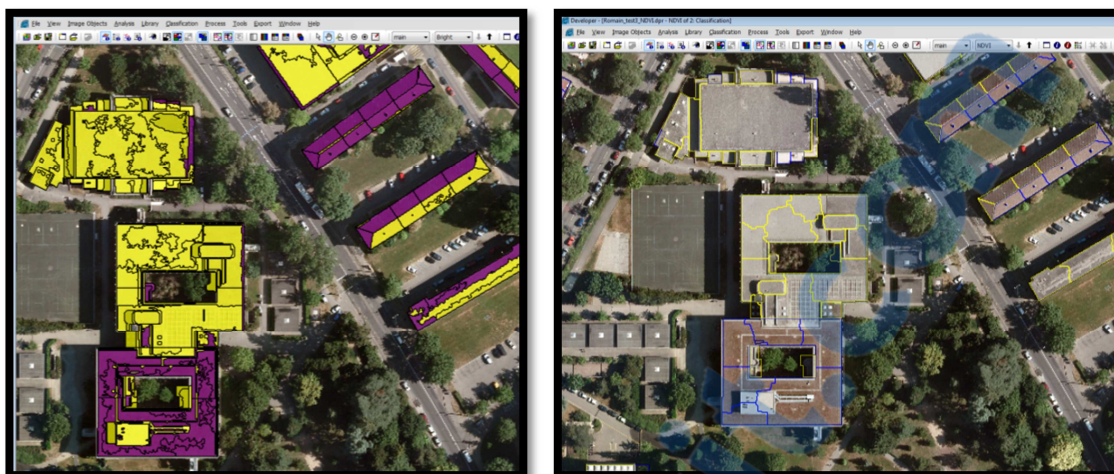


Figure 11 : Segmentation en fonction de la variable Brightness (2^{ème} niveau)

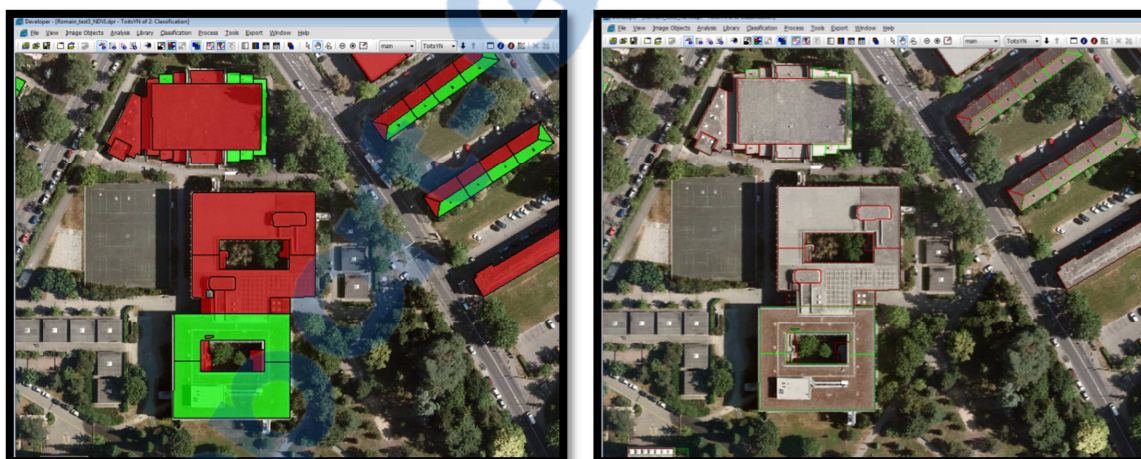
L'étape qui suit permet de déterminer au 2^{ème} niveau un intervalle des valeurs de Brightness où la surface est considérée comme potentiellement végétalisée. Cette sélection est rapportée au 1^{er} niveau sous la forme de seuil de pourcentage du nombre de pixel du 2^{ème} niveau (sélectionnés dans l'intervalle définit au niveau 2) par rapport au 1^{er} niveau. Cette méthode est plus précise qu'une simple moyenne de la Brightness à l'échelle du polygone toit non segmenté (1^{er} niveau).

La « Classification » est un outil qui permet d'effectuer cette définition de l'intervalle de Brightness (niveau 2). L'intervalle de valeur a été premièrement testé sur la base des valeurs proposées dans le travail de J. Massy et ont été redéfinies de manière empirique afin de prendre une grande partie des zones potentiellement vertes. Dans notre cas, l'intervalle de valeur de Brightness a été défini entre 300 et 425 (Figures 12).



Figures 12 : En violet, les polygones répondant positivement à l'intervalle des valeurs de Brightness (ici $300 < \text{Brightness value} \leq 425$)
Sur le polygone en du bas, on constate une super structure non verte (jaune) qui n'a pas été sélectionnée positivement car trop brillante.
(2^{ème} niveau)

Au niveau « Toits_YN » (niveau 1), une classification liée à une couche « Toits_Bright_OK » est de nouveau ajoutée avec une requête qui définit la règle suivante : si les objets segmentés au niveau 2 représentent plus de 25 % des polygones toits (niveau 1), alors le polygone toits sera sélectionné positivement (Figures 13).



Figures 13 : En vert, les polygones toits répondant positivement à leur potentiel d'être végétalisées selon
l'analyse de la variable Brightness (pourcentage de surfaces sélectionnées du niveau 2 par rapport au polygones du niveau 1 > 25%)
(1^{er} niveau)

Cette démarche est répétée pour la variable Pente et la variable NDVI sur chacune des neuf zones. Le temps machine pour effectuer la « multiresolution segmentation » est très variable selon la taille de la zone, il se situe entre 30 min et 4 heures.

En résumé pour les variables pentes et NDVI:

Pour la pente, nous estimons que les toitures peuvent être végétalisées si l'intervalle des valeurs de pente se situe entre 0° et 12° au 2^{ème} niveau (Figure 14). Ainsi au 1^{er} niveau, une couche « Toits_pente_ok » sélectionne les polygones si plus de 25% des « toits_pente » ont été sélectionnés au niveau 2 (Figure 15).

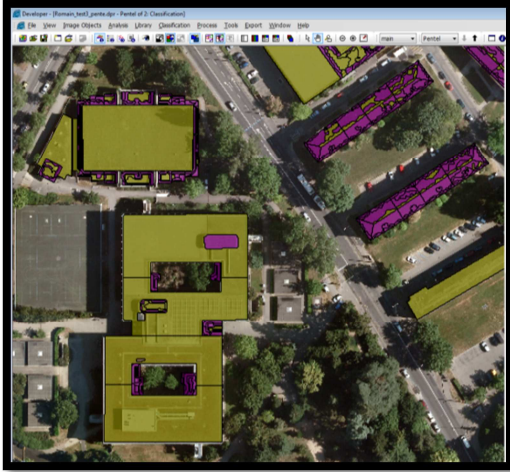


Figure 15: Visualisation des polygones de la segmentation du 2ème niveau sélectionnés positivement à notre requête (en beige)

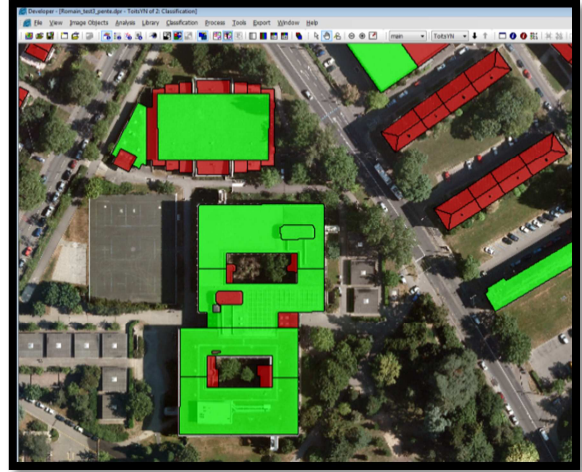


Figure 14 : Visualisation des polygones du 1er niveau sélectionnés sur la base de la sélection précédente (en vert)

Pour le NDVI, l'intervalle de NDVI choisit se situe entre -0.12 et 1 au niveau 2. La couche « toits_NDVI_OK » du niveau 1 sélectionne les polygones si plus de 25% des « toits_NDVI » ont été sélectionnés au niveau 2.

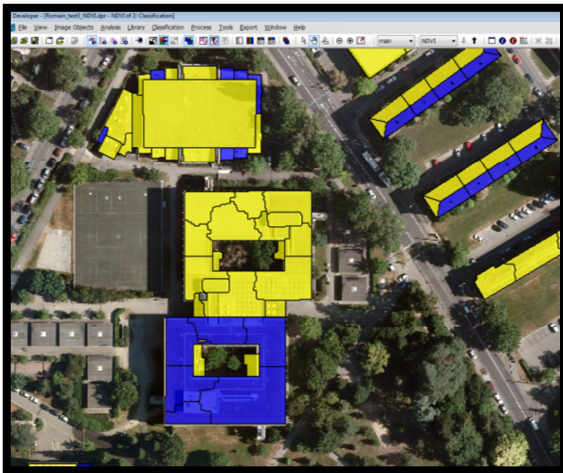


Figure 17 : Visualisation des polygones de la segmentation du 2ème niveau sélectionnés positivement à notre requête (en bleu)

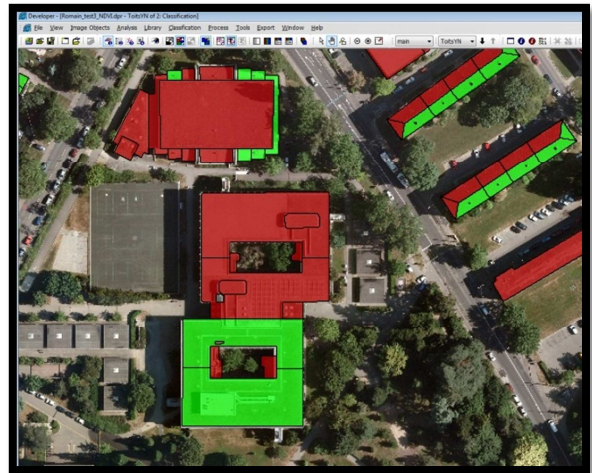


Figure 16 : Figure Visualisation des polygones du 1er niveau sélectionnés sur la base de la sélection précédente (en vert)

La dernière étape permet d'obtenir une couche en format shape qui est exportée dans Arcmap. Les trois couches liées aux variables sont identifiées séparément pour être ensuite jointes avec la couche toits de base qui aura des champs nouveaux que sont la Brightness_OK, NDVI_OK et Slope_OK. Ces champs seront utilisés dans l'étape suivante.

6.1.2 Analyse globale et classification des toitures

Durant cette nouvelle étape, les rasters Brightness, NDVI, Slope, Orthophoto sont tous importés en tant qu'« images layers » et la couche Toits avec les champs calculés à l'étape précédente est importée comme « thematic layer ».

Selon le même principe que précédemment expliqué, les rasters sont délimités en fonction des polygones toits (« chessboard »). Ce qui diffère, se situe au niveau de la deuxième segmentation (multiresolution segmentation) car, elle s'effectue avec la prise en compte des trois variables en

même temps en leur attribuant une pondération. Ainsi le poids de la valeur de pente est de 15, celle du NDVI est de 10 et enfin celle de la Brightness est de 5. Ce choix a été effectué au regard de la première étape qui a démontré que le facteur le plus limitant est la variable pente, le NDVI est quant à lui le paramètre le plus important mais pas au niveau de la première étape (chapitre 6.1.1) car trop permissive.

L'intégration d'une classification des toits végétalisés peut commencer. Pour ce faire, des couches sont ajoutées au niveau 1 et 2, et des classifications y sont liées de manière différente.

Premièrement, une couche «Toits_NON_VEGE» liée à une classification qui détermine des valeurs définissant des toits non végétalisés permettra de les éliminer lors de la classification proprement dite des toits verts.

Une classification « Toits_intensifs_Grands » détermine les toitures qui ont des structures végétalisées très développées tels que des massifs ou des jardins. Pour sélectionner ces structures, il est nécessaire de ne pas prendre en compte la variable pente car la présence d'un arbuste peut rendre la valeur d'un pixel très haute. Par contre il est nécessaire qu'au niveau 2 un intervalle extrêmement restrictif du NDVI soit déterminé afin de choisir uniquement les polygones très fournis en végétation (Figures 18 et 19).

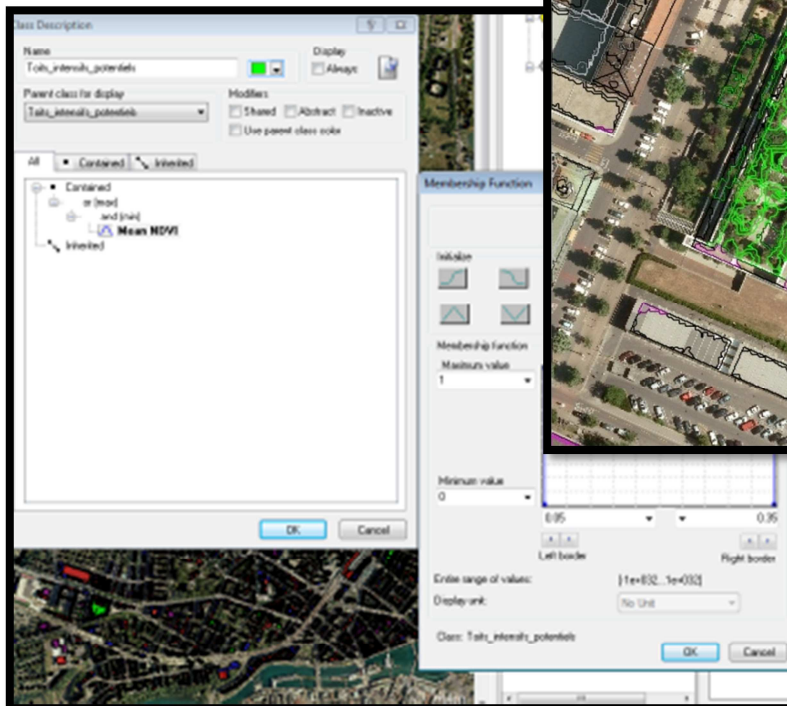


Figure 19 : Classification de la couche du niveau 2 en fonction d'un intervalle de valeur de NDVI très restrictive (condition à une requête)

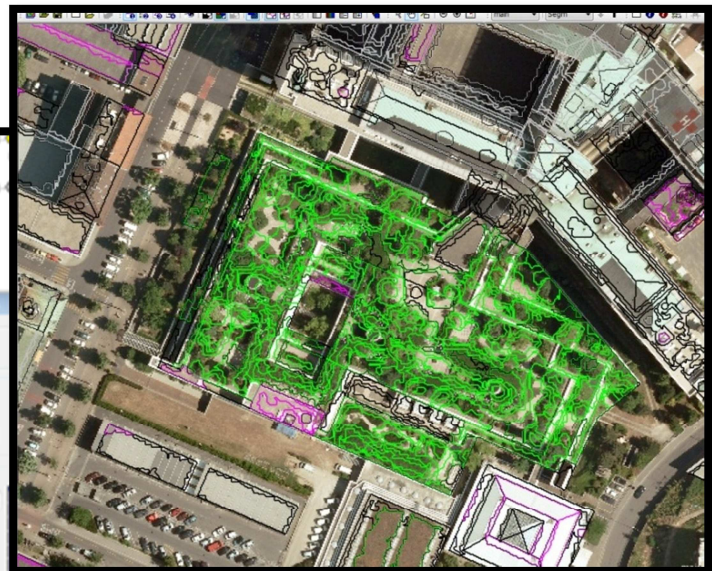


Figure 18 : Visualisation du résultat demandé par la requête de la figure 15 (Hôpital cantonal)

Au niveau 1, plusieurs requêtes forme une condition et plusieurs conditions différentes permet de récupérer en fonction de plusieurs paramètres tels que la surface, la proportion de relative de surface dont le NDVI est positivement sélectionné au niveau 2, une moyenne de l'infrarouge, de la luminosité, de la pente. Toutes ces requêtes mises ensemble permettent d'affiner au mieux la sélection des toitures végétalisées dites intensives (Figure 20).

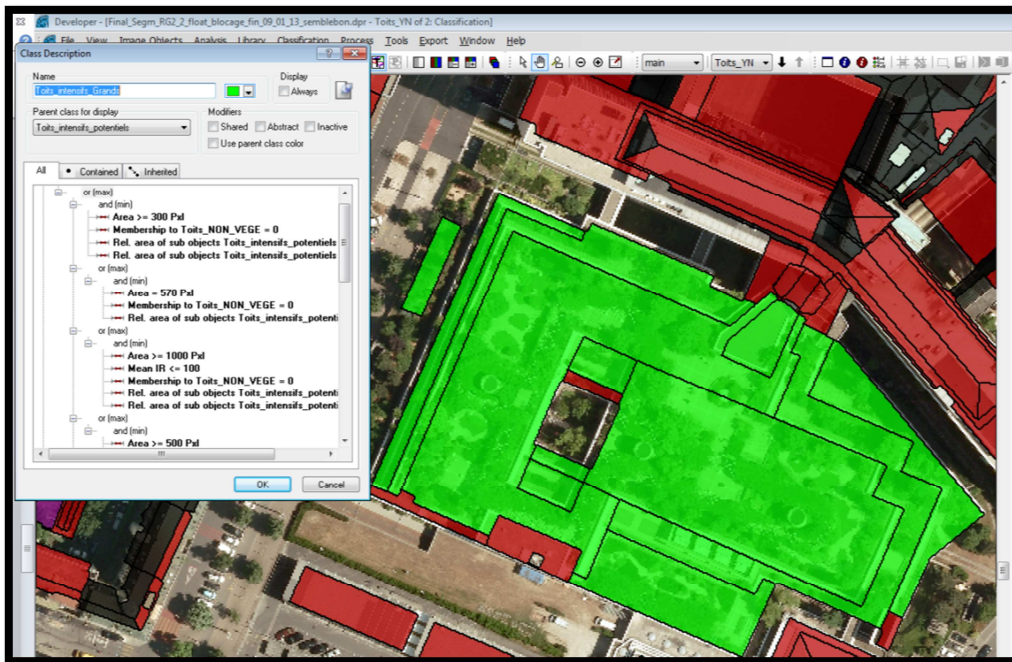


Figure 20 : A gauche, une partie des conditions utilisées (formées de plusieurs requêtes), en bas les polygones verts marquent leur appartenance à la couche "Toits_intensifs_Grands"

Suivant le même principe mais en étant moins restrictive, une couche dite « Toits_assez_intensifs » est censée mettre en avant les toitures végétalisées de type engazonnée et de type extensif (Figures 21,22). C'est aussi à ce niveau que les champs Brightness_ok, NDVI_ok et Slope_ok sont utilisés pour affiner la recherche.

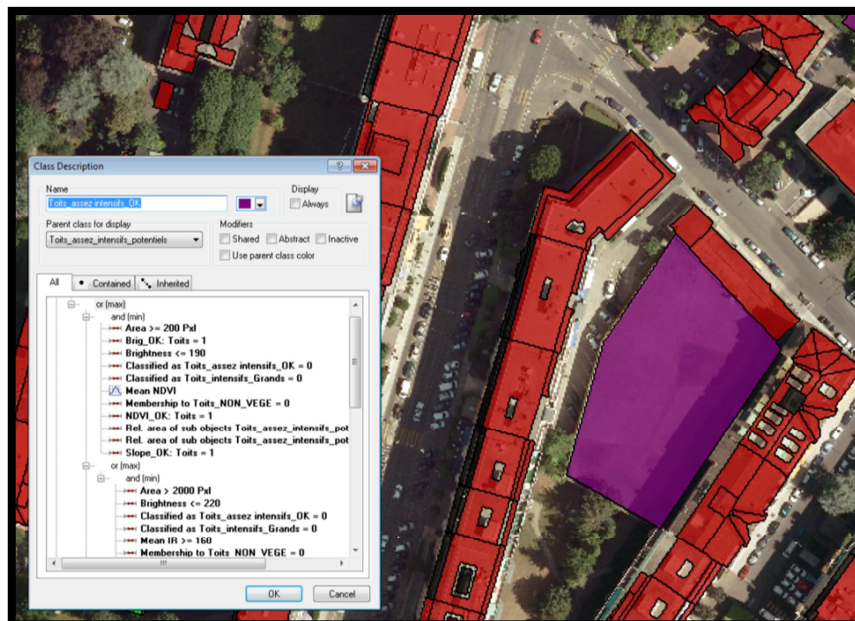


Figure 21 : Exemple d'un toit de type gazon sélectionné, avec une partie des conditions permettant de retenir les toits de type assez intensif (au niveau 1)

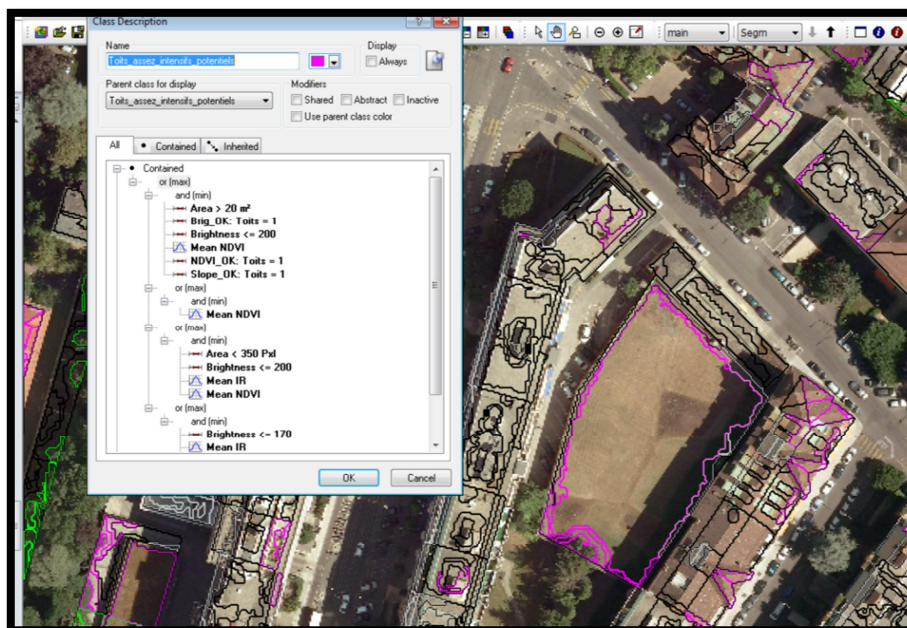


Figure 22 : Exemple d'une sélection des polygones dit "assez végétalisés" du second niveau

Enfin, en suivant le même principe mais de manière encore plus permissive une dernière classe « Toits_spontanés » doit permettre de définir les toitures qui se sont végétalisées de manière spontanée.

Notons que pour les 3 rives nous avons utilisés des paramètres sensiblement différents dus aux différences de radiométrie entre les zones.

6.1.3 Photo-détection manuelle

Les couches finales sont exportées pour être jointes avec la couche des toits initiale. Chaque polygone sélectionné en tant que toit vert est vérifié manuellement pour s'assurer de la véracité de l'information grâce au croisement des orthophotos 2009 et 2011 non dégradées. La vérification manuelle s'effectue à l'échelle 1 : 800^{ème} (outil « pan to »), cela permet de récupérer de nombreux polygones non sélectionnés par le logiciel Definiens.

Durant la validation des polygones, un code est donné afin d'affiner la classification. En accord avec la DGNP onze classes ont été déterminées :

Tableau 3 : Définition des codes de la classification des toitures végétalisées

Code	Définition
10	Toitures végétalisées intensives
11	Toitures végétalisées intensives partielles (< 50% de la surface totale)
12	Toitures végétalisées par gazon entretenu
13	Toitures végétalisées par gazon entretenu partielles (< 50% de la surface totale)
20	Toitures végétalisées extensives
21	Toitures végétalisées extensives partielles (< 50% de la surface totale)
30	Toitures végétalisées de manière spontanées (>60% de la surface totale)
31	Toitures végétalisées de manière spontanées partielle (20<TV<60% de la surface totale)
32	Toitures végétalisées de manière spontanées très partielle (<20% de la surface totale)
40	Balcons ou Terrasses végétalisées
41	Balcons ou Terrasses végétalisées partielles (< 50% de la surface totale)

Enfin un grid de 250 mètres de côté est créé afin de nous guider lors d'un dernier scan, afin de récupérer les oublis possibles.

6.2 Résultats

Sur les 155'919 polygones toits de départ, 3'212 objets ont été sélectionnés par Definiens en tant que potentiellement « vert ». Soit 1'301 polygones en tant que type 1, 1'733 polygones en tant que type 2 et finalement seulement 178 polygones de type 3. Le faible nombre d'objets de type 3 s'explique par une raison simple. En milieu urbain, nous avons remarqué que si nous ajoutions la classification de type 3, le ratio entre la récupération réelle de nouveaux polygones végétalisés et l'ajout de polygones à vérifier était trop faible (entre 1 et 9 %). Par conséquent, il a été décidé de ne pas ajouter la classification de type 3 dans les zones trop densément urbanisées.

L'analyse manuelle permet d'éliminer 1'939 objets sur les 3'212 polygones initialement sélectionnés, soit 1'273 objets effectivement considérés comme vert. Enfin, 1'069 objets ont été importés manuellement pour qu'au final 2'342 objets soit considérés comme végétalisés selon onze classes (Tableau 4, chapitre 7.1.1).

L'annexe 3 permet de visualiser sur la ville de Genève où sont situées les toitures végétalisées. Ceci donne un aperçu de ce que la couche « toits végétalisées » sur le canton de Genève représente.

7 Discussions

Il est opportun de prendre conscience que les calculs qui sont effectués sont faits en fonction des toitures végétalisées trouvées. Or nous savons pertinemment que certaines sont passées entre les mailles du filet. Leur nombre est probablement faible mais existe, particulièrement pour les classes végétalisées spontanées à faible recouvrement, il faut donc prendre un certain recul quant à la véracité absolue des chiffres avancés dans cette analyse.

7.1 Analyse de la procédure

7.1.1 Analyses des résultats obtenus avec Definiens

Après l'analyse manuelle, seulement 1'273 éléments sont effectivement bien considérés comme des toitures végétalisées. Ainsi 1'939 objets sélectionnés par Definiens ont dû être classés en tant que non toit vert ce qui correspond à 40 % de réussite sur l'ensemble du canton.

Notons que sur la partie urbanisée de la rive Rhône-Arve nous avons effectué une segmentation peu sévère, ce qui a eu pour conséquence une diminution du taux de réussite général (Tableau 4, colonne 4).

Tableau 4 : Analyse par rive et globale de l'efficacité de Definiens

Rives	Total des objets sélectionnés par Definiens	Nombre d'objets bien verts	Pourcentage de toits verts dans la sélection eCognition (en %)	Nombre d'objets verts rapportés (vérification manuelle)	Total des toits végétalisés au final	Pourcentage de détection des toits verts par Definiens (en %)
Droite	941	517	55	489	1039	50
Gauche	1'003	441	44	308	803	55
Arve_rhône	1'268	315	25	191	500	63
Total	3'212	1'273	40	975	2'342	54

Definiens reconnaît par rive entre 50% et 63% du total des toits effectivement végétalisés ce qui peut être considéré comme peu élevé (Tableau 4, colonne 6).

En revanche, nous avons remarqué qu'en vérifiant manuellement les toits sélectionnés par Definiens (au 1 :800^{ème}), nous étions capable de récupérer 95% des toitures non détectées par le logiciel. En effet, en milieu urbain les différences des paramètres de deux toits sont tellement infimes qu'un élément peut être pris et le voisin non (illustration Figures 23, p. 32). C'est pour cela que dans un grand nombre de cas, (principalement pour les toitures spontanées) un toit sélectionné par Definiens avait un, voire plusieurs, voisins aussi végétalisés mais non sélectionnés par Definiens.

Au final 2'342 (tableau 4) objets toits végétalisés ont été identifiés mais il est nécessaire de prendre des précautions avec les toitures végétalisées de type 31 et 32. En effet, ce type de végétalisation est

particulier car seule une petite partie des toits est végétalisée et qui plus est, de manière spontanée. Il n'est donc pas possible de considérer ces toits comme végétalisés à part entière. Ces objets pourront par la suite être utilisés pour de futures études voire pour évaluer l'évolution de la toiture. Ainsi si les catégories 31 et 32 ne sont pas prises en comptes, 1'531 objets végétalisés ont été identifiés.

Tableau 5 : Analyse de l'efficacité de Definiens par type de classe de toiture végétalisée

CODE_TV de la classification des toitures	Nombre d'objets totaux sur le canton	Nombre d'objets reconnus par Definiens	Nombre d'objets rapatriés manuellement	Pourcentage reconnu par Definiens
Toitures végétalisées intensives	216	183	37	85
Toitures végétalisées intensives partielles	79	43	30	54
Toitures végétalisées par gazon entretenu	160	139	24	87
Toitures végétalisées par gazon entretenu partielles	38	16	12	42
Toitures végétalisées extensives	284	151	135	53
Toitures végétalisées extensives partielles	37	14	22	38
Toitures végétalisées de manière spontanées	560	354	197	63
Toitures végétalisées de manière spontanées partielle	335	137	185	41
Toitures végétalisées de manière spontanées très partielle	476	168	266	35
Balcons ou Terrasses végétalisées	83	44	43	53
Balcons ou Terrasses végétalisées partielles	74	24	41	32

Le tableau 5 nous montre que malgré l'efficacité partielle de Definiens, la reconnaissance de certaines classes clés telles que les toitures intensives et les toitures engazonnées (CODE_TV 10 et 12) est très bonne avec respectivement 85 et 87% d'identification positive. En revanche, il existe un problème au niveau de l'identification des objets végétalisés de façon partielle. Ceci s'explique facilement par la surface verte qui est minime comparée à la surface de l'objet toits et ne peut être considérée par Definiens comme toit vert. Les caractéristiques de ces toits végétalisés spontanément sont, en termes de valeurs de paramètres tels que « NDVI », « Brightness » et « Slope » très proches de toits qui sont simplement recouvert de gravier.

Nous avons essayé de calculer l'indice de Kappa qui permet de mesurer en termes statistiques l'accord entre les observateurs lors d'un codage qualificatif en catégories⁸. Le modèle se calcule sur

⁸ www.wikipedia.org

la base de la formule ci-dessous et le tableau 6 permet de donner les valeurs utilisées dans notre cas. Au final l'indice de Kappa est de 0.45 ce qui en terme d'interprétation est considéré comme un accord modéré. Cet indice est probablement bien différent selon les classes de toitures végétalisées. Il faut toutefois rester prudent sur cet indice car, comme nous l'avons déjà mentionné, il existe probablement des toitures végétalisées qui ont été oubliées ce qui aurait pour conséquence l'augmentation du nombre de toits dits Faux positifs.

Formule de calcul (Cohen's Kappa) :

$$\frac{(a+d)-(((a+c)(a+b)+(b+d)(c+d))/N)}{N-(((a+c)(a+b)+(b+d)(c+d))/N)}$$

(a+d) : proportion de concordance entre les observations

(((a+c)(a+b)+(b+d)(c+d))/N) : proportion de concordance due au hasard

N : total des données

Tableau 6 : Récapitulatif des polygones entrant dans le calcul de l'indice de Kappa

		Réalité		
		Toits verts	Toits non verts	
Modèle	Toits verts	a : 1'273 Vrais positifs	b : 1'939 Faux positifs	3'212
	Toits non verts	c : 1'069 Faux négatifs	D : 151'638 Vrais négatifs	152'707
		2'342	153'577	N : 155'919

7.1.2 Analyses de la classification selon Definiens

Nous avons analysé la classification par type de toitures végétalisées que nous avons effectué sur Definiens, nous nous sommes rendu compte qu'il sera compliqué d'utiliser la classification automatique.

En effet, le tableau 7 nous montre que dès que nous comparons le type 1 avec la réussite de la classe 12 (gazon), on se rend compte que le type 2 rapporte lui aussi un nombre important de toits. Or, le but initial était de séparer les types 1 (toitures vertes intensives) et 2 (toitures vertes engazonnées). Lors de l'analyse de la classe définie manuellement comme toiture extensive (classe 20), le type 1 représente 24% de la totalité de cette classe et le type 2 en représente 29%. Les deux types rapportent autant de toits de cette classe donc aucune différenciation ne peut être faite. Nous ne prendrons donc pas en compte le type comme élément de hiérarchisation. Un bénéfice a malgré tout été tiré de cette classification automatique car elle nous a permis de structurer notre démarche de classification sur Definiens.

Tableau 7 : Tableau de récapitulation de la réussite de la classification effectué dans Definiens

CODE_TV de la classification des toitures	Nombre total d'objets toits verts	Type 1 reconnus par Definiens	Pourcentage reconnu par le type 1	Type 2 reconnus par Definiens	Pourcentage reconnu par le type 2
Toitures végétalisées intensives	216	156	72	26	12
Toitures végétalisées intensives partielles	79	34	43	7	9
Toitures végétalisées par gazon entretenu	160	101	63	36	23
Toitures végétalisées par gazon entretenu partielles	38	9	24	6	16
Toitures végétalisées extensives	284	68	24	81	29
Toitures végétalisées extensives partielles	37	4	11	20	54
Toitures végétalisées de manière spontanées	560	94	17	254	45

7.1.3 Comparaison des données entre l'analyse par Definiens et l'étude de 2011

Rappelons qu'en début 2011, J.Massy n'avait pas accès à une orthophoto aussi précise que celle dont nous avons l'accès (Orthophoto 2011, faite en mars). Le fait que l'orthophoto 2011 ait été faite en hiver, nous permet d'avoir une autre vision qu'en été. Le croisement des orthophotos 2009 et 2011 maximise la précision lors de la photo détection. De plus, Definiens a travaillé à 40 cm de définition alors qu'en 2011 l'étude avait été faite sur des pixels de 60 cm. Enfin la détection des toitures vertes avait été effectuée avec des « ModelBuilder » ce qui est probablement plus limité que Definiens.

Par conséquent, Definiens reconnaît 672 objets toits verts dont 425 sont effectivement des toitures végétalisées (soit 63%). Sur l'ensemble de la ville de Genève 902 toits verts sont totalisés en intégrant les toitures de type 31 et 32 (soit 31% de la totalité des toits) ce qui représente une détection de 47%. Si les type 31 et 32 ne sont pas pris en compte, Definiens détecte 59% des toitures végétalisées de la ville.

En 2011, 348 objets avaient été reconnus sur 1'747 (soit 20%). Ainsi sur les 902 toits dénombrés la méthode de J. Massy a permis de détecter 38% des toitures vertes. Si les types 31 et 32 ne sont pas pris en compte l'étude de 2011 a permis de détecter 42% des toitures végétalisées. A première vue, peu de différence existe entre les deux types d'analyse, en revanche en regardant les données de plus près, de grandes différences significatives apparaissent.

En comparant les données, 203 objets ont été trouvés par Definiens et non en 2011, à contrario cette ancienne méthode avait permis de détecter 126 objets que Definiens n'a pas détectés (Tableau 8). Il est important de noter que sur ces 126 polygones, 50% d'entre eux représentaient un toit de classes 31 et 32, alors que cela ne représente que 15% lors de l'étude actuelle.

Tableau 8 : Tableau comparant les polygones verts détectés par une l'étude de 2011 (J. Massy) et pas par l'étude actuelle, et inversement

CODE_TV de la classification des toitures	Nombre d'objets trouvé par Definiens et pas par étude de 2011	Nombre d'objets trouvé par l'étude de 2011 et pas par Definiens
Toitures végétalisées intensives	82	4
Toitures végétalisées intensives partielles	12	8
Toitures végétalisées par gazon entretenu	13	3
Toitures végétalisées par gazon entretenu partielles	4	1
Toitures végétalisées extensives	11	8
Toitures végétalisées extensives partielles	4	1
Toitures végétalisées de manière spontanées	17	35
Toitures végétalisées de manière spontanées partielle	11	38
Toitures végétalisées de manière spontanées très partielle	20	25
Balcons ou Terrasses végétalisées	21	0
Balcons ou Terrasses végétalisées partielles	8	3
Total	203	126

Le constat est clair, Definiens est plus performant au niveau de la détection des toitures végétalisées souhaitées (Tableau 9, gris clair). Par contre, l'étude de 2011 est plus performante au niveau de la détection des toitures végétalisées. Cette affirmation est malgré tout à prendre avec beaucoup de précaution car l'étude de J. Massy a permis de déterminer plus de toits végétalisés spontanément certes, mais avec une part importante de travail manuel. En effet, sur les 348 éléments toits effectivement verts, 1'747 objets avaient été éliminés, quand Definiens en avait 425 de bons sur un total de 672.

Cartographie des toitures végétalisées du canton de Genève

Tableau 9 : Tableau comparant les résultats entre l'étude de 2011 (J. Massy) et l'étude actuelle

CODE_TV de la classification des toitures	Nombre total d'objets vert	Nombre d'objets reconnus par Definiens	Nombre d'objets reconnus par l'étude 2011	Pourcentage de réussite de reconnaissance par Definiens en fonction des toits finaux (en %)	Pourcentage de réussite de reconnaissance par l'étude de 2011 en fonction des toits finaux (en %)
Toitures végétalisées intensives	112	94	16	84	17
Toitures végétalisées intensives partielles	41	17	13	42	32
Toitures végétalisées par gazon entretenu	52	42	32	81	62
Toitures végétalisées par gazon entretenu partielles	15	5	2	33	13
Toitures végétalisées extensives	77	51	48	66	62
Toitures végétalisées extensives partielles	9	5	2	56	22
Toitures végétalisées de manière spontanées	222	119	137	54	62
Toitures végétalisées de manière spontanées partielle	120	25	52	21	43
Toitures végétalisées de manière spontanées très partielle	154	30	35	20	23
Balcons ou Terrasses végétalisées	52	24	3	46	6
Balcons ou Terrasses végétalisées partielles	48	13	8	27	17

Le travail effectué en 2011 était de très bonne facture car il avait été mené de manière exploratoire. Il est important de mentionner que cette nouvelle procédure de détection des toitures végétalisées a été bien améliorée. En effet, de nombreux nouveaux toits végétalisés ont été détectés par rapport à 2011. De plus, la méthode de cette nouvelle étude permet de prendre en compte les toitures végétalisées de manière intensives ce qui n'avait pas pu être le cas pour l'étude de J. Massy. La détection automatique est elle aussi, globalement, plus performante que l'étude effectuée en 2011. N'oublions pas que des perspectives d'améliorations existent et pourront être testées pour limiter le travail manuel (chapitre 9).

7.1.4 Analyses des toits verts provenant de la couche bâtiment

Dans le chapitre 4.1.2.2, des polygones provenant de la couche « SDO.CAD_BATIMENT_HORSOL_2009 » avaient été rapatriés dans la couche « SDO.CAD_BATIMENT_HORSOL_TOITS » nettoyée, cette dernière n'étant pas à jour. Finalement 114 polygones ont été classifiés en tant que végétalisés et seulement 6 sont des toitures spontanées. Cela montre bien l'efficacité de notre méthode de rapatriement des bâtis en tant que toitures car cela représente 11 % des toitures végétalisées non spontanées sur l'ensemble du canton.

Il restait des polygones toits où le doute planait, ils avaient été marqués et étaient au nombre de 1'418 (chapitre 4.2.2.1). Seulement 23 polygones d'entre eux ont été classés comme vert et 4 présentaient une différence significative d'emprise des toitures entre ce que nous avons à la base et ce qui est réellement présent en 2009.

7.1.5 Etape finale : Rapatriement de données non comprise dans l'analyse

En scannant manuellement, 32 objets toits végétalisés de manière intensive ou extensive ont été identifiés mais aucuns polygones n'existaient. Deux d'entre eux étaient déjà des toits verts en 2009 et les 30 autres l'étaient après 2009. Les polygones dans la couche « SDO.CAD_BATIMENT_HORSOL » étaient présent, ils ont donc été importés dans la couche finale mais n'ont pas été pris en compte lors de l'analyse des résultats. Pour les 30 polygones qui sont végétalisés en 2011, on trouvera dans le champ « ANNEE » l'annotation « 2011 ».

Notons que l'enclave de Céligny a été scannée manuellement car nous pensions que cela aurait demandé trop de temps de préparation de la donnée source comparé aux nombres de toits potentiellement verts (car zone très rurale). Sur les 1'337 polygones scannés, seulement 9 sont végétalisés dont 2 classés en extensif (classe 20), 4 en spontanés (classe 30) et 3 en partiellement spontanés (classe 31).

Nous avons au final, 2'351 objets qui sont considérés comme végétalisés. **Attention, il est possible que par la suite ces chiffres changent car, si l'administrateur retrouve un toit végétalisé oublié il pourra le réintégrer même si cet acte devrait se révéler très occasionnel.**

7.2 Analyse des surfaces de toitures végétalisées par commune

En effectuant une analyse un peu plus poussée, la surface des toitures végétalisées représente 5.7% de la surface totale des toitures du canton. Nous nous sommes ainsi intéressés à effectuer ces mêmes analyses à l'échelle communale afin de comprendre quelles sont les communes qui sont les plus actives dans ce domaine et pourquoi (Annexe 4).

En prenant compte tous les types de végétalisation nous constatons que les communes les mieux placées sont Onex, Genève et Chêne Bourg avec respectivement 9.14%, 8.83% et 8.76% de leur nombre de toitures qui est végétalisée. En revanche en termes de surface, nous constatons que les trois premières communes sont Genève (336'579 m²), Meyrin (72'317 m²) et Vernier (67'317 m²) qui sont loin devant les communes d'Onex (28'882 m²) et de Chêne Bourg (19'629 m²).

Nous avons effectué le même type d'analyse sans prendre en compte les toitures dont la végétalisation est spontanée de façon partielle. Ainsi nous avons les communes de Chêne Bourg (7.04%), Genève (6.49%) et Aire la Ville (6.12%) qui sont les premières en termes de proportion de

surfaces de toitures végétalisées. Au niveau de la superficie des toitures vertes, ce sont les communes de Genève (247'296 m²), Vernier (53'113 m²) et Lancy (45'143 m²) qui sont aux trois premières places.

Toutes ces différences sont dues aux caractéristiques propres à chaque commune : les types de bâtiments présents, l'âge des bâtiments, la densité des bâtiments, la typologie de la commune. Ainsi, les toitures végétalisées sont plus présentes dans les communes de type cœur d'agglomération (Genève) ou zone urbaine centrale (Meyrin). En effet, les communes type « villages » sont rurales donc moins construites mais aussi, les habitations sont traditionnelles (maison à deux pans de toits) donc peu accueillantes pour une toiture verte (Figure 23 ou Annexe 5: densité de toitures vertes par commune).

Aire la Ville, diffère légèrement car considérée comme un village, elle se positionne au 3^{ème} rang au niveau de la proportion de la surface de toitures végétalisées (sans prendre en compte les spontanées partielles) mais cela ne représente qu'une surface de 4'960 m². Ceci démontre qu'Aire la Ville est active dans la promotion des toitures végétalisées.

La commune de Genève est la deuxième plus grande en termes de superficie mais aussi la plus densément construite du canton de Genève, enfin c'est un cœur d'agglomération avec de nombreux immeubles dont les toits sont potentiellement plus accueillant pour une toiture végétalisée, ce qui explique son bon positionnement dans tous les cas. De plus, la ville de Genève est le moteur mais aussi la locomotive dans la construction ou l'aménagement de toitures végétalisées. C'est cette commune qui doit montrer l'exemple pour les autres. Les communes de la ville de Genève, d'Onex et de Meyrin sont bien placées dans notre classement car elles ont développé une politique de nature en ville (séance d'automne CDPNP, 2009). Ceci implique aussi de favoriser l'installation de sites naturels tels que les toitures végétalisées afin de conserver et d'améliorer la biodiversité.

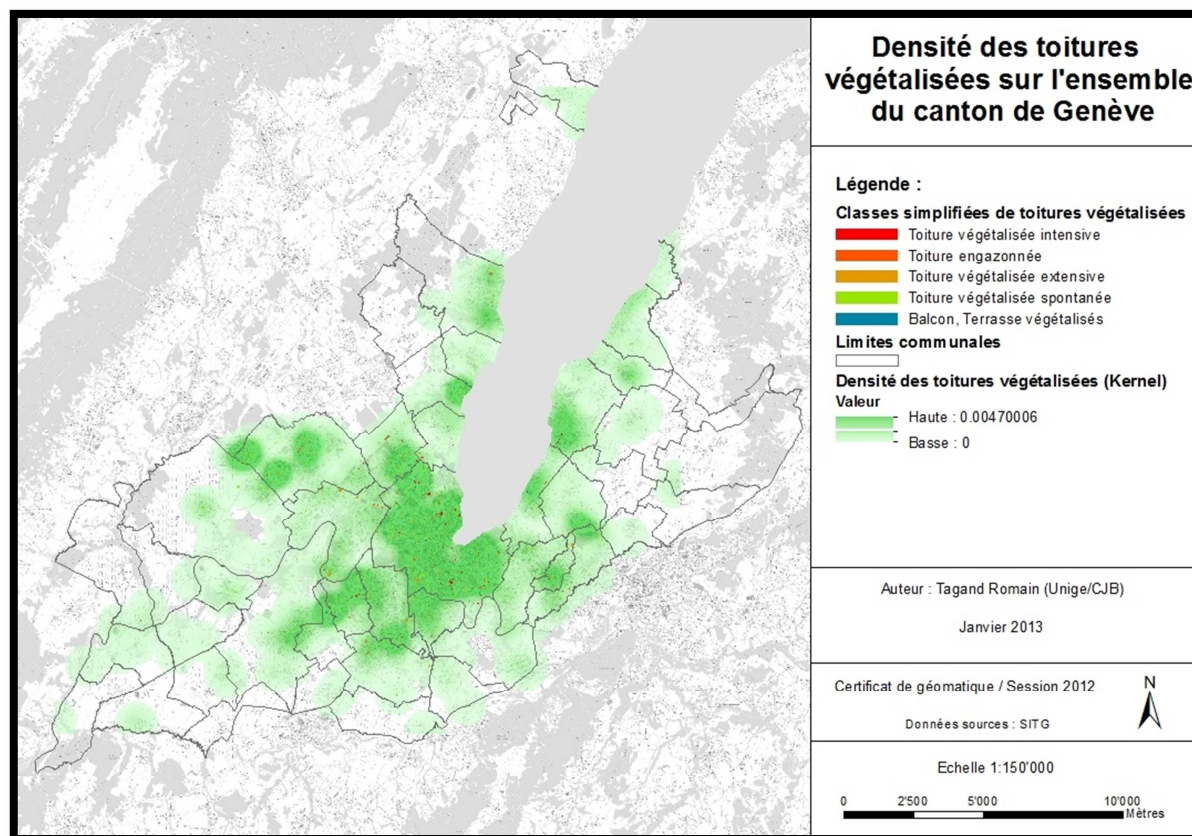


Figure 23 : Carte représentant la densité des toitures végétalisées sur le canton de Genève

7.3 Les toitures végétalisées sur quels type des toits, qu'en est-il des perspectives ?

7.3.1 Quels types de toitures végétalisées sur quels types de toits ?

Nous nous sommes intéressés sur le placement des types de végétalisation en fonction des types de bâtiments. Pour cela nous avons simplifié la classification des 11 catégories de toits verts en 5 entités en regroupant les types de végétalisation dites partielles avec celles qui ne le sont pas. D'après les tableaux 10 et 11, les toitures végétalisées intensives sont bien réparties sur tous les types de bâtiments. En termes de surface, cela représente une plus grande proportion de ces types de toitures végétalisées sur des bâtiments d'activités (38%) ou d'équipements collectifs (32%) qui de part nature sont plus grand. Nous remarquons qu'un grand nombre de toitures engazonnées sont situées sur des « autres bâtiments » (32%) et sur les bâtiments d'activités (24%), c'est le même constat en termes de surface avec respectivement 32% et 39%. Ceci s'explique par le fait que la plupart des toitures végétalisées engazonnées sont situées sur de grandes surfaces donc de grands bâtiments (secteur d'activité) ou encore sur des parkings souterrains peu surélevés (secteur « Autres bâtiments »). Les toitures végétalisées extensives sont plus présentes sur les équipements collectifs (29%) et sur les habitations (29%). Naturellement, la proportion des surfaces de toitures extensives est bien plus représentée sur des bâtiments plus grands tels que les équipements collectifs (47%). Enfin nous constatons que les toitures végétalisées spontanées sont principalement situées sur les habitations (29%) par contre en termes de surfaces elles sont situées sur des équipements collectifs (30%) et des bâtiments d'activité (32%).

Au final nous constatons que le nombre d'habitations végétalisées est élevé comparé aux autres types de bâtiments. Leur surface est souvent de plus petite taille que des bâtiments collectifs ou d'activité, ainsi les habitations ne sont pas les plus représentées en termes de surface cumulée sur l'ensemble du canton.

Tableau 10 : Proportion du nombre des types de toitures végétalisées par type de bâtiments en fonction du nombre de polygones toits des types de toitures

Type de bâtiment	Végétalisation intensive	Végétalisation de type engazonnée	Végétalisation extensive	Végétalisation spontanée	Végétalisation sur balcons et terrasses	Total général
Activité	21%	24%	18%	19%	11%	19%
Autre bâtiment	21%	32%	18%	18%	4%	18%
Équipement collectif	22%	12%	29%	19%	6%	19%
Habitation	22%	15%	29%	29%	59%	29%
Mixte: logements/activités ou équipement collectifs	12%	6%	4%	14%	18%	12%

Tableau 11 : Proportion de la surface des types de toitures végétalisées par type de bâtiments en fonction de la surface totale des types de toitures

Type de bâtiment	Végétalisation intensive	Végétalisation de type engazonnée	Végétalisation extensive	Végétalisation spontanée	Végétalisation sur balcons et terrasses	Total général
Activité	38%	39%	34%	32%	16%	38%
Autre bâtiment	14%	32%	4%	7%	5%	14%
Équipement collectif	31%	18%	47%	30%	13%	31%
Habitation	11%	8%	12%	20%	46%	11%
Mixte: logements/activités ou équipement collectifs	6%	4%	2%	11%	20%	6%

Constatations faites nous devons par la suite penser à ces paramètres. En effet, si l'objectif d'aménagement dans un futur proche est d'augmenter la surface de toitures végétalisées, ou d'augmenter le nombre de toitures végétalisées, la stratégie à adopter ne sera pas la même. En effet, les habitations sont nombreuses mais souvent de petites tailles elles seraient donc intéressantes pour, par exemple, créer des corridors faunistiques en ayant un certain continuum de toitures végétalisées. Les espèces cibles seraient dans ce cas des espèces dont la superficie de leur domaine vital est assez faible. En revanche si l'objectif premier est augmenter de manière significative la surface des toitures végétalisées extensives favorables à une diversité floristique (par exemple) sur le canton de Genève, il serait probablement plus judicieux d'axer l'effort de promotion des toitures végétalisées sur les bâtiments collectifs ou les bâtiments dits d'activités. En effet, pour favoriser les espèces végétales intéressantes il est préférable d'avoir des milieux d'assez grande surface.

7.3.2 Quelles sont les perspectives d'utilisation de cette couche ?

Plus généralement cette couche des toitures végétalisées du canton de Genève va pouvoir être utilisée comme base de travail à des inventaires floristiques et faunistiques (projet futur de la DGNP). Ces inventaires vont permettre de définir la qualité des milieux rencontrés pour ensuite définir une charte des toitures végétalisées. Il serait envisageable de mettre en place des ensemencements spécifiques pour les toitures végétalisées extensives qui favoriseraient la biodiversité. Le but serait de mettre à disposition des mélanges d'espèces végétales locales plus ou moins rares et surtout bien adaptées aux conditions particulières présentes sur les toitures végétalisées (ex : plantes héliophiles, xerothermophiles). Derrière cette démarche, une bonne communication sur les avantages d'une toiture végétalisée par un ensemencement de qualité serait un gage de réussite pour l'implantation de nouveaux milieux de qualité.

La nature en ville est une volonté politique très développée sur les communes urbaines du canton, il est donc important de mentionner que cette couche des toitures végétalisées est aussi un bon outil d'aide à décision sur le choix de l'emplacement des futurs toits végétalisés. Enfin, pour d'autres services architecturaux par exemple, cette couche pourrait aider à construire des quartiers ou bâtiments couverts d'une toiture végétalisée en fonction du voisinage afin d'optimiser l'intégration paysagère d'un nouveau bâti dans son environnement.

8 Problèmes rencontrés

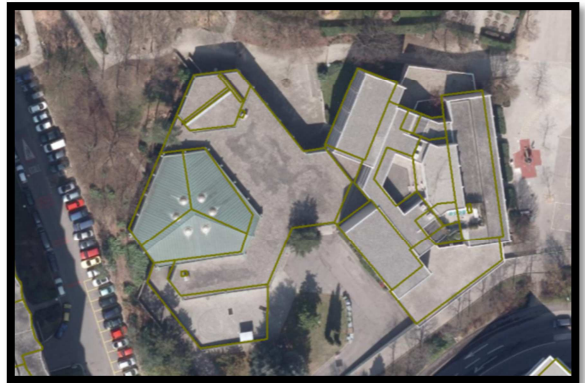
De nombreux problèmes sont apparus au cours de ce travail. Premièrement, nous nous n'attendions pas que la couche « SDO.CAD_BATIMENT_HORSOL_TOIT » ne soit pas à jour. Le développement d'une méthode de rapatriement d'élimination des toits n'étant plus à jour et de rapatriement de bâti en tant que toit a pu être développé mais a demandé un certain temps.

Deuxièmement, le fait que Definiens ne segmente pas les grandes zones dont la valeur de pixel est constante nous a généré beaucoup de problèmes. Il a fallu tout d'abord comprendre pourquoi Definiens patinait lors d'une « Multiresolution segmentation » d'une zone : 15h de fonction et le process n'était pas encore terminé. Ensuite, il était nécessaire de déterminer une zone raster assez petite mais pas trop pour que Definiens puisse tourner sur une durée acceptable (temps de segmentation : 30 min à 4h). Tout ceci a impliqué de retravailler les rasters qui l'avaient déjà été dans un premier temps sur les trois rives. En effet, nous avons redécoupé en trois chacune des trois rives en faisant attention à ne pas diviser un polygone toit en deux mais aussi en essayant d'avoir le moins de surface de valeur raster potentiellement constante (Annexe 2). Cette division implique une répétition des étapes sur Definiens. Ces dernières ont été un facteur limitant à l'optimisation de l'efficacité de ce travail dans le temps imparti.

Definiens est un logiciel complexe qui a demandé un certain temps d'adaptation et il est probable que la hiérarchisation aurait pu être faite d'une manière différente afin de rendre ce logiciel plus performant. Avec un peu plus de temps, nous aurions certainement pu améliorer la détection automatique. En effet, de faibles différences existent entre les valeurs des variables par types de toitures végétalisées et la différence n'est pas forcément évidente (Figures 24).

Le décalage entre la couche des toits et l'orthophoto est manifeste, il est certain que ce problème a diminué l'efficacité de Definiens dans l'analyse des toitures végétalisées (Figure 25). De plus, nous avons travaillé à une définition très élevée (40cm) car les toits sont par nature de petite taille. Ceci implique une augmentation significative des valeurs des variables et rend les intervalles des valeurs dans une variable très hétérogènes et donc sensible au niveau du choix de valeurs seuils, impliquant une opacité dans l'analyse.

D'



Figures 24 : Exemple de toitures végétalisées spontanément :

En haut à gauche : toiture végétalisée spontanée

En bas à gauche : toiture végétalisée spontanée très partielle

En haut à droite : toiture végétalisée spontanée partielle

En bas à droite : toiture non végétalisée

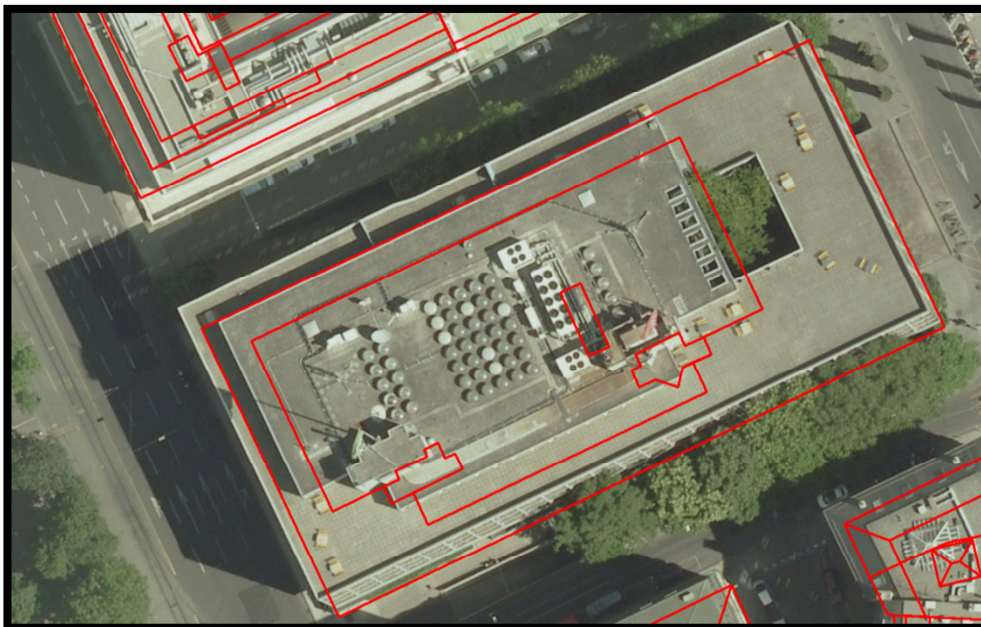


Figure 25 : Visualisation du décalage qui peut exister entre la couche toit et l'orthophoto 2009

9 Perspectives d'amélioration de la détection

Au niveau des données sources, il serait très pertinent d'avoir à disposition une couche « SDO.CAD_BATIMENT_HORSOL_TOIT » de base réellement à jour. En effet, même si le nombre de toits végétalisés non digitalisés est pas si élevé, il existe. L'existence d'une couche à jour permettrait d'éliminer les différents biais et cela améliorerait la reconnaissance de certains toits verts au niveau de Definiens.

Deuxièmement, il serait intéressant de disposer d'une orthophoto effectuée en hiver afin d'éliminer le recouvrement des feuillus sur les toits. Pour cela il est nécessaire d'avoir une orthophoto avec les quatre canaux et si possible le LIDAR associé. L'idéal serait d'effectuer le vol en novembre où les feuilles sont tombées mais où la végétation au sol n'est pas encore trop « grillée » par le gel.

Les perspectives d'améliorations de cette procédure se situent principalement au niveau de l'analyse par Definiens. Tout d'abord, évaluer plus en profondeur les applications qu'offre Definiens au niveau de la classification avancée est nécessaire car nous pensons que nous n'avons probablement pas utilisé toutes les possibilités d'analyses. Par exemple, la fonction de « texture » peut être calculée, il aurait été intéressant de vérifier si ce type de variable pouvait apporter un plus à l'étude. Pour des raisons de temps machine bien trop élevé ce paramètre n'a pas été approfondi.

Nous avons remarqué que l'analyse pouvait être plus fine et sensiblement différente selon les zones étudiées. En effet, les différents clichés constituant le jeu d'orthophotos ont des différences sensibles en termes de radiométrie. Ainsi le choix des valeurs des paramètres de la classification sur Definiens sont à adapter selon la zone étudiée. Dans notre étude nous avons essayé d'affiner ces paramètres pour nos neuf zones d'études mais nous sommes conscients de ne pas avoir été au bout de cette calibration.

Les classes de toitures « vertes » sont construites par plusieurs conditions formées elles-mêmes de plusieurs paramètres. Certaines conditions permettent d'inclure la sélection de cas particulier, leur impact réel sur les autres polygones toits à l'échelle de la zone étudiée n'a pas toujours été clair. Il serait plus judicieux de faire une condition correspondant à une classe afin de bien visualiser les conséquences sur les autres toitures. Ceci va considérablement augmenter le nombre de classes mais paradoxalement peut faire gagner du temps sur la compréhension, l'expérimentation et la pertinence des conditions.

Comme il l'avait déjà été proposé dans le travail de J. Massy, une étude de type « Generalized Regression Analysis and Spatial Prediction » (GRASP)⁹ pourrait être envisagée. Le nombre de données que nous avons à disposition grâce à cette étude rendrait plus solide une telle analyse statistique. Même si, à première vue nous restons sceptiques sur ce genre d'analyse car le sujet de ce travail s'applique sur des objets qui sont vraiment très proches les uns des autres. En effet, la comparaison se fait parfois entre un toit partiellement végétalisé, plat, sur substrat graveleux avec un toit non végétalisé, plat, sur substrat graveleux. Dans ce type de situation les différences de paramètres sont très ténues et très variables entre les toitures des deux types et à l'intérieur même d'un des types ce qui rend l'approche statistique difficilement exploitable.

⁹ <http://www.unine.ch/CSCF/grasp/>

10 Conclusion

Ce travail a permis de produire une couche des toitures végétalisées du canton de Genève très proche de la réalité. La détection des toitures majoritairement recouvertes par de la végétation est fiable, par contre, les toits partiellement ou très faiblement végétalisés sont vraisemblablement incomplets. Globalement les données sont solides et serviront très prochainement d'outils d'aide à la décision pour la DGNP. Ces informations spatiales et typologiques appuieront les projets concernant la nature en ville, la promotion de la biodiversité en milieu urbain ou encore la mise en place de corridors biologiques pour certaines espèces. A noter, ces données peuvent être utilisées par d'autres services cantonaux (eaux, urbanisme) mais également par les communes. Il est important de noter que malgré une satisfaction modérée de l'automatisation du procédé, Definiens nous a permis indirectement de déceler la plupart des toitures végétalisées non reconnues automatiquement.

Notre étude a permis d'une part, de faire évoluer la méthode de 2011 et, d'autre part, d'augmenter et de compléter les précédents résultats. Signalons la prise en compte des toitures de type intensives et extensives qui sont probablement les éléments les plus pertinents lors d'une étude des toitures végétalisées à l'échelle d'un canton.

Dans la couche rendue à la DGNP, nous avons intégré le maximum de toitures végétalisées spontanées car elles sont très intéressantes en termes de biodiversité malgré le fait qu'elles peuvent être éliminées du jour au lendemain par les services d'entretiens. Pour ces différentes raisons, la couche « Toits_végétalisés » avec la classification des types de végétalisation apparaît comme très pertinente pour les besoins du mandant. Il est probable que Genève soit, grâce à ce travail, le premier canton à disposer d'une cartographie des toitures végétalisées définie selon onze classes. La prise en compte de l'environnement en milieu urbain est actuellement discutée par les pouvoirs politiques (cf. motion sur la promotion des toitures végétalisées) et devient un sujet de première importance pour les années à venir.

Enfin, ce travail m'a permis développer mes connaissances en matière de géomatique et de gestion de projet. J'ai pu acquérir de bonnes connaissances dans les logiciels FME et Definiens même si je n'ai pas disposé de suffisamment de temps pour maîtriser parfaitement ces outils. Malgré cela, c'est en découvrant ce type de logiciel que l'on prend pleinement conscience des ouvertures possibles d'analyses qu'offre la géomatique. Dans la plupart des cas, nous nous rendons compte que le croisement de plusieurs logiciels est à la fois une manière efficace d'optimiser le travail mais également un gage de rendu de qualité.

11 Bibliographie

Rapports :

J. Massy, 2011. Cartographie semi-automatique des toitures végétalisées de la Ville de Genève. Rapport de stage du certificat de géomatique de l'Université de Genève, 48 pages.

E. Renaud, 2011. Toitures végétalisées, ARTICLE PIC VERT, 2 pages.

Definiens, 2007. Developper 7, Reference Book, 195 pages.

FME, 2012. Transformers dans FME Workbench, 1'182 pages.

F. Lefort et al., 2012. Proposition de motion pour une promotion active des toitures végétalisées, 5 pages.

Articles de lois :

Loi fédérale sur la protection des eaux (LEaux) RS 814.20, 1991, 34 pages.

Loi fédérale sur la protection de l'environnement (LPE) RS 814.01, 1983 (remis à jour en 2010), 46 pages

Loi sur les eaux (LEaux-GE) L 2 05, 1961 (remis à jour en 1991), 15 pages.

Loi d'application de la loi fédérale sur la protection de l'environnement (LaLPE) K 1 70, 1997, 10 pages.

Loi sur les constructions et les installations diverses (LCI) L 5 05, 1988, 52 pages.

Sites Web :

Portail SITG :

<http://ge.ch/sitg/>

(Consulté régulièrement)

Les toitures végétalisées :

<http://www.terrenature.ch/nature/02092010-0000-geneve-et-lausanne-invitent-la-nature-sur-leurs-toits>

(Visité le 15 novembre 2012)

Législation de Genève :

<http://www.ge.ch/legislation/> M5 15

(Visité le 25 novembre 2012)

Generalized Regression Analysis and Spatial Prediction :

<http://www.unine.ch/CSCF/grasp/>

(Visité le 20 janvier 2013)

Indice de Kappa

<http://www.wikipedia.org>

(Visité le 21 janvier 2013)

Nature en ville :

<http://etat.geneve.ch/dt/SilverpeasWebFileServer/CDPNP - Nature en Ville->

[1.pdf?ComponentId=kmelia758&SourceFile=1269607464884.pdf&MimeType=application/pdf&Directory=Attachment/Images/](http://etat.geneve.ch/dt/SilverpeasWebFileServer/CDPNP - Nature en Ville-1.pdf?ComponentId=kmelia758&SourceFile=1269607464884.pdf&MimeType=application/pdf&Directory=Attachment/Images/)

(Visité le 02 février 2013)

12 Annexes

Annexe 1 : Schéma graphique des types de toitures végétalisées selon l'OFEFP

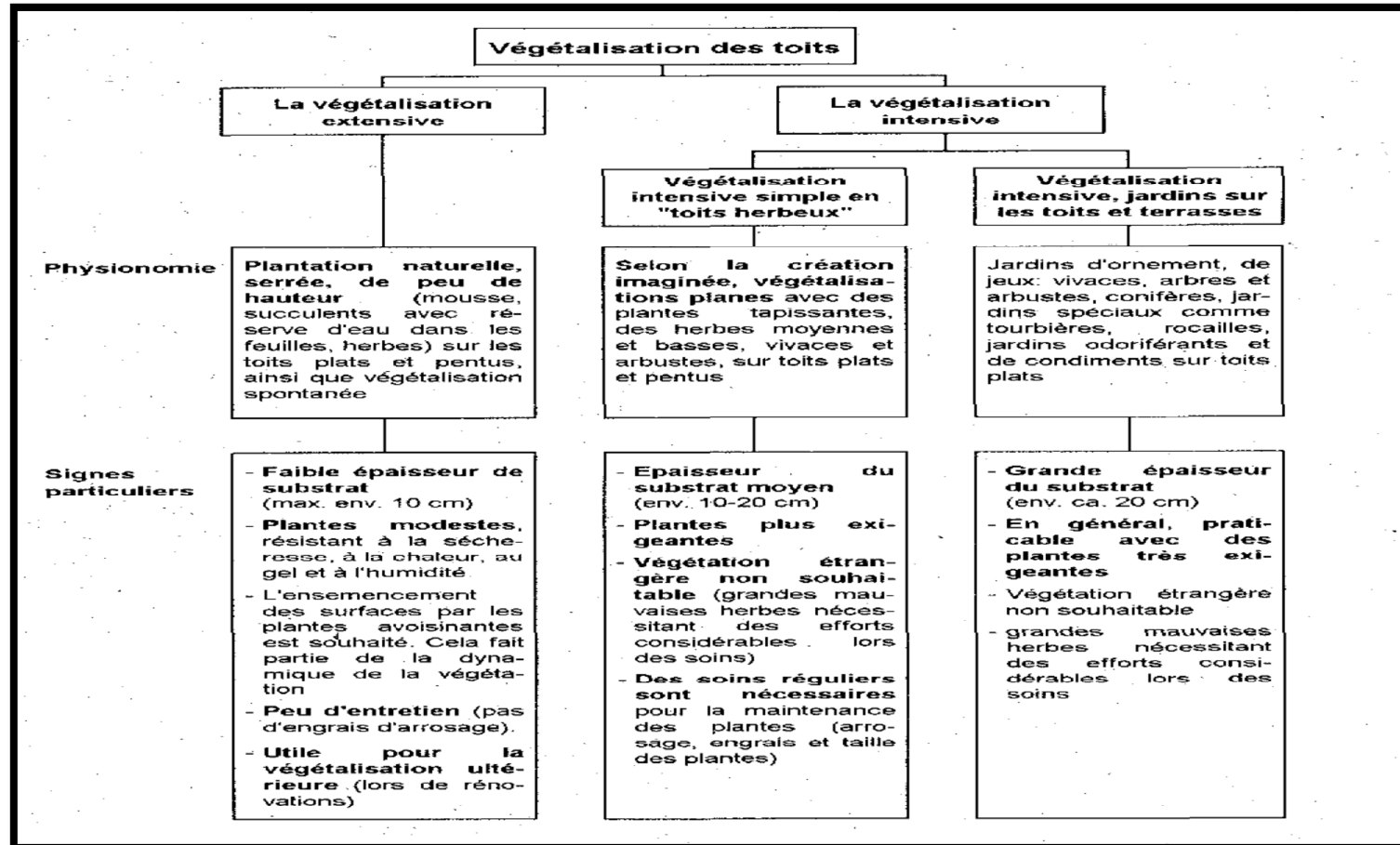
Annexe 2 : Découpage du canton de Genève en neuf zones d'études

Annexe 3 : Toitures végétalisées de la Ville de Genève – Catégories

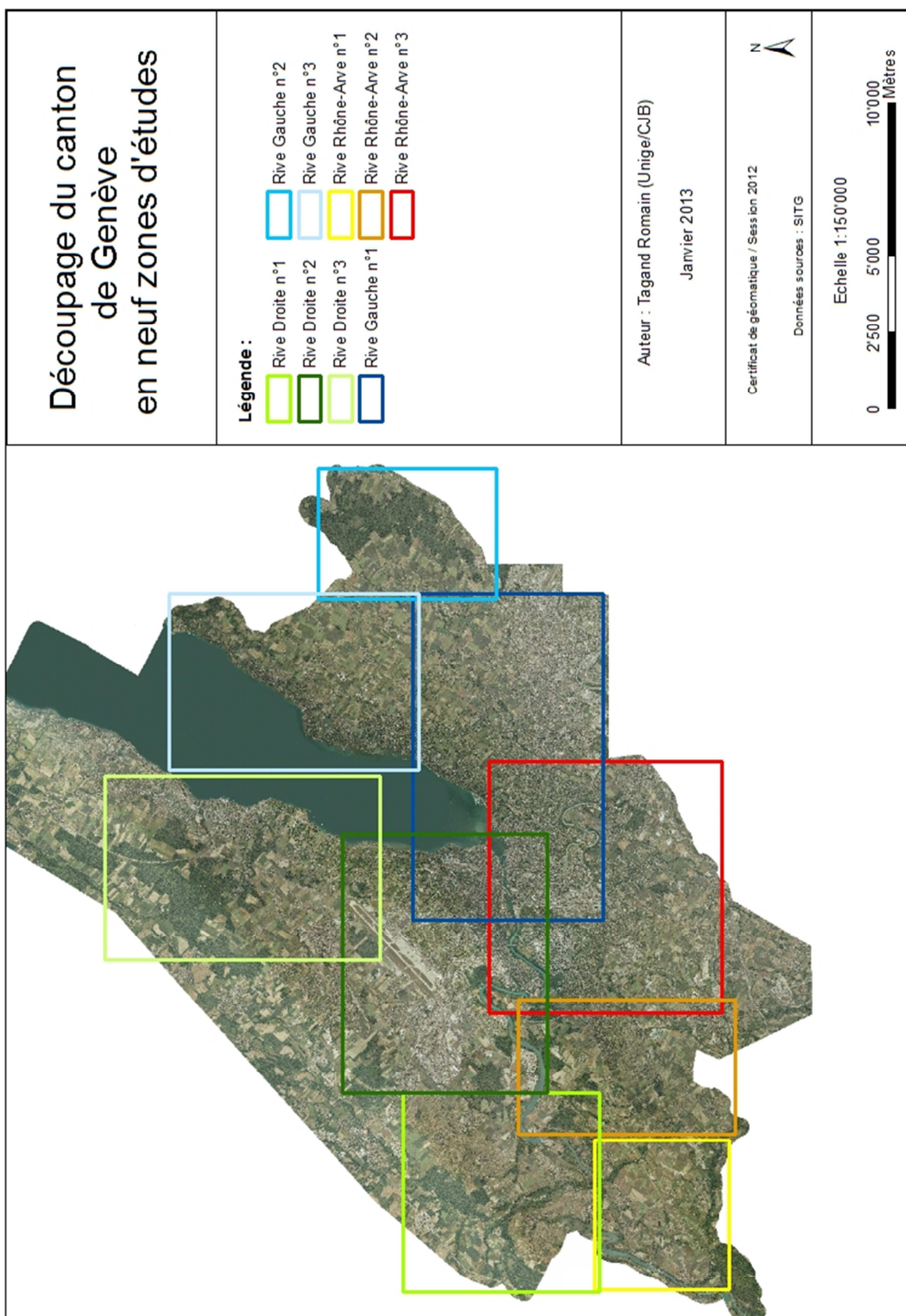
Annexe 4 : Tableau récapitulatif des surfaces de toitures végétalisées en fonction de la somme des surfaces totales des toitures par commune

Annexe 5 : Carte de densité des toitures végétalisées sur l'ensemble du canton de Genève

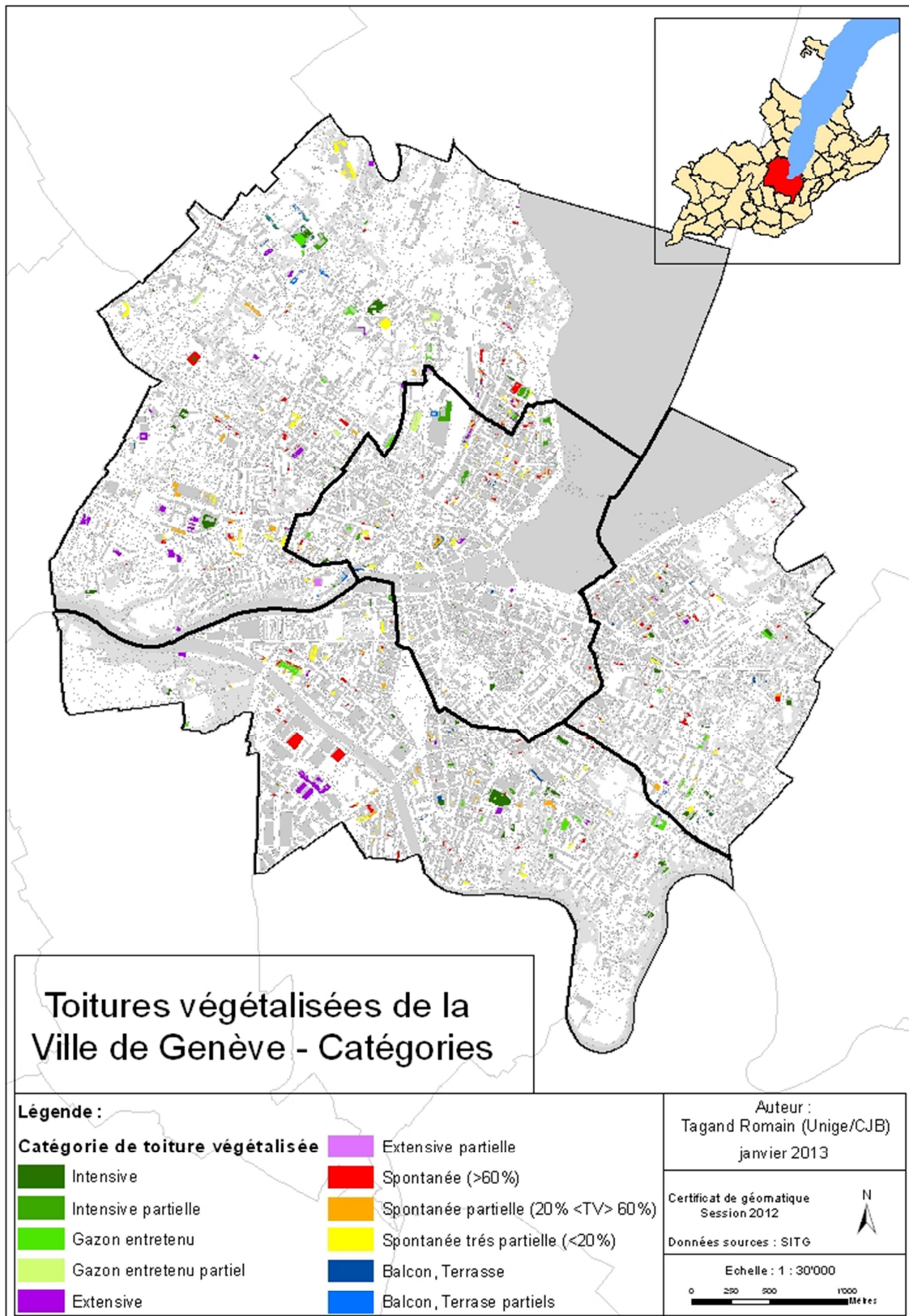
Annexe 1



Annexe 2



Annexe 3



Annexe 4

COMMUNE	TYPLOGIE	Surface de la commune (en m ²)	Nombre totale d'objets toits	Surface des toitures totale (en m ²)	Nombre d'objets toits verts	Surface des toits vert (en m ²)	Pourcentage de surface des toits verts (en %)	Nombre d'objets toits verts sans toits verts spontanés partiels	Surface des toits verts sans toits verts spontanés partiels (en m ²)	Pourcentage de surface des toits verts sans toits verts spontanés partiels (en %)
Aire-la-Ville	Villages	2'926'555	1'476	81'093	8	5'797	7.15	4	4'960	6.12
Anières	Zone urbaine périphérique	3'858'919	4'215	155'162	38	4'808	3.10	26	3'432	2.21
Avully	Villages	4'618'303	1'400	78'605	7	774	0.98	4	272	0.35
Avusy	Villages	5'172'043	1'871	87'239	4	142	0.16	0	0	0.00
Bardonnex	Villages	4'996'990	2'556	141'959	1	70	0.05	1	70	0.05
Bellevue	Zone urbaine périphérique	4'359'874	3'112	150'208	43	3'552	2.36	17	1'208	0.80
Bernex	Centres régionaux	12'953'935	7'452	475'013	45	8'403	1.77	21	4'890	1.03
Carouge	Coeur d'agglomération	2'696'696	7'965	609'001	68	28'847	4.74	35	14'396	2.36
Cartigny	Villages	4'383'521	1'537	73'659	3	1'377	1.87	2	188	0.26
Celigny	Villages	4'650'162	1'336	56'295	9	473	0.84	6	212	0.38
Chancy	Villages	5'380'935	1'185	63'672	1	109	0.17	0	0	0.00
Chene-Bougeries	Zone urbaine centrale	4'140'287	11'548	439'446	61	13'369	3.04	42	9'512	2.16
Chêne-Bourg	Zone urbaine centrale	1'280'738	4'756	224'185	41	19'629	8.76	30	15'776	7.04
Choulex	Villages	3'908'926	1'653	76'403	0	0	0.00	0	0	0.00
Collex-Bossy	Villages	6'886'822	2'059	97'708	0	0	0.00	0	0	0.00
Collonge-Bellerive	Centralités locales	6'118'345	13'220	519'965	90	21'601	4.15	58	15'071	2.90
Cologny	Zone urbaine périphérique	3'653'959	8'592	329'102	66	13'262	4.03	56	12'037	3.66
Confignon	Zone urbaine centrale	2'772'020	4'289	187'572	41	8'144	4.34	31	5'290	2.82
Corsier	Zone urbaine périphérique	2'736'451	2'955	121'661	20	1'992	1.64	15	1'494	1.23
Dardagny	Villages	8'596'394	1'707	97'337	5	1'055	1.08	2	554	0.57
Geneve (Ville)	Coeur d'agglomération	15'909'934	70'221	3'812'391	902	336'579	8.83	628	247'296	6.49
Genthod	Zone urbaine périphérique	2'869'577	4'234	159'028	10	875	0.55	5	461	0.29
Grand-Saconnex	Coeur d'agglomération	4'382'047	5'348	532'570	89	32'085	6.02	55	22'102	4.15
Gy	Villages	3'286'308	726	36'632	0	0	0.00	0	0	0.00
Hermance	Zone urbaine périphérique	1'430'134	1'779	58'370	6	985	1.69	6	985	1.69
Jussy	Villages	11'350'166	2'512	130'207	6	5'207	4.00	4	2'660	2.04
Laconnex	Villages	3'831'208	1'067	41'524	4	789	1.90	0	0	0.00
Lancy	Zone urbaine centrale	4'773'794	11'446	778'034	117	52'165	6.70	94	45'143	5.80
Meinier	Villages	6'953'477	2'014	125'731	7	1'040	0.83	6	977	0.78
Meyrin	Zone urbaine centrale	9'937'308	9'920	962'274	205	72'455	7.53	118	34'587	3.59
Onex	Zone urbaine centrale	2'814'454	5'622	315'917	80	28'882	9.14	34	15'948	5.05
Perly-Certoux	Zone urbaine centrale	2'536'118	2'566	195'991	2	1'148	0.59	1	159	0.08
Plan-les-Ouates	Zone urbaine centrale	5'853'832	10'533	596'083	50	25'322	4.25	36	20'417	3.43
Pregny-Chambesey	Zone urbaine centrale	3'226'907	6'410	231'684	35	12'945	5.59	25	10'369	4.48
Presinge	Villages	4'707'492	1'069	52'135	0	0	0.00	0	0	0.00
Puplinge	Zone urbaine centrale	2'672'124	1'843	96'774	1	88	0.09	1	88	0.09
Russin	Villages	4'909'733	951	45'201	1	573	1.27	1	573	1.27
Satigny	Zone urbaine périphérique	18'921'138	5'632	568'363	35	33'559	5.90	12	6'898	1.21
Soral	Villages	2'942'030	769	40'523	0	0	0.00	0	0	0.00
Thonex	Zone urbaine centrale	3'820'204	10'059	457'098	51	22'784	4.98	33	15'597	3.41
Troinex	Zone urbaine centrale	3'429'934	3'926	235'426	6	392	0.17	4	267	0.11
Vandoeuvres	Zone urbaine périphérique	4'419'835	6'852	206'420	36	3'038	1.47	20	2'047	0.99
Vernier	Zone urbaine centrale	7'687'252	16'088	950'279	88	67'317	7.08	54	53'113	5.59
Versoix	Centralités locales	10'488'565	7'831	394'973	68	18'623	4.72	46	11'107	2.81
Veyrier	Zone urbaine centrale	6'496'615	12'071	467'620	9	1'382	0.30	9	1'382	0.30

Annexe 5

