

**Rapport de stage
Certificat de Spécialisation en Géomatique**

***Cartographie semi-automatique des toitures végétalisées de la
Ville de Genève***

Joëlle Massy

Novembre 2010-Janvier 2011

Résumé

En milieu urbain les toits végétalisés sont une alternative pour la création d'espaces verts. Un projet a donc été mis en place, afin de chiffrer les avantages que pourraient apporter de telles structures. Le premier volet de ce projet consiste à mettre en place un inventaire semi, voire totalement automatisé de ces toitures vertes. A l'aide de paramètres tels que le *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), la pente, la luminosité, le modèle numérique de hauteur (MNH) ou encore la réflectance dans les longueurs d'ondes rouges venant d'orthophoto, nous avons caractérisé chaque toiture de la Ville de Genève. Pour chacun des toits, nous avons donc une valeur moyenne et un écart-type de tous ces paramètres.

Ensuite, après plusieurs essais de paramétrage, nous avons défini des valeurs seuils pour chaque variable qui permettent de sélectionner les toitures végétalisées avec un maximum de probabilité. Un peu de nettoyage manuel a dû cependant être fait, car la sélection découlant du modèle n'est pas parfaite. Ceci parce que les données ne sont pas homogènes. Par exemple, les orthophotos utilisées n'ont pas toutes été prises à la même heure ce qui influence l'ombrage des toits.

Finalement, environs 400 toits végétalisés à différents degrés ont été répertoriés. Par la suite, quelques analyses statistiques ont été exécutées afin de classer les toits. D'une part, suivant leur origine spontanée ou anthropique et d'autre part, suivant le type et la répartition de la végétation qui s'y trouve. Une analyse par quartier est également produite afin de déterminer quelle est l'insertion de ces toits dans le continuum vert de la ville et de savoir si un quartier a un meilleur potentiel de toits végétalisables qu'un autre.

Remerciements

Je tiens à remercier :

Nicolas Wyler, qui m'a accueillie promptement au sein de son équipe, pour son aide,

Pascal Martin, qui a toujours pu répondre à mes questions,

Anthony Lehmann, sans qui ce stage n'aurait pas eut lieu,

Sophie Pasche et Helder Santiago qui ont permis de créer une ambiance de travail sympathique et pour leur aide.

Et Guy Loutan de l'Association CONVIVE ainsi que Catherine Lambelet pour leurs précieuses informations sur les toits végétalisés.

Sommaire

1. Introduction	4
1.1 Contexte	4
1.2 Définition d'une toiture végétalisée	4
2. Méthodologie	5
2.1 Rassemblement des données nécessaires	5
2.2 Données utilisées	6
2.3 Construction des modèles dans Model Builder	6
2.4 Création du raster NDVI	7
2.5 Création du raster de luminosité	8
2.6 Création du raster de pente	8
2.7 Préparation de la couche des toits	9
2.8 Sélection des toits potentiellement végétalisés	11
2.9 Passage à l'application du modèle pour la Ville de Genève	12
2.10 Création d'un modèle de base de données	13
2.11 Création de la couche des parcs de la Ville de Genève	15
2.12 Analyses des données acquises sur les toits végétalisés	15
2.12.1 Classification des toitures végétalisées sélectionnées	16
2.12.2 Analyse du potentiel végétalisable des toits de la ville par quartier	18
2.12.3 Analyse de la densité de toits végétalisés	20
2.13 Affinement de la sélection par l'ajout de nouveaux paramètres	20
3. Résultats	23
3.1 Carte des toits végétalisés de la Ville	23
3.2 Carte de la classification des toits	24
3.2.1 Les 10 catégories conçues	24
3.3 Analyse des toits par quartier	26
3.4 Analyse de la densité de toits végétalisés	28
3.5 Couche des parcs de la ville	30
4. Interprétation	31
4.1 Carte de la classification des toits	31
4.1.1 Moyenne pour chaque classe	31
4.2 Analyse des toits par quartier	31
5. Conclusions	32
5.1 Conclusion sur les toits végétalisés	32
5.2 Conclusion de stage	32
6. Bibliographie	33
7. Annexes	35

1. Introduction

1.1 Contexte

Dans le cadre des engagements d'Aalborg signés en 2010 par la Ville de Genève, cette dernière s'engage à améliorer la qualité et la quantité des habitats pour la faune et la flore¹. Les toits végétalisés peuvent participer à l'augmentation de la biodiversité en ville en servant de relais pour la dissémination des graines par exemple. A Bâle, certains toits verts sont des lieux de nidification de substitution pour des espèces rares en Suisse² comme le Vanneau huppé, un petit oiseau insectivore³. Il est donc important de répertorier et localiser ces toitures vertes afin d'en examiner les caractéristiques. Dans cette optique, la Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève (hepia) a mis en place un projet sur l'ensemble du Canton. Celui-ci consiste, dans un premier temps, à inventorier ces toitures de façon automatique puis, à améliorer les connaissances de ces structures vis-à-vis notamment de l'eau, de l'énergie et de la biodiversité. Il semble, en effet, que mettre de la végétation sur les toits soit bénéfique pour la gestion des eaux de pluies ou pour les économies d'énergie liées à la climatisation⁴. Finalement, un rapport entre le coût et le bénéfice apporté par ces structures sera calculé. L'hepia collabore avec les Conservatoire et Jardin botaniques de la Ville de Genève (CJB) en ce qui concerne l'élaboration d'une carte répertoriant les toits verts. De son côté, les CJB ont entrepris de cartographier et d'identifier toute la végétation présente sur le territoire de la ville de Genève, ceci en vue de répondre aux impératifs des engagements d'Aalborg. Les toits verts sont une part, trop souvent omise, de cette végétation.

C'est dans ce contexte que se situe ce travail de stage qui a pour but de répondre, en partie, à la première demande du projet de l'hepia. Toutefois, la zone étudiée sera uniquement la Ville de Genève. La cartographie a été automatisée au maximum, en caractérisant ces toitures vertes par leur pente, leur végétation via le NDVI, leur luminosité, leur taille et leur hauteur. Ceci afin de rendre l'inventaire reproductible en des lieux différents ou à d'autres échelles. La définition d'un modèle conceptuel de données pour l'ensemble des espaces verts de la ville était également demandée, cela afin d'articuler l'intégration des toits verts dans une structure commune à l'ensemble des objets végétalisés de la ville.

1.2 Définition d'une toiture végétalisée

Un toit vert a une structure déterminée qui comprend en général en dessous de la végétation:

- une couche d'isolation posée à même le toit qui sert de protection
- une couche de drainage pour l'eau de pluie
- une couche de terre d'épaisseur variable⁵

Il existe deux types de toiture verte:

- les extensives qui ont une épaisseur de terre, ou de substrat, moindre et ne demande peu d'entretien car elles contiennent des espèces résistantes comme les plantes succulentes, les xérophiiles ou les graminées.
- les intensives qui ont des épaisseurs de terre plus conséquentes et qui sont recouvertes d'arbustes et/ou d'herbacées. Ce qui demande un entretien plus important⁵.

Cependant, certains toits répertoriés sont couverts d'une végétation spontanée arrivée sur le toit grâce à l'apport de graines issues de la végétation environnante. Ces derniers ne possèdent donc pas les caractéristiques mentionnées ci-dessus. Nous avons, toutefois, considéré ces toitures comme vertes, car elles peuvent avoir la même fonction écologique que les toits végétalisés au sens strict.

¹ Ville-geneve.ch

² Naturdach.ch, Université de Zurich, ZHAW

³ Oiseaux.net

⁴ Summary of the Consultant's Report (2005)

⁵ Office fédéral de l'environnement des forêts et du paysage (1995), Fiche Hepia (février 2010)

2. Méthodologie

2.1 Rassemblement des données nécessaires

Tout d'abord, il a fallu se renseigner sur les caractéristiques visibles des toits verts afin de pouvoir décider sur quelles bases les identifier. Les toits végétalisables doivent être relativement grands et plats. La taille et la pente sont donc des facteurs discriminants⁶.

Ensuite, les toits verts sont évidemment recouverts en partie de végétation, il est donc possible de les distinguer des autres grâce à un indice de végétation. Ici c'est le *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) qui a été utilisé. C'est une valeur qui varie entre -1 et 1. Plus le résultat se rapproche de 1, plus l'activité photosynthétique est grande⁷. Celui-ci se calcule comme suit à partir des données de réflectance des longueurs d'onde dans le domaine du proche infrarouge (IR : 0,78 µm à 1,4 µm) et du rouge (R : 620-780 nm) :

$$NDVI = (IR - R) / (IR + R)^7$$

Finalement, ces toitures végétalisées sont moins brillantes que des surfaces bétonnées. Leur luminosité est donc plus faible. La luminosité est l'addition des canaux du domaine visible rouge, vert et bleu. Le noir donnant des valeurs basses et le blanc des valeurs hautes.

Dans un autre temps, les couches provenant du Système d'Information du Territoire Genevois (SITG) ont été inspectées pour trouver les informations utiles déjà disponibles. Deux couches ont été principalement retenues : la couche des bâtiments hors-sol et celle des toits. En définitive, c'est la couche qui représente les toits du Canton qui a été gardée pour le modèle. Ceci parce que la couche des bâtiments ne définissait pas exactement les toits. En effet, il est possible de rencontrer des habitations avec des avant-toits ou des structures secondaires sur les toitures qui ne sont pas représentés dans la couche des bâtiments qui décrit uniquement l'emprise au sol.

Des orthophotos prises en juin 2009, ainsi qu'un modèle numérique de surface ont également été utilisés. Il existe plusieurs types de modèle numérique, tel que le modèle numérique de terrain (MNT), de surface (MNS) ou encore de hauteur (MNH). Le schéma ci-dessous explique la relation entre ces différents types de données.

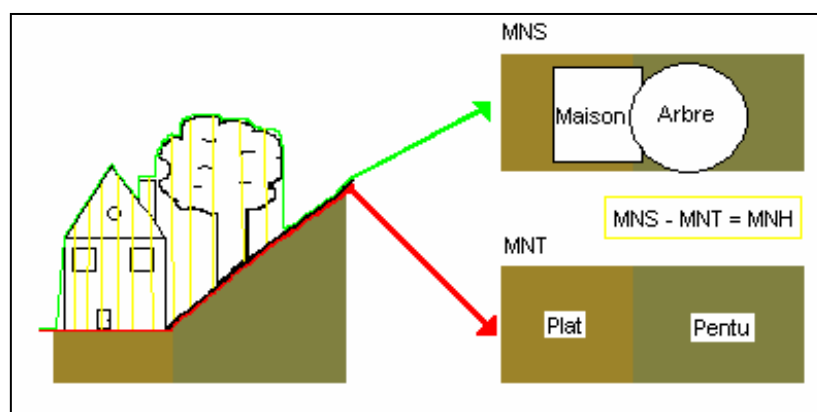


Figure 1 : Le MNT nous montre les variations de niveau du sol alors que le MNS voit la surface la plus haute des objets sur le terrain. Le MNH est la différence entre le sol et la surface la plus haute.

⁶ Office fédéral de l'environnement des forêts et du paysage (OFEPF),

⁷ Tucker, C.J. 1979.

Cependant, il faut être attentif lors du maniement de ces données, car les couches provenant du SITG sont dans l'ancien système de coordonnées géographiques nommé *CH1903* alors que les modèles numériques de terrain ainsi que les orthophotos sont dans le nouveau système *CH1903+*. Avant de manipuler les couches, il faut donc les convertir afin qu'elles soient toutes dans le même système. Pour la conversion, nous avons utilisé le logiciel *Feature Manipulation Engine, Universal translator (FME)* qui permet de transformer les données *CH1903* en *CH1903+*. Il existe également un outil de conversion sur le site Internet de Swisstopo, mais celui-ci n'a pas été exploité.

2.2 Données utilisées

- **La couche des toits** : provient des SITG et se trouve donc en *CH1903*. Nous l'avons transformé en *CH1903+*.
- **Les 30 orthophotos couvrant la Ville de Genève** : proviennent du Service de la mensuration officielle de l'Etat de Genève (SEMO). Elles ont une résolution de 10cm et contiennent chacune quatre bandes (vert, bleu, rouge et infrarouge). Pour gagner en temps de calcul, nous les avons dégradées à 60cm grâce à la fonction *Aggregate*. Il faut trouver le bon équilibre entre le temps de calcul gagné en dégradant et la nécessité d'avoir des résultats précis. La dégradation à 60cm nous paraît un bon compromis compte tenu de la taille des objets que nous étudions. Chaque orthophoto est une tuile de 1km². Ces données sont en *CH1903+*.
- **Le modèle numérique de surface (MNS)** : provient également du SEMO et est en *CH1903+*.

2.3 Construction des modèles dans Model Builder

Nous avons travaillé sur la version anglaise de ArcGis Desktop 9.2 (ArcView et ArcInfo), les noms des outils utilisés sont donc en anglais.

Sachant les caractéristiques vues plus haut, un modèle sélectionnant les toits conformes aux critères donnés à été mis en place.

Au départ, il était dans l'intention de faire un seul et unique modèle qui exécuterait toutes les opérations en une seule fois. L'image ci-dessous n'est qu'une partie du modèle qui aurait été le final.

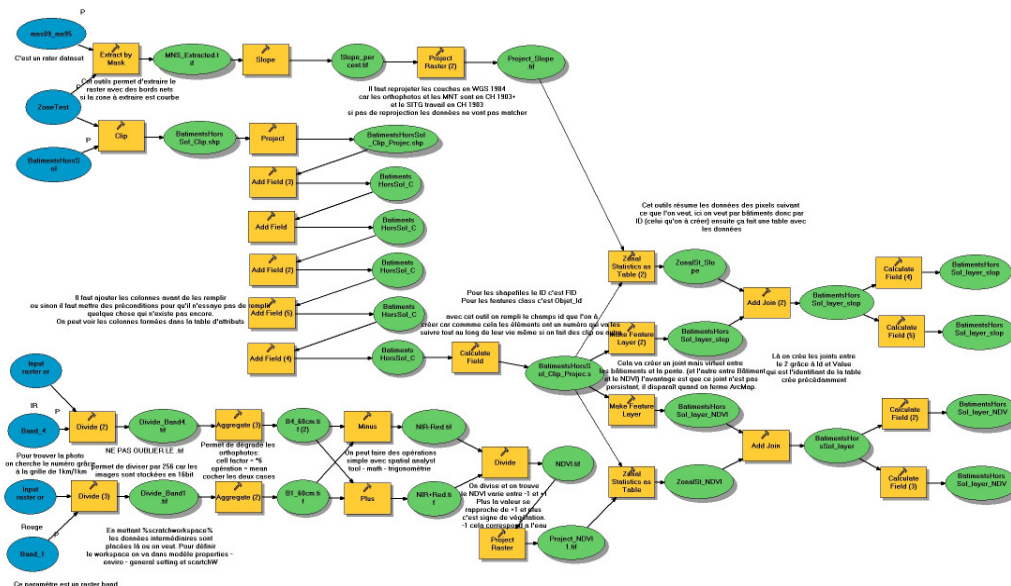


Figure 2 : Modèle d'essai où toutes les manipulations se faisait en une fois.

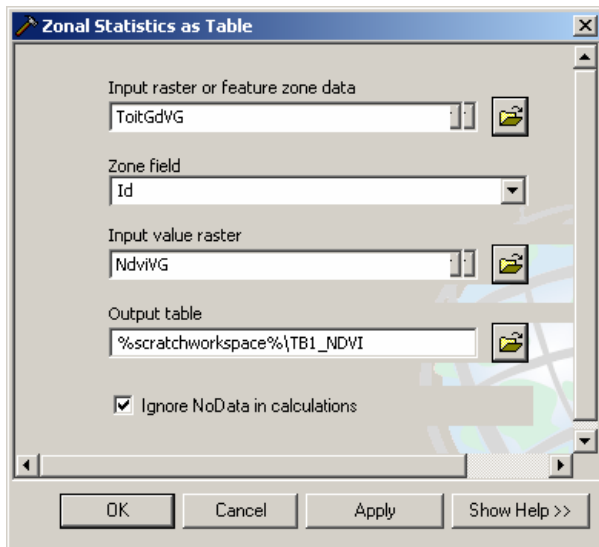


Figure 3 : Interface de l'outil *Zonal statistique as table*

Un modèle ainsi fait étant trop conséquent, nous avons dû le découper en plusieurs parties. Nous avons donc commencé par créer cinq modèles, dont quatre qui préparent les données à traiter et un dernier qui met ces informations en relations et sélectionnent les éléments pertinents. La fonction centrale est *Zonal statistics as table* qui permet de prendre une zone définie, ici les toits, et de faire des statistiques avec les données d'un *raster* de son choix. Nous obtenons ainsi pour la zone une moyenne, un écart-type, un maximum, un minimum ainsi que d'autres informations qui n'ont pas été utilisées dans notre cadre. C'est à partir de ces valeurs que la sélection des toits verts potentiels se fait. Afin de faciliter le nom des chemins d'accès pour les données intermédiaires, il est possible de définir un espace de travail pour celles-ci dans les propriétés du modèle et ensuite

d'inscrire `%scratchworkspace%/nom_couche` à la place du chemin d'accès de sortie dans les outils. Ceci permet, lors d'un changement d'ordinateur, de n'avoir pas tous les chemins à rééditer mais seulement les chemins d'entrées et de sorties du modèle. Les modèles ont été développés à partir de deux zones tests afin de limiter le temps de calcul, lors des phases d'essais.

2.4 Création du raster NDVI

Pour commencer, nous avons besoin d'un *raster* qui nous renvoie en chaque point des valeurs de NDVI. Nous avons donc pris les bandes des orthophotos du canton correspondant au rouge (bande n°1) et au proche infrarouge (bande n°4) pour les découper au périmètre de la ville. L'outil nécessaire pour cette extraction au niveau d'un *raster* est l'*Extract by mask*. Contrairement au *Clip*, cet outil respecte les courbes de la zone voulue. Puis, vient le calcul du NDVI proprement dit, pour lequel les fonctions mathématiques *Minus*, *Plus* et *Divide* ont été employées.

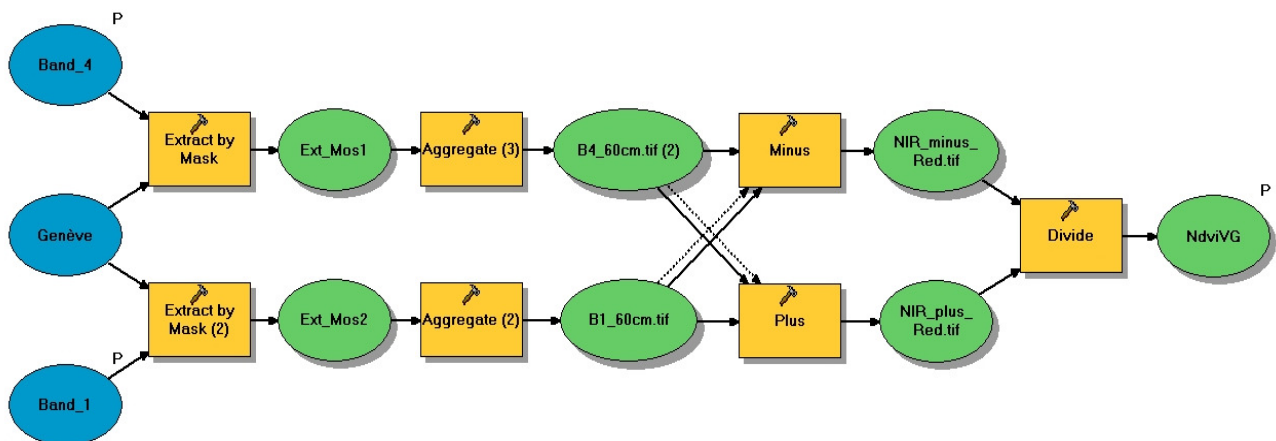


Figure 4 : Modèle calculant le NDVI avec un raster en sortie (temps d'exécution : environs 30h)⁸

⁸ Les temps d'exécution peuvent varier suivant la puissance de l'ordinateur utilisé.

2.5 Création du raster de luminosité

Comme pour le NDVI, nous allons créer un *raster* qui rapporte pour chaque pixel une valeur de luminosité. Il est également recommandé de dégrader les données à 60cm comme à l'étape précédente. Ensuite, chaque valeur de pixel est divisée par 256 afin d'avoir des données en 8bit, avec 256 valeurs possibles, car les *rasters* de départ se trouvent en 16bit et ont donc une palette de 65'536 valeurs. Lors du calcul du NDVI, cette étape n'est pas nécessaire car il s'agit un rapport. Nous additionnons finalement les trois bandes avec la fonction *Plus*. Les doubles flèches signifient qu'une précondition existe. C'est-à-dire que le calcul ne peut pas s'effectuer si une des deux valeurs n'a pas été créée au préalable. Ceci est parfois nécessaire, car des erreurs peuvent survenir suivant l'ordre des calculs, s'ils sont fait au hasard.

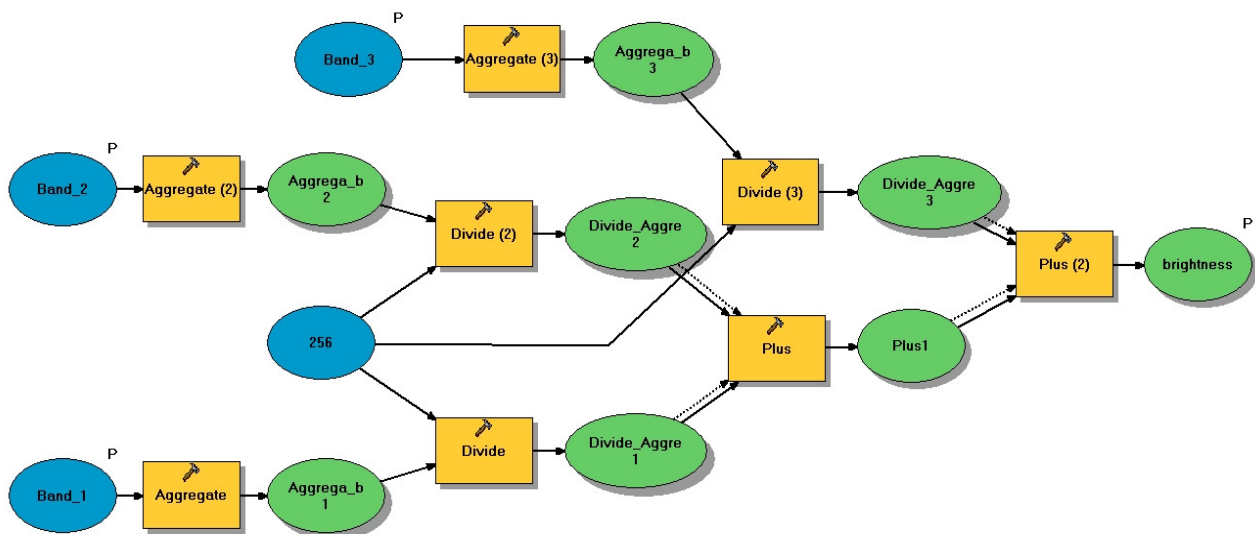


Figure 5 : Modèle calculant la luminosité avec un raster en sortie (temps d'exécution : environs 45h)

2.6 Création du raster de pente

La pente est calculée à partir du MNS grâce à la fonction *Slope*. Comme pour la luminosité, nous commençons par extraire la zone d'intérêt. Afin d'obtenir un *raster* sur lequel sélectionner facilement les zones plates, un *raster* constant est élaboré avec l'outil *Create constant raster*. Ce *raster* a pour particularité d'avoir tous les pixels à la même valeur que nous pouvons définir. Généralement, les toitures végétalisées ont une pente idéale qui se situe entre 3° et 5°. En dessous de 3°, l'eau stagne sur le toit et au-dessus de 5° l'eau n'est pas retenue, le substrat est lessivé. Afin de garder une marge d'erreur, nous avons décidé de créer un *raster* avec une valeur constante de 8°. Ensuite, avec la fonction *Less than equal*, il est possible d'attribuer la valeur 1 à tous les pixels qui ont une pente inférieure à 8 et la valeur 0 aux autres. Il faut également être attentif au fait que le *raster* constant doit avoir la même extension que celui de la pente, sinon la fonction *Less than equal* ne fonctionne pas. Pour éviter de rentrer à chaque fois l'extension à la main, il est possible, dans les propriétés de l'outil sous *General setting*, de lui demander de prendre la même extension qu'un autre *raster*. C'est pour cela que nous avons une flèche en trait tillé en plus de celle de précondition en pointillé. Finalement, avant de pouvoir utiliser le *raster* constant, il doit encore recevoir une projection car elle ne se crée pas automatiquement. C'est l'outil *Define projection* qui nous est alors utile. Le *raster* que nous obtenons à la fin du modèle contient, comme il est dit plus haut, uniquement les valeurs 0 et 1. Lorsque nous ferons les moyennes avec le *Zonal statistique as table*, les résultats obtenus seront des pourcentages de pixels qui ont des pentes inférieures à 8° pour chaque toit. Cette méthode donne de meilleurs résultats que si nous faisons simplement des moyennes de pente car les bords des toits ont des pentes vertigineuses dues à leurs façades

verticales. Ces valeurs extrêmes faussent nos moyennes, lorsque que le MNS et la couche des toits ont un léger décalage.

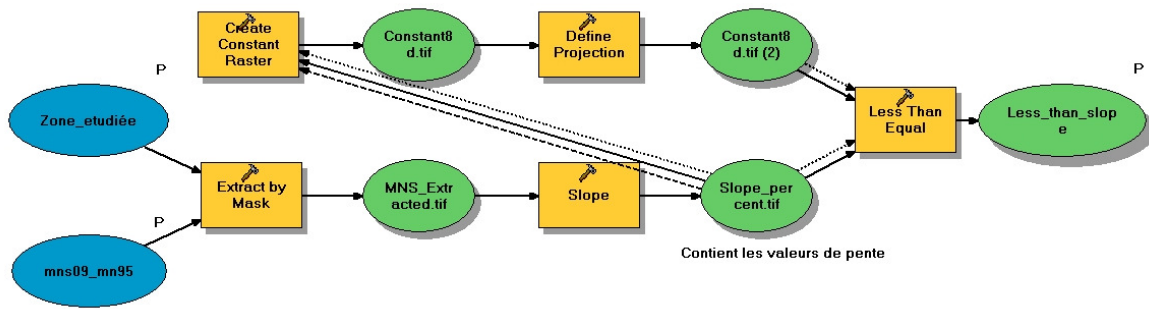


Figure 6 : Modèle calculant la pente avec un raster en sortie (temps d'exécution : environs 2min)

2.7 Préparation de la couche des toits

Avant de pouvoir rentrer dans le modèle la couche des toits fournie pas le SITG, elle doit subir quelques modifications. La première est de la rendre topologiquement propre car elle contient des polygones à double et d'autres qui se chevauchent. Nous devons commencer par créer une topologie dans *ArcCatalog* que nous devons placer dans un *feature dataset*. Les topologies ne peuvent être faites qu'uniquement avec une licence *ArcInfo*. Ceci fait, dans *ArcMap*, nous validons la topologie afin de pouvoir constater les erreurs. Dans le *Error inspector*, qui se trouve dans la barre d'outil liée à la topologie, il faut visualiser les erreurs et toutes les sélectionner. Avec un clic droit, nous choisissons l'option *Select feature*. Elle nous permet de distinguer tous les polygones qui participent aux erreurs. Dans la couche des toits, nous exportons les éléments sélectionnés vers une nouvelle couche. Sur cette nouvelle couche seule, la fonction *Union* est utilisée. Cette manœuvre permet de créer pour chaque recouvrement trois polygones, un pour chaque polygone préexistant et un pour leur intersection, ceci tout en gardant les attributs. Cette couche contient également des polygones à double qu'il faut enlever. Pour cela, nous avons téléchargé une boîte à outil qui se nomme *Type Convert* dans laquelle se trouve la fonction *Remove duplicate* qui permet de séparer les doublons. Grâce à cet outil, nous obtenons deux couches l'une avec les polygones à double et une autre propre avec seulement des polygones à exemplaire unique. C'est avec cette dernière que nous allons continuer. Finalement, pour être sûr de remettre les bouts de toits séparés lors de l'*Union* avec le bon polygone, nous faisons un *Dissolve* en choisissant comme critères les altitudes maximales et minimales, ainsi que le numéro EGID qui est propre à chaque bâtiment. Ainsi, toutes les superpositions se retrouvent avec le polygone auquel elles appartiennent. Avec cette méthode, nous obtenons une couche topologiquement propre. Cependant, certains polygones sont perdus lors du *Dissolve* s'ils se trouvent dans le même bâtiment, c'est-à-dire qu'ils possèdent le même numéro EGID et s'ils ont les mêmes altitudes. Heureusement, après vérification ces polygones perdus ne sont pas nombreux, souvent de petites tailles et étaient contenus dans un polygone plus grand qui lui n'a pas été perdu.

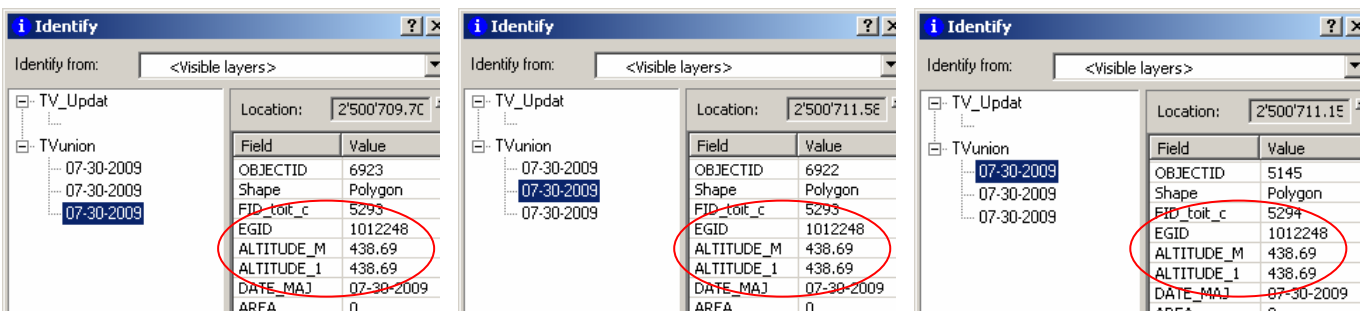


Figure 7 : Ces trois polygones ont tous les mêmes valeurs pour les altitudes et le EGID, après le *Dissolve*, ils n'en forment donc plus qu'un.

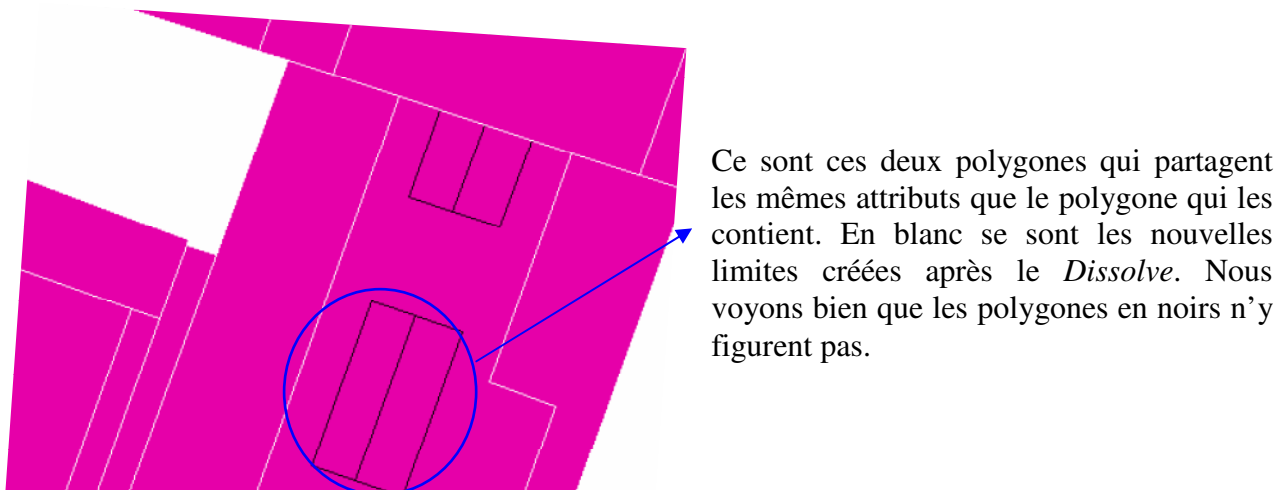


Figure 8 : En rose et noir figure la couche avant le *Dissolve*, en blanc la couche obtenue après.

Pour finir le nettoyage, nous appliquons un *Update* à la couche de départ afin de remplacer les polygones comportant des erreurs par les polygones propres que nous venons de créer.

Ensuite, comme le travail se fait sur des *raster*, les polygones extrêmement petits renvoient des valeurs nulles lors des calculs, car ils ne contiennent pas un seul pixel en entier. C'est pourquoi il est préférable, avant d'ajouter les champs nécessaires à la couche des toits, d'effectuer un *Select* pour ne prendre que les polygones dont l'aire est supérieure à 1,5m².

Puis, après ces nombreuses manipulations, les 7 champs utiles pour la suite peuvent être ajoutés. Ces champs sont dans l'ordre :

- Un numéro d'identification qui permet de suivre les objets quelques soit les manipulations qui suivront : Id
- La moyenne du NDVI calculée par le *Zonal statistics as table* comme pour les autres ci-dessous : NDVI_mean
- L'écart-type du NDVI : NDVI_Sd
- La moyenne des pourcentages de pente : Slope_mean
- L'écart-type des pourcentages de pente : Slope_Sd
- La moyenne de la luminosité : Bright_mean
- Et l'écart-type de la luminosité : Bright_Sd

Finalement le premier champ, l'identifiant, est calculé à partir de l'*ObjectId*. Il est important de créer les champs à la suite, avant de les remplir ou alors de mettre des préconditions, afin que les champs ne soient pas calculés avant d'être créés. Nous calculons un identifiant car lors d'opérations tels que *Select* le logiciel réinitialise le champs *ObjectId* ce qui nous fait perdre le lien avec nos objets de départ. Notre identifiant, quant à lui, reste le même pour chaque toit, les objets peuvent ainsi être retrouver quelque soit les opérations faites.

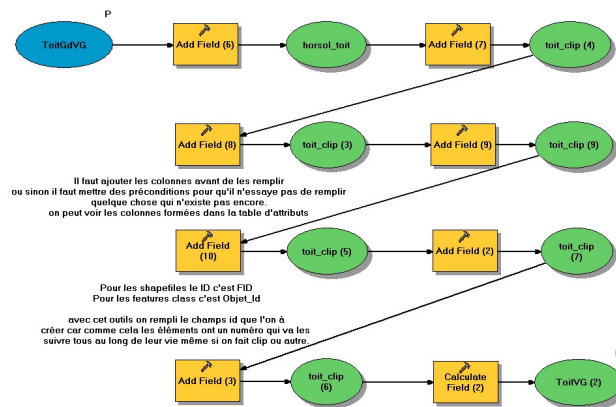


Figure 9 : Modèle préparant la couche des toits à recevoir les informations (temps d'exécution : quelques secondes.)

2.8 Sélection des toits potentiellement végétalisés

Après avoir créé tous les paramètres d'entrées, grâce aux modèles précédents, il faut prendre les *raster* obtenus et leur appliquer la fonction *Zonal statistics as table* en choisissant comme discriminant des zones, le numéro d'identification antérieurement calculé (Id). Il y a également une option qu'il faut cocher dans cet outil, qui est la case *No data*. Si cette case n'est pas cochée, les toits qui contiennent une ou plusieurs cellules sans valeur, par exemple à cause d'un effet de bord, ne seront simplement pas calculés. Alors que si l'option est activée, ces toits seront calculés, mais uniquement sur l'ensemble des pixels ayant une valeur. Ensuite, une liaison est faite, via l'outil *Add join*, afin de pouvoir remplir les champs de la couche des toits avec des *Calculate field*. Cette relation est faite à partir de *layer*, ainsi elle n'est pas permanente et s'efface lorsque nous fermons le logiciel. C'est pour cela que la couche des toits doit d'abord être transformée en *layer* avec la fonction *Make feature layer*. Lorsque les six champs sont remplis, il est possible de faire des sélections sur les toits.

Les critères retenus pour choisir les toits ont du être ajustés pour perdre le moins de toits possibles. Ces critères ne pouvaient pas être trop stricts car, étant donné que les orthophotos n'ont pas toutes été prises en même temps et dans les mêmes conditions, les valeurs des toits verts varient légèrement d'une photographie à l'autre. Un premier paramétrage sur les variables calculées plus haut fait à partir des valeurs des toits verts déjà connus, a été effectué. Puis, nous avons soumis ces limites à notre deuxième zone d'étude. Nous avons constaté que nos limites précédentes étant trop strictes, elles ont donc été ajustées, afin de contenir tous les toits verts visibles sur cette zone d'étude. En classant nos toitures par ordre croissant pour un critère donné, il est possible de constater avec précision pour quelles valeurs nous commençons à avoir des toits végétalisés.

Finalement, suite à plusieurs essais, les limites suivantes ont été retenues :

- Avoir une moyenne de NDVI comprise entre -0.078 et 0.229 : certains toits ont des valeurs basses car ils ne sont pas végétalisés sur toute leur surface, ce qui se fait ressentir lors du calcul de la moyenne. À l'inverse, d'autres toits se situant sous des arbres ont des résultats très élevés pour le NDVI. Nous avons donc mis une limite supérieure afin de ne pas prendre en compte ces toitures.
- Avoir une moyenne de luminosité comprise entre 231.7 et 471.03.
- Avoir plus de 25% de la surface avec une pente de moins de 8° : cela correspond à prendre toutes les moyennes plus hautes que 0.25.
- Avoir une surface plus grande que 16.8m² : en regardant les données, nous avons constaté que le plus petit toit végétalisé avait cette superficie.

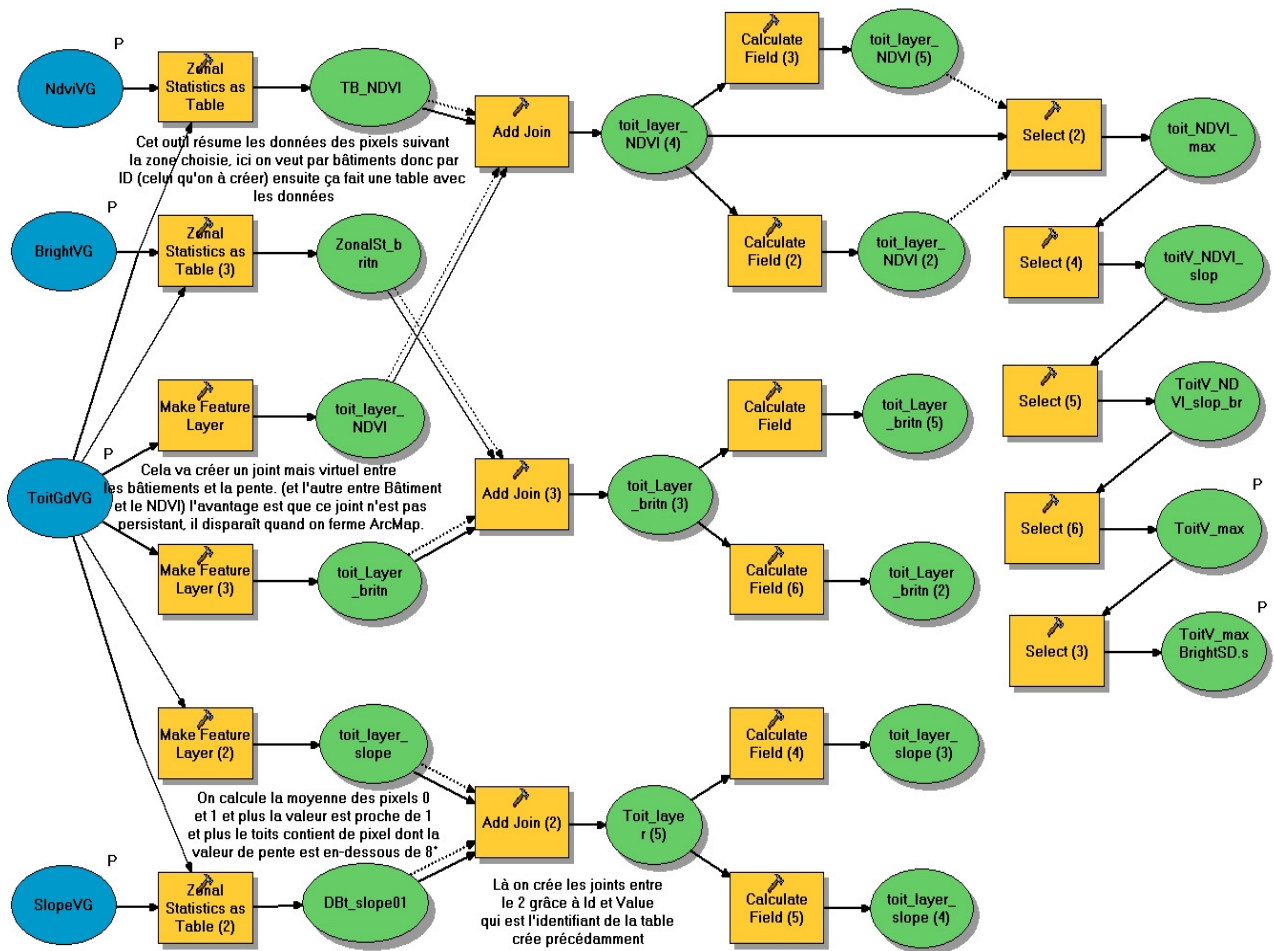


Figure 10 : Modèle insérant les données calculées dans la couche des toits (temps d'exécution : environs 15min)

2.9 Passage à l'application du modèle pour la Ville de Genève

L'obstacle majeur pour cette phase du travail a été les temps de calcul extrêmement long. En effet, comme nous travaillons sur des *raster*, les calculs sont nombreux, car il y en a un par cellule, d'où la nécessité de réduire la résolution des données et ainsi le nombre de pixels.

Pour commencer, il a fallu trouver un moyen de mettre ensemble les 30 orthophotos de 1 km² qui couvrent la surface de la ville. Pour cela, nous avons d'abord pensé à construire un *Raster catalog* afin d'y stocker nos photographies. Cependant, nous avons remarqué que sur ce type de matériel, il était impossible d'utiliser des outils tels que l'*Extract by mask*. Ce dernier nous étant indispensable, nous avons dû trouver un autre moyen. C'est donc avec l'outil *Mosaic* que nous avons rassemblé les orthophotos. Cette fonction permet de rajouter à un *raster* préexistant nommé *target* d'autres *raster* appendus et de créer au final une seule image à partir de toutes les autres. Cette donnée à 10cm est cependant très lourde (~32Gb pour 30 km²) et le processus lent. De plus, la dégradation de chacune des quatre bandes est également très coûteuse en temps (~13h par bande). Cependant, après cela, les étapes sont bien plus rapides car l'image est moins lourde (~320Mb par bande). Ainsi, une couche des toits de la Ville de Genève avec pour chacun ces caractéristiques de pente, NDVI et luminosité a été reconstruite.

Après les sélections faites selon le modèle, nous avons obtenus un total d'un peu moins de 2'000 toits potentiellement verts parmi les un peu moins de 60'000 objets de la couche des toits. Cela nous offre une réduction du champ d'investigation appréciable, car les toits que nous obtenons ne représentent que le 3,3% du total des toits. Cependant, nous avons tout de même tenté de réduire encore la marge en mettant des critères de sélection sur l'écart-type de la luminosité. En effet, un

toit végétalisé n'est pas uniforme et possède donc un écart-type relativement important, contrairement à un toit bétonné qui sera plus homogène. Ce choix est étayé par des tests statistiques effectués avec M. Martin, à l'aide de l'extension de *Mircosoft excel* nommée *XLstat 7.1*. Nous avons fait des statistiques descriptives puis discriminantes sur la couche des toits verts potentiels afin de voir s'il existait encore un facteur qui permettait de distinguer les deux groupes. Le critère « Avoir un écart-type de luminosité supérieur à 30 » a donc été rajouté. Ce qui a permis de retirer de la liste une centaine de toits qui n'étaient, en réalité, pas végétalisés.

Après ces étapes ce sont 1'747 polygones qui sont des toits verts potentiels. Ensuite, il faut nettoyer la couche des toits qui ne sont pas vraiment verts de manière manuelle. Au passage, nous avons rencontré une petite vingtaine de toits qui n'avaient pas été pris en compte lors de la première sélection car ils ont pour l'un ou l'autres des critères une valeur extrême. Nous avons donc dû les rajouter à la main dans la couche finale. Pour finir, seulement 386 toits sur 1'747 ont été gardés, ce qui représente malgré tout un travail manuel important, car il faut retirer de la liste environ 80% des toits sélectionnés.

2.10 Création d'un modèle de base de données

Afin d'avoir une idée générale de l'insertion de la donnée produite par ce modèle dans l'ensemble du projet concernant les espaces verts de Genève (SIPV volet Espace Vert), nous avons créé un modèle conceptuel de donnée (MCD). Dans un premier temps, nous avons mis en place une récolte des données existantes sur le SITG et ailleurs des informations concernant les espaces verts. Il fallait ensuite réfléchir à comment les organiser et les relier entre elles. Nous avons donc créé une première base de donnée gravitant autour de la couche principale qui intègre tous ce qui est végétal sur le Canton. Pour la mise en forme de la base de donnée, nous avons utilisé un logiciel libre nommé *AnalyseSI - v0.74.1*. Cette application permet de créer des modèles conceptuels et logiques de base de donnée avec des relations entre les tables, ainsi qu'un dictionnaire des attributs.

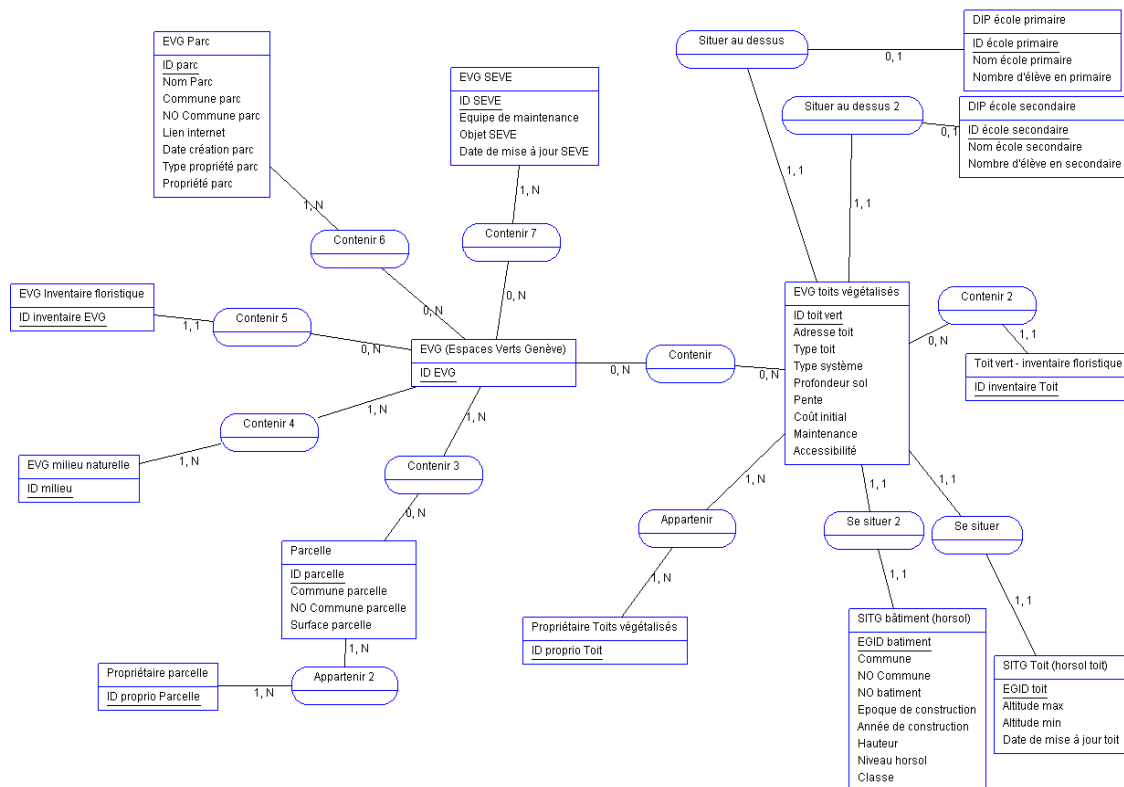


Figure 11 : Premier modèle conceptuel de donnée élaborée avec toute les données retenues au départ.

Après discussion, nous avons décidé de ne pas faire figurer les inventaires floristiques qui seront liés au reste de façon spatiale uniquement, de même que les données sur les parcelles. Le modèle constitué ici était trop complexe au niveau de la relation entre les toits verts et les écoles. En cherchant de manière plus approfondie dans les données, nous avons trouvé un autre moyen de les relier. En effet, la couche des bâtiments hors sol contient un champ nommé *destination* qui donne le but de l'établissement. Dans ce champ, nous retrouvons un critère *école primaire* ou *école privé* qui permettrait de relier ces écoles aux bâtiments. Cependant, les écoles ne sont pas toutes représentées par ce critère. Nous avons donc finalement opté pour un champ *école* inséré dans la table des toits végétalisés. Ce champ est binaire (oui/non) et nous renseigne sur la fonction du bâtiment en tant qu'école ou non.

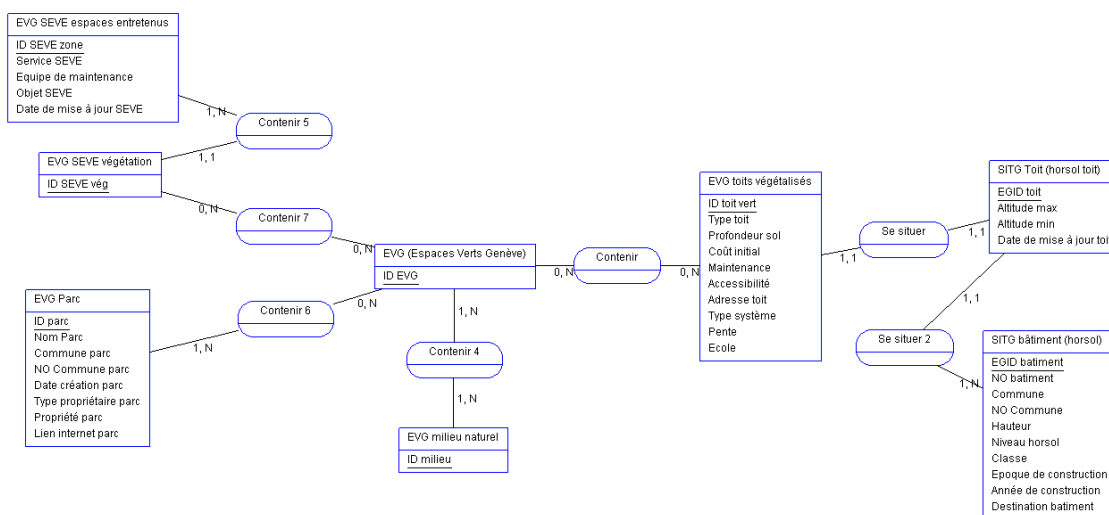


Figure 12 : Deuxième modèle simplifié.

Le problème majeur est de savoir comment nous pouvons relier intelligemment les données sur milieux naturelles, les parcs, les espaces entretenus par le Service des Espaces Verts et de l'Environnement (SEVE), et notre couche finale sur les espaces verts de la ville. Il faut savoir que ces différentes couches se superposent et se contiennent ce qui complique la réflexion. Après avoir discuté avec les gestionnaires des couches du SEVE, nous avons appris qu'une couche nommée *végétation_type*, existe. C'est une version découpée de la couche *végétation*, dans laquelle figure pour chaque élément le type de végétation. Nous avons également appris que la couche *espaces_entretenus* est une couche de travail qui contient dans les grandes lignes les éléments de la couche *végétation* en plus de chemins et des zones en durs se trouvant entre ces éléments. Nous avons donc rentré ces informations dans notre modèle de donnée et nous obtenons au final le modèle suivant.

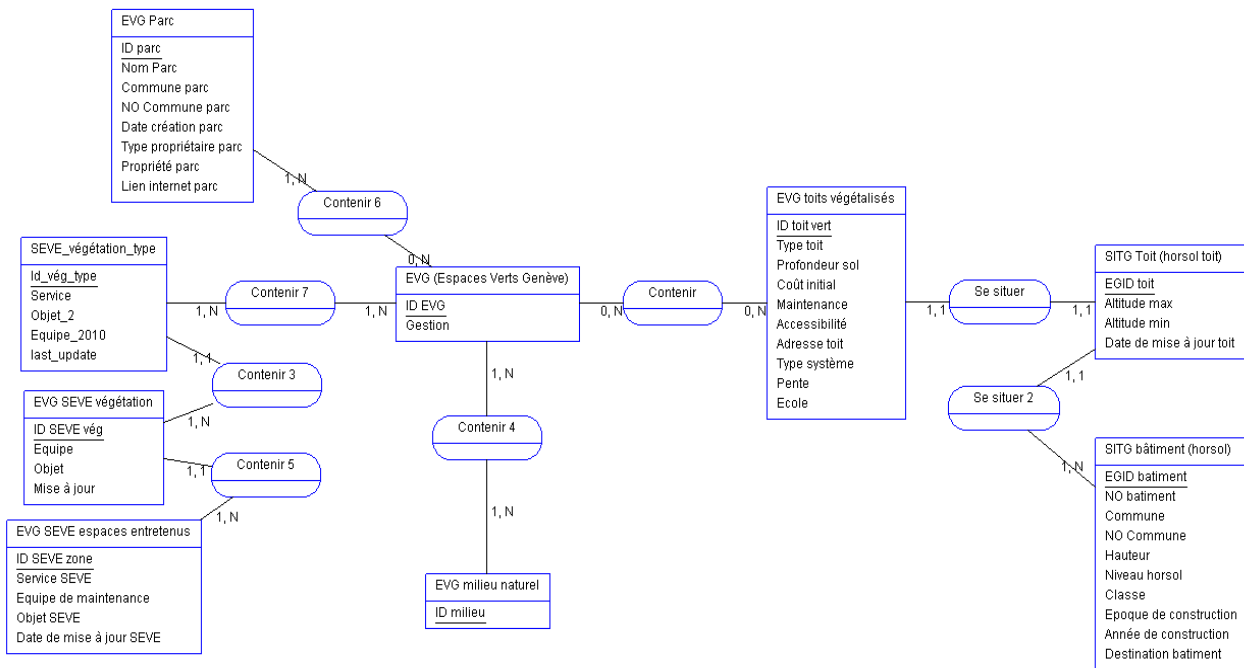


Figure 13 : Modèle de base de donnée finale.

2.11 Création de la couche des parcs de la Ville de Genève

A partir de la couche représentant les parcelles de la ville ainsi que celle des zones entretenues par le SEVE nous avons pu retrouver les contours des parcs de la ville. Lorsque les parcelles et les espaces entretenus ne coïncidaient pas, nous avons privilégié les contours des parcelles lorsque cela était pertinent.

Cette couche n'est cependant pas utilisée par les gestionnaires du SEVE, qui travaillent sur des secteurs ne correspondant pas aux parcs. Elle servira à des fins de communication avec le public qui sont les usagers de ces parcs.

2.12 Analyses des données acquises sur les toits végétalisés

Afin de mieux connaître les particularités des toitures végétalisés et leur insertion dans la ville, nous avons analysé nos résultats à l'aide d'outils statistiques. Pour affiner nos recherches, nous avons ajouté comme paramètre les données de la bande de rouge de l'orthophoto, ainsi que la moyenne de hauteur par toits. Cette hauteur a été calculée par un *Zonal statistics as table* à partir du modèle numérique de hauteur (MNH). Ce modèle est la soustraction du MNS et du modèle numérique de terrain (MNT). Il faut cependant être prudent avec les valeurs obtenues car, même si le MNH contrairement aux orthophotos, ne sont pas ou peu en décalage avec les toits, il suffit qu'un pixel ou deux se situent dans la mauvaise zone pour avoir des données erronées.

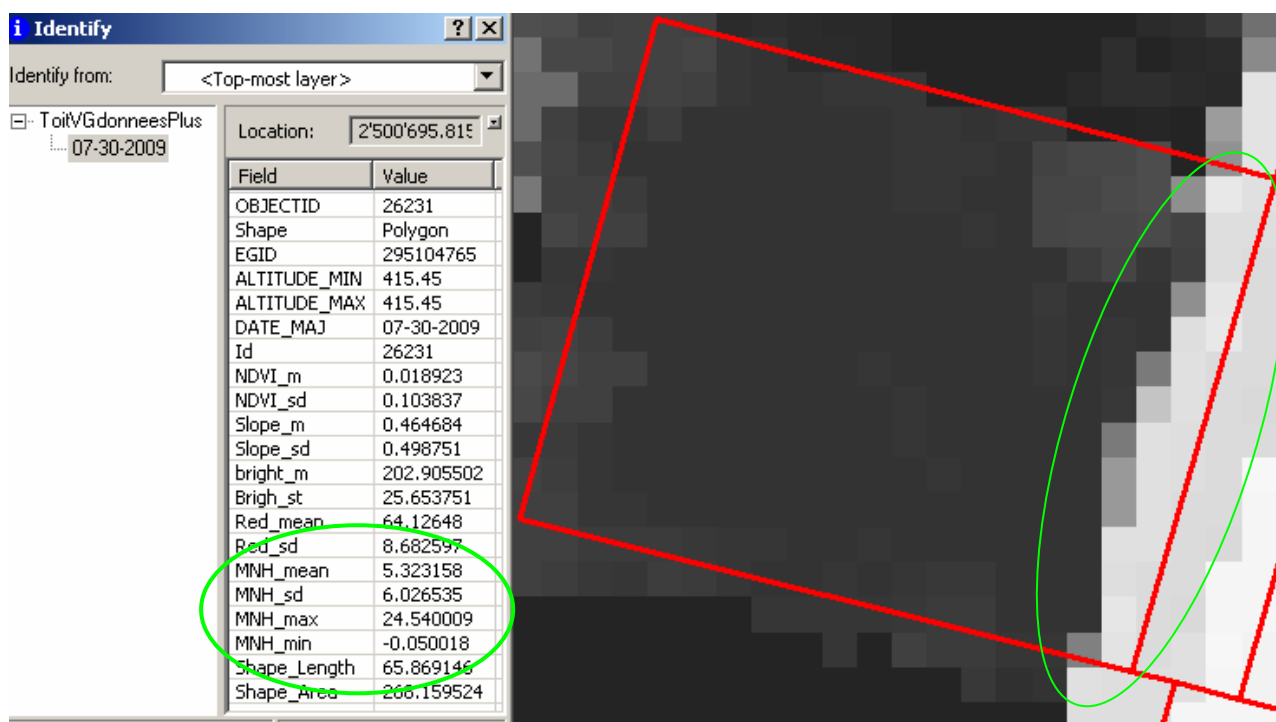


Figure 14 : Les pixels blancs sont des valeurs de MNH hautes (23 à 24m) alors que le toit est à environs 3m. Nous voyons ici que la moyenne est plus élevée que ce qui est attendu et que l'écart-type est important.

2.12.1 Classification des toitures végétalisées sélectionnées

Le lot de toits sélectionnés est très diversifié. Il comprend aussi bien des pelouses installées sur des toitures que de la végétation éparsée arrivée naturellement. Nous avons donc essayé de classifier ces différents types de structure. Pour cela, nous avons exporté la table des toits végétalisés dans *Microsoft Excel* (en format texte) et à l'aide de l'extension *XLstat*, nous avons appliqué quelques fonctions statistiques à notre jeu de donnée.

Pour commencer, la fonction *Nuée dynamique* (algorithme similaire à un k-means) a été utilisée. Cette fonction permet de créer des classes en associant les toits qui se ressemblent le plus. A partir d'une première partition, des réassemblages itératifs sont calculés en cherchant à minimiser l'inertie intra-classe c'est-à-dire en regroupant les objets dans des classes le plus homogène possible. Ici, les dimensions données à l'outil sont le NDVI, la luminosité, la pente, les données de rouge et de hauteur avec chaque fois la moyenne et l'écart-type. Plusieurs nombres de classes ont été testés afin de voir dans quelles mesures le découpage se réalisait le mieux, le but étant évidemment d'avoir des classes homogènes. Il s'est avéré que même avec un nombre élevé de classes (ici : 10) nous n'avons pas pu obtenir une classification satisfaisante.

Ensuite, nous nous sommes tourné vers la *Classification ascendante hiérarchique* (CAH). Cette méthode regroupe, comme dans un arbre phylogénétique, les objets qui se ressemblent le plus et forme également des classes. Il est possible d'afficher un dendrogramme du regroupement fait. Malheureusement, les classes obtenues avec cette technique n'étaient pas toujours cohérentes car elles contenaient des objets qui n'étaient pas homogène du point de vue de la végétation.

Afin donc d'optimiser le découpage des catégories, nous avons pris les données de regroupement des classes acquises par les différentes méthodes. Chaque objet se retrouve avec un numéro de classe. Ces nombres ont été repris et triés, puis nous avons créé à la main, des nouveaux groupes qui unissent les objets se retrouvant toujours ensemble indépendamment de la technique de découpage utilisée. Un total de 40 classes a été élaboré. Deux groupes comportant les objets isolés ont également été définies. Ces différentes catégories étaient presque totalement homogènes, nous avons donc pu les rassembler suivant des critères choisis de végétation. Il a été difficile d'obtenir des classes définies de manière automatisée, car les toits ont des valeurs d'une grande variabilité. Cela provient essentiellement du décalage entre les polygones des toits et l'orthophoto ainsi que des

différences d'ombrage. Ce phénomène est bien visible sur les calculs de luminosité car souvent les rebords des bâtiments sont très clairs puis juste à côté, il peut y avoir de l'ombre due à l'immeuble. Ces cas se détachent souvent du lot car ils ont de forts écart-types de luminosité et de rouge mais ne constituent pas un groupe de toits particulier. Dans la même optique, les toits qui comportent une part d'ombre forment également une catégorie à part entière, qui ne se base pas sur la végétation. Ce sont donc des groupes que nous devons reclasser à la main.

Ainsi, nous avons pu regrouper nos toits en 10 classes distinctes. Pour toutes les classes, la moyenne de chaque paramètre a été faite afin d'avoir en quelque sorte l'individu type du groupe. Les valeurs remarquables sont en surbrillance et sont explicités plus bas.

Tableau 1 : Moyenne des moyennes pour différentes catégories de toits végétalisés

	Construit à végétation épars	Spontané à végétation épars	Graminées	Construit à végétation dense	Spontané à végétation dense	Pelouse
NDVI moyen	-0.03	-0.05	0.01	0.05	-0.01	0.07
NDVI écart-type	0.04	0.06	0.12	0.11	0.08	0.13
Pente moyenne	0.51	0.51	0.67	0.59	0.49	0.49
Pente écart-type	0.48	0.47	0.45	0.47	0.47	0.47
Luminosité moyenne	417.85	385.13	350.05	365.77	349.59	331.28
Luminosité écart-type	70.22	64.00	69.97	70.37	72.27	88.24
Rouge moyen	148.07	136.39	123.68	130.27	126.10	116.55
Rouge écart-type	22.94	21.78	24.55	25.25	24.86	33.17
MNH moyen	6.19	16.25	10.51	12.80	12.13	5.50
MNH écart-type	1.35	1.83	1.14	3.37	1.97	4.24
MNH minimum	1.91	8.57	0.74	7.67	4.71	1.05
MNH maximum	11.03	21.76	12.31	26.67	18.86	23.67
Périmètre	57.80	76.79	116.51	192.58	87.67	164.00
Aire	295.64	277.29	481.78	728.68	329.14	1039.78
Nr de données	6.00	160.00	5.00	11.00	78.00	48.00

2.12.2 Analyse du potentiel végétalisable des toits de la ville par quartier

Afin de savoir, si un quartier de la ville avait plus de toits verts qu'un autre, nous avons découpé notre carte des toits verts en quatre zones, une pour chaque quartier, respectivement Genève-Cité, Plainpalais, Eaux-Vives et Petit-Saconnex.

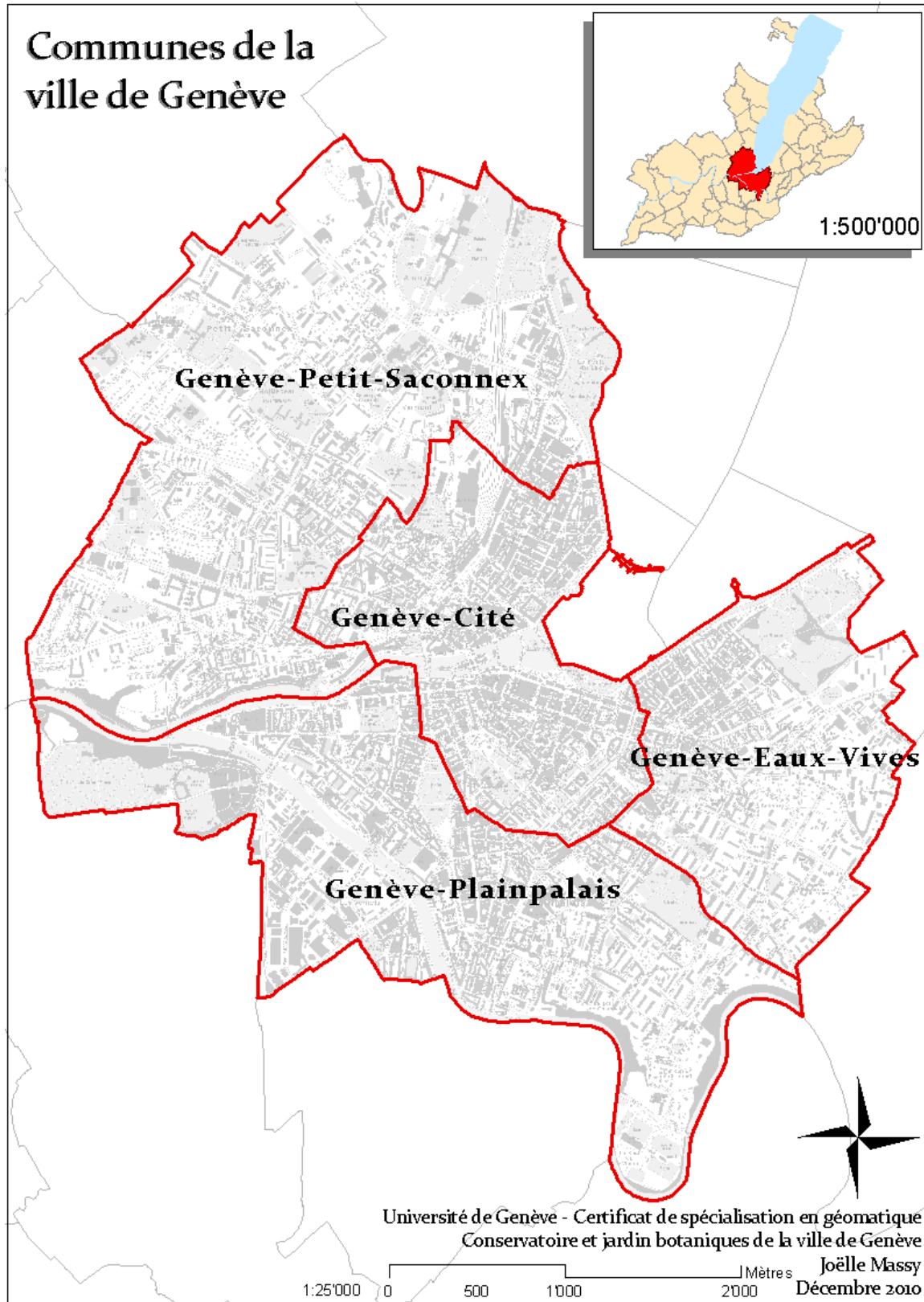


Figure 15 : Carte des communes formant la ville de Genève.

Avant de s'intéresser aux toits potentiels, nous avons découpé les toits verts déterminés précédemment selon le quartier. Pour cela, nous avons créé, à partir de la couche représentant toutes les communes du Canton de Genève via un *Select*, la couche d'intérêt ne contenant que les quatre communes qui nous sont utiles. Puis, grâce à un *Select by location*, qui permet de choisir des objets selon leur position dans l'espace, nous avons pour chaque quartier choisi les toits verts qu'il contient. La formule est la suivante :

Select features from
 (Couche des toits verts)
That: are completely within
 (Quartier sélectionné),
Use selected features

Il faut par la suite, exporter les données sélectionnées vers une nouvelle couche et recommencer avec le quartier suivant. Au final, en affichant les quatre couches créées, il est possible de visualiser les toits verts de chaque quartier. En exportant les tables vers *Microsoft Excel*, il a été possible de calculer un pourcentage de toits végétalisés pour chaque quartier, une fois en fonction de la surface totale du quartier et une autre fois en fonction de la surface bâtie

Tableau 2 : Portion des toits verts sur la Ville par rapport à la surface du quartier et à la surface bâtie.

Communes	Surface des toits verts (m ²)	Surface quartier (m ²)	Pourcentage de toits verts par quartier	Nombre de toits verts par quartier	Surface bâtie (m ²)	Pourcentage de toits verts par surface bâtie
Genève-Cité	23'411.06	2'536'048.31	0.92	73	860'604.99	2.72
Plainpalais	67'743.43	4'622'576.73	1.47	147	1'105'775.10	6.13
Eaux-Vives	19'436.76	2'534'065.00	0.77	73	540'450.43	3.60
Petit-Saconnex	71'472.25	6'217'065.45	1.15	113	1'062'609.39	6.73

Ensuite, pour calculer le nombre de toits que nous pourrions végétaliser en ville, nous avons sélectionné avec les mêmes critères que pour le choix des toits verts, les toitures qui avaient une moyenne de pourcentage de pente en dessous de 8°, plus grand que 25% et une aire de plus de 16.8m². Ainsi, nous obtenons des données comparables avec nos toits verts. Pour cela, il a suffi de rentrer dans le modèle un sélection finale différente. Puis, avec un *Union*, nous avons relié les informations contenues dans la couche de l'ensemble des toits de la Ville de Genève avec celle provenant des communes composées plus haut. Grâce à l'outil *Type Convert*, téléchargés précédemment, nous avons pu de manière rapide et simple découper en quatre couches nos données, une pour chaque quartier. Pour cela, il existe dans cette barre d'outils, un élément nommé *Stratify* qui permet de produire des *shapfiles* uniquement à partir de la légende de la couche active. Nous avons donc, via l'interface des propriétés et l'onglet *Symbology*, créé une légende en fonction des quartiers que nous avons envoyés dans l'outil *Stratify*. Puis, nous avons exporté les quatre tables afin de pouvoir les analyser dans *Microsoft Excel*. Une fois les tables correctement affichées dans *Microsoft Excel*, il fallait supprimer à chaque fois deux lignes, avant d'effectuer des calculs. Ces deux lignes sont des restes indésirables créés par la fonction *Union*. La première ligne, qui généralement à l'aire la plus étendue, contient tous ce qui est autour des bâtiments, c'est-à-dire les routes, parcs et autres. La deuxième ligne à supprimer est celle qui contient les bâtiments qui n'ont pas été répertoriés dans la couche des toits potentiels. C'est l'ensemble des bâtiments ayant des toits de petites surfaces et pentus. Ces deux lignes supprimées, il ne nous reste plus que les grands toits

plats du quartier. Nous avons effectué la somme des surfaces de ces toits que nous avons comparée à la surface bâtie totale.

Tableau 3 : Potentiel des toits végétalisables par quartier

Communes	Surface totale des toits potentiels (m ²)	Rapport entre les toits végétalisable et les toits bâtis
Genève- Cité	312'795.02	36.35
Plainpalais	605'265.01	54.74
Eaux-Vives	263'981.76	48.84
Petit-Saconnex	594'295.12	55.93

2.12.3 Analyse de la densité de toits végétalisés

Pour déterminer l'insertion des toits végétalisés dans le maillage vert de la Ville de Genève, nous avons utilisé des calculs de densité. En premier lieu, il faut convertir les polygones de nos couches des toits verts, des toits végétalisés, des parcs et des zones entretenues par le SEVE en lignes car les densité se font sur des polygones. Ensuite, nous avons testé plusieurs fonctions de densité, tel que *Kernel density* et *Line density*. Les résultats les plus parlant sont obtenus avec la *Line density*, en demandant des données en mètre carré et des cellules de 6m de côté. Nous avons choisi cette taille pour avoir un rapport connu avec la taille des pixels de nos *rasters* qui est de 0,6m.

2.13 Affinement de la sélection par l'ajout de nouveaux paramètres

Afin de tenter d'affiner la recherche et de minimiser le travail à la main, lors de la sélection sur les toits sortant du modèle, mais également lors de la classification, nous avons ajouté des variables telles que le modèle numérique de hauteur afin de pouvoir séparer les toits végétalisés proches du sol de ceux qui se trouvent sur un immeuble. Nous avons également ajouté le canal du rouge afin d'éliminer les toitures de couleur rouge non végétalisées qui sont prises en compte par le modèle car le NDVI est faussé par la couleur du toit.

Pour diminuer les effets de bord dus aux décalages de la couche des toits par rapport à l'orthophoto, nous avons appliqué un *Buffer* intérieur qui soustrait les bordures des toitures. Dans un premier temps, nous avons essayé d'utiliser l'outil *Buffer* se trouvant dans les *Analysis tools*. Cependant, malgré le fait qu'il est mentionné que cette fonction est capable d'effectuer une zone tampon interne, les valeurs négatives ne semblaient pas être bien gérées par l'outil, nous avons donc préféré employer le *Buffer* qui est logé dans la boîte à outil nommée *Coverage tools*. Cet outil ne fonctionne qu'avec des données de type *Coverage*, qui est un ancien format de donnée ainsi qu'une licence *ArcInfo* et l'installation de *ArcInfo Workstation*. Pour avoir un rognage, il suffit de mettre une valeur de *Buffer* négative, ici nous avons pris -1m. L'outil exécute un *Buffer*, puis un *Intersect* et un *Dissolve* automatiquement. Il crée également un polygone intérieur lorsque les rognages se font sur un objet qui était totalement contenu dans un autre. Pour avoir de meilleurs résultats, il est préférable de mettre une petite tolérance, tel que 0.01m, ainsi les polygones restent bien définis.

Comme le nombre de donnée devient important, nous avons séparé la phase de calcul et d'implémentation des résultats dans la couche des toits de la partie de sélection. Il est ainsi plus facile, lorsque nous avons notre couche de base des toits de faire différentes sélections suivant les toits que nous voulons répertorier. Nous obtenons ainsi deux nouveaux modèles.

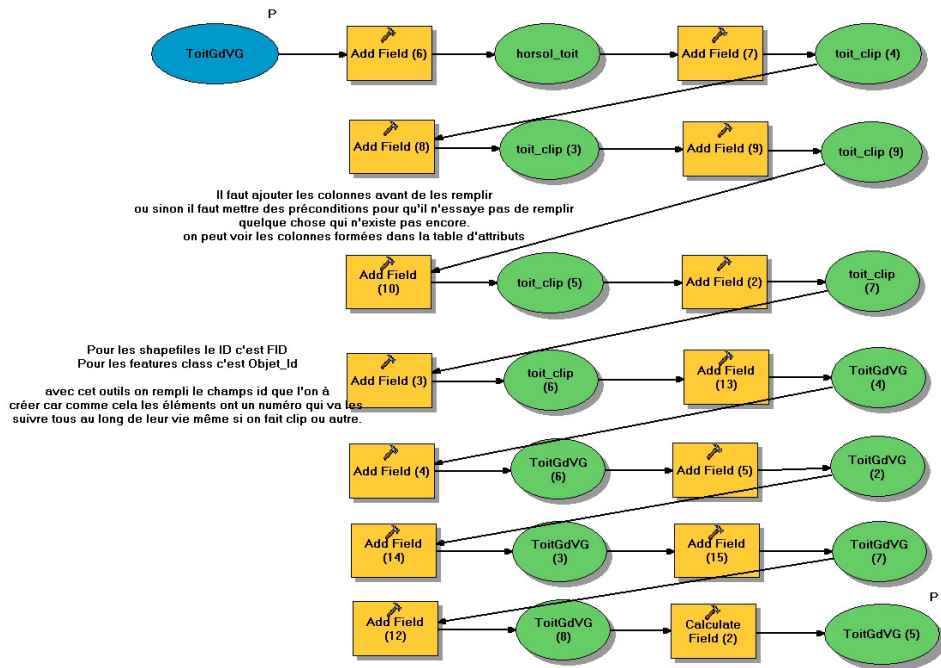


Figure 16 : Modèle préparant la couche des toits à recevoir plus de données (temps d'exécution : 1min).

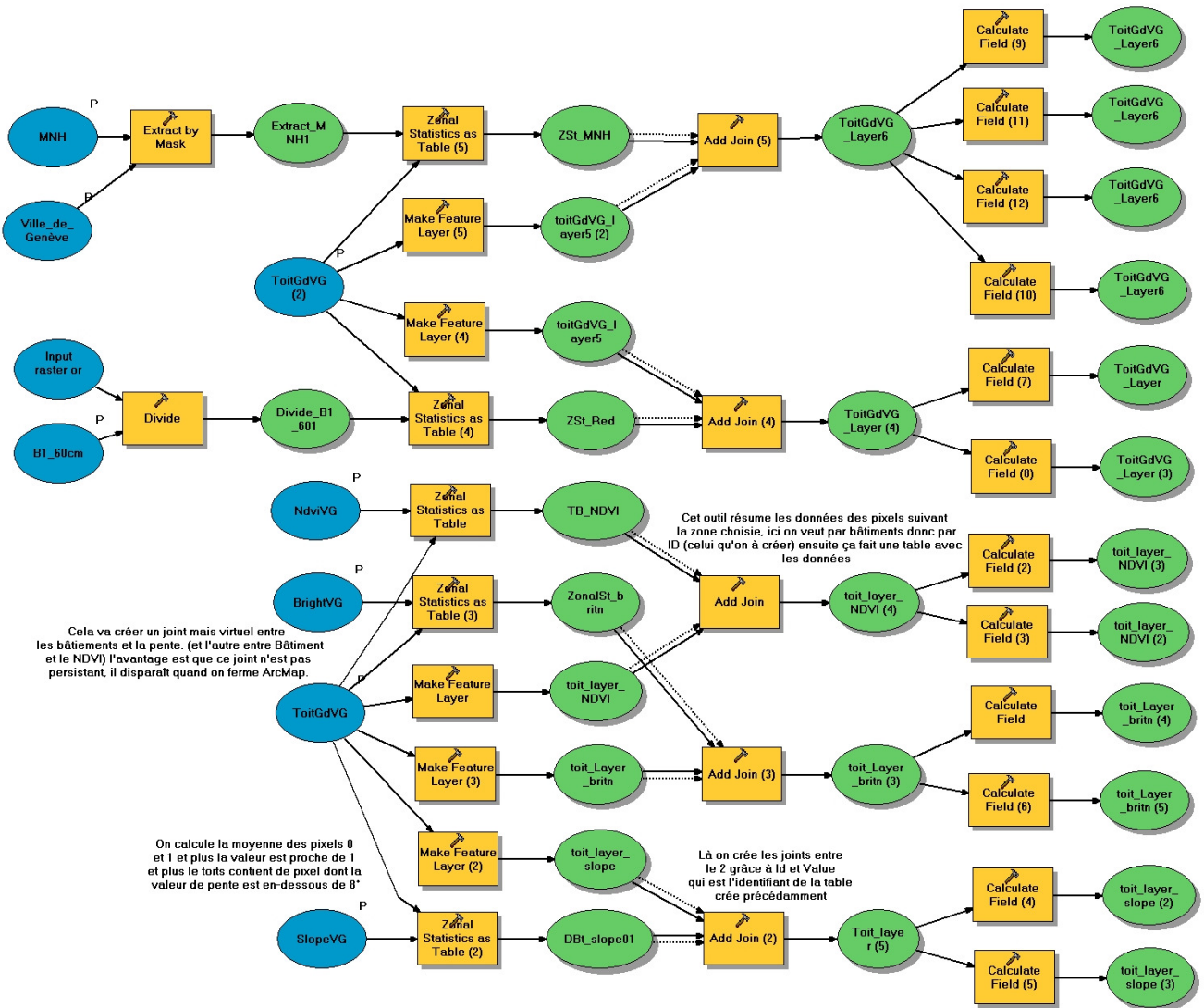


Figure 17 : Modèle dont la partie supérieure permet de lier les nouvelles données à la couche des toits (temps d'exécution : environs 20min).

Les données calculées à partir de la couche des toits sur laquelle nous avons appliqué un *Buffer* ont des écarts-types en général plus bas que les données calculées sur la même couche qui n'a pas subi de *Buffer*. Cependant en comparant statistiquement ces valeurs nous n'obtenons pas de différences significatives (valeur P pour le test de Mann-Whitney / test bilatéral = 0.754). Nous pouvons en conclure qu'appliquer un *Buffer* interne ne semble pas améliorer la donnée pour un Buffer de 1m.

Tableau 4 : Comparaison des moyennes des écart-types sur tous les toits avec un rognage ou non.

	Moyenne avec Buffer	Moyenne sans Buffer
NDVI écart-type	0.051	0.054
Pente écart-type	0.206	0.183
Luminosité écart-type	59.656	62.593
Rouge écart-type	20.867	21.918
MNH écart-type	1.063	1.790

Nous arrivons aux mêmes conclusions en comparant la moyenne des moyennes citées dans le tableau suivant. Effectivement, la valeur-P est ici de 0.749, les différences ne sont donc pas significatives.

Tableau 5 : Comparaison des moyennes des moyennes sur tous les toits avec un rognage ou non.

	Moyenne avec Buffer	Moyenne sans Buffer
Moyenne NDVI	-0.106	-0.108
Moyenne pente	0.182	0.132
Moyenne luminosité	396.323	394.545
Moyenne rouge	138.327	137.273
Moyenne MNH	17.927	17.778
Maximum MNH	20.570	20.574
Minimum MNH	16.401	13.609

En définitive, il reste difficile d'avoir une meilleure sélection de toits. Les méthodes testées n'ayant pas donné de résultat concluant nous gardons pour la suite notre premier lot de toits. En effet, l'ajout de nouveaux paramètres ne permet pas de discriminer beaucoup plus les toits végétalisés des autres toits. Nous affirmons ceci après avoir testé de nombreux paramétrages avec les nouvelles variables. Nous avons constaté que le nombre de toits sélectionnés ne diminue pas.

3. Résultats

3.1 Carte des toits végétalisés de la Ville

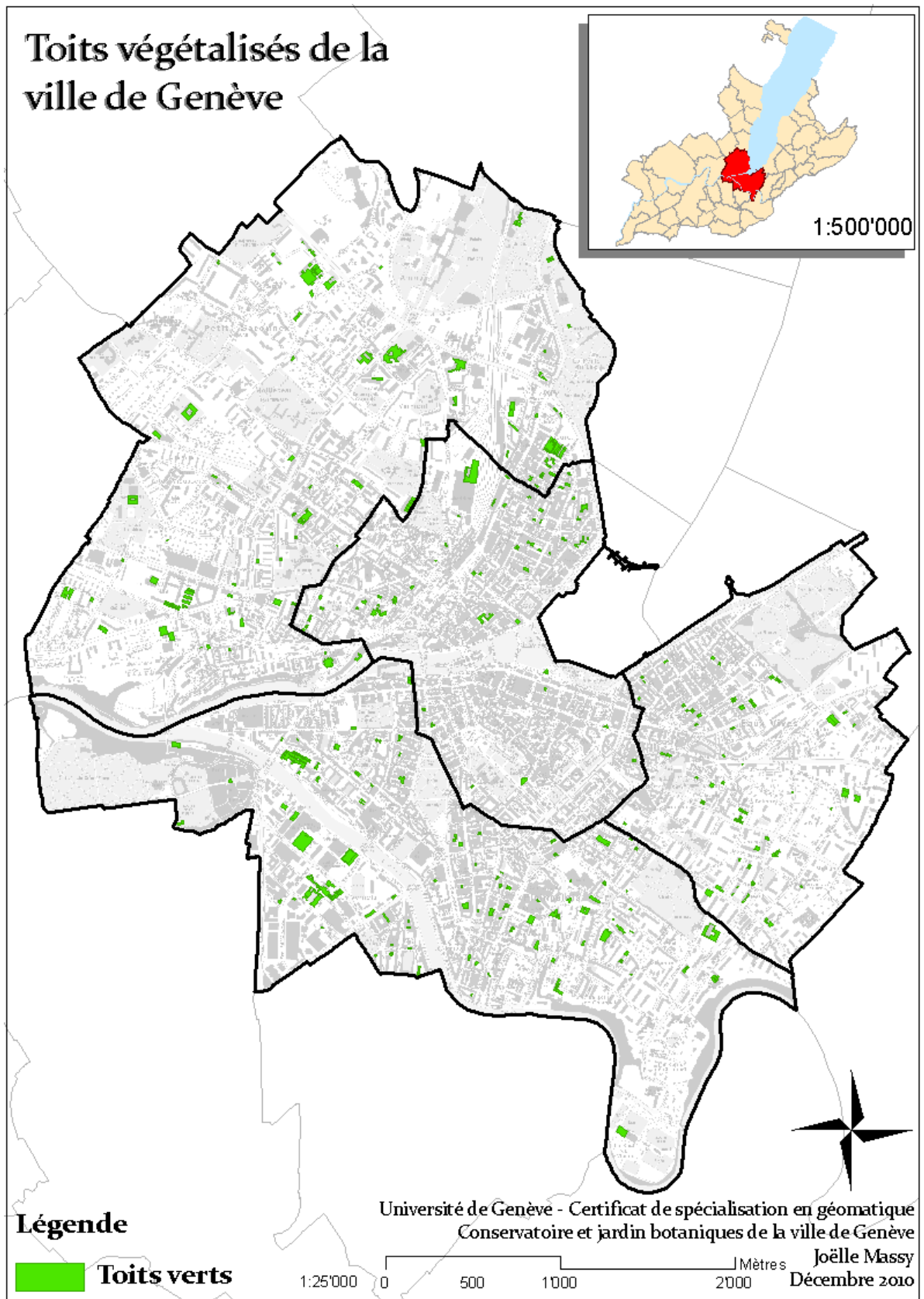


Figure 18 : Carte des toits verts de la Ville de Genève

3.2 Carte de la classification des toits

3.2.1 Les 10 catégories conçues

Grâce à notre classification nous avons pu élaborer 10 classes.

- Les éléments construits connus recouvert de graminées
- Les éléments construits recouvert de végétation denses
- Les éléments construits recouverts de végétation éparses
- Les éléments d'origine incertaine recouverts de végétation denses
- Les éléments d'origine incertaine recouverts de végétation éparses
- Les éléments recouverts de végétation spontanée dense
- Les éléments recouverts de végétation spontanée éparses
- Les pelouses
- Les terrasses
- Les balcons

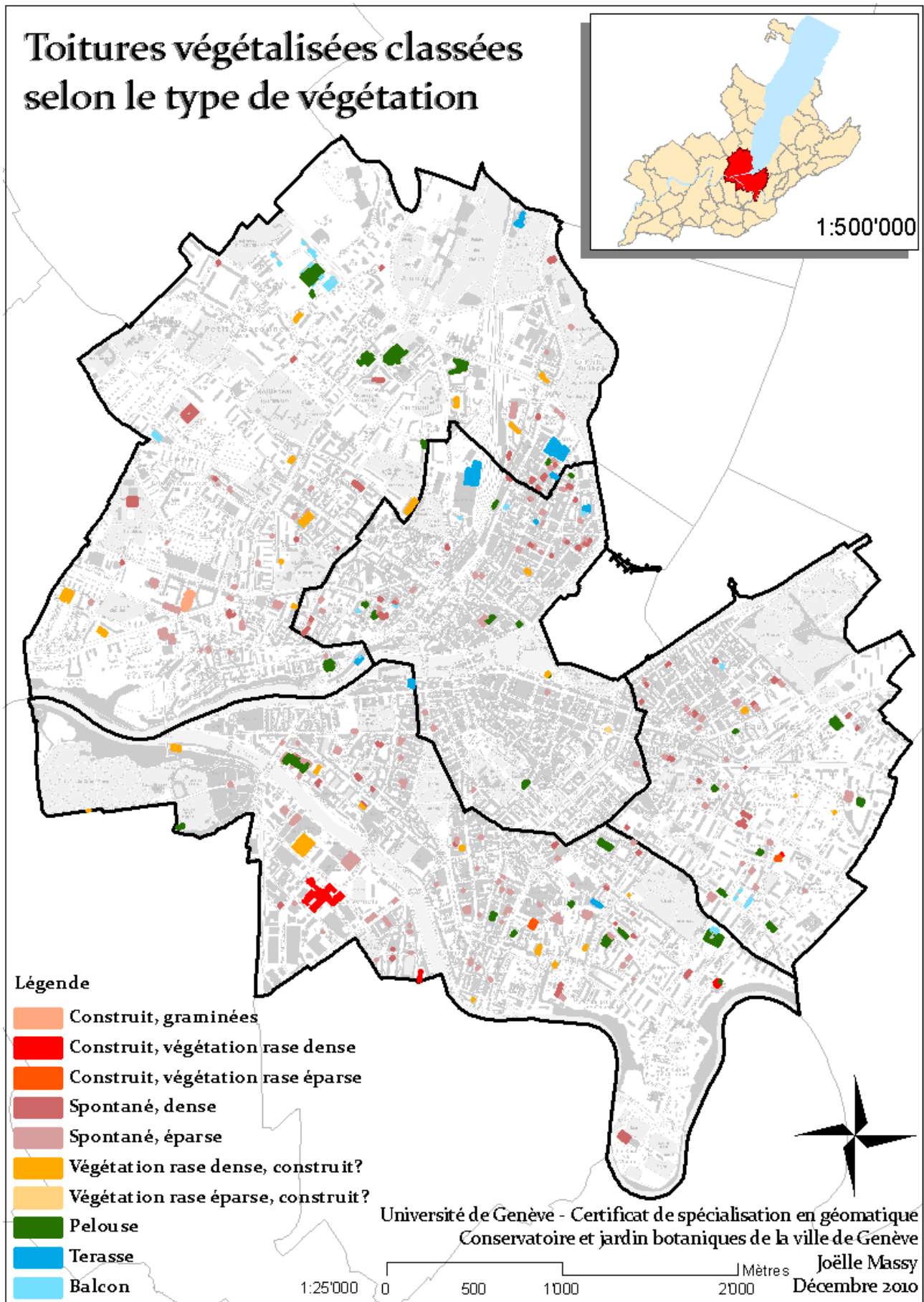


Figure 19 : Carte des toits verts selon leur type de végétation.

3.3 Analyse des toits par quartier

Voici en premier la carte représentant l'ensemble des toits potentiellement végétalisables sur de la Ville de Genève. Puis en second, la carte nous montrant les toits verts relevés, découpée selon les différents quartiers de la ville.

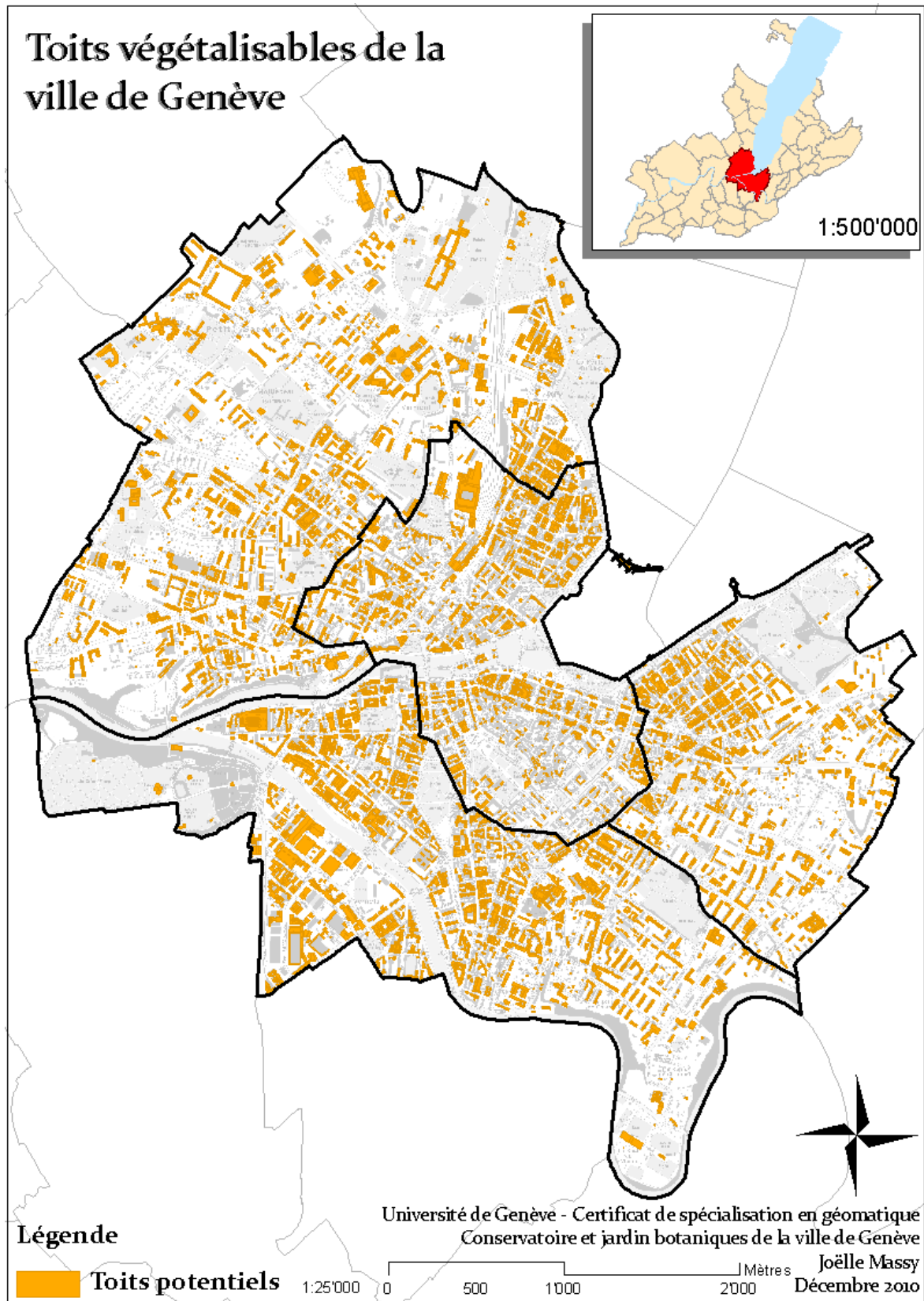


Figure 20 : Ensemble des toits potentiellement végétalisables de la ville.

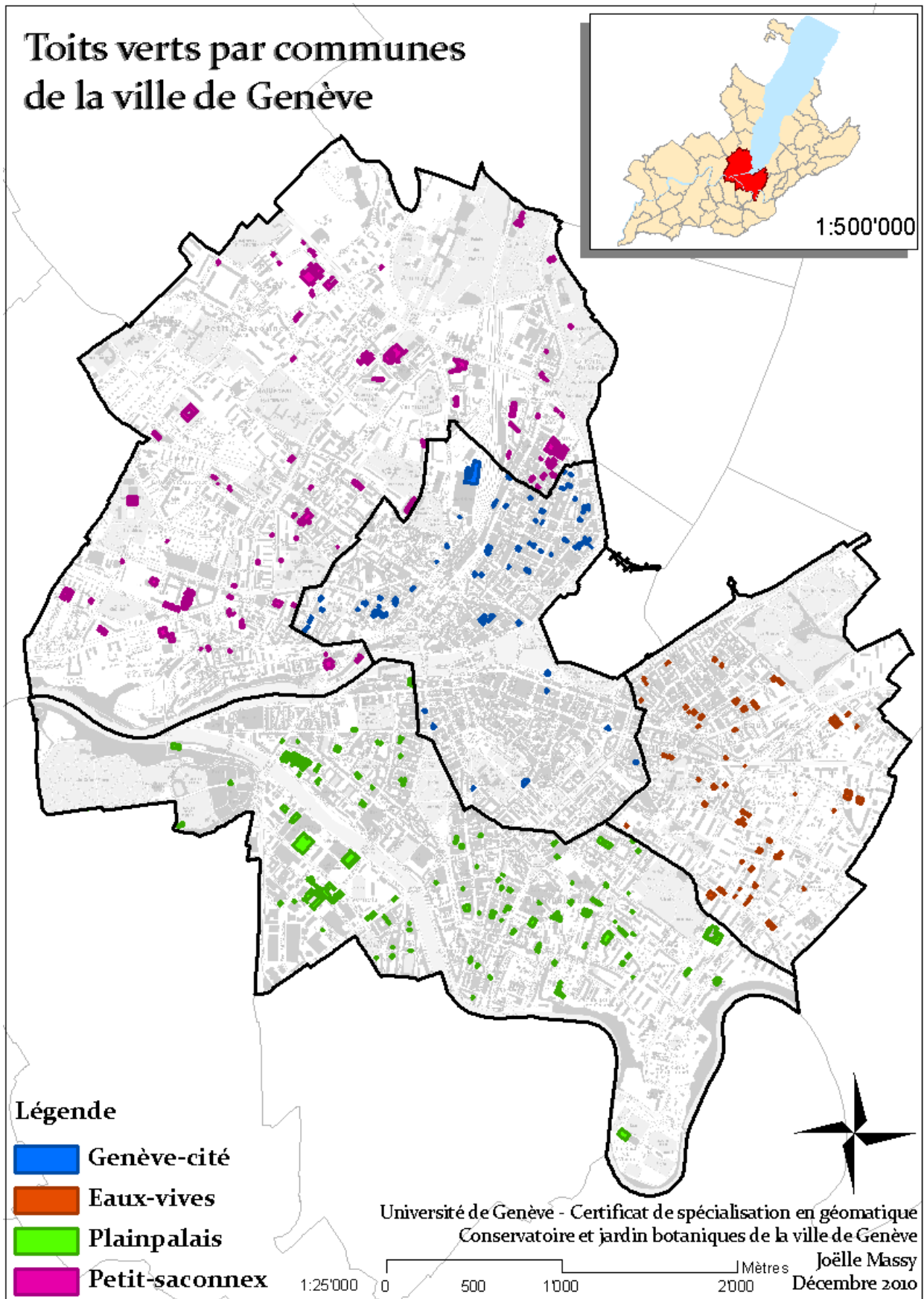


Figure 21 : Toits végétalisés de la ville selon le quartier

3.4 Analyse de la densité de toits végétalisés

Voici en premier lieu les résultats obtenus avec un calcul de densité sur les toits végétalisés. Ainsi nous pouvons facilement voir quelles sont les parties de la ville qui possèdent le plus de toits végétalisés. Ensuite, nous avons également appliqué ce calcul aux zones vertes gérées par les services de la ville afin de voir comment ces différents éléments s'emboîtaient entre eux. Nous pouvons alors déterminer les endroits où des toits pourraient être judicieusement insérer afin d'augmenter la connectivité entre les éléments verts de la ville.

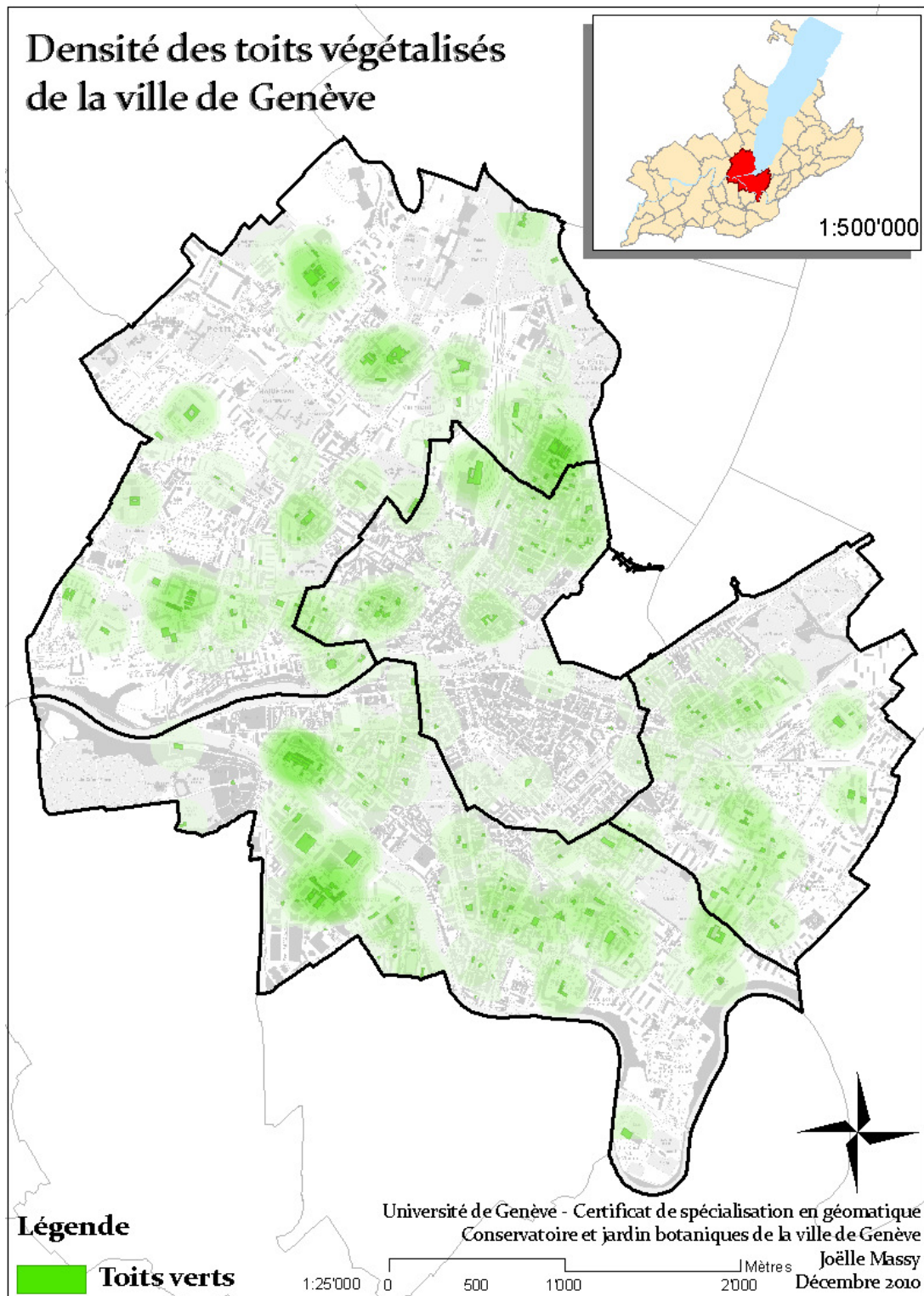


Figure 22 : Densité des toits verts sur la ville de Genève

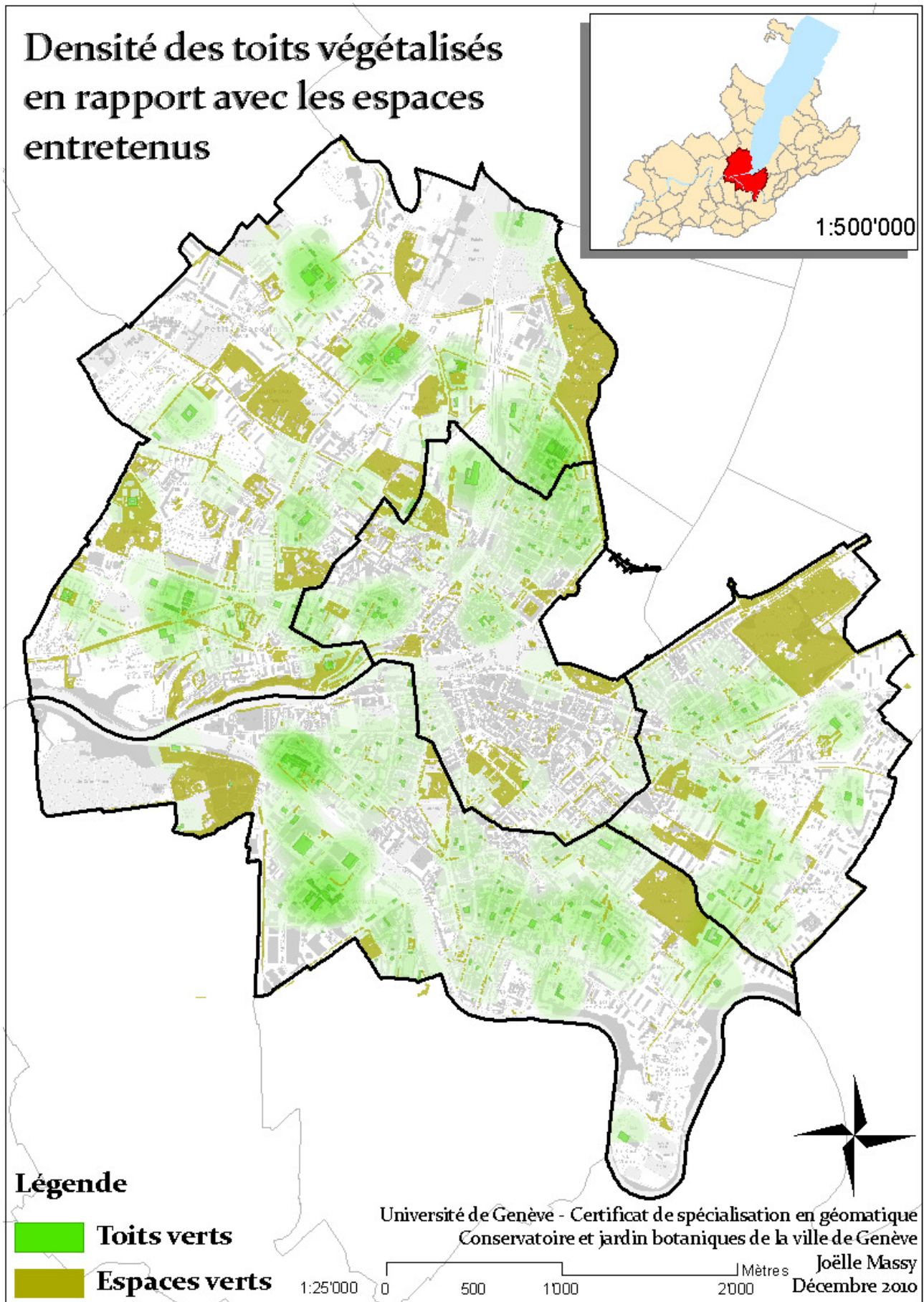
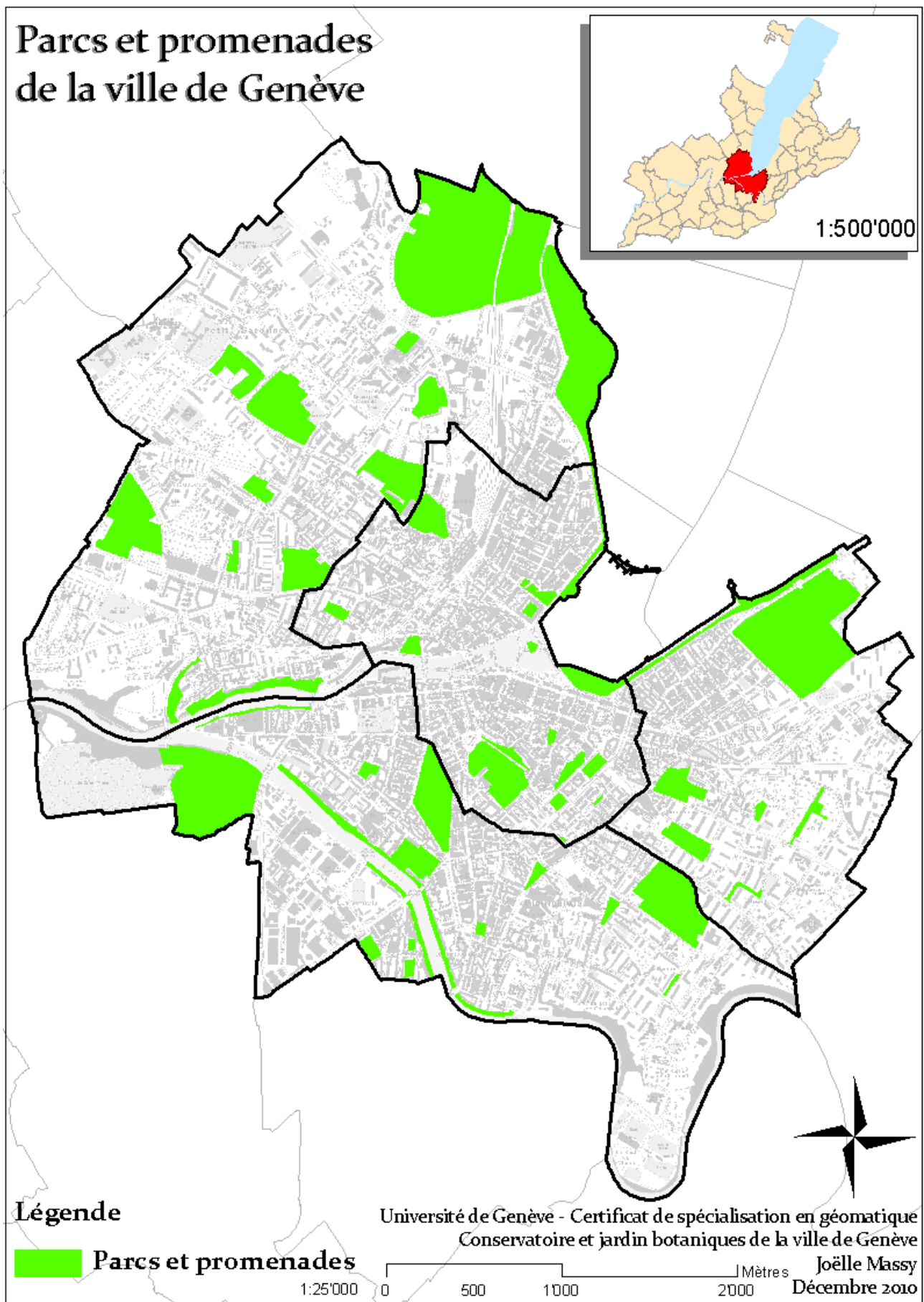


Figure 23 : Densité des toits verts en rapport avec les espaces verts entretenus par la ville.

3.5 Couche des parcs de la ville



4. Interprétation

4.1 Carte de la classification des toits

4.1.1 Moyenne pour chaque classe

Il faut être prudent lorsque nous analysons les données des moyennes contenues dans le *tableau 2* car, comme il est indiqué en rouge, certaines moyennes sont faites sur très peu d'objets. Nous pouvons cependant en retirer certaines tendances marquées en vert. Nous attirons l'attention sur le fait que toutes les classes ne sont pas représentées, ceci étant dû au fait que les éléments dont nous ne connaissons pas l'origine ne sont pas étudiés par manque d'information pour l'interprétation. De même, les balcons et les terrasses ont une végétation souvent faites de plantes en pot disposées de manières régulières et éparées suivant le vouloir des occupants du bâtiment. De plus, il est difficile d'intégrer pleinement ces éléments sous le concept de toitures végétalisées. C'est pour ces raisons que nous n'irons pas plus loin avec ces quatre catégories (les éléments d'origine incertaine recouverts de végétation denses, les éléments d'origine incertaine recouverts de végétation éparse, les terrasses et les balcons).

Si nous nous intéressons en premier au NDVI moyen, nous pouvons constater que les éléments construits sont mieux végétalisés que les toits couverts de végétation spontanées. Ceci est dû en partie au fait que les services d'entretien des toits brûlent chaque année la végétation qui s'est installée sur ces toits. De même évidemment que les toits à végétation éparse ont une moyenne de NDVI plus faible que les toits dont la végétation est plus dense. Les plus fortes valeurs d'activité végétale sont détenues par les toits construits dense, les toits recouverts de graminées et inévitablement par les pelouses.

Les pelouses ont, en outre, une aire moyenne nettement supérieures aux autres ainsi qu'une hauteur moyenne plus basse que tous les autres groupes. Il est vrai que ce sont des éléments proches du sol est de grandes tailles en générale. Il est parfois possible de les rattacher plus à un parc ou une cours qu'à un toit.

Nous pouvons également remarquer que lorsque la végétation est éparse, les moyennes de luminosité sont élevées, car le béton réfléchit mieux la lumière que la végétation. Ceci nous indique que ce critère a donc été judicieusement choisi.

4.2 Analyse des toits par quartier

Nous pouvons constater que les quartiers contenant le plus de toits verts sont des quartiers récents et grands tels que Plainpalais et Petit-Saconnex. Ce sont également eux qui ont le plus grand potentiel de toits qu'il serait possible de rendre verts. En effet, le quartier de la Vieille Ville situé dans Genève-Cité possède peu de toits végétalisés car il est constitué principalement de vieilles maisons dont les toitures sont très pentues, ce qui rend difficile l'installation de la végétation.

5. Conclusions

5.1 Conclusion sur les toits végétalisés

En conclusion, il est possible de discriminer jusqu'à un certain point les toits végétalisés des autres toits de manière semi-automatique. Cependant, nous ne pouvons pas choisir des critères univoques qui nous donneraient d'une fois uniquement tous les toits verts. Ceci est dû à la trop grande diversité des données les concernant ainsi qu'à des problèmes de calages entre les couches utilisées toits versus orthophotos. En effet, nous avons vu que malgré le fait que la première sélection soit basée sur des critères larges, elle n'avait pas pris en compte tous les toits intéressants.

De plus, il faut être attentif au fait que seuls les toits dits extensifs sont retenus par cette méthode. Les toits dits intensifs, qui possèdent une couche de terre épaisse et une végétation plus haute et dense, fait d'arbuste voire même d'arbre, ne peuvent pas être retrouvés. Ces toits-jardins ont, de par leur végétation arbustive, des pentes qui ressortent comme non-plates sur le MNS. C'est le cas du Bâtiment de l'Opéra de l'Hôpital Universitaire de Genève (HUG) que nous n'arrivons pas à discriminer par cette analyse. Pour cela, il faudrait la reprendre avec des critères adaptés à ce type de structures.

5.2 Conclusion de stage

Grâce à ce stage, j'ai pu apprendre énormément sur l'utilisation de *Model builder* que je ne connaissais que de manière superficielle auparavant. J'ai notamment découvert des techniques pour faciliter les chemins d'accès de stockage des données, en utilisant le raccourci vers l'espace de travail (*%scratchworkspace%*). Ceci s'est avéré très utile lorsqu'il a fallu se déplacer d'ordinateur à l'autre, car les modèles fonctionnent tant que l'espace de travail est défini dans les propriétés du modèle, ce qui rend nos modèles exportables sans souci.

J'ai également eu l'occasion de travailler avec de nombreux outils différents qui traitent soit des données vectoriels soit des données de type *raster*. Je me suis également rendu compte que suivant la version utilisée (Arcview, ArcEditor ou ArcInfo), les outils à disposition ne sont pas les mêmes.

Lors de la préparation de la couche des toits, j'ai été confrontée à un sérieux problème de topologie pour lequel il n'existait pas de solution préfabriquée. J'ai donc dû trouver par moi-même, via de nouveaux outils, la meilleure façon de résoudre le problème. J'ai ainsi constaté qu'ArcGIS avait des limites et qu'il faut parfois être inventive et utiliser d'autres ressources pour arriver à ses fins. D'autres fois, il n'y a même pas de solutions automatisées et il faut se résigner à faire les manipulations à la main si cela est possible. En effet, l'œil et la main sont souvent indispensables pour mettre à niveau les données afin qu'elles soient utilisables.

Dans la phase d'analyse des données répertoriées, j'ai beaucoup appris sur les outils statistiques qu'il était possible d'utiliser, afin de sortir de l'information plus précise. Au final, en couplant plusieurs logiciels qui à la base ont des usages très divers, j'ai vu que nous pouvons aller plus loin dans les analyses, qu'en utilisant qu'uniquement les produits SIG.

6. Bibliographie

Livres et articles :

Brenneisen, S., *Space for Urban Wildlife: Designing Green Roofs as Habitats in Switzerland*, urban Habitats, 4 :1

Fiche Hepia, *Projet toitures végétalisées à Genève*, version février 2010

Grant, G., *Extensive green roofs in London*, Urban Habitats, 4 :1

Grant, G., Engleback, L. & Nicholson, B. (2003), Green roofs: their potential for conserving biodiversity in urban areas. *English Nature Research Report 498*, Peterborough, U.K., English Nature.

Office fédéral de l'environnement des forêts et du paysage (OFEPF), *Cahier de l'environnement 216*, (1995)

Raynolds, M. K. & all, Relationship between satellite-derived land surface temperatures, arctic vegetation types, and NDVI, *Remote Sensing of Environment 112*, Elsevier Inc., (2008) 1884–1894

Tucker, C.J. 1979. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of the Environment*, 8:127-150.

Summary of the Consultant's Report: Environmental Benefits and Costs of Green Roofs
MAKING GREEN ROOFS HAPPEN, November 2005, page 7

Sites Internet :

Aide ESRI en ligne

<http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.2/index.cfm>

(Consulté régulièrement)

Association CONVIVE :

<http://www.convive.org/pages/index.php>

(Visité le 3 novembre 2010)

Base de données sur les toits verts ; Greenroofs :

http://www.greenroofs.com/archives/gf_dec03.htm#top

(Visité le 3 novembre 2010)

Centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques de la République française :

http://www.certu.fr/fr/Ville_et_equipements_publics-n30/Construction_durable-n148/Vegetalisation_extensive_des_terrasses_et_toitures_%28fiche_de_lecture%29-a1027-s_article_theme.html

(Visité le 2 novembre 2010)

Oiseaux de France et du monde ; Oiseaux.net :

<http://www.oiseaux.net/oiseaux/vanneau.huppe.html>

(Visité le 6 décembre 2010)

Portail SITG :

<http://etat.geneve.ch/sitg/accueil.html>

(Consulté régulièrement)

Type Convert

<http://arcscrippts.esri.com/details.asp?dbid=13443>

(Visité le 20 novembre 2010)

Université de Zurich, Sciences appliqués

http://www.naturdach.ch/oekologische_aspekte/biooekologie_naturschutz/tiere/voegel

http://acl-lullier.ch/pdf_2010/04_EXCURSION_2010.pdf

(Visité le 2 novembre 2010)

Ville de Genève

<http://www.ville-geneve.ch/themes/developpement-durable-energie/engagements-aalborg/>

(Visité le 16 décembre 2010)

7. Annexes

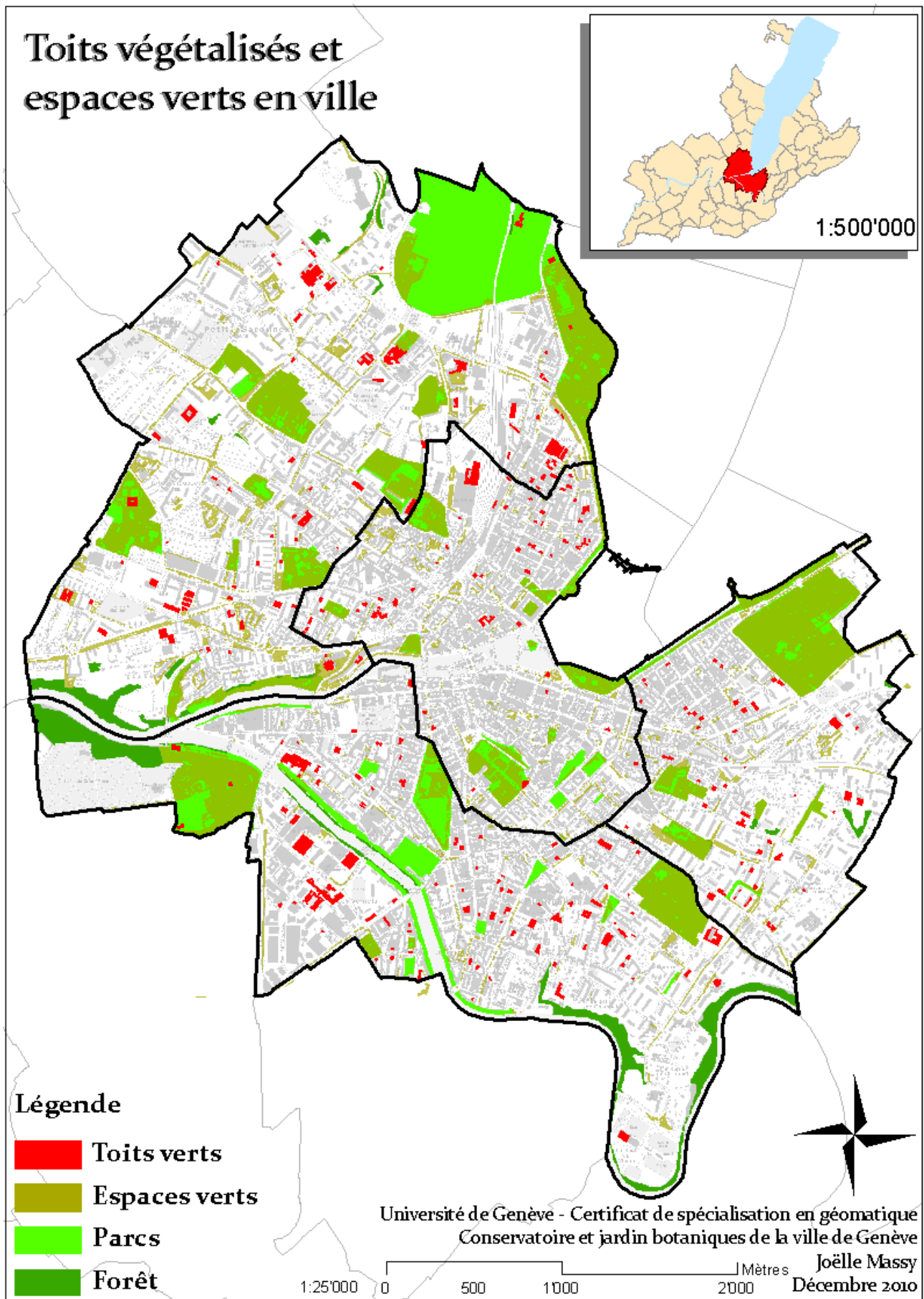


Figure 24 : Insertion des toits verts dans l'ensemble des espaces verts de la Ville de Genève

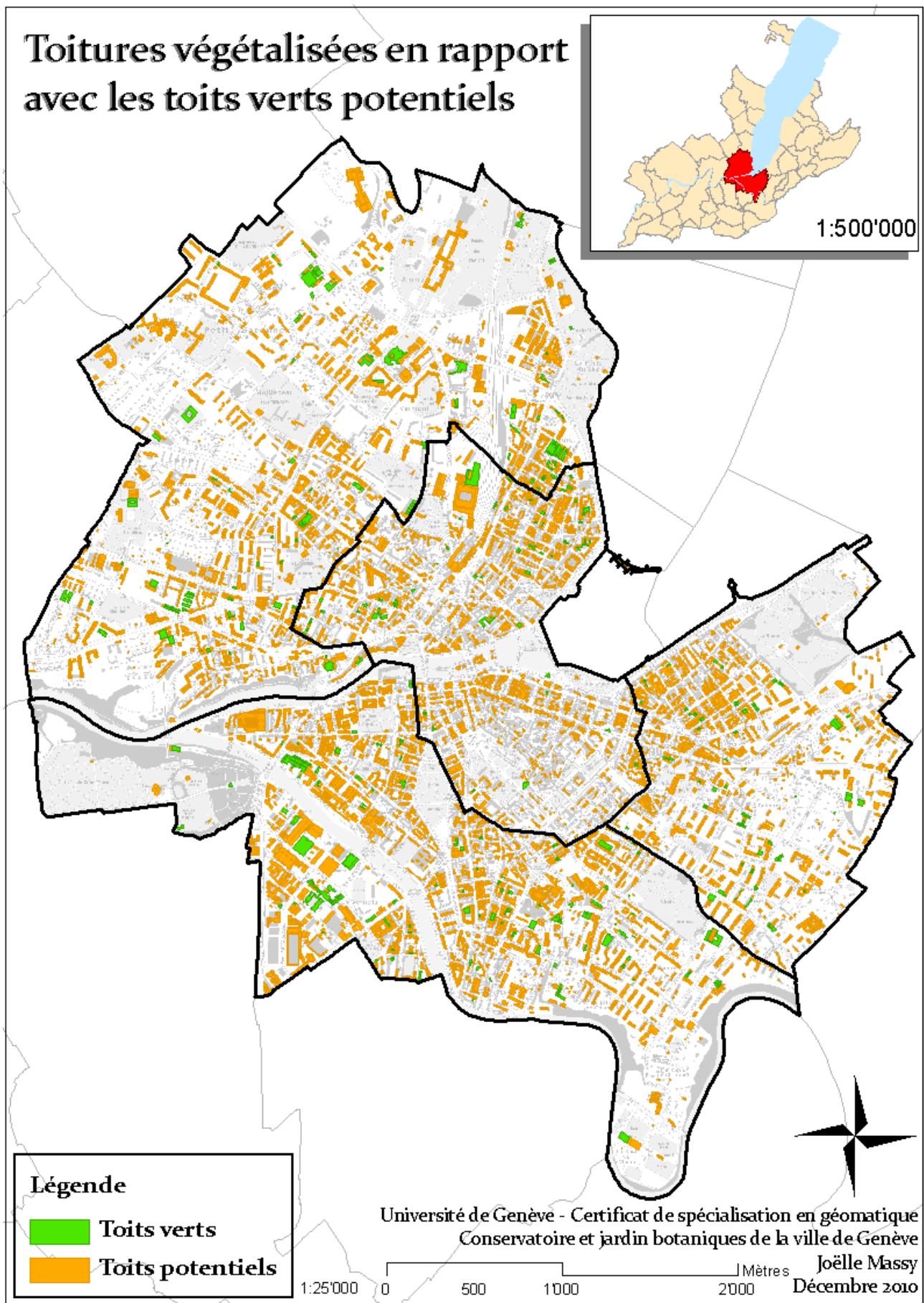


Figure 25 : Rapport entre les toits verts et les toits potentiellement végétalisables