Zeitschrift: Archives des sciences [2004-ff.]

Herausgeber: Société de Physique et d'histoire Naturelle de Genève

Band: 62 (2009)

Heft: 2

Artikel: Cartographie semi-automatisée et multi-sources de la couverture du sol. 1. Périmètre de l'agglomération franco-valdo genevoise (CCSA04, moyenne résolution)

Autor: Schwarzer, Stefan / Allenbach, Karin / Jaquet, Jean-Michel

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-738453

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 14.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Cartographie semi-automatisée et multi-sources de la couverture du sol

1. Périmètre de l'agglomération franco-valdo genevoise (*CCSA04*, moyenne résolution)

Stefan SCHWARZER[1], Karin ALLENBACH[1] et Jean-Michel JAQUET[1]

Ms reçu le 10 février 2009, accepté le 17 avril 2009

Abstract

Semi-automated, multi-source cartography of land cover. 1. Geneva transboundary area (medium resolution). - *A land cover map is an essential layer of information for the management and planning of the territory. Within the context of a trans-boundary endeavour between Switzerland and France (*Projet d'Agglomération Franco-Valdo-Genevoise, *hereafter AFVG), a medium-resolution land cover map (*CCSA04*) was developed for the Canton of Geneva, part of the Canton of Vaud, and parts of the French departments of Ain and Haute-Savoie.*

Within the constraints of the available data, a 27-class legend was chosen to suit the needs of the AFVG project. This legend can be converted to the Swiss OTEMO and European CORINE standards. The applied mapping methodology can be described as multi-source, multi-scale *and* object-oriented. *Multi-source refers to using the SPOT satellite imagery at two different resolutions (5m for the visible bands, 10m for the infrared), a Digital Elevation/Digital Height Model, and several vector layers. Multi-scale means that the analysis, within the* Definiens Developer™ *software, proceeded on different levels or scales. The object-oriented approach is based on the concept that the semantic information necessary to interpret an image is not contained in isolated pixels, but rather in* objects *and their mutual relationships. These objects, obtained through a segmentation process, were classified using multiple criteria, such as their spectral values, morphology and context. Some legend classes, such as buildings and roads, are defined by their spatial coincidence with a shapefile. Others, such as forests and water, are derived from their spectral values. The altitude criterion was used to differentiate mountain grasslands from low-altitude meadows .*

The automated classification process was completed by some manual editing in the following cases: objects adjacent to roads, under-estimation of coniferous forest, agricultural surfaces falsely classified as deciduous forest, confusion between hard surfaces and bare soil, and objects hidden by shadows.

In order to control the quality of the land cover map, a statistical procedure was applied. Two control points were randomly selected within each square kilometre of the AFVG area, and their land cover class was visually estimated from colour aerial photographs, based on a simplified legend. A contingency matrix was computed, yielding a Kappa *coefficient of 89%, which exceeds the mandatory threshold of 75% requested by the project.*

It is considered that this quality level is quite acceptable, owing to the difficulties stemming from the heterogeneity of data between the Swiss and French entities: vector layers having different meaning and showing mismatch across the border, and the SPOT *mosaic being a composite of scenes from two years, resulting in differences in radiometry. The rugged topography in the Jura and pre-Alps also leads to extensive zones of shadows, which complicate the analysis.*

[1] *UNEP/DEWA/GRID-Europe, MIE, 11 chemin des Anémones, 1219 Genève*

As an example of application of the CCSA04 *map, land cover statistics were computed for the four entities. Finally, recommendations are presented towards an improvement of the map-making process (revised legend, compatible data across borders and better imagery), in the perspective of future applications such as change mapping for the computation of land cover trends.*
Keywords: *land cover mapping, object-oriented approach, medium resolution remote sensing, Switzerland, France.*

Résumé

Le projet d'agglomération franco-valdo-genevoise (AFVG) est né d'une volonté transfrontalière et solidaire pour construire ensemble un développement durable du bassin genevois qui devrait, à l'horizon 2030, accueillir 200 000 habitants et 100 000 emplois supplémentaires. Dans ce contexte, les données géographiques sont des éléments essentiels d'aide à la décision et de communication des politiques publiques. Parmi ces données, la carte de couverture du sol étendue à la regio genevensis *est devenue incontournable pour la gestion et la planification de ce territoire.*

La méthodologie appliquée pour la production de la carte de couverture du sol de l'AFVG (CCSA04) *se base sur des données satellitaires (mosaïque* SPOT *à 5-10 m de résolution), vectorielles et hypsométriques. Elle comprend une segmentation multi-résolution de l'image en objets, qui sont ensuite étiquetés thématiquement selon des critères multiples. La légende de la carte comprend 27 classes de couverture et d'utilisation du sol; elle est compatible avec les standards suisses et européens (OTEMO, CORINE). Par ailleurs, cette approche cartographique multi-source, orientée objet, offrira la possibilité d'une mise à jour régulière semi-automatique.*

La qualité du résultat obtenu, évaluée à l'aide de la matrice de contingence, atteint un coefficient Kappa *de 89%. La* CCSA04 *ainsi produite permet de calculer des statistiques de superficie, pour l'ensemble de l'agglomération aussi bien qu'à l'échelle de la commune. Elle offre également un socle commun d'analyse et une bonne visualisation de la distribution spatiale des différents thèmes jusqu'à une échelle limite de 1:20 000 environ. La carte est disponible en totalité sur le guichet cartographique du projet d'agglomération*[2].
Mots-clés: *cartographie, couverture du sol, occupation du sol, approche orientée-objet, télédétection à moyenne résolution,* SPOT, *Suisse, France.*

Zusammenfassung

Im Zuge des grenzüberschreitenden, schweizer-französischen Projektes "Agglomeration Franco-Valdo-Genevoise" wurde eine Bodennutzungskarte (*CCSA04*) mittlerer Auflösung entwickelt. Die Legende umfasst 27 Klassen, die mit dem schweizer System OTEMO und dem europäischen CORINE kompatibel ist.

Die angewandte Methodik kann als *multi-source*, *multi-scale* und objekt-orientiert beschrieben werden. *Multi-source* aufgrund der Verwendung der *SPOT* Bilder mit zwei verschiedenen Auflösungen (5m für die sichtbaren Bänder Blau, Grün und Rot; 10m für das nahe und mittlere Infrarot), der Nutzung von DEM und DHM sowie mehrerer Vektordateien. Der Begriff des *mutli-scales* bezieht sich auf die Arbeit innerhalb der Definiens Developer™ Software, wo auf verschiedenen Ebenen bzw. Skalen, objekt- statt pixel-orientiert gearbeitet wird.

Einige der Klassen basieren auf räumlicher Überschneidung mit den Vektordateien – wie Gebäude und Strassen –, andere auf den spektralen Eigenschaften (Wasser, Wald, Kulturen) sowie eventuell auf Höhenangaben (Bergwiesen, Schnee). Am Ende des automatisierten Prozesses wurden einige Objekte manuell, im direkten Vergleich mit Luftbildern, korrigiert.

Die Überprüfung der Qualität der Klassifikation ergab einen *Kappa* Koeffizienten von 89%, was deutlich über der vom Projekt geforderten Grenze von 75% lag. Schwierigkeiten lagen vor allem in der Tatsache dass das *SPOT*-Mosaik aus zwei verschiedenen Monaten der Jahre 2004 und 2005 stammt, der Inhomogenitäten zwischen den von den beiden Kantonen und beiden Ländern zur Verfügung gestellten Vektordateien, sowie dem hügeligen bis bergigem Terrain des Juras und der französischen Voralpen.

1. Introduction

La couverture du sol représente une source d'information essentielle pour la gestion et la planification du territoire. L'établissement de cette couche d'information fait partie des tâches prioritaires à effectuer, entre autres, sous l'égide du grand projet d'infrastructure nationale de données géographiques (INDG) mené au niveau fédéral suisse (Frick et Kettiger 2006). C'est dans ce cadre que le Canton de Genève vient d'élaborer une carte de couverture du sol à haute résolution de son territoire (Jaquet et al. 2008; SITG 2009a).

[2] http://etat.geneve.ch/geoportail/geoagglo/

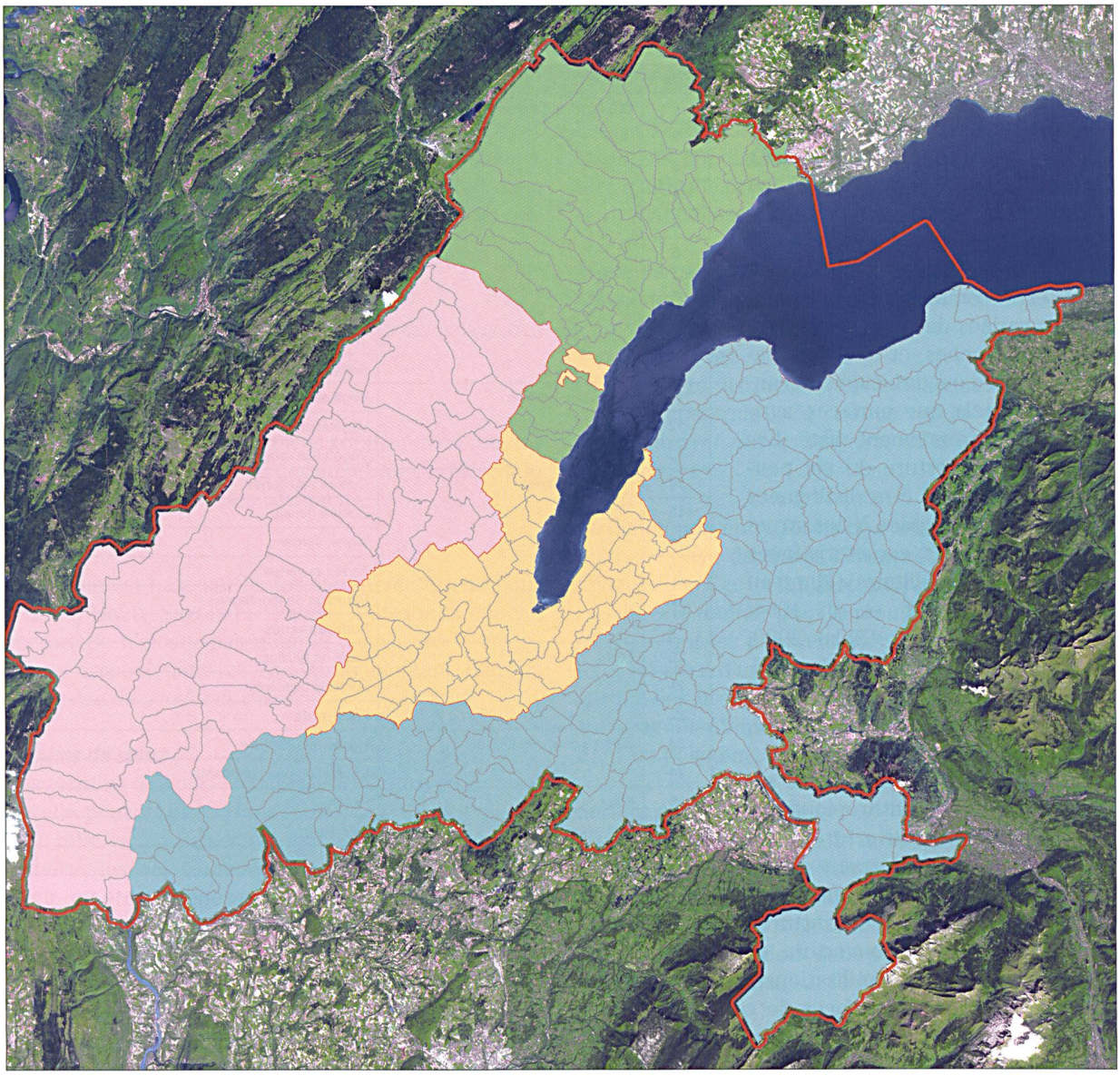

Figure 1: Extension géographique de la carte de couverture du sol CCSA04 (limite en rouge), avec les quatre entités politiques Vaud (vert), Genève (saumon), Ain (rose) et Haute-Savoie (bleu).

Figure 1: Geographic coverage of the CCSA04 land cover map (limit in red), with the 4 political entities Vaud (green), Geneva (beige), Ain (pink) and Haute-Savoie (blue).

La nécessité de disposer d'un tel document étendu à la *regio genevensis* semble évidente. Jusqu'à ce jour, il n'existait qu'une cartographie effectuée en 2000 à partir d'images satellitaires à résolution moyenne de 30 m (Jaquet 2002), ainsi qu'une carte à 20 classes réalisée par le SITL également sur la base d'images satellitaires en 1999-2000 (SITL 2009).

Le projet d'Agglomération Franco-Valdo-Genevois (ci-après *AFVG*; Surchat Vial 2009) prévoit, sous forme de l'action no 145[3], l'établissement d'une carte de couverture du sol dans son périmètre (Fig. 1), avec possibilité d'une mise à jour régulière et semi-automatique. Cette cartographie a été réalisée en 2008-2009 par le GRID Europe, en coordination avec le Service de la Mensuration Officielle du Canton de Genève (SEMO), produisant la carte dite *CCSA04*. Celle-ci est maintenant disponible sur le site internet du SITG (SITG 2009b).

Après une introduction sur la notion de couverture du sol, nous présentons les données utilisées dans le cadre de cette cartographie, puis la méthode appliquée, ainsi que les résultats et leur contrôle de qualité.

[3] http://www.projet-agglo.org/upload/wysiwyg/File/site_internet/Fiches%20actions_dec07.pdf

2. Définition et cartographie de la couverture du sol

Couverture et utilisation du sol sont deux notions complémentaires décrites dans Anonyme (1999), Campbell (2002, chap. 19) et Comber et al. (2005a et b).

La *couverture* du sol se réfère à la description physique de la surface de la terre, comprenant des combinaisons variées de types de végétation, sols, roches et corps aquatiques, ainsi que des éléments anthropiques tels que surfaces agricoles et environnement bâti. Les classes de couverture du sol peuvent généralement être distinguées par télédétection grâce à des structures ou textures caractéristiques sur l'imagerie satellitaire (Marceau et al. 1990; Green et al. 1994; Loveland et al. 2000; Cihlar 2000; Vogelmann et al. 2001; Kressler et al. 2001; Silverio et Jaquet 2009) ou les photos aériennes (Kressler et al. 2005; Richard et al. 2008)

L'*utilisation* ou *occupation* du sol se réfère à l'usage anthropique auquel est dévolue la couverture du sol (Anonyme 2006). Certains types d'occupation du sol, tels que l'agriculture, présentent une couverture du sol caractéristique. Dans ce cas, couverture et utilisation sont équivalentes. D'autres utilisations, telle que les réserves naturelles, les surfaces de compensation ou encore les pépinières, peuvent être constituées de plusieurs types de couverture du sol.

Dans la plupart des schémas classificatoires de «couverture» du sol, tels que *CORINE Land Cover* ou *geoland* (GSELand 2006a et b), on trouve en fait un mélange de ces deux notions. En Suisse, la distinction est clairement faite dans la statistique de superficie selon la nomenclature 2004 (OFS 2009), mais pas formellement dans la *couche couverture du sol* régie par l'Ordonnance Technique sur la Mensuration Officielle (OTEMO) (DDPS 1994).

La couverture du sol représente un élément important dans la modélisation du géosystème, de par son rôle lors du stockage et des transferts d'énergie et de matière, telle que l'eau (Silverio et Jaquet 2005). De nombreux programmes internationaux s'attachent ainsi à la cartographier et à la suivre dans le temps. L'on peut citer les *Land-Cover and Land-Use Change Programs* de la NASA[4] et de l'IGBP[5], ainsi que le projet européen *Land cover flows* basé sur les données *Corine*[6].

Il existe deux manières de représenter ou cartographier la couverture du sol: (a) le type de couverture est évalué au centre des mailles d'une grille par examen visuel d'orthophotos. C'est le cas de la statistique de superficie suisse mentionnée plus haut, basée sur une maille hectométrique (OFS 2009; Bapst 2008). La taille minimale d'une entité cartographiée est dans ce cas d'un hectare, dont la vraie surface et la forme ne sont ainsi pas exprimées; (b) les entités de couverture sont représentées sous forme d'objets vectoriels par des *polygones*, dont les limites correspondent à la réalité de terrain. Ces polygones sont tracés et renseignés thématiquement soit manuellement, soit plus volontiers sur la base d'une analyse semi-automatisée d'images aériennes numériques et données associées (Smith et Fuller 2001; Harayama et Jaquet 2004). C'est cette dernière méthode qui a été appliquée dans le présent travail.

Tableau 1: Légende de la carte CCSA04

Table 1: Legend of CCSA04 map

No	Ordre 1	Ordre 2
1	Urbain et surfaces dures	Bâtiment <80 m^2
2		Bâtiment 80-500 m^2
3		Bâtiment >500 m^2
4		Pourtour des bâtiments
5		Route
6		Chemin de fer
7		Aérodrome
8		Parking
9		Terrain de sport
10		Autres surfaces dures
11	Végétation urbaine	Végétation urbaine : gazon
12		Végétation urbaine : mixte
13		Végétation urbaine : arbre
14	Surface agricole	Culture peu dense
15		Culture dense
16		Vigne, verger
17		Terres ouvertes
18		Pâturage de montagne
19		Surfaces vertes
20	Forêt	Forêt de feuillus
21		Forêt de conifères
22		Forêt mixte
23	Surface peu végétalisée	Roche nue, éboulis
24		Végétation peu abondante
25	Eaux	Rivière
26		Lac, étang
27		Neige

[4] http://lcluc.umd.edu/index.asp

[5] http://www.igbp.net/page.php?pid=250

[6] http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/land-cover-flows-based-on-corine-land-cover-changes-database-1990-2000-1

3. Thématique

Vingt-sept classes ou thèmes de couverture du sol d'ordre deux ont été distingués, regroupables au sein de six super-classes d'ordre un (Tableau 1). Cette légende a été établie en fonction des besoins du Projet *Agglo* mais aussi sous la contrainte des données à disposition. Les thèmes étant définis en détail dans Schwarzer et al. (2009), nous ne commentons ici que les plus importants.

Bâtiments

Les bâtiments ont été subdivisés en trois catégories sur la base de leur emprise au sol.

Pourtour des bâtiments

Ce thème regroupe les surfaces goudronnées (ou des mixels de bâtiments, et/ou des mixels de surfaces peu végétalisées) proche des bâtiments.

Parkings

Ce thème est basé sur l'information vectorielle pour l'Ain, la Haute-Savoie et Genève. Puisque la couche vectorielle n'existe pas pour le canton de Vaud, ce thème tombe, dans ce cas, probablement dans la classe *autres surfaces dures.*

Terrains de sport

Les terrains de sport se basent sur l'information vectorielle pour l'Ain, la Haute-Savoie et Vaud. Puisque une telle couche n'existe pas pour le Canton de Genève, les objets concernés et détectés visuellement ont été attribués manuellement.

Autres surfaces dures

Cette classe essaye de rassembler des objets de haute réflectance, qui sont très probablement des surfaces dures, mais qui ne tombent pas dans la classe *parking*. Elle est partiellement basée sur la couche vectorielle *zones aménagées* sans autre spécification.

Végétation urbaine

Il nous a paru intéressant de cartographier séparément la végétation en milieu urbain, suivant en cela la terminologie *CORINE Land Cover*, implémentée entre autre dans GSELand (2006a): *M2.1 Regional land Cover*, catégorie 1.4, «*Artificial non-agricultural vegetated areas*». Trois sous-classes ont été identifiées. Ce sont: *Végétation urbaine: arbre*, *Végétation urbaine: gazon* et *Végétation urbaine: mixte* (mixels arbre-gazon).

Cultures

Cette catégorie comprend ici les prairies, qui n'ont pas pu être spectralement distinguées des cultures intensives. Les cultures maraîchères sont également impossibles à distinguer spectralement à l'échelle de la mosaïque *SPOT*. Elles pourraient être identifiées par comparaison visuelle avec les orthophotos. En attendant, elles tombent dans les *terres ouvertes* (=*labourées*). Nous avons séparé les *cultures* en deux sous-classes suivant la densité de la végétation exprimée par le *NDVI* (indice de la différence normalisée; Caloz et Collet 2001). Les *pâturages de montagne* ont été distingués grâce à l'utilisation d'un critère d'altitude tiré du MNA, complété par des corrections manuelles.

Vigne, verger

Ce thème est basé sur l'information vectorielle.

Terres labourées

Elles ont été distinguées essentiellement par l'information spectrale. Ce thème peut parfois être confondu avec *autres surfaces dures*.

Forêts

La distinction entre forêts de conifères, de feuillus et mixtes essaye de suivre l'interprétation visuelle des images *SPOT* et orthophotos. Néanmoins, il est impossible de donner pour le moment des seuils *quantitatifs* pour les pourcentages de conifères / feuillus dans un objet d'un de ces trois types. Il faut plutôt regarder ces groupes comme une description indicative, signifiant quel type d'arbre est prédominant dans un polygone.

Surface peu végétalisée

C'est surtout une classe de montagne, qui comprend *roche nue, éboulis*, et *végétation peu abondante*. Dans ce dernier cas, il s'agit aussi des pâturages avec encore très peu de végétation, l'image *SPOT* utilisée pour la classification datant du mois de mai. Ce thème est donc basé sur l'information spectrale.

Eaux

Les shapefiles des entités politiques ne comprenant pas l'hydrologie (lac et rivières transfrontaliers), ce thème n'a pas pu être cartographié de manière satisfaisante pour le Léman, l'Arve et le Rhône. Ainsi, les objets classifiés comme *lac et étang* ne comprennent-ils que le lac de Divonne et les petits plans d'eau. Les petites rivières sont représentées par des polygones issus d'un tampon de 2.5 m autour de leur axe central.

4. Données disponibles

Les données primaires pouvant fournir des informations sur la couverture du sol dans un territoire et à un moment donné sont multiples. Il s'agit essentiellement de l'imagerie numérique, satellitaire ou aérienne, des relevés effectués au sol et stockés sous forme de vecteurs (points, lignes ou polygones) et des modèles numérique de hauteur, ces derniers représentant la hauteur des objets au-dessus de la sur-

face topographique (Riedo et al. 2002). On pourrait y ajouter les cartes topographiques, pour autant qu'elles soient à jour.

L'élaboration de la carte de couverture du sol de l'*AFVG* s'est basée sur les données répertoriées dans le Tableau 2, qui ont été obtenues auprès des fournisseurs pour chaque entité (SITG pour Genève, ASIT pour Vaud et IGN pour la France). Dans ce contexte transfrontalier, nous avons été confrontés au problème de l'hétérogénéité des données vectorielles. En effet, les thèmes figurant dans le Tableau 2 ne sont pas tous décrits de la même manière dans les tables attributaires selon l'entité considérée (Comber et al. 2005a). Il a fallu donc recourir à des procédures classificatoires différenciées.

Un autre type d'hétérogénéité est apparu au niveau de l'imagerie satellitaire, laquelle consiste en une mosaïque de quatre scènes *SPOT* prises à des dates différentes entre mai 2004 et septembre 2005 (Fig. 2). Ceci induit des différences radiométriques qui ont également des conséquences sur la classification. Pour des détails supplémentaires sur les données utilisées, on se reportera au rapport final du mandat AGGLO (Schwarzer et al. 2009).

Tableau 2: Données de base pour la cartographie de la couverture du sol dans le périmètre de l'Agglomération franco-valdo-genevoise

Table 2: Data used for land cover mapping in the area of the AFVG project

Type	Thème	Entité	Utilisation
Vecteur	**Routes**	GE, VD, F	Segmentation et étiquetage thématique
	Parking	GE, F	
	Zone aménagée	GE, VD, F	
	Aérodrome	GE, VD, F	
	Terrain de sport	VD, F	
	Bâtiments	GE, VD, F	
	Chemin de fer	GE, VD, F	
	Vignes et vergers	GE, VD, F	
	Zone agricole	GE, VD	
	Eaux	GE, VD, F	
Raster ou image	Mosaïque *SPOT* 5 m Pseudo-bleu, Vert, Rouge	GE, VD, F	
	Mosaïque *SPOT* 10 m Vert, Rouge, PIR, MIR	GE, VD, F	
	MNH 2005 1 m dégradé à 5 m	VD	Distinction des arbres et des prairies
	MNA 50 m	F, VD	Définition des pâturages de montagne
	Orthophotos	GE, VD, F	Vérification de la cartographie (contrôle de qualité)

5. Méthodologie

Le principe de notre approche cartographique est de combiner les données images, vectorielles et hypsométriques afin d'en extraire une information cartographique sur la couverture du sol (Harayama et Jaquet 2004). Cette approche est dite *multi-source* et *orientée objet*, car elle consiste en une segmentation multi-résolution de l'image produisant des objets vectoriels (polygones), qui sont ensuite étiquetés thématiquement sur la base de critères multiples (spectraux, morphologiques, contextuels). On en trouvera les principes dans Hoffmann (2001) et Lewinski et Bochenek (2008), et des applications dans Brooks et al. (2006), Zhou et Troy (2008), Fung et al. (2008).

Trois logiciels ont été utilisés pour mener à bien ces opérations cartographiques: *ERDAS Imagine*™ pour la manipulation des données image, *Definiens Developer*™ (Lang et Tiede 2007) pour la classification et *ArcGIS*™ *9.2* pour le stockage, la gestion et l'affichage des résultats. L'ensemble du processus analytique est résumé par l'organigramme de la figure 3, au sein duquel on peut identifier quatre parties.

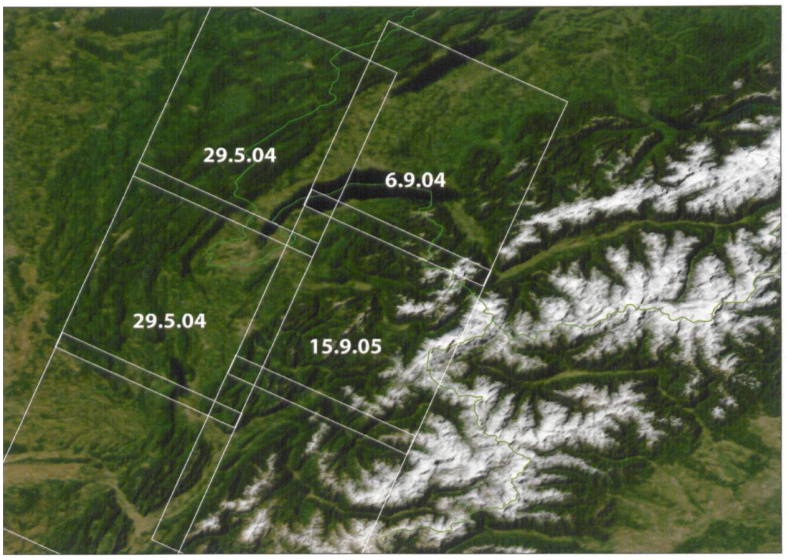

Fig. 2: Assemblage des scènes faisant partie de la mosaïque SPOT. Noter les différences de dates entre les tuiles.

Figure 2: Scene assembly scheme for the SPOT mosaic. Note date differences between tiles.

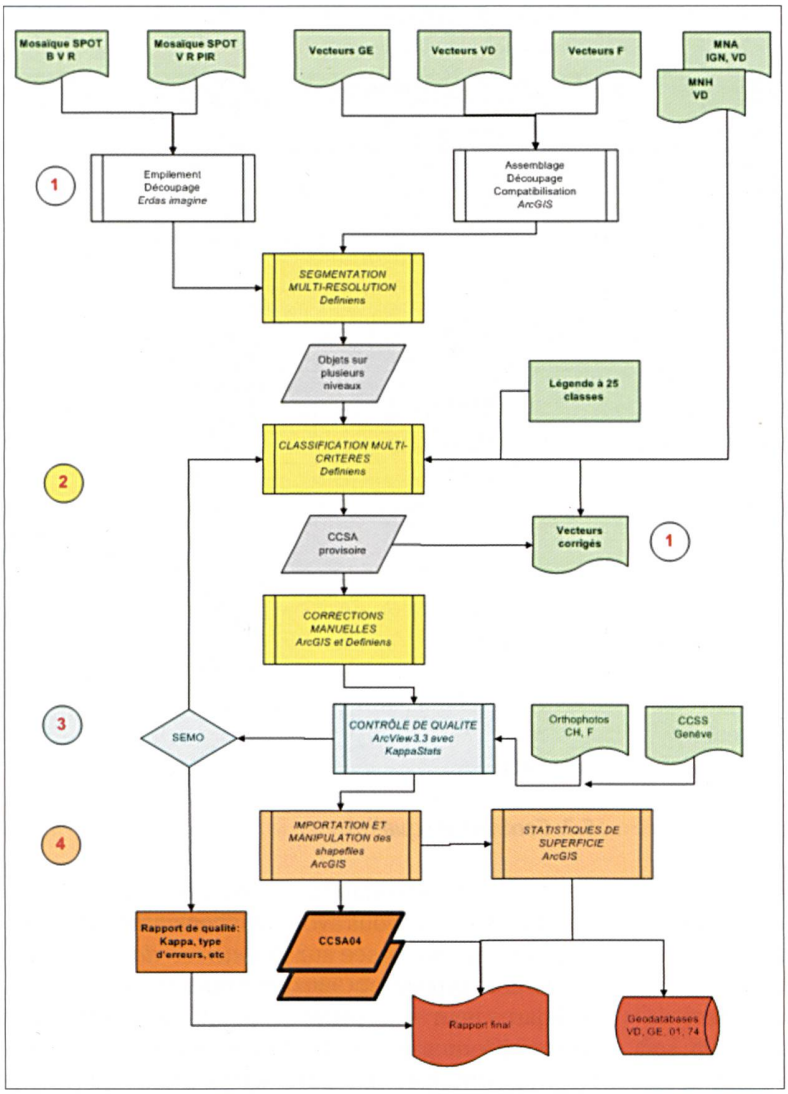

Fig. 3: Organigramme des opérations pour la production de la carte de couverture du sol CCSA04. 1: Pré-traitement. 2: Extraction de l'information. 3: Contrôle de qualité. 4: Conditionnement. Vert: données. Gris: produits intermédiaires. Orange: produits finaux. La dernière ligne de chaque boîte indique le nom du logiciel utilisé.

Figure 3: Flowchart of operations for the production of the CCSA04 land cover map. 1: Pre-treatment. 2: information extraction. 3: Quality control. 4: Export. Green: data. Grey: intermediate outputs. Orange: final products. The last line of each box indicates the software used.

5.1. Pré-traitement

Il comprend le découpage, l'empilement et l'alignement géométrique des mosaïques d'images *SPOT* et des couches vectorielles pour l'ensemble des entités considérées. L'hétérogénéité intrinsèque des données de base mentionnée plus haut, ainsi que celle induite par leur provenance diverse (trois entités politiques) a passablement alourdi cette phase préliminaire.

5.2. Extraction de l'information

La technologie du logiciel *Definiens* est basée sur le concept selon lequel l'information sémantique nécessaire pour l'interprétation d'une image n'est pas représentée dans des pixels isolés, mais plutôt dans des *objets* possédant une signification particulière, ainsi que dans leurs relations mutuelles (Mittelberg 2009). Le logiciel agit donc comme la perception humaine qui interprète une image selon différents critères tels que couleur, forme, taille, texture et contexte, et non selon une information isolée telle qu'un pixel.

Cette méthode multi-sources et multi-échelles permet d'améliorer considérablement le résultat de la classification puisqu'en plus des valeurs spectrales, les informations *contextuelles* y sont intégrées (Binaghi et al. 1997; Gitas et al. 2004; Kux et de Pinho 2006). Par ce terme, l'on entend la forme des polygones représentant la couverture du sol, ainsi que leurs relations d'adjacence ou de proximité. En outre, le terme «multi-sources» se justifie du fait que les données raster aussi bien que les vecteurs peuvent être utilisés, et celui de «multi-échelle» parce que segmentation et classification peuvent être effectuées à différents niveaux.

Comme indiqué sur la figure 3, l'extraction de l'information contenue dans l'ensemble des données a procédé en trois étapes:

1. *Segmentation*: c'est une phase très importante parce que les objets qui en sont dérivés vont directement influencer la classification. *Definiens* segmente une image en parcelles (=objets) par regroupement, à différentes échelles, des pixels ayant des propriétés spectrales et des formes homogènes. La technique de segmentation utilise une approche croissante: elle fusionne des petits objets de l'image pour en obtenir un plus grand, l'objet originel étant représenté par un seul pixel (Caloz et al. 2003). Le processus d'union s'arrête lorsqu'il a atteint un seuil défini selon une échelle spécifiée par l'utilisateur, ou lorsque la forme et la couleur des objets avoisinants ne sont plus similaires. Afin de trouver les paramè-

tres idéaux (échelle, forme, couleur) pour une segmentation adaptée, nous avons effectué plusieurs tests. Les paramètres de segmentation sont détaillés dans Schwarzer et al. (2009).

- *2. Classification multi-critères*: Une fois définis par la segmentation, les objets sont étiquetés thématiquement dans *Definiens* via l'application de critères qui font appel à trois grandes catégories d'information:
  - Appartenance à, ou coïncidence spatiale avec un *shapefile*: c'est le cas, par exemple, pour les bâtiments et les routes.
  - Caractéristiques spectrales tirées des plans d'information de la mosaïque *SPOT*: *Vert*, *Rouge*, *PIR*, *MIR*, *luminance*, *NDVI*, diverses ratios. Par exemple: cultures, forêts, eaux, ombre.
  - Situation altitudinale, tirée du MNA. Exemple: pâturages de montagne.
  - Notons que plusieurs thèmes sont définis en appliquant une combinaison des critères ci-dessus. La classification procède d'une manière séquentielle qui est sauvegardée dans des fichiers dits *ruleset*. Ces derniers diffèrent selon les entités, pour tenir compte de la non-uniformité des sources d'information, soit spectrale, soit au niveau des vecteurs. Ces *rulesets* sont listés dans Schwarzer et al. (2009; annexe 4).

- *3. Corrections manuelles*: les corrections ont été effectuées visuellement par les opérateurs, en superposant en semi-transparence les polygones classifiés sur l'imagerie *SPOT* et sur les ortho-photos. Elles visent à corriger les défauts principaux suivants:
  - Agrégation à tort de certains objets adjacents aux routes.
  - Sous-estimation de la surface des forêts de conifères.
  - Attribution erronée aux cultures de la végétation urbaine autour de certains bâtiments.
  - Cultures faussement classifiées comme forêts de feuillus.
  - Terrains de sport non classifiés, donc alloués manuellement.
  - Confusion entre les forêts de feuillus et la végétation herbacée, les surfaces dures et les sols nus, et entre les cultures et les surfaces vertes.
  - Identification des objets occultés par les ombres.

  Ainsi, 1550 objets ont-ils été corrigés sur un total de plus de 1.5 millions (taux de 1 pour mille).

Tableau 3: Légende simplifiée de CCSA04 pour contrôle de qualité
Table 3: CCSA04 simplified legend for quality control

Code	Appellation	Correspondance
-	Non classé	Nuage
1	Bâtiments	< 80 m^2, 80-500 m^2, > 500m^2
2	Routes	Routes
3	Chemin de fer	Chemin de fer
4	Surface dure	Pourtour des bâtiments, surfaces dures, terrain de sport, parkings, aérodrome
5	Végétation arborée	Forêt mixte, forêts feuillus, forêts conifères, végétation urbaine : arbre, végétation urbaine : mixte
6	Végétation herbacée	Pâturage de montagne, surfaces vertes, végétation peu abondante, végétation urbaine : gazon
7	Cultures	Culture dense, culture peu dense, terres ouvertes
8	Eaux	Lac et étang, rivière
9	Roche/sol nu	Roche nue, éboulis
10	Vergers	Vergers, vignes
11	Neige	Neige

5.3. Contrôle de qualité

Pour évaluer l'adéquation d'une carte de couverture du sol à la réalité, nous avons suivi une procédure statistique formelle basée sur la *matrice de confusion* ou de *contingence* (Caloz et Collet 2001). Celle-ci compare, pour une série de points de contrôle, le thème obtenu par classification avec un thème de référence. Une série de paramètres statistiques sont ensuite calculés à partir des totaux de lignes et de colonnes de la matrice, pour chaque thème individuellement et pour leur ensemble. Le degré global d'adéquation de la classification au thème de référence est donné par le coefficient *Kappa* (variant entre 0 et 1, ou encore 0 et 100%).

Pour chaque entité, une série de points de contrôle a été générée sous *ArcGis 9.2* (Beyer 2004), et la vérité-terrain obtenue par examen visuel de l'imagerie *SPOT* et des orthophotos. Dans ce dernier cas, l'attribution du point de contrôle à une classe a été faite en tenant compte d'une zone d'influence d'environ 1 à 5 m de diamètre.

L'obtention de la vérité-terrain a passé par une légende simplifiée à 11 classes (Tableau 3). En effet, il n'était pas possible d'évaluer visuellement avec certitude la totalité des 27 classes d'origine. Il faut donc bien noter que les coefficients *Kappa* rapportés plus loin concernent la légende *simplifiée*. L'extension *kappa_stats.avx* (Jenness et Wynne 2007) a été utilisée pour les calculs.

Figure 4: Extrait de CCSA04. Genève-Ville. La largeur de la carte représente 3 km.
Figure 4: An extract of CCSA04. Downtown Geneva. The map is 3 km wide.

5.4. Conditionnement

Dans le but de livrer la carte de couverture du sol sous forme d'une *geodatabase*, nous avons exporté les *shapefiles* des thèmes classifiés sous *Definiens* dans *ArcGIS 9.2*. Bien que cette exportation soit considérée comme faisable dans *Definiens*, nous avons buté sur des limitations pratiques dans les possibilités d'exportation, et constaté des erreurs de topologie dans les *shapefiles*. En outre, le fait d'avoir travaillé sur différents niveaux a impliqué tout une série de manipulations dans *ArcGIS*, faisant appel entre autres aux opérateurs *ArcTools UNION, MERGE et SPLIT*.

5.5. Mise en œuvre

L'hétérogénéité des données de base, tant pour l'imagerie que pour les vecteurs, nous a obligés à adapter à chaque entité la méthodologie esquissée plus haut. Nous avons donc élaboré des *rulesets* adaptés pour les entités Vaud, Genève, Ain et Haute-Savoie. Chacune de ces entités a été subdivisée en plusieurs parties avant le traitement, afin de ne pas dépasser les capacités des logiciels, et les cartes partielles ont été finalement fusionnées.
La base de données géographique finale, au format *geodatabase ESRI*, occupe 471 MB.

6. Résultats

6.1 Carte CCSA04

Nous présentons aux figures 4 à 6 trois extraits de la *CCSA04*, avec la légende des classes donnée à la figure 7. Le premier extrait (Fig. 4) couvre le centre de la ville de Genève, avec son tissu urbain dense entrecoupé des espaces verts des parcs et de la surface à revêtement dur de la Plaine de Plainpalais. Le second extrait (Fig. 5) représente le village de Chavanne-de-Bogis (VD) traversé par l'autoroute et entouré d'une zone agricole (cultures de densités diverses, terres ouvertes et vignes).

L'extrait de la figure 6 représente la Haute-Chaîne du Jura, entre les avant-monts de St Jean-de-Gonville au SE et la vallée de la Valserine au NW. On remarquera les divers types de forêts, passant en altitude aux pâturages de montagne et aux surfaces semi-rocheuses à végétation peu abondante. La falaise de Roche-Franche se marque par un affleurement rocheux en forme de croissant.

Ces extraits sont représentés à une échelle de l'ordre de 1:30 000, assurant une bonne qualité graphique. Si l'on désire afficher la *CCSA04* à une échelle plus grande, l'on atteint, autour du 1:5000, une limite de qualité causée par la résolution de l'imagerie *SPOT* utilisée (5 m). C'est le cas de l'extrait représenté sur la figure 8: les objets polygonaux y ont des limites en escaliers de 5 m, et les objets linéaires, tels que les routes, sont parfois discontinus. A titre de comparaison, l'on a représenté sur la figure 9 la même région, utilisant cette fois la carte de couverture du sol à haute résolution du Canton de Genève *CCSS* (Jaquet et al. 2008; Jaquet et al. 2011), dont l'imagerie de base est l'orthophoto à résolution de 25 cm.

Il est possible d'accéder à chacun des objets cartographiques de la *geodatabase* au moyen du requêteur d'*ArcMap*. Ainsi, sur la figure 8, on affiche les caractéristiques d'un ensemble de bâtiments dont la surface est supérieure à 500 m², mesurant 320 m de long, avec un *NDVI* = -0.19 (indice de végétation, voir Caloz et Collet 2001, p. 227).

La comparaison visuelle entre les figures 8 (*CCSA04*, moyenne résolution) et 9 (*CCSS*, haute résolution) fait ressortir les différences suivantes:

Figure 5: Extrait de CCSA04. Région de Céligny (GE) - Divonne (F). La largeur de la carte représente 3.2 km.

Figure 5: An extract of CCSA04 between Céligny (GE) and Divonne (F). The map is 3.2 km wide.

- La forêt est plus étendue dans la *CCSA04*, englobant certaines surfaces vertes de la *CCSS*.
- Les cultures sont beaucoup plus étendues dans la *CCSA04*, car les prairies y ont été considérées comme cultures.
- Les surfaces dures, en particulier le pourtour des bâtiments, sont plus importantes dans *CCSA04*. Cela est dû à la présence de mixels composés de surfaces vertes et surfaces dures de petite taille, non résolvables sur l'image *SPOT*.

6.2 Statistiques de superficie

Les pourcentages du territoire couverts par les diverses classes d'ordre 1 et 2 de la carte CSSA04 sont donnés en détail dans Schwarzer et al (2009), et présentés de manière synthétique par la carte en anneau (*ring map*) de la figure 10.

Les contrastes paysagers entre les entités ressortent bien à l'examen de cette figure. Ainsi, l'on notera:

- Vaud et Haute-Savoie montrent une couverture du sol assez semblable (surfaces agricole et forestière autour de 40%, urbain voisin de 10%).
- L'Ain est caractérisé par une couverture forestière atteignant presque les 60%.
- Genève diffère très fortement des autres entités, ayant à la fois, paradoxalement, la plus forte couverture urbaine (25%) et la plus grande proportion de surface agricole (presque 50% du territoire).

6.3 Contrôle de qualité

L'évaluation a été réalisée sur un échantillon de 4619 objets, soit 2.4 objets au km^2. Les descripteurs de qualité du tableau 4 indiquent que la classification *CCSA04* (légende simplifiée) est satisfaisante. Avec un taux de mauvaise classification de 8% et un coefficient *Kappa* de 89%, elle dépasse le seuil de 75% qui avait été fixé dans le cahier des charges du mandat.

7. Discussion

Dans ce chapitre, nous reprenons et discutons certains aspects de notre méthodologie, ainsi que des questions touchant aux données utilisées et aux résultats obtenus.

7.1. Validité de la légende

Les classes cartographiées ici résultent d'un compromis entre les exigences du projet *AFVG* et le contenu informationnel intrinsèque des données à disposition. Cette légende ayant donc un caractère *ad hoc*, il est important, aux fins de comparaison, d'en établir la correspondance avec des standards. Nous l'avons fait pour les légendes suivantes:

- OTEMO-GE[7]: extension cantonale genevoise de la couche d'information *couverture du sol* de l'Ordonnance Technique sur la Mensuration Officielle, utilisée en Suisse. Cette légende a été utilisée pour la carte de couverture du sol *CCSS* du Canton de Genève (Jaquet et al. 2008; Jaquet et al. 2011).
- CORINE Land Cover[8]: il s'agit de la typologie en vigueur dans la Communauté Européenne et, par là-même, en France voisine (Herold et al. 2009).

[7] http://www.admin.ch/ch/f/rs/211_432_21/index.html#id-2-2

[8] http://www.ifen.fr/bases-de-donnees/occupation-du-sol/nomenclature.html

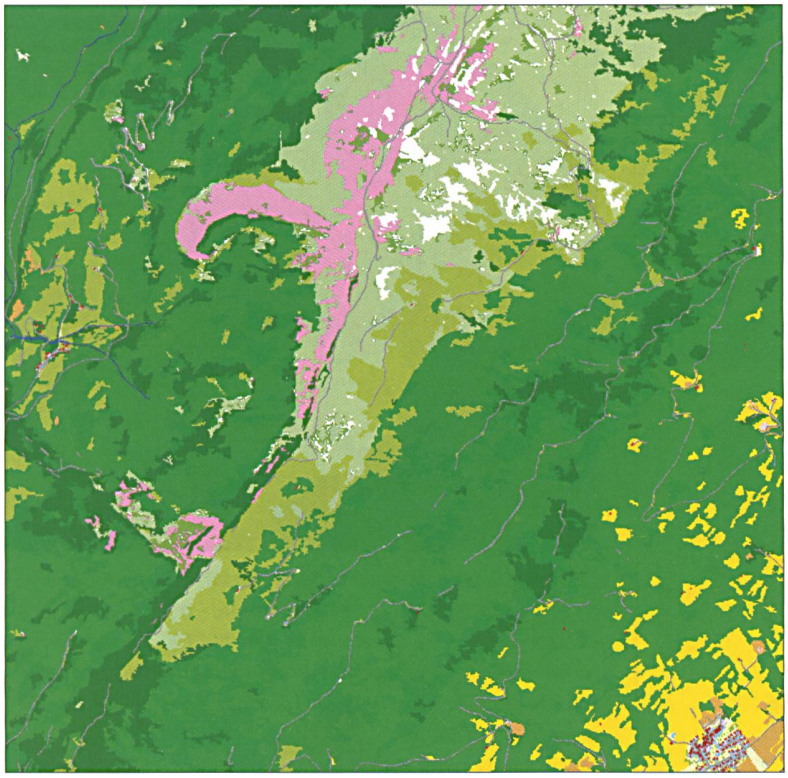

Figure 6: Extrait de CCSA04. Région Valserine – St Jean-de-Gonville. La largeur de la carte représente 5 km.
Figure 6: An extract of CCSA04 between St Jean-de-Gonville (Ain dept.) and the Valserine valley. The map is 5 km wide.

Le tableau de correspondance se trouve à l'Annexe 1.

7.2. Problème de qualité des données

L'hétérogénéité et l'imperfection qualitative des couches vectorielles a considérablement compliqué la tâche de cartographie. Les défauts principaux de ces couches sont les suivants:

- Couverture incomplète par les vecteurs (par exemple VD).
- Non-uniformité thématique: par exemple, les terrains de sport manquent pour Genève.
- Inexactitude spatiale: la couche *ZONE_OCCUPATION SOL* de l'IGN a été numérisée trop grossièrement, et ne correspond donc pas aux limites visibles sur la mosaïque *SPOT*.
- Manque de méta-information, en particulier sur la date d'acquisition ou d'élaboration de la couche. Il est donc possible qu'imagerie et vecteurs ne coïncident pas dans le temps.

Ces ambiguïtés sont un défaut récurrent de la plupart des légendes de couverture du sol (Comber et al. 2005a, p.205-206).

L'approche choisie dans cette étude tente de combiner, de manière pas forcément évidente, des objets vectoriels de taille parfois métrique avec des pixels décamétriques de la mosaïque *SPOT*. En effet, il s'agit de faire cohabiter, dans le corpus informationnel, des vecteurs à limites précises («dures») avec de l'imagerie où les thèmes ont, par essence, des limites «floues». Cela implique, d'une part, la dégradation spatiale des bâtiments et de la voirie (Fig. 8) et, d'autre part, l'exploitation de l'information exclusivement spectrale de la mosaïque *SPOT* pour la cartographie des thèmes naturels (forêts, espaces verts, cultures).

Bien que l'on puisse toujours souhaiter travailler avec de l'imagerie à résolution plus fine, la solution *SPOT* demeure actuellement incontournable, car nous ne disposons pas d'autres capteurs satellitaires qui permettent de couvrir le périmètre *AFVG* sur un minimum d'orbites (deux), et à une résolution néanmoins acceptable (5-10 m).

Ces éléments devront être gardés à l'esprit lors de l'utilisation de la *CCSA04* dans le contexte de l'*AFVG*. Ainsi, cette carte peut-elle légitimement permettre de calculer des statistiques de superficie, depuis l'en-

Tableau 4: Résultats du contrôle de qualité de CCSA04 pour les quatre entités.
Table 4: Results of CCSA04 map quality control for the 4 entities.

Entité	N points de contrôle	N points de contrôle km-²	Taux de mauvaise classification %	Kappa %
Genève	594	2.4	6	92
Vaud	711	2.3	7	90
Ain	1385	2.3	9	84
Haute-Savoie	1929	2.4	9	88
Total ou moyenne	4619	2.4	8	**89**

Figure 7: Légende de la CCSA04.
Figure 7: 27 class legend of CCSA04 land cover map.

semble de l'agglomération jusqu'à l'échelle de la commune; il est aussi possible d'avoir une bonne visualisation de la distribution spatiale des différents thèmes au niveau d'une entité communale. Zoomer plus finement ne se justifierait pas.

7.3. Une méthodologie adaptable

Bien que l'approche multi-sources orientée objet ait été appliquée sur l'ensemble du périmètre, sa concrétisation dans le logiciel *Definiens* a varié selon l'entité cartographiée. Cela est dû aux raisons suivantes:

- Physiographie contrastée, entre le Plateau genevois, le Jura vaudois-gessien et les Préalpes chablaisiennes. Les zones montagneuses peuvent être affectées d'effets d'ombre, et requièrent l'usage d'un MNA pour séparer certains thèmes (pâturages de montagne).
- Hétérogénéité radiométrique de la mosaïque *SPOT*, rassemblant des scènes prises à des saisons différentes (printemps 2004 et

Figure 8: Extrait de la carte de couverture du sol CCSA04. Région de Puplinge. La fenêtre «Identify» représente les caractéristiques de l'objet vectoriel no 307100 (limite turquoise) telles que stockées dans la table attributaire de la base de données géographique (geodatabase). La largeur de la carte est de 800 m.
Figure 8: An extract of CCSA04 in Puplinge (GE). The "Identify" window shows the characteristics of object nr. 307100 (limit in cyan) such as stored in the geodatabase attribute table. Notice the "blocky" texture inherited from the SPOT mosaic.The map is 800 m wide.

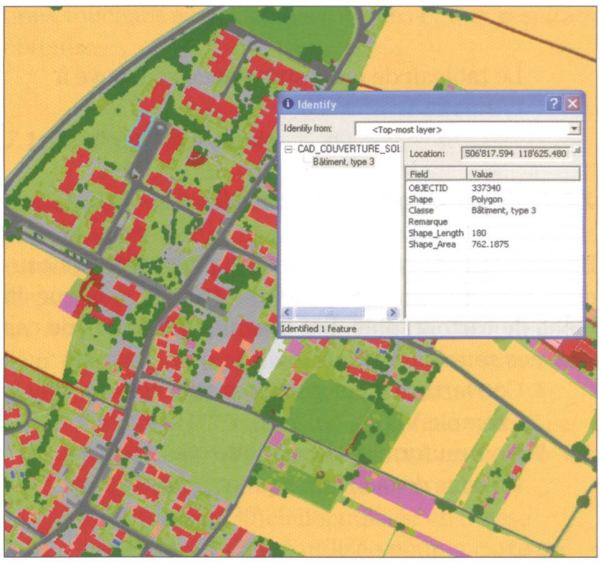

Figure 9: Extrait de la carte de couverture du sol à haute résolution du Canton de Genève (CCSS). Région Puplinge. La fenêtre «Identify» représente les caractéristiques de l'objet vectoriel no 337340 telles que stockées dans la table attributaire de la geodatabase. La largeur de la carte est de 800 m.
Figure 9: An extract of the high resolution land cover map CCSS in Puplinge (GE). The "Identify" window shows the characteristics of object nr. 337340 (limit in cyan) such as stored in the geodatabase attribute table. The map is 800 m wide.

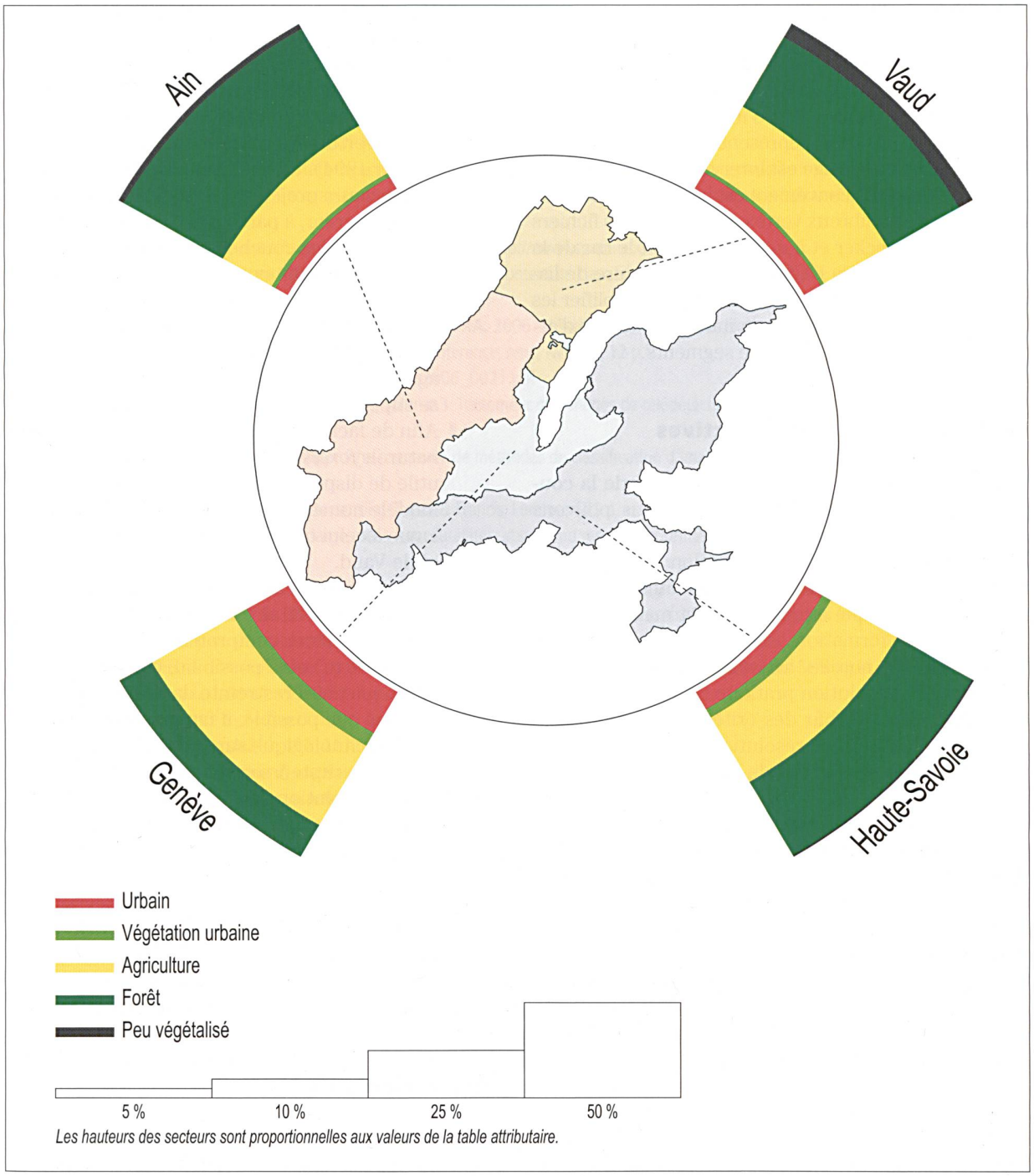

Figure 10: Représentation par carte en couronne des statistiques de superficie pour les quatre entités de l'AFVG.
Figure 10: Ring map representation of land cover areal statistics for Vaud, Ain, Geneva and Haute-Savoie entities.

automne 2005). Cela implique, entre autres, que les seuils quantitatifs des critères de classification puissent varier d'une entité à l'autre.

- Hétérogénéité quantitative et qualitative des données vectorielles. A titre d'exemple, la couche *zone agricole*, très utile pour pallier à des confusions radiométriques dans la végétation, n'a pas pu être utilisée partout.

Nous pensons que cette variabilité méthodologique, bien que non idéale, était inévitable. Néanmoins, les résultats des contrôles de qualité nous portent à croire que notre approche a permis d'atténuer les effets des hétérogénéités mentionnées ci-dessus, assurant une cohérence thématique acceptable entre les cartes des diverses entités.

7.4. Objets pixellisés ou lissés?

L'utilisation d'une couche-image dans le processus de segmentation des objets donne à ceux-ci des limites en escaliers, bien visibles lors d'un zoom (voir Fig. 8). L'avantage d'une telle représentation est d'indiquer clairement qu'une image est intervenue lors de la définition de l'objet; l'inconvénient est la présence d'une limite ayant de nombreux vertex, ce qui rend les fichiers plus lourds à stocker et à manipuler. C'est le cas de la version actuelle de la *CCSA04*. Une procédure de lissage est actuellement à l'étude, en vue de simplifier les limites des polygones, tout en évitant la formation d'artéfacts, tels que croisements de segments.

8. Conclusions et perspectives

Au terme de cette première cartographie de la couverture du sol du périmètre *AFVG*, nous pouvons tirer les conclusions suivantes.

Les données vectorielles à disposition, provenant de trois sources différentes, ne sont pas toujours compatibles en thématique et en qualité, et manquent parfois de méta-information. Elles sont rarement à jour (différence temporelle avec la mosaïque *SPOT*). Celle-ci a une résolution pratique de 10 m lorsqu'elle est utilisée pour établir des critères radiométriques comme le *NDVI*. Cette résolution est trop grossière pour éviter des confusions de thèmes dans le milieu urbain.

La procédure mise au point (segmentation multi-niveaux suivie d'un étiquetage thématique) a tenté de tirer un profit maximum de la combinaison de données raster et vecteur. En raisons des hétérogénéités au niveau des données signalées plus haut, les procédures classificatoires ont dû être adaptées à chaque entité, impliquant dans le logiciel *Definiens* des *rulesets* et seuils des critères de classes différenciés. En dépit de cela, et comme indiqué par les contrôles de qualité et les statistiques de superficie, les quatre cartes *CCSA04* forment un tout cohérent.

Le coefficient *Kappa*, indicateur de la qualité globale de la cartographie, atteint une valeur moyenne de 89%, ce qui est très honorable si on le compare au niveau de qualité d'autres cartes similaires (Congalton 1991; Foody 2002; Debeir et al. 2002).

Il faut aussi rappeler que la finesse thématique et géométrique de la carte, et donc ses usages en aménagement, dépendent de la résolution de base de l'image et de la précision des couches vectorielles. Pour ces raisons, la *CCSA04* se prête tout à fait au calcul de statistiques de superficie par commune, mais elle n'est en aucun cas destinée à des applications au niveau de parcelles individuelles.

Dans la perspective d'une mise à jour attendue de la *CCSA04* d'ici quelques années, nous souhaitons faire part des recommandations suivantes:

- Hormis le calcul des statistiques de superficie par entités politico-administratives, l'accès à deux ou plusieurs cartes étagées dans le temps permettra de mettre en évidence dans quelles portions du territoire les changements de couverture du sol sont survenus (Meyer et Turner 1994). Une telle application fait l'objet de plusieurs projets en Europe et ailleurs.
- Il faudra créer, à partir des données suisses et françaises, des couches vectorielles compatibles thématiquement, et supprimer totalement les décalages géométriques entre les couches vectorielles, l'imagerie satellitaire et les MNA/MNH. Les vecteurs limitant la zone agricole, la zone urbaine et les eaux devront se superposer parfaitement à l'imagerie.
- Afin de faciliter la séparation des thèmes naturels *forêts* et *surfaces vertes*, il serait utile de disposer, sur territoire français, d'un modèle numérique de hauteur (MNH), analogue à celui qui couvre les canton de Genève et de Vaud.
- Bien qu'en l'état actuel de disponibilité de l'imagerie satellitaire la solution *SPOT* représente le meilleur compromis entre la résolution (5-10 m) et la possibilité d'avoir une mosaïque aussi restreinte dans le temps et l'espace que possible, il faudra assurer une veille technologique sur le développement de nouveaux capteurs et plateformes: une imagerie à résolution de 5 m ou au-dessous permettrait une amélioration notable de la cartographie, particulièrement en milieu urbain et sub-urbain.
- Enfin, la légende de la future carte devrait être améliorée, en précisant la définition de certaines classes (conifères vs feuillus, cultures denses vs peu denses), et en incluant de nouvelles (gravières, terrains de sport, sols nus).

Remerciements

Nous apprécions la confiance que nous a témoignée le Comité de Pilotage du Projet d'Agglomération en confiant au GRID Europe le mandat de cartographie et en nous autorisant à en publier les résultats. Dans l'accomplissement de cette tâche, Bertrand Barbey, du Service de la Mensuration Officielle du Canton de Genève a été pour nous un fournisseur de données efficace et un interlocuteur technique compétent. Nous lui en sommes très reconnaissants. Nous avons aussi bénéficié des talents informatiques et graphiques de Dominique del Pietro, du GRID Europe, qui a conçu le programme de représentation par cartes en couronnes. Merci aussi à R. Witt pour la relecture du résumé en anglais.

Bibliographie

- **Anonyme.** 1999. Terminology for Integrated Resources Planning and Management. Food and Agriculture Organization/United Nations Environmental Programme, Rome, Italy and Nairobi, Kenya.
- **Anonyme.** 2006. CORINE land cover 44 class legend. https://ecourses.dbnet.ntua.gr/fsr/10607/CORINE_EN.pdf
- **Bapst P.** 2008. Corine Land Cover vs Statistique suisse de la superficie. Etude théorique et expérimentale de la compatibilité des méthodes. Diplôme, Département de Géographie, Université de Fribourg, 110 p. http://www.unifr.ch/science/diplome08/html/pdf/98-214-760.pdf
- **Beyer, HL.** 2004. Hawth's Analysis Tools for ArcGIS. Available at http://www.spatialecology.com/htools.
- **Binaghi E, Madella P, Montesano MG et Rampini A.** 1997. Fuzzy contextual classification of multisource remote sensing images. IEEE transactions on geoscience and remote sensing, 35(2): 326-340.
- **Brooks CN, Schaub DL, Powell RB, French NHF, Shuchman RA.** 2006. Multi-temporal and multi-platform agricultural land cover classification in Southeastern Michigan. ASPRS 2006 Annual Conference, reno, Nevada, 12 p. http://earth.definiens.com/sites/default/files/164_asprs2006_0021.pdf
- **Caloz R, Collet C.** 2001. Précis de télédétection, volume 3: Traitement des images de télédétection. Presses de l'Université du Québec, 386 p.
- **Caloz R, Pointet A et Collet C.** 2003. Approche comparée de méthodes de classification d'images aériennes: une étude de cas. Geographica Helvetica, 58: 141-153.
- **Campbel JB.** 2002. Introduction to remote sensing. Taylor & Francis, London, 621 p.
- **Cilhar J.** 2000. Land cover mapping of large areas from satellites: status and research priorities. International Journal of Remote Sensing, 21(6 & 7): 1093-1114.
- **Comber A, Fisher P, Wadsworth R.** 2005a. What is land cover. Environment and Planning B: Planning and Design, 32: 199-209.
- **Comber A, Fisher P, Wadsworth R.** 2005b. You know what landcover is but does anyone else?...an investigation into semantic and ontological confusion. International Journal of Remote sensing, 26(1): 223-228.
- **Congalton RG.** 1991. A review of assassing the accuracy of classifications of remotely sensed data. Remote Sensing of Environment, 37: 35-46. http://www.uwf.edu/zhu/evr6930/2.pdf
- **DDPS.** 1994. Ordonnance technique du DDPS du 10 juin 1994 sur la mensuration officielle (OTEMO). http://www.admin.ch/ch/f/rs/c211_432_21.html
- **Debeir O, van den Steen I, Latinne P, van Ham P et Wolf E.** 2002. Textural and contextual land-cover classification using single and multiple classifier systems. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 68(6): 597-605. http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsidt=13686986
- **Foody GM.** 2002. Status of land cover classification accuracy assessment. Remote sensing of Environment, 80(1): 185-201. http://www.sciencedirect.com/science?_ob=MImg&_imagekey=B6V6V-44SJGRK-J-3&_cdi=5824&_user=779890&_orig=search&_coverDate=04%2F30%2F2002&_sk=999199998&view=c&wchp=dGLzVzz-zSkzV&md5=4b16239e59a29b16fde91f3b4b810c95&ie=/sdarticle.pdf
- **Frick R, Kettiger D.** 2006. Catalogue des géodonnées de base selon le droit fédéral. Document des travaux de finalisation. Rapport final, INFRAS, 26 p. http://www.swisstopo.admin.ch/internet/swisstopo/fr/home/topics/geodata_inf/bgdi.html
- **Fung T, So LLH, Chen Y, Shi P, Wang J.** 2008. Analysis of green space in Chongqing and Nanjing, cities of China with ASTER images using object-oreinted image classification and landscape metric analysis. International Journal of Remote Sensing, 29(24): 7159-7180.
- **Gitas IZ, Mitri GH et Ventura G.** 2004. Object-based image classification for burned area mapping of Creus Cape, Spain, using NOAA-AVHRR imagery. Remote Sensing of Environment, 92(3): 409-413.
- **Green K, Kempka D et Lackey L.** 1994. Using remote sensing to detect and monitor land-cover and land-use change. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 60(3): 331-337.
- **GSELand.** 2006a. Mapping Guide for GSELand M2.1 Regional Land Cover. http://www.gmes-gseland.info/pub/deliv/GSE-Land_MappingGuide_LandTakeMap_RegionalLandcover_I1.08.pdf
- **GSELand.** 2006b. Mapping Guide for GSEland M1.1 Urban Atlas, Phase 1. http://www.gmes-gseland.info/pub/deliv/GSE-Land_MappingGuide_UrbanAtlas_I1.00.pdf
- **Harayama A, Jaquet JM.** 2004. Cartographie semi-automatisée et multisources de la couverture du sol dans le Canton de Genève. Géomatique Suisse, no. 8/2004: 503-506.
- **Herold M, Hubald R, Di Gregorio A.** 2009. Translating and evaluating land cover legends using th UN Land Cover Classification System (LCCS). GOFC-GOLD Report N0. 43, 189 p. http://nofc.cfs.nrcan.gc.ca/gofc-gold/Report%20Series/GOLD_43.pdf
- **Hoffmann A.** 2001. Neue Ansätze zur Auswertung und Klassifizierung von sehr hochauflösenden Daten: Methoden der Segmentierung, der hierarchischen Klassifizierung und der per-Parcel-Methode mit Daten der Digitalen Kamera HRSC-A und ihre Anwendbarkeit für die Aktualisierung topographischer Karten. Thèse, Université Humboldt de Berlin, 200 p. http://earth.definiens.com/sites/default/files/Hoffmann.pdf
- **Jaquet JM.** 2002. Cartographie multi-sources de la couverture du sol (périmètre du Plan directeur genevois). CouvSolGE, version 1.1x. Rapport final du mandat DAEL. UTED-S, UNIGE, 41p., une base de données géoréférées.

- **Jaquet JM, Couderq S, Allenbach K, Jodry A, Klaus R.** 2008. Cartographie à haute résolution de la couverture du sol du Canton de Genève. Rapport final du mandat décerné par la Direction Cantonale de la Mensuration Officielle au groupement GeoDataNetwork + UNEP-GRID Europe. 75 pages, 9 annexes.
- **Jaquet JM, Klaus R, Jodry A, Allenbach K et Barbey B.** 2011. Cartographie semi-automatisée et multi-sources de la couverture du sol: 2. Canton de Genève (haute résolution). En préparation.
- **Jenness J, Wynne JJ.** 2007. Cohen's Kappa and Classification Table Metrics 2.1a: *An ArcView 3x Extension for Accuracy Assessment of Spatially-Explicit Models.* http://www.jennessent.com/arcview/kappa_stats.htm
- **Kressler FP, Bauer TB et Steinnocher KT.** 2001. Object-oriented per-parcel land use classification of very high resolution images. IEEE/ISPRS Joint Workshop on remote sensing and data fusion over urban areas: 164-167. 10.1109/DFUA.2001.985866.
- **Kressler FP, Bauer TB et Franzen M.** 2005 . Object-oriented classification of orthophotos to support update of spatial databases. Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2005. IGARSS '05. Proceedings. 2005 IEEE International. Vol. 1: 1-4. 10.1109/IGARSS.2005.1526155. http://earth.definiens.com/sites/default/files/241_igarsskressler.pdf
- **Kux HJH et de Pinho CMD.** 2006. Object-oriented analysis of high-resolution images for intra-urban land cover classification: case study in São José dos Campos, São Paulo State, Brazil. Proceedings of 1st International Conference on Object-based Image Analysis (OBIA 2006). http://www.commission4.isprs.org/obia06/Papers/05_Automated%20classification%20Urban/OBIA2006_Kux_Pinho.pdf.
- **Lang S, Tiede D.** 2007. Definiens Developper. GIS Business 9/2007: 34-37. http://earth.definiens.com/sites/default/files/812_gis_business_definiens_developer_snapshot_092007_v3.pdf
- **Lewinski S, Bochenek Z.** 2008. Rule-based classification of *SPOT* imagery using object-oriented approach for detailed land cover mapping. Proceedings 28th EARSeL Symposium, Istanbul, Turquie, 8 p. http://earth.definiens.com/sites/default/files/1098_lewinski_bochenek_rule_based_classification_of_spot_imagery_for_landcover_mapping.pdf
- **Loveland TR, reed BC, Brown JF, Ohlen DO, Zhu Z, Yang L, Merchant JW.** 2000. Development of a global land cover characteristics database and IGBP DISCover from 1 km AVHRR data. International Journal of Remote Sensing, 21(6-7): 1303-1330.
- **Marceau DJ, Howarth PJ, Gratton DJ, Dubois JM.** 1990. Evaluation of the grey-level co-occurrence matrix method for land-cover classification using *SPOT* imagery. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 28: 513-519.
- **Meyer WB et Turner BL.** 1994. Changes in land use and land cover: a global perspective. Cambridge University press, 537 pages.
- **Mittelberg B.** 2009. Pixel vs. Object: a method comparison for analysing urban areas with VHR data. Definiens Case Studies, 3 p. http://earth.definiens.com/sites/default/files/definiens_pixel_versus_object.pdf
- **OFS.** 2009. Statistique de la superficie selon la nomenclature 2004 standard. http://www.bfs.admin.ch/bfs/portal/fr/index/dienstleistungen/geostat/datenbeschreibung/arealstatistik_2004.html
- **Richard JP, Jaquet JM, Niggeler L.** 2008. Comment exploiter l'information des anciennes photos aériennes? Géomatique Suisse, 1/208: 8-11.
- **Riedo M, Gachet G, Gnerre D, Caloz R, Golay F.** 2002. Perspectives pour l'exploitation des modèles numériques d'altitude à très haute résolution. VPK / MPG - Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik / Mensuration, Photogrammetrie, Génie rural, 6/2002 http://www.gilles-gachet.ch/pdf/Article_MNA_laser.pdf
- **Schwarzer S, Allenbach K, Jaquet JM.** 2009. Rapport final sur la production de la carte de couverture du sol à moyenne résolution (CCSA04) dans le périmètre de l'agglomération franco-valdo-genevoise. Mandat décerné au GRID-Europe par le SEMO. Premier volume: 60 pages. Deuxième volume: Annexes, 114 pages, un DVD.
- **Silverio W, Jaquet JM.** 2005. Glacial Cover Mapping (1987 – 1996) of the Cordillera Blanca (Peru) Using Satellite Imagery. Remote Sensing of Environment, 95: 342-350.
- **Silverio W, Jaquet JM.** 2009. Prototype land-cover mapping of the Huascarán Biosphere Reserve (Peru) using a digital elevation model, and the NDSI and NDVI indices. Journal of Applied Remote Sensing, 3, 033515 (Mar. 4, 2009). DOI: 10.1117/12.830844.
- **SITG.** 2009a. http://etat.geneve.ch/sitg/dictionnaire.html
- **SITG.** 2009b. http://etat.geneve.ch/geoportail/metadataws/Publish/3363.html
- **SITL.** 2009. http://sitl.org/images/COUVERTURE_DU_SOL.jpg
- **Smith GM, Fuller RM.** 2001. An integrated approach to land cover classification: an example in the island of Jersey. International Journal of Remote Sensing, 22(16): 3123-3132.
- **Surchat Vial N.** 2009. Le projet d'agglomération franco-valdo-genevois. Présentation du 26 mai 2009 à l'Institut National Genevois. http://www.projet-agglo.org//upload/wysiwyg/File/site_internet/Doc%20et%20media/Presentation%20type%20PA_ING_26mai2009.pdf
- **Vogelmann JE, Howard SM, Limin Y, Larson CR, Wylie BK, Van Driel N.** 2001. Completion of the 1990s National Land Cover Data set for the conterminous United States from landsat thematic mapper data and ancillary data sources. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 67(6): 650-662.
- **Zhou W, Troy A.** 2008. An object-oriented approach for analysing and characterizing urban landscape at the parcel level. International Journal of Remote sensing, 29(11): 3119-3135.

Annexe 1: Correspondance des classes CCSA04 avec d'autres typologies

No	CCSA04gglo	OTEMO-GE[a]	CORINE Land Cover[b]
1	Bâtiment <80 m^2	Bâtiment, type 1	1.1.2. Tissu urbain discontinu
2	Bâtiment 80-500 m^2	Bâtiment, type 2	1.1.1. Tissu urbain continu
3	Bâtiment >500 m^2	Bâtiment, type 3	1.1.1. Tissu urbain continu
4	Pourtour des bâtiments	Pourtour de bâtiment	1.1.2. Tissu urbain discontinu
5	Route	Chaussée, chemin, piste cyclable, trottoir	1.2.2. Réseau routier et ferroviaire
6	Chemin de fer	Chemin de fer	1.2.2. Réseau routier et ferroviaire
7	Parking	Parking, espace de stationnement	1.2.2. Réseau routier et ferroviaire
8	Terrain de sport	Autre surf. revêt. dur	1.4.2. Equipements sportifs et de loisirs
9	Autre surface dure	Autre surf. revêt. dur, bassin STEP, piscine, place d'aviation	1.2.4. (Aéroport)
10	Végétation urbaine: gazon	Autres surf. verte	1.4.1. Espaces verts urbains
11	Végétation urbaine: mixte	Parc public	1.4.1. Espaces verts urbains
12	Végétation urbaine: arbre	Surface forestière	1.4.1. Espaces verts urbains
13	Culture peu dense	Autre culture intensive, serre	2.1.1. Terres arables
14	Culture dense	Autre culture intensive	2.1.1. Terres arables
15	Terres ouvertes	Autre culture intensive	2.1.1. terres arables
16	Vigne, verger	Vigne, verger	2.2. Cultures permanentes
17	Pâturage de montagne	-	3.2.1. Pelouses et pâturages naturels
18	Surfaces vertes	Autres surf. vertes, cimetière, prairie/pâturage, jardin	?
19	Forêt de feuillus	Surface forestière	3.1.1. Forêts de feuillus
20	Forêt de conifères	Surface forestière	3.1.2. Forêt de conifères
21	Forêt mixte	Surface forestière, buisson	3.1.2. Forêts mélangées
22	Roche nue, éboulis	Rocher, éboulis/sable, gravière/décharge	3.3.2. Roches nues
23	Végétation peu abondante	Autres surf. vertes, autre surf.ss.vég., roselière	3.3.3. Végétation clairsemée
24	Rivière	Cours d'eau	5.1.1. Cours et voies d'eau
25	Lac, étang	Eau stagnante	5.1.2. Plans d'eau
26	Neige	-	

[a] Jaquet et al (2008); Jaquet et al (2011) [b] Herold et al (2009)