



HAL
open science

Cartographier l'occupation du sol à grande échelle : optimisation de la photo-interprétation par segmentation d'image.

Maxime Vitter

► **To cite this version:**

Maxime Vitter. Cartographier l'occupation du sol à grande échelle : optimisation de la photo-interprétation par segmentation d'image.. Géographie. Université de Lyon, 2018. Français. NNT : 2018LYSES011 . tel-02094240

HAL Id: tel-02094240

<https://theses.hal.science/tel-02094240>

Submitted on 9 Apr 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



THÈSE de DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE LYON

préparée au sein de l'UNIVERSITÉ JEAN MONNET de SAINT-ÉTIENNE

École Doctorale n°483 Sciences Sociales

Spécialité de doctorat: Géographie

N° d'ordre NNT : 2018LYSES011



Cartographier l'occupation du sol à grande échelle: optimisation de la photo-interprétation par segmentation d'image

Maxime VITTER

Soutenue publiquement le 23 mars 2018

Devant le jury composé de :

Laurence Moy

Professeur - Université Rennes 2 Haute-Bretagne / rapporteur

Rachid Nedjai

Professeur - Université d'Orléans / rapporteur

Samuel Robert

Chargé de Recherche CNRS - Université Aix-Marseille / examinateur

Philippe Blancher

Expert - Asconit Consultants, Lyon / examinateur

Christine Jacqueminet

Maître de conférences - Université de Saint-Étienne / co-directrice de thèse

Bernard Etlicher

Professeur émérite - Université de Saint-Étienne / directeur de thèse

Remerciements

Cette thèse, réalisée dans le cadre d'une Convention Industrielle de Formation par la REcherche (CIFRE), fut une formidable expérience au cours de laquelle j'ai fait de nombreuses rencontres universitaires et professionnelles enrichissantes. Toutes ces personnes ont contribué, directement ou indirectement, à l'aboutissement du présent manuscrit. Je tiens donc à les remercier.

Mes remerciements s'adressent d'abord à mes deux directeurs de thèse, Christine Jacqueminet et Bernard Etlicher. Je les remercie d'avoir accepté d'encadrer ce travail de doctorat et de m'avoir apporté leur expérience, leur suivi et leur confiance. Ils ont su m'accorder une grande disponibilité pour m'accompagner avec efficacité dans mes choix méthodologiques. Je vous suis reconnaissant car vous avez toujours cru en mon travail inscrit dans un contexte particulier de recherche appliquée en entreprise.

Mes remerciements vont ensuite à mon encadrement au sein du bureau d'études ASCONIT. Philippe Blancher (directeur du département Recherche et Innovation) et Rémy Martin (ex-directeur du département Systèmes d'Information Géographique). Ils sont à la genèse du sujet de recherche qu'ils m'ont proposé en 2012. Merci Philippe, pour ton soutien et le fort intérêt que tu portes pour mon travail et sa valorisation pour l'entreprise. J'apprécie nos échanges et l'expérience que tu m'apportes pour la réalisation et la gestion des projets de recherche et d'innovation en entreprise. Merci Rémy, de m'avoir fait confiance. J'ai apprécié être ton « Padawan » jusqu'en 2015 avant ton départ de la société. Tu m'as transmis tout ton savoir sur la gestion de projet, le fonctionnement du bureau d'études et ses croustillantes histoires !

Un grand merci à Céline Thyriot qui a pris la suite de Rémy Martin dans la direction du service SIG d'ASCONIT. Au-delà de ton suivi attentif de mes travaux de thèse, tu m'as apporté énormément de soutien et d'attention, même dans les moments les plus compliqués. J'ai apprécié, comme beaucoup d'autres, ta gentillesse et ton dévouement pour l'ensemble des équipes d'ASCONIT.

Je remercie Laurence Moy, Rachid Nedjai et Samuel Robert d'avoir accepté de faire partie de mon jury de thèse et d'évaluer mon travail.

Je tiens également à exprimer un remerciement spécial à Pascal Pluvinet, mon collègue de bureau chez ASCONIT. Tu m'as qui m'a apporté une aide considérable dans mes travaux de thèse. Que ce soit sur le plan technique, méthodologique ou thématique, tu m'as prodigué des conseils précieux et toujours pertinents, le tout avec un accent provençal très chantant ! Tes nombreux bouts de scripts R ou PostGIS ont débloqué de nombreuses situations ! Merci.

Mes remerciements s'adressent également à tous les membres du laboratoire ISTHME sous la direction d'Hervé Cubizolle. Même si mes passages au laboratoire sont restés ponctuels, j'ai eu la chance de travailler au côté d'une équipe stéphanoise agréable et toujours prête à m'aider ! Merci à POM, Céline, André-Marie, Carole, Renaud, Catherine, Aurélien, Christelle et à tous les collègues thésards que j'ai pu rencontrer durant ces dernières années.

Mes remerciements vont aussi à l'ensemble de l'équipe ASCONIT, en particulier pour mes collègues lyonnais. Au-delà des liens professionnels, ce doctorat m'a permis de créer de forts liens d'amitié. Je tiens à remercier en particulier mes collègues ou ex-collègues du département SIG : Rémy, Céline, Pascal, Florence, Sylvie, Olivier, Fabien, Philippe, Gaël, Lucie. Je pense aussi à Christophe, Ouissem, Petia, Eric, Laurence J, Laurence H, Purdey, Evelyne, Cédric, Kathy, Amandine, JF, JP, Julien, Baptiste... (Ils sont encore nombreux !) Merci à vous tous pour vos encouragements, votre sympathie et votre bonne humeur !

Je tiens à remercier également tous les acteurs des collectivités territoriales, pour lesquels nous avons travaillé dans le cadre de ce doctorat et qui m'ont toujours bien accueilli et favorablement aidé pour ce travail. Un remerciement spécial pour Anne-Marie Clément de la Métropole Nice Côte-d'Azur et Sylvain Liautard de la Communauté d'Agglomération DLVA.

Je souhaite également remercier au passage mes anciens collègues du laboratoire LETG Rennes COSTEL avec qui j'ai conservé des liens professionnels et amicaux forts. J'ai énormément appris auprès d'eux avant de me lancer dans cette aventure de la thèse.

Un grand merci à ma famille qui, même à distance, m'a toujours encouragé et apporté son soutien pour l'aboutissement de ce travail. Ils ont toujours cru dans mes capacités pour y parvenir et je leur suis extrêmement reconnaissant pour ça.

Enfin, un grand merci à la personne avec qui je partage ma vie, Nolwenn. Tu m'as soutenu tous les jours, tu as supporté mes humeurs, tu as relu mes écrits de nombreuses fois... Et en plus de tout ça, tu m'as apporté la plus belle chose qui soit, notre bébé Yuna ! Pour cela je ne te remercierai jamais assez !

Liste de sigles et d'acronymes

AA	Avec Assistance
ACP	Analyse en Composantes Principales
AF	Analyse Fonctionnelle
AFB	Analyse Fonctionnelle du Besoin
AFIGEO	Association Française pour l'Information GÉOgraphique
AFNOR	Association Française de NORmalisation
AFT	Analyse Fonctionnelle Technique
ALUR	Accès au Logement et un Urbanisme Rénové
ANR	Agence Nationale de Recherche
ANRT	Association Nationale de la Recherche et de la Technologie
APTE	APplication aux Techniques d'Entreprise
BD	Base de données
BD Ocsol GE	Base de Données sur l'Occupation du sol à Grande Échelle
BE	Bureau d'Études
BPI	Banque Publique d'Investissement
CANCA	Communauté d'Agglomération de Nice-Côte d'Azur
CARTO	CARTO-graphique
CCTP	Cahier des Clauses Techniques Particulières
CEMAGREF	Centre d'Étude du Machinisme Agricole et du Génie Rural des Eaux et Forêts
CEREMA	Centre d'Études et d'Expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement
CES	Centre d'Expertise Scientifique
CIFRE	Conventions Industrielles de Formation par la REcherche
CIGAL	Coopération pour l'Information Géographique en Alsace
CLC	CORINE Land Cover
CNES	Centre National d'Études Spatiales
CNRS	Centre National de la Recherche Scientifique
CORINE	COORdination of INformation on the Environment
COSTEL	Climat et Occupation du Sol par TELédétection
CRIGE	Centre Régional de l'Information Géographique

DDT	Direction Départementale des Territoires
DE	Développement Expérimental
DGFIP	Direction Générale des Finances Publiques
DLVA	Durance Luberon Verdon Agglomération
DP	Douglas-Peucker
ECW	Enhanced Compression Wavelet
EME	Éléments du Milieu Extérieur
EPA	Établissement Public d'Aménagement
EPCI	Établissement Public de Coopération Intercommunale
ESP	Estimation Scale Parameter
EVS-ISTHME	Environnement Ville Société - Image Société Territoire Homme Mémoire Environnement
FAST	Functionnal Analysis System Technique
FC	Fonction de Contrainte
FP	Fonction Principale
FS	Fonctions de Service
FT	Fonctions Technique
GDAL	Geospatial Data Abstraction Library
GE	Grande Échelle
GEOBIA	GEOgraphic Object Based Image Analysis
GEOSUD	GEOinformation for SUstainable Development
GIP	Groupement d'Intérêt Public
GMES	Global Monitoring for Environment and Security
HR	Haute Résolution
IAU	Institut d'Aménagement et d'Urbanisme
IDG	Infrastructure de Données Géographiques
IG	Information Géographique
IGN	Institut Géographique National
INSPIRE	Infrastructure for Spatial Information in Europe
IPAMAC	Inter-PArcs-MAssif Central
IRSTEA	Institut national de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture
JPEG	Joint Photographic Experts Group

LETG	Littoral Environnement Télédétection Géomatique
LMC	Largeur Minimale de Cartographie
LMI	Largeur Minimale d'Intérêt
LPE	Ligne de Partage des Eaux
MOLAND	MOonitoring Land Use/Cover Dynamics
MOS	Mode d'Occupation du Sol
MURBANDY	Monitoring URBAN DYnamics
NCA	Nice Côte d'Azur
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
OCS GE	OCcupation du Sol Grande Échelle
OCS2D	OCcupation du Sol à 2 Dimensions
OCSOL	OCcupation du SOL
OcsolGE	Occupation du Sol à Grande Échelle
ONF	Office National des Forêts
ORTHO	ORTHO-photoplan
OSO	Occupation du SOL
PACA	Provence-Alpes-Côte d'Azur
PAEK	Polynomial Approximation with Exponential Kernel
PCI	Plan Cadastral Informatisé
PIAO	Photo-Interprétation Assistée par Ordinateur
PLU	Plan Local d'Urbanisme
PLUi	Plan Local d'Urbanisme intercommunal
PLUm	Plan Local d'Urbanisme métropolitain
PNR	Parc Naturel Régional
POS	Plan d'Occupation des Sols
PPige	Plateforme Publique de l'Information Géographique
R&D	Recherche et Développement
RA	Recherche Appliquée
RECIA	RÉgion Centre InterActive
RF	Recherche Fondamentale
RFF	Réseau Ferré de France
RGE	Référentiel à Grande Échelle
ROC	Rate Of Change

RPG Registre Parcellaire Graphique
RVB Rouge Vert Bleu
SADT Structured Analysis and Design Technic
SCOT Schéma de COhérence Territoriale
SGBD Système de Gestion de Base de Données
SHP Shapefile
SI Segmentation d'Image
SIG Système d'Information Géographique
SIT Système d'Information Territorial
SMC Superficie Minimale de Cartographie
SPOT Satellite Pour l'Observation de la Terre
SQL Structured Query Language
SRCE Schéma Régional de Cohérence Écologique
SRU Solidarité et Renouveau Urbains
ST Solution Technique
THRS Très Haute Résolution Spatiale
TIF Tagged Image File Format
TOPO TOPO-graphique
TVB Trames Vertes et Bleues
UMC Unité Minimale de Cartographie
UMI Unité Minimale d'Intérêt
UMR Unité Mixte de Recherche
VL Variance Locale
VW Visvalinghan-Wyatt
VWm Visvalinghan-Wyatt modifié
ZT Zone Test

Table des matières

(Cette version du document est présentée sans les annexes)

INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	13
Première partie : Les enjeux de production de la cartographie d'occupation du sol à grande échelle en France.....	17
Introduction.....	19
Chapitre 1 : Les prestataires de services face à une demande régulière de production sur-mesure de Bases de Données d'Occupation du sol à Grande Échelle (BD Ocsol GE).....	21
1.1 Les besoins cartographiques sur l'occupation du sol à grande échelle.....	22
1.1.1 Définition et enjeux.....	22
1.1.2 En France : un retard qui s'accumule.....	25
1.1.3 Un contexte réglementaire qui se durcit.....	26
1.2 L'évolution actuelle de l'offre cartographique :.....	28
1.2.1 De CORINE Land Cover à l'OCS GE® de l'IGN.....	28
1.2.2 La multiplication des BD Ocsol GE régionales et locales.....	40
1.2.3 Les acteurs de l'offre cartographique.....	43
1.3 Problématique de production pour un bureau d'études en environnement : genèse d'un projet de R&D.....	45
1.3.1 Positionnement d'un bureau d'études en environnement.....	45
1.3.2 Le rôle d'un bureau d'études en tant que vecteur d'innovation.....	46
1.3.3 Un besoin d'optimisation de la production régulière des BD Ocsol GE exprimé par un bureau d'études.....	49
Chapitre 2 : Optimiser la production régulière de BD Ocsol GE sur-mesure : analyse du besoin et orientation de la Recherche et du Développement (R&D).....	53
2.1 Analyse de la demande : étude de marché.....	54
2.2 L'Analyse Fonctionnelle (AF).....	57
2.2.1 Principe.....	57
2.2.2 Application pour la production régulière de BD Ocsol GE sur-mesure.....	64
2.3 La photo-interprétation comme solution de production.....	69
2.3.1 La photo-interprétation répond encore à un besoin.....	69
2.3.2 La méthodologie de production par photo-interprétation.....	70
2.4 Recherche des pistes d'optimisation de la photo-interprétation.....	74
2.5 Pertinence d'une assistance à la digitalisation.....	77
Chapitre 3 : Confrontation du projet à la réalité du marché : trois prestations diversifiées d'élaboration de BD Ocsol GE.....	81
3.1 Trois territoires, trois enjeux, trois besoins.....	83
3.1.1 Le projet de PNR de l'Aubrac : la reconnaissance d'un territoire rural à haute valeur environnementale.....	83
3.1.2 Métropole Nice Côte d'Azur : entre urbanisation dense et haute-montagne....	86
3.1.3 Durance Luberon Verdon Agglomération : en proie à une forte périurbanisation.....	88
3.2 Les cahiers des charges.....	91
3.2.1 L'imagerie de référence.....	93
3.2.2 Les données exogènes.....	96
3.2.3 Échelles et Unité Minimale de Cartographie.....	97
3.2.4 Le squelette polygonal des infrastructures linéaires : routes et voies ferrées ...	98
3.2.5 La photo-interprétation.....	100

3.3	Les nomenclatures.....	100
3.3.1	L'adaptation de Corine Land Cover, niveau 1 à 3.....	101
3.3.2	Un niveau 4 pour une cartographie à grande échelle	105
3.3.3	Un niveau 5 ponctuel.....	108
3.4	Conduite d'une R&D progressive.....	109
Conclusion de la première partie.....		111
Deuxième partie : Optimiser l'exercice de photo-interprétation.....		113
Introduction.....		115
Chapitre 4 : Réalisation d'une assistance à la digitalisation à partir d'une Segmentation d'Image (SI) Analyse fonctionnelle et méthodologie générale.....		
4.1	Analyse Fonctionnelle du produit : assistance à la digitalisation à partir d'une SI	118
4.1.1	Recensement des fonctions du produit.....	118
4.1.2	L'ordonnancement des fonctions.....	125
4.1.3	La caractérisation des fonctions de service.....	127
4.2	Méthodologie générale pour la réalisation du produit	128
4.2.1	Les prétraitements.....	128
4.2.2	La segmentation d'image	130
4.2.3	La finalisation de l'assistance à la digitalisation	130
4.2.4	La mise à disposition de l'assistance à la digitalisation	130
4.3	Choix d'un développement technique en « modules emboîtés ».....	130
Chapitre 5 : Prétraitements des données Préalables à la segmentation d'image.....		
5.1	FC2 : s'adapter au volume et au format de l'imagerie à segmenter	134
5.1.1	Formatage de l'imagerie à segmenter.....	134
5.1.2	Ordonnancement des fonctions techniques relatives à la FC2.....	135
5.1.3	FT ₂₁ : convertir l'imagerie en format TIF	136
5.1.4	FT ₂₂ : mosaïquer les images.....	137
5.1.5	FT ₂₃ : tuiler l'image	138
5.2	Module 1 : formatage de l'imagerie à segmenter.....	143
5.3	FC3 et FC4: préparation des vecteurs structurant la SI.....	145
5.3.1	Ordonnancement des fonctions techniques relatives à la FC3 et la FC4	145
5.3.2	FT ₃₁ : élaborer le squelette polygonal des infrastructures linéaires	147
5.3.3	FT ₄₁ : élaborer le masque urbain	156
5.3.4	FT _{3/4-1} : adapter le squelette polygonal des infrastructures linéaires aux espaces urbains denses et structurés, le cas du centre-ville de Nice.....	163
5.4	Module 2 : élaboration du squelette polygonal des infrastructures linéaires.....	166
5.5	Module 3 : élaboration du masque urbain.....	167
5.6	Conclusion sur les prétraitements des données	169
Chapitre 6 : La segmentation d'image.....		
6.1	Bref état de l'art de la segmentation d'image.....	172
6.1.1	Définition et principes	172
6.1.2	Types d'approches pour la segmentation	173
6.1.3	Choix de l'approche de segmentation.....	180
6.1.4	Choix de l'outil : eCognition®	181
6.2	Services rendus par la segmentation d'image.....	183
6.2.1	Ordonnancement des fonctions techniques.....	183
6.2.2	Le « ruleset » d'eCognition®.....	184
6.2.3	FT ₃₂ et FT ₄₂ : intégrer le ou les vecteur(s) de référence géométrique dans le processus de segmentation	185
6.2.4	FT ₅₁ et FT ₅₂ : paramétrage de la segmentation	189
6.2.5	FT ₆₁ : supprimer les petits objets	195

6.2.6	FT71 : optimiser la compacité des objets générés par la segmentation	196
6.2.7	Exportation de la segmentation d'image	199
6.3	Module 4 : réalisation de la segmentation d'image adaptée à un exercice de photo- interprétation pour la constitution d'une BD Ocsol GE.....	199
6.4	Conclusion sur la segmentation d'image	201
Chapitre 7 :	Post-traitements de la segmentation d'image	203
7.1	FC2(2) : s'adapter au volume et au format de l'imagerie à segmenter : assemblage des segmentations tuilées	204
7.1.1	Ordonnancement des fonctions techniques liées à la FC2(2)	204
7.1.2	ST ₂₄₁ : découper les segmentations par les dalles d'assemblage	205
7.1.3	ST ₂₄₂ : assembler les dalles segmentées	206
7.1.4	ST ₂₄₃ : supprimer les contours de dalle	206
7.2	FC8 : Obtenir une géométrie polygonale cohérente avec l'échelle de photo- interprétation.....	207
7.2.1	FT ₈₁ : diminuer le nombre de vertex des polygones	207
7.2.2	Pourquoi simplifier la géométrie des objets issus de la segmentation d'image ?	207
7.2.3	La simplification de ligne	208
7.2.4	Le choix d'un algorithme de simplification de ligne	209
7.2.5	Le choix d'un outil : MapShaper	212
7.3	FC3(3) et FC4(3) : intégration du ou des vecteur(s) de référence géométrique ...	216
7.3.1	Ordonnancement des fonctions	216
7.3.2	FT33 et FT43 : mise à jour de la segmentation	216
7.4	Module 5 : finalisation de l'assistance à la digitalisation	218
7.5	Conclusion sur les post-traitements	219
7.6	Illustrations des apports de l'assistance à la digitalisation sur les 3 cas d'étude .	219
Conclusion de la deuxième partie		227
Troisième partie : Productivité de la photo-interprétation assistée par segmentation d'image.....		229
Introduction.....		231
Chapitre 8 :	Photo-interprétation avec et sans assistance à la digitalisation, comparaison de deux approches de production d'une BD Ocsol GE.....	233
8.1	Le protocole de l'expérimentation	234
8.2	Préparation de la photo-interprétation.....	238
8.2.1	Photo-interprétation sans assistance.....	238
8.2.2	Photo-interprétation avec assistance.....	240
8.3	Critères d'évaluation.....	245
8.3.1	Appréciation visuelle de la qualité de production	245
8.3.2	Test du Kappa	245
8.3.3	Métriques de Hoover.....	245
8.3.4	Nombre d'objets cartographiés.....	246
8.3.5	Temps de production.....	246
8.4	Résultats.....	246
8.4.1	Analyse visuelle des productions cartographiques.....	246
8.4.2	Ressenti des photo-interprètes.....	248
8.4.3	Test du Kappa	248
8.4.4	Métriques de Hoover.....	249
8.4.5	Nombre d'objets cartographiés.....	250
8.4.6	Analyse comparative des temps de production.....	251
8.5	Discussion sur l'expérimentation.....	253

Chapitre 9 : Discussions sur la méthode proposée.....	255
9.1 Un ensemble de modules comme environnement de développement : avantages et limites	256
9.2 La sensibilité des paramétrages	258
9.3 Quand doit-on recourir à l'assistance à la digitalisation ?.....	261
9.4 La qualité du prédécoupage : une notion subjective	265
9.5 Une nouvelle manière de numériser l'occupation du sol par photo-interprétation	265
9.5.1 La diminution des manipulations d'édition.....	266
9.5.2 Une première lecture du paysage.....	266
9.5.3 La photo-interprétation en équipe.....	268
9.5.4 L'endurance du photo-interprète	271
9.6 L'évolution des compétences requises pour photo-interpréter.....	271
9.7 Les besoins spécifiques de l'analyse diachronique	275
9.8 Les utilisateurs de BD Ocsol GE : qu'en pensent-ils ?.....	275
9.8.1 Une automatisation sous contrôle	276
9.8.2 Une qualité de production non remise en cause.....	278
9.9 Synthèse du produit : assistance à la digitalisation	279
 Conclusion de la troisième partie	 281
CONCLUSION GÉNÉRALE	285
Bibliographie	303

INTRODUCTION GÉNÉRALE

La connaissance des attributs physiques et/ou fonctionnels des surfaces terrestres et de leurs modifications a toujours représenté un enjeu majeur pour la gestion des territoires (Kasperson, Kasperson, et Turner 1995; Hubert-Moy 2004). La cartographie de l'occupation et de l'utilisation du sol reste, pour cela, un vecteur d'information incontournable pour les décideurs. Les apports et les usages de ces cartographies sont nombreux : description du territoire, suivi des dynamiques économiques, sociales et environnementales, renseignements sur les services aux populations présents sur le territoire, et support à la planification des actions d'aménagement (González et al. 2011; Puissant 2003; Joliveau 2004; Robert et Autran 2012). La cartographie est un outil d'aide à la décision qui répond à un besoin exprimé, sur la base d'une ou plusieurs source(s) de données spécifiques et qui sont élaborés pour une échelle d'utilisation précise. Dès lors, les travaux de cartographie des surfaces terrestres présentent des variantes substantielles.

Depuis une quinzaine d'années, l'émergence des données de télédétection à Très Haute Résolution Spatiale (THRS) a stimulé l'expression de nouveaux besoins d'informations spatialisées à des échelles fines. Les grandes mutations de la couverture et de l'usage du sol (déforestation, urbanisation, etc.) ont été et sont toujours largement cartographiées aux petites et moyennes échelles, à partir d'images satellites de moyenne ou haute résolution spatiale (Landsat, SPOT, etc.) (Geist 2006). L'évolution des capteurs vers la THRS offre l'opportunité de comprendre à de grandes échelles, des mutations mal connues (Lefebvre 2011), dont les conséquences environnementales, économiques et sociales s'enregistrent à l'échelon local des territoires.

Dans un même temps, la démocratisation des Systèmes d'information Géographique (SIG) et les avancées importantes en matière de traitements d'image ont engendré des nouvelles façons de cartographier les surfaces terrestres et d'utiliser cette information. La production de données sur l'occupation et l'utilisation du sol connaît une progression rapide et parfois mal maîtrisée. Les informations sont stockées à l'intérieur de bases de données spatialisées multi-attributaires. Cette structuration permet d'entrevoir des usages multiples de la donnée afin de répondre non plus à un seul besoin cartographique, mais à plusieurs. Cela entraîne inévitablement une complexification de la production cartographique à grande échelle. Le cartographe est alors confronté à de nombreuses exigences qui vont fortement contraindre son exercice.

En France, l'emploi de bases de données spatialisées sur l'occupation du sol à grande échelle (BD Ocsol GE) est devenu incontournable dans les opérations courantes de planification et de suivi des territoires (Joliveau 2004). Même si cela peut sembler une banalité, pour de nombreux organismes infrarégionaux, l'acquisition de ce type de bases de données spatialisées est encore un besoin difficile à satisfaire (Saffroy et Lambert 2013). Jusqu'à encore aujourd'hui, l'absence d'un référentiel national sur l'occupation du sol à grande échelle, a poussé de plus en plus de collectivités territoriales à se lancer dans l'acquisition de leurs propres données (Roy 2013). Cette pratique régulière a suscité chez les utilisateurs une forte exigence pour des productions sur mesure et parfaitement adaptées aux problématiques locales de leur territoire.

Cet engouement pour les BD Ocsol GE a permis à un secteur d'activités regroupant des acteurs multiples (État, laboratoires de recherche, collectivités territoriales et entreprises privées) de développer ses compétences en matière de production cartographique plus ou moins automatisée (Puissant 2003). Avec l'avènement des images à Très Haute Résolution Spatiale (THRS), les méthodes de traitement numérique des images se sont considérablement développées, en particulier avec l'approche GEOBIA (Geospatial Object-Based Image Analysis) (Caloz et Collet 2001; Blaschke 2010), sans que cela ne retentisse réellement sur l'usage de la photo-interprétation. Pourtant aujourd'hui, la photo-interprétation, ou plus précisément la Photo-Interprétation Assistée par Ordinateur (PIAO), est toujours à même de répondre aux besoins de cartographie à grande échelle de nombreux secteurs d'activités comme l'urbanisme, l'écologie, l'agriculture ou la foresterie. Les spécialistes de ces secteurs ne sont, jusqu'à aujourd'hui, pas totalement convaincus par les techniques de traitement d'images semi-automatique, considérant que la finesse de l'expertise humaine reste indispensable dans nombre d'applications (Provencher et Dubois 2007). De ce fait, la PIAO est encore largement pratiquée. Néanmoins, elle reste une discipline exigeante pour les praticiens, extrêmement consommatrice de temps et d'argent pour le producteur. Cela est surtout valable pour un producteur régulier de BD Ocsol GE comme un bureau d'étude. Pour ce dernier, le défi consiste à produire pour moins cher tout en préservant la qualité du résultat. Cela peut susciter une remise en question des méthodes de production utilisées.

Cette thèse a été réalisée dans le cadre d'une Convention Industrielle de Formation par la Recherche (CIFRE) entre le bureau d'études ASCONIT Consultants, devenu ASCONIT filiale du groupe LHP en mai 2017, et le laboratoire CNRS, EVS-ISTHME UMR 5600 (Université de Lyon, Université Jean Monnet de Saint-Etienne).

Les travaux s'inscrivent ainsi dans le contexte professionnel d'un bureau d'études. La stratégie de développement de la recherche revêt donc un caractère applicatif important. De fait, l'entreprise d'accueil, à l'initiative du projet de thèse, souhaitait se doter d'un « produit » ou d'un « service » qui l'aide à répondre plus efficacement à ses besoins de production de cartographie de l'occupation du sol à grande échelle.

L'objectif principal de cette thèse est de développer un ensemble d'outils méthodologiques permettant l'analyse d'images à THRS pour assister la production cartographique de BD Ocsol GE par photo-interprétation. Aussi, la recherche a dû s'inscrire dans un cadre de production régulière de BD Ocsol GE sur-mesure tel qu'il est rencontré chez un prestataire de services ou une entreprise spécialisée dans la production de ce type de donnée en France. Ce cadre de production est extrêmement contraignant, car il impose une généricité de la méthodologie et l'obligation d'obtenir un résultat cartographique répondant aux attentes des commanditaires, tout en assurant la rentabilité de la production.

Ainsi, il est nécessaire de s'orienter vers de nouvelles approches de production cartographique des BD Ocsol GE. Les développements récents en matière de traitements d'images permettent d'entrevoir une meilleure interrelation entre le traitement manuel par le photo-interprète et des tâches de traitements d'images automatisés. En effet, entre la digitalisation totalement manuelle et la cartographie numérique, des solutions hybrides sont largement explorées (Aguejdad 2009; Touzet, Halbecq, et Lecordix 2011; Sheeren et al. 2012;

Houet et al. 2012). Dans cette thèse, nous privilégions la photo-interprétation comme pratique principale de production de la cartographie d'occupation du sol à grande échelle. Dès lors, nous accordons un intérêt particulier à la segmentation numérique d'image en tant qu'outil d'optimisation de l'exercice de la PIAO. Nous faisons l'hypothèse que l'apport d'un prédécoupage du paysage à partir d'une segmentation d'image, peut apporter un gain substantiel de productivité à la pratique de la photo-interprétation.

Cette thèse s'organise en trois parties :

- Dans **la première partie**, nous présentons le contexte dans lequel les besoins cartographiques sur l'occupation et l'usage du sol à grande échelle sont formulés. Nous nous appliquons à identifier les problématiques et les enjeux de production qu'ils suscitent pour un bureau d'études en environnement, en France particulièrement. Sont abordés dans le premier chapitre les enjeux de la cartographie à grande échelle des surfaces terrestres, pour la gestion locale des territoires, en lien avec l'avènement des images THRS et des SIG. Nous détaillons la situation française, à l'aube de 2020 et de l'avènement de nouveaux projets nationaux et européens, tant en matière d'offre que de demande, concernant la constitution de bases de données sur l'occupation et l'utilisation du sol à grande échelle. Dans le deuxième chapitre, nous développons une analyse précise de cette demande et du besoin du point de vue d'un prestataire de service lié à la production régulière de BD Ocsol GE sur-mesure. L'objectif est d'identifier l'ensemble des contraintes qui oriente une activité de Recherche et Développement (R&D) visant l'optimisation du procédé de fabrication d'une BD Ocsol GE. Enfin, dans le troisième chapitre, nous montrons comment le projet de R&D a été confronté avec la réalité du marché à travers la réponse à trois appels d'offre initiés par des gestionnaires publics et la réalisation des prestations demandées, suite à l'obtention des marchés. Ces prestations ont servi de cas d'études pour la recherche de solutions méthodologiques et pour l'évaluation de la rentabilité économique des solutions proposées.

- La **deuxième partie** expose le développement méthodologique qui conduit à proposer une assistance à la digitalisation pour l'exercice de photo-interprétation d'une BD Ocsol GE. L'assistance se traduit par la réalisation d'un prédécoupage du paysage à partir d'une segmentation menée sur une image THRS. Cette partie est introduite par le chapitre 4, dans lequel une analyse fonctionnelle approfondie est menée afin de justifier les choix techniques adoptés pour la mise en place d'une telle assistance. Toute la chaîne de prétraitements et de traitements des données est présentée successivement dans les chapitres 5, 6 et 7.

- La **troisième partie** est dédiée à l'évaluation de la nouvelle méthode de production cartographique proposée. L'évaluation est d'abord menée, dans le chapitre 8, à travers une analyse comparative de deux méthodes de cartographie de l'occupation du sol : l'une basée sur une démarche de photo-interprétation entièrement manuelle et la seconde basée sur une photo-interprétation assistée en amont du prédécoupage du paysage issu d'une segmentation numérique. Enfin le dernier chapitre est consacré à une discussion approfondie sur l'ensemble des développements qui ont conduit à proposer une nouvelle manière de numériser l'occupation du sol par photo-interprétation. Nous menons une discussion sur les apports et les perspectives méthodologiques, thématiques et commerciales qu'impliquent les travaux exposés dans cette thèse.

Première partie :

**Les enjeux de production de la
cartographie d'occupation du sol à
grande échelle en France**

Introduction

En France, la cartographie de l'occupation du sol à grande échelle répond le plus souvent à des besoins de suivi opérationnel et réglementaire des territoires. Dans un contexte de forte demande, ces besoins se traduisent par des enjeux importants de production pour les prestataires de service. Dans cette partie, nous réalisons un état de l'art sur la demande et l'offre actuelle en matière de cartographie à grande échelle d'une part et d'autre part, sur les problématiques de production pour un prestataire de service. Nous présentons la genèse d'un projet de Recherche et de Développement (R&D) menée par un bureau d'études (BE) en environnement visant une optimisation du procédé de fabrication d'une Base de Données sur l'Occupation du sol à Grande Échelle (BD Ocsol GE).

Dans cette première partie, nous nous attacherons d'abord à définir ce qu'est la cartographie de l'occupation et l'utilisation du sol, en détaillant les enjeux qu'elle suscite lors de sa déclinaison aux grandes échelles. Nous ferons cas du contexte français où la demande de précision cartographique sur les territoires est forte et l'offre souvent mal adaptée. Cette contextualisation introduira la fonction d'un bureau d'études en environnement dans ce secteur d'activité. Nous identifierons son rôle en tant vecteur d'innovation et nous présenterons le projet de R&D visant à optimiser la production de BD Ocsol GE, à la base de cette thèse.

Nous présenterons ensuite une analyse précise de la demande et du besoin qui conditionne la production de BD Ocsol GE. Cette analyse est développée sous la forme d'une étude de marché et d'une analyse fonctionnelle du besoin. L'objectif est de confirmer la pertinence du projet R&D et de guider les choix dans la construction d'une méthodologie de production optimisée et générique. De ces choix résultent les problématiques et les questions de recherche auxquels cette thèse a cherché à répondre.

Enfin, nous présenterons les trois prestations commerciales de cartographie sur-mesure qui ont été confiées au bureau d'études et qui ont servi d'études de cas. À travers les spécificités de leurs cahiers des charges, chacun d'eux a alimenté de façon propre les axes de développement méthodologique de la thèse.

Les prestataires de services face à une demande régulière de production sur-mesure de Bases de Données d'Occupation du sol à Grande Échelle (BD Ocsol GE)

Sommaire

1.1	Les besoins cartographiques sur l'occupation du sol à grande échelle.....	22
1.1.1	Définition et enjeux.....	22
1.1.2	En France : un retard qui s'accumule	25
1.1.3	Un contexte réglementaire qui se durcit.....	26
1.2	L'évolution actuelle de l'offre cartographique :	28
1.2.1	De CORINE Land Cover à l'OCS GE® de l'IGN.....	28
1.2.1.1	<i>CORINE Land Cover.....</i>	<i>30</i>
1.2.1.2	<i>Couches Haute Résolution</i>	<i>31</i>
1.2.1.3	<i>BD Urban Atlas.....</i>	<i>31</i>
1.2.1.4	<i>BD CARTO® IGN.....</i>	<i>33</i>
1.2.1.5	<i>SPOT Thema.....</i>	<i>33</i>
1.2.1.6	<i>OSO : « Occupation du Sol ».....</i>	<i>34</i>
1.2.1.7	<i>MOS francilien.....</i>	<i>35</i>
1.2.1.8	<i>BD OCSOL-PACA.....</i>	<i>36</i>
1.2.1.9	<i>OCS GE® IGN.....</i>	<i>37</i>
1.2.2	La multiplication des BD Ocsol GE régionales et locales	40
1.2.2.1	<i>La nomenclature OcsolGe PACA : procédures et recommandations ..</i>	<i>41</i>
1.2.2.2	<i>OCS^{2d} Nord-Pas de Calais.....</i>	<i>42</i>
1.2.3	Les acteurs de l'offre cartographique	43
1.3	Problématique de production pour un bureau d'études en environnement : genèse d'un projet de R&D	45
1.3.1	Positionnement d'un bureau d'études en environnement	45
1.3.2	Le rôle d'un bureau d'études en tant que vecteur d'innovation	46
1.3.3	Un besoin d'optimisation de la production régulière des BD Ocsol GE exprimé par un bureau d'études.....	49

1.1 Les besoins cartographiques sur l'occupation du sol à grande échelle

1.1.1 Définition et enjeux

La cartographie de la surface terrestre consiste en la représentation graphique et continue de zones paysagères homogènes à partir de diverses sources de données télédéteçtées ou levées sur le terrain par arpentage (Robert et Autran 2012). La cartographie des territoires est menée à l'initiative d'un groupe de personnes voulant répondre à un ou plusieurs besoin(s) sociétal(aux) d'informations géographiques (Comber, Fisher, et Wadsworth 2005). Il existe alors une multitude de façon de cartographier l'état et l'usage de la surface terrestre en fonction du besoin à satisfaire, des sources d'information employées et de l'échelle de restitution attendue.

Les réalisations cartographiques décrivent toutes l'espace selon des critères (bio) physique et/ou d'usage de la surface terrestre. Il est alors de coutume de parler de cartographie d'occupation et d'utilisation du sol où l'occupation se réfère aux propriétés physiques de la surface terrestre (végétalisées, minérales, en eau, etc.) et l'utilisation renvoie aux fonctions économiques et sociales de l'espace (résidentiel, industriel, agricole, etc.) (Mather, Kotliakov, et White 1991; Meyer, Turner, et Studies 1994; Corgne 2004). La description thématique d'un paysage peut alors facilement varier selon le besoin cartographique attendu. Une forêt peut être identifiée comme une occupation végétalisée du sol ou bien par son usage agro-forestier de plantation. Un espace urbanisé peut être décrit par la composition bio-physique de son sol (surface artificialisée, végétale ou en eau) ou bien par les usages de ses différentes entités spatiales.

Cependant, les notions d'occupation et d'utilisation du sol (Land Cover/Land Use) restent étroitement liées voire confondues, en fonction des points de vue et des applications. Par exemple, la simple visualisation d'une image satellite par un néophyte sur Google Earth, lui permet de reconnaître des éléments paysagers autour desquels sa vie s'organise et qu'il interprète indifféremment en termes d'occupation et d'utilisation du sol. Du point de vue du gestionnaire d'un territoire qui doit répondre à des besoins d'inventaires de ressources ou à des projets d'aménagement, la différenciation de l'occupation ou de l'utilisation du sol est implicite et secondaire par rapport à son besoin. Par contre, pour le cartographe, ces notions d'occupation et d'utilisation du sol revêtent la plus haute importance parce qu'elles déterminent les méthodes de cartographie. En effet, la cartographie des propriétés biophysiques est conduite la plupart du temps par des méthodes de classifications algorithmiques basées sur les informations contenues dans l'image ou dérivées de celle-ci et parfois même de manière routinière (couches Haute Résolution (HR) du programme Copernicus). Inversement, la cartographie de l'usage du sol est conduite la plupart du temps par photo-interprétation manuelle. Donc du point de vue du cartographe, les méthodes de production de l'information géographique entrent en jeu dès la conception d'un projet cartographique et vont impacter dans la formalisation de la nomenclature.

Toutefois, de nombreuses nomenclatures comme celle de CORINE Land Cover revêtent un caractère hybride en mélangeant les deux notions. Chez les utilisateurs et dans de nombreuses publications, les terminologies se croisent. Il n'est pas rare de trouver le terme seul « d'occupation » du sol pour désigner l'occupation et l'utilisation des terres. D'autres, utilisent les termes de « Mode d'Occupation du Sol » (MOS) qui en réalité recouvrent, ces deux notions. La distinction de ces deux termes (occupation et utilisation) est perçue comme une lourdeur

sémantique rébarbative alors qu'ils sont appelés à satisfaire un besoin cartographique implicitement proche. Pour exemple, la nomenclature CORINE Land Cover oublie le terme « use » pour alléger sa nomination. Depuis peu, certaines problématiques souvent liées à l'urbanisme (flots de chaleur urbain, densification urbaine, etc.) incitent à concevoir des nomenclatures dissociant les deux notions (Gourgand 2014). Ces problématiques valorisent la nécessité d'acquérir en plus des informations d'usage, une information de type biophysique appropriée (identification des surfaces végétalisées, des surfaces artificialisées, etc.) auxquelles les nomenclatures hybrides, d'usage courant, ne répondent pas.

Ainsi, pour faciliter la lecture des travaux présentés dans cette thèse, nous avons choisi d'utiliser l'intitulé « occupation du sol » comme terme générique. Si sa définition stricte n'est pas mentionnée dans le texte associé, cela signifie que le terme se réfère à l'occupation et l'utilisation du sol.

La connaissance des modifications des attributs physiques ou fonctionnels des surfaces terrestres liées soit à une conversion de leur occupation ou utilisation, soit à une évolution à l'intérieur d'une même catégorie, représente un enjeu majeur pour la gestion des territoires (Kasperson, Kasperson, et Turner 1995; Hubert-Moy 2004). Ces changements d'occupation et d'utilisation du sol se caractérisent par des causes, des formes, des intensités et des rythmes différents dont la cartographie ajustée peut rendre compte (Lambin et al. 2001). Par exemple, une tempête peut occasionner, sur plusieurs centaines de kilomètres, des dégâts sur les peuplements forestiers de façon brutale. Chaque année, les rotations agricoles entraînent des changements d'occupation du sol plus subtils à l'échelle parcellaire. L'étalement urbain transforme les paysages de manière substantielle au rythme de la croissance démographique et/ou un contexte socio-économique favorable. Dès lors, la cartographie spatio-temporelle de l'occupation du sol à l'échelle globale, régionale ou locale se positionne comme une ressource d'aide à la décision incontournable.

Aujourd'hui, les grands changements d'occupation et d'utilisation du sol comme la déforestation, l'intensification agricole ou l'étalement urbain sont largement connus, cartographiés et suivis aux petites et moyennes échelles (inférieures aux 1/25 000^e) (Geist 2006). Cependant, les causes de ces grands changements se trouvent, bien souvent, dans la somme d'une multitude de changements opérant sur des étendues spatiales plus petites et observables à de plus grandes échelles. Ces changements de faible envergure sont plus difficiles à cartographier et restent encore peu connus ou sous-estimés (Lefebvre 2011). Pourtant, au-delà de l'effet cumulatif que ces changements provoquent au niveau des échanges globaux, la connaissance de leur existence est un enjeu majeur en matière environnementale, économique et sociale à l'échelle régionale et locale. Par exemple, l'étalement urbain contribue à accentuer les ruissellements de surface et renforce les risques d'inondations. L'augmentation du mitage urbain engendre des coupures dans les trames paysagères qui provoquent un appauvrissement progressif de la biodiversité locale. Un autre exemple est l'ouverture des terres forestières pour un usage agricole qui fragilise localement la stabilité des sols et accentue l'érosion. De plus l'introduction d'intrants dans une nouvelle zone agricole peut impacter la qualité des eaux et exposer la population alentour à des risques sanitaires. La cartographie à grande échelle trouve ici toute sa justification et un très fort potentiel de développement pour les gestionnaires de territoires.

Depuis 2000, la cartographie de l'occupation du sol aux grandes échelles occupe une place importante parmi les travaux scientifiques (Lambin et al. 2001). La grande échelle se définit par une plage d'échelle comprise entre le 1/25 000^e et le 1/5 000^e (Provencher et Dubois 2007). Elle trouve son écho à la fois dans l'avènement des images à Très Haute Résolution Spatiale (THRS) et dans la démocratisation des Systèmes d'Information Géographique (SIG).

La visualisation de ces images THRS permet d'espérer un niveau de finesse accrue dans la délimitation et la description thématique de l'occupation du sol et de satisfaire les besoins de cartographie à grande échelle. C'est une avancée remarquable par rapport à la plupart des bases de données spatialisées existantes, nourries par des images satellites à moyenne résolution comme CORINE Land Cover. Pour les décideurs et les gestionnaires des territoires aux échelons régional et local, l'imagerie THRS constitue une source précieuse d'aide à la décision. Il s'agit d'une opportunité d'acquérir de nouvelles informations géographiques sur l'occupation du sol, suffisamment précise spatialement et thématiquement pour appuyer des opérations courantes de planification territoriale, en particulier pour les milieux urbains.

Ces importants développements technologiques sont associés à l'essor des Systèmes d'Information Géographique (SIG). Les SIG facilitent la manipulation et le traitement des données dérivées des images de télédétection. La création de bases de données d'occupation du sol spatialisées est alors simplifiée. Les SIG permettent à un plus large public, en particulier les gestionnaires locaux des territoires, de manipuler et structurer plus facilement de l'information géographique utile à la gestion de leur territoire (Joliveau 2004).

Malgré tout, la transformation de l'information physique observable sur l'imagerie THRS en une information thématique et sociétale, qui réponde aux besoins de chaque société, reste un défi majeur. Par exemple, les attentes cartographiques sur les espaces urbains européens sont différentes de celles portées sur les espaces urbains asiatique ou nord-américain. L'avènement des images THRS, en augmentant la résolution, aide à s'affranchir des produits cartographiques standards aux échelles moyennes, pour proposer des produits cartographiques sur mesure, répondant de façon étroite aux besoins d'informations des gestionnaires. On remarquera que ces nomenclatures complexes et sur-mesure sont axées, le plus souvent, sur l'usage du sol.

Parallèlement, les méthodes de cartographie issues de la télédétection et du traitement de l'image se sont considérablement développées depuis les années 2000. Par exemple, l'approche GEOBIA (GEOgraphic Object Based Image Analysis) a acquis une place importante dans la télédétection (Castilla et Hay 2008; Blaschke 2010; Blaschke et al. 2014). Celle-ci est construite sur une théorie, des méthodes et des outils pour imiter la photo-interprétation. Pourtant, ces nouvelles méthodes semblent ne pas convaincre suffisamment les décideurs et les gestionnaires locaux pour la cartographie à grande échelle de leurs territoires (Provencher et Dubois 2007; Robert et Autran 2012). Elles se basent sur un ensemble de descripteurs analytiques inspirés de la démarche de cartographie et traduits à travers des algorithmes de segmentation et de classification de l'image. L'utilisateur peut définir et paramétrer ces descripteurs avec souplesse mais cela reste insuffisant par rapport aux possibilités du cerveau humain. La cartographie à grande échelle des spécificités locales d'un territoire reste un exercice de modélisation trop complexe pour l'appréhender de cette seule manière. La photo-interprétation, plus ancienne, est encore largement privilégiée pour répondre à ce besoin cartographique en raison des vertus intégratrices du cerveau humain (Provencher et Dubois 2007). Ceci dit, elle reste une discipline

exigeante pour les praticiens et extrêmement consommatrice de temps et d'argent pour le producteur.

Néanmoins, ces deux méthodes de production cartographique ne sont pas incompatibles. Au contraire, des solutions hybrides de cartographie sont largement explorées (Aguejdad 2009; Touzet, Halbecq, et Lecordix 2011; Houet et al. 2012; Sheeren et al. 2012). Elles associent les traitements algorithmiques et la photo-interprétation à différentes étapes du processus cartographique. La démarche développée dans cette thèse soutient la photo-interprétation comme méthode principale de production de la cartographie à grande échelle. Dès lors se pose la question : Comment entrevoir une meilleure interrelation entre le travail du photo-interprète et l'apport des traitements numériques ?

1.1.2 En France : un retard qui s'accumule

Historiquement, en France, la cartographie de l'occupation du sol est l'apanage de l'Institut Géographique National (IGN). Il est en charge de fournir des données spatialisées publiques de référence nationale. Sa mission de service public lui confère un monopole dans ce secteur qui sera remis en cause à la fin des années 90 par le rapport Lengagne (Lengagne 1999). À cette date, les productions majeures de l'IGN, que sont la BD TOPO® et la BD CARTO®, sont critiquées : les acteurs décentralisés de l'État reprochent à ces bases de données d'être longues à produire, coûteuses et en inadéquation avec les besoins des utilisateurs (Puissant 2003). Par exemple, la BD CARTO®, base de données sur l'occupation du sol à moyenne échelle, est produite depuis 2002 pour une utilisation à une échelle du 1/100 000^e. Or, se profile, à cette date, une forte demande des utilisateurs pour des Bases de Données sur l'Occupation du sol à Grande Échelle (BD Ocsol GE) à des échelles du 1/5 000^e au 1/10 000^e.

À partir de 2000, une volonté de rattrapage est lancée au niveau européen et national pour combler un retard global en matière d'Information Géographique (IG). Parallèlement, la mise en œuvre de la directive INSPIRE (Infrastructure for Spatial Information in Europe) en France (Merrien, Léobet, et Francès 2015), se traduit par une multiplication des Infrastructures de Données Géographiques (IDG) au niveau régional. Intercalées entre le niveau national et local, ces IDG régionales ou CRIGE (Centres régionaux de l'information géographique) se sont assez rapidement imposées comme l'échelon fédérateur d'un grand nombre d'acteurs territoriaux autour de l'IG à grande échelle (AFIGEO 2012).

En parallèle, l'IGN lance le programme RGE (Référentiel à Grande Échelle) (Lubek et al. 2005). Il a pour but de fournir à un grand nombre d'acteurs publics et privés, de l'information géographique de référence nationale à grande échelle sous 6 ans. Le RGE comporte cinq composantes (ortho photographique, topographique, altimétrique, parcellaire et adresse). Les informations géographiques produites sont entièrement superposables. Toutefois, à son début, ce programme n'inclut pas la production d'un référentiel cartographique national à grande échelle de l'occupation du sol.

Cette lacune importante pousse déjà certaines agglomérations, à se lancer dans (ou à poursuivre) l'acquisition de leurs propres BD Ocsol GE (Puissant 2003; Roy 2013). Les problématiques liées à l'étalement urbain préoccupent de plus en plus les gestionnaires (Loi SRU de 2001). Il devient urgent, pour les grandes agglomérations, de se doter d'une BD Ocsol GE à

plusieurs dates. Cet outil, couramment dénommé Modes d'Occupation des Sols (MOS), s'avère de plus en plus indispensable pour des opérations courantes de planification et de suivi de leur territoire.

L'acquisition d'un MOS au niveau local est réservée aux structures les plus riches et volontaires. La production d'une base de données spatialisées comme celle-ci nécessite des ressources financières et humaines importantes liées aux coûts de l'imagerie THRS de référence, des licences de logiciels et des personnels compétents. Ces initiatives locales sont souvent peu concertées ou mutualisées avec des territoires voisins ou avec des échelons administratifs supérieurs (départements, régions, État). Les choix méthodologiques de production (données sources, échelles, nomenclatures, consignes cartographiques, etc.) divergent. Certains gestionnaires choisissent de commanditer des produits cartographiques « clé en main » de type SPOT Thema malgré leur coût onéreux pour aller plus vite dans cette démarche (Roy 2013). Par conséquent, les analyses comparatives entre les territoires sont rendues difficiles voire impossible. La multiplication de ces MOS locaux illustre bien la situation d'urgence dans laquelle se trouve la France. L'information sur l'occupation du sol à grande échelle manque. Les acteurs locaux de l'aménagement du territoire tentent de trouver des moyens rapides pour satisfaire ce manque.

1.1.3 Un contexte réglementaire qui se durcit

À partir de 2010, l'adoption successive de la Loi Grenelle II (2010), de la Loi de Modernisation de l'Agriculture et de la Pêche (2010), de la Loi d'avenir de l'Agriculture et de la Forêt (2014) et de la Loi ALUR (2015) durcissent la pression réglementaire quant au suivi de l'occupation du sol et à la production de documents d'action aux échelons locaux. Ce durcissement concerne de nombreuses problématiques de l'aménagement du territoire.

Ces Lois réaffirment les préoccupations foncières liées au phénomène d'étalement et de mitage urbain. La gestion économe des espaces urbains est une priorité pour faire face à la régression des surfaces agricole et naturelle. Les lois incitent donc à l'optimisation des gisements fonciers au sein des espaces urbains existants. Pour appuyer cette politique, de nouvelles obligations de suivi de consommation d'espace doivent apparaître dans les documents de planification d'urbanisme, ce que dit le code de l'urbanisme pour le rapport de présentation d'un Schéma de Cohérence Territoriale (SCoT) ou d'un Plan Local d'Urbanisme (PLU) (*Code de l'urbanisme - Article L141-3 s. d.*) :

« Le rapport de présentation (...) doit présenter une analyse de la consommation d'espaces naturels, agricoles et forestiers au cours des dix années précédant l'approbation du schéma (ou du plan) et justifier les objectifs chiffrés de limitation de cette consommation compris dans le document d'orientation et d'objectifs. »

Les problématiques liées aux espaces naturels et semi-naturels font également l'objet de mesures réglementaires importantes. Parmi-elles, la définition de la Trame Verte et Bleue (TVB) des territoires constitue l'un des grands engagements nationaux français issu du Grenelle de l'environnement ((LOI n° 2010-788 du 12 juillet 2010 portant engagement national pour l'environnement 2010). Les objectifs de la TVB se déclinent d'abord au niveau national par l'élaboration de documents d'orientation pour le maintien et la reconstitution des réseaux

écologiques (circulation, alimentation et reproduction des espèces animales et végétales) sur le territoire national. Puis au niveau régional, par la co-élaboration par la Région, l'État et de l'ensemble des acteurs locaux concernés (les collectivités territoriales, les parcs nationaux, les parcs naturels régionaux, les associations de protection de l'environnement, etc.) du Schéma Régional de Cohérence Écologique (SRCE). Le SRCE doit présenter les enjeux régionaux et les mesures contractuelles mobilisables pour la préservation et/ou la remise en bon état des continuités écologiques, en s'appuyant sur la cartographie régionale de la TVB. Enfin, au niveau local, le SRCE doit être pris en compte par les différents documents de planification (SCoT, PLU, etc.). La déclinaison au niveau local de la TVB doit pouvoir alimenter les documents d'actions face aux risques d'inondations, d'incendies ou de mouvements de terrain. Elle est également un moyen pour soutenir les études liées aux problématiques de santé et d'environnement (qualité de l'air, allergisant, etc.), des microclimats urbains et de la place de la nature en ville.

L'encadrement des modalités de représentation cartographique pour satisfaire l'ensemble de ces obligations ne sont pas précisées par les textes réglementaires ou du moins de façon limitée. Par exemple, dans le cadre sur SRCE, le code de l'environnement (*Code de l'environnement - Article R371-29* s. d.) fixe seulement une échelle minimale de la cartographie des TVB régionales au 1/100 000^e. Il est cependant convenu qu'en fonction des territoires concernés et des enjeux, l'échelle de la cartographie de la TVB dans les documents d'urbanisme doit être adaptée. Les préconisations d'échelles se situent entre le 1/25 000^e et le 1/50 000^e pour un SCoT, et le 1/ 5 000^e pour un PLU avec la possibilité de réaliser des « zooms » à plus grandes échelles sur certains secteurs pour affiner les documents d'orientations. Ce flou méthodologique laisse une autonomie aux décideurs locaux afin d'adapter la réponse aux spécificités de leur territoire, aux données disponibles et à l'avis des experts. Par exemple, pour la définition de la TVB, certains vont privilégier une approche d'écologie paysagère ou une approche par espèce patrimoniale ou simplement étudier la perméabilité des milieux.

Face à l'obligation de moyens, et à l'absence de donnée et/ou de guide méthodologique national, les gestionnaires des échelons locaux et régionaux tentent de s'organiser pour proposer des solutions cartographiques aptes à satisfaire la réglementation qu'impose la loi Grenelle II. De plus, les gestionnaires locaux y voient également une opportunité de construire un observatoire territorial basé sur un outil cartographique multi-usage capable d'alimenter un grand nombre d'opérations courantes de planification au sein de leurs différents services. Ce sont, par exemple, des tâches de suivi des dynamiques économiques, sociales et environnementales, de renseignement des services et des citoyens mais aussi d'analyses prospectives sur les devenir possibles des territoires. La cartographie de l'occupation du sol à grande échelle doit alors permettre de lire le contenu du territoire et d'y exercer une vision métier.

1.2 L'évolution actuelle de l'offre cartographique :

1.2.1 De CORINE Land Cover à l'OCS GE® de l'IGN

Il existe un grand nombre de produits cartographiques de référence portés par des programmes internationaux, nationaux et régionaux. Ces produits à valeur ajoutée sont dérivés d'images satellites, de photographies aériennes ou parfois de la combinaison des deux. Soumis à des droits d'utilisation, ils sont généralement diffusés sous forme de bases de données spatialisées (vecteurs) et/ou d'images thématiques (rasters) et/ou parfois via des webservices. La conception et la production des offres cartographiques sont souvent dissociées. Les projets peuvent naître d'organismes nationaux, supranationaux, mixtes ou privés. La production peut être détachée à des organismes tiers ou des bureaux d'études spécialisés sous la forme de prestations de service. Nous dressons un panorama non exhaustif des produits cartographiques remarquables à l'échelon européen, national et régional susceptibles d'être utilisés par les gestionnaires régionaux et locaux des territoires (*Tableau 1*).

Tableau 1. Récapitulatif des caractéristiques des offres cartographiques remarquables sur l'occupation

Nom du programme	CORINE Land Cover	Couches HR	Urban Atlas	BD CARTO®	SPOT Thema	OSO (en cours de production)	MOS Francilien	OCSOL PACA	OCS GE (en cours de production)
Pilotage	Agence européenne pour l'environnement	Agence européenne pour l'environnement	Agence européenne pour l'environnement	IGN	Airbus Defense & Space	Pôle Theia – CES occupation des sols	Institut d'Aménagement et d'Urbanisme d'Ile-de-France	CRIGE PACA	IGN
Programme	Copernicus (Anciennement GMES)	Copernicus (Anciennement GMES)	Copernicus (Anciennement GMES)	RGE	SPOT Thema	OSO	MOS	BD OCSOL PACA	RGE®
Couverture Spatiale	Europe	Europe	Zones urbaines européennes de plus de 100 000 habitants	France	À la demande sur la France métropolitaine (min de 300 km ²)	France	Région Ile-de-France (IdF)	Région PACA	France métropolitaine
Type de produit	BD spatialisée (vecteur)	Couches thématiques (rasters)	BD spatialisée (vecteur)	BD spatialisée (vecteur)	BD spatialisées (vecteurs)	Couche thématique (raster)	BD spatialisée (vecteur)	BD spatialisée (vecteur)	BD spatialisée (vecteur)
Échelle d'utilisation ou résolution spatiale	1/100 000 ^e	20 m	1/10 000 ^e	1/100 000 ^e	1/50 000 ^e ou 1/25 000 ^e ou 1/10 000 ^e	10 m et 20 m	1/5 000 ^e	1/50 000 ^e	Du 1/5 000 ^e au 1/10 000 ^e
Unité minimale de cartographie	25 ha (5 ha pour les changements)	-	De 0.25 ha à 1 ha (selon les classes)	Entre 8 ha et 5 ha (selon les classes)	-	-	625 m ²	De 0.3 ha à 2.5 ha	De 200 m ² à 2 500 m ²
Couverture temporelle	1990/2000/2006/2012	2012 (et 2006 pour un produit)	2006/2012	Mise à niveau régulière	À la demande	Mise à jour annuelle	1982/1987/1990/1994/1999/2003/2008/2012/2016(prévue)	1999/2006/2014	Dépendante de la date d'acquisition de la BD ORTHO®
Nomenclature	Hiérarchisées en 3 niveaux avec un maximum de 44 classes	5 produits thématiques : Imperviousness / Forests / Grassland / Wetlands / Permanent Water Bodies	Hiérarchisées en 4 niveaux avec un maximum 27 classes	7 classes	1/50 000 ^e : 8 classes 1/25 000 ^e : 29 classes 1/10 000 ^e : 46 classes	15 à 20 classes	1 niveau et 81 classes	3 niveaux et 47 classes	2 dimensions : Couvert du sol : 14 classes Usage du sol : 17 classes
Problématique générale	« Fournir aux pays de l'Union Européenne une information géographique homogène sur l'occupation du sol »	« Fournir des informations sur des caractéristiques spécifiques de l'occupation des sols, complémentaires à CORINE Land Cover à l'échelle européenne »	« Fournir des informations sur l'utilisation du sol dans les grandes villes européennes »	« Fournir des données spatialisées publiques de référence nationale sur l'occupation et l'utilisation des sols en France »	Cartographie clé en main pour la connaissance et suivi du territoire urbain et péri-urbain ; l'aide à la planification urbaine ; modélisation et analyse urbaine.	« fournir une cartographie de l'occupation des sols opérationnelle et annuelle sur la France avec un niveau de détails modéré »	« Fournir un outil unique de suivi et d'analyse de l'évolution de l'occupation des sols franciliens »	« Fournir aux acteurs régionaux un fichier de référence et un outil d'observation sur l'occupation et l'utilisation des sols »	« Fournir des données spatialisées publiques de référence nationale sur la couverture et l'usage des sols à grande échelle »
Imagerie source	1990 : Landsat-5 2000 : Landsat-7 2006 : SPOT-4/5 et IRS P6 LISS III 2012 : IRS P6 LISS III et RapidEye	SPOT-4/5, IRS P6 LISS III, RapidEye	SPOT 5 ALOS RapidEye Quickbird	SPOT	SPOT 1 à 5 ou équivalent	Sentinelle-2 SPOT-6/7	Orthophotographies THRS	Landsat-5/7 SPOT-5/6	Orthophotographies THRS
Méthode de production	Principalement par PIAO Pour certains pays des solutions semi-automatiques ont été appliquées en utilisant des données nationales existantes.	Approche hybride : Traitements d'images semi-automatiques + Amélioration par PIAO à partir de données auxiliaires	Approche hybride : Traitements d'images semi-automatiques + Amélioration par PIAO à partir de données auxiliaires	PIAO	Approche hybride : Traitements d'images semi-automatiques + PIAO	Traitements d'images semi-automatiques	PIAO	Approche hybride : Traitements d'images semi-automatiques + Amélioration par PIAO à partir de données auxiliaires	Utilisation de données socles pour une première partition du territoire (BD TOPO® de l'IGN) + PIAO
Producteur	Maîtres d'Ouvrage et/ou prestataires de services désignés dans chaque pays	-	Prestataire de service privé	IGN	Airbus Space & Defense	Theia	Prestataires de service (privé)	Prestataire de service (privé)	IGN + prestataires de services (privé)
Diffusion	Accès libre pour tous les utilisateurs	Accès libre pour tous les utilisateurs	Accès libre pour tous les utilisateurs	Gratuité pour la recherche et l'enseignement	Licence payante	Non connu	Accès libre pour acteurs publics de la région IdF	Accès libre pour tous les utilisateurs	Non connu

1.2.1.1 CORINE Land Cover

Le programme CORINE Land Cover (CLC) est initié en 1985 par la Commission Européenne. Il est intégré dans le programme Copernicus, anciennement GMES (Global Monitoring for Environment and Security). La BD CLC est aussi bien connue pour le produit cartographique qu'elle propose que par sa nomenclature. La BD CLC est une base de données cartographique de l'occupation et de l'utilisation du sol conduite sur 38 pays européens. Pour le moment il existe 4 millésimes de la BD CLC (1990, 2000, 2006 et 2012). La BD est construite sur une nomenclature commune à l'ensemble des territoires européens dont l'objectif est de fournir une classification partagée de l'occupation du sol pour : permettre de comparer les territoires nationaux entre eux et d'analyser leur évolution ; établir un vocabulaire commun autour de l'occupation et l'utilisation du sol entre toutes les professions et entités institutionnelles ; et enfin donner la possibilité de positionner un territoire plus restreint dans un contexte territorial plus large et standardisé (Autran 2007).

La BD CLC est toujours aujourd'hui considérée comme un référentiel cartographique important pour de nombreux de gestionnaires de territoire. Son succès est à la fois assuré par sa diffusion libre auprès de l'ensemble des citoyens européens mais aussi par l'opérationnalité de sa nomenclature. Son système novateur de nomenclature emboîtée en 3 niveaux de précision thématique et un maximum de 44 postes a très vite été approprié et apprécié par les gestionnaires. La nomenclature CLC a alors inspiré la construction de nombreuses autres des bases de données spatialisées (Fricke et Wolff 2002; Louvet et Ajouc 2014; Gourgand 2014).

La BD CLC est conçue pour une échelle d'utilisation au 1/100 000^e, avec une UMC minimale de 25 ha et une UMC de détection de changement de 5 ha. CLC constitue encore l'unique source d'informations sur l'occupation du sol pour un grand nombre de territoires, souvent ruraux (Saffroy et Lambert, 2013), bien qu'elle ne réponde, en aucun cas, aux exigences (aux besoins) d'une cartographie à grande échelle (*Figure 1*).

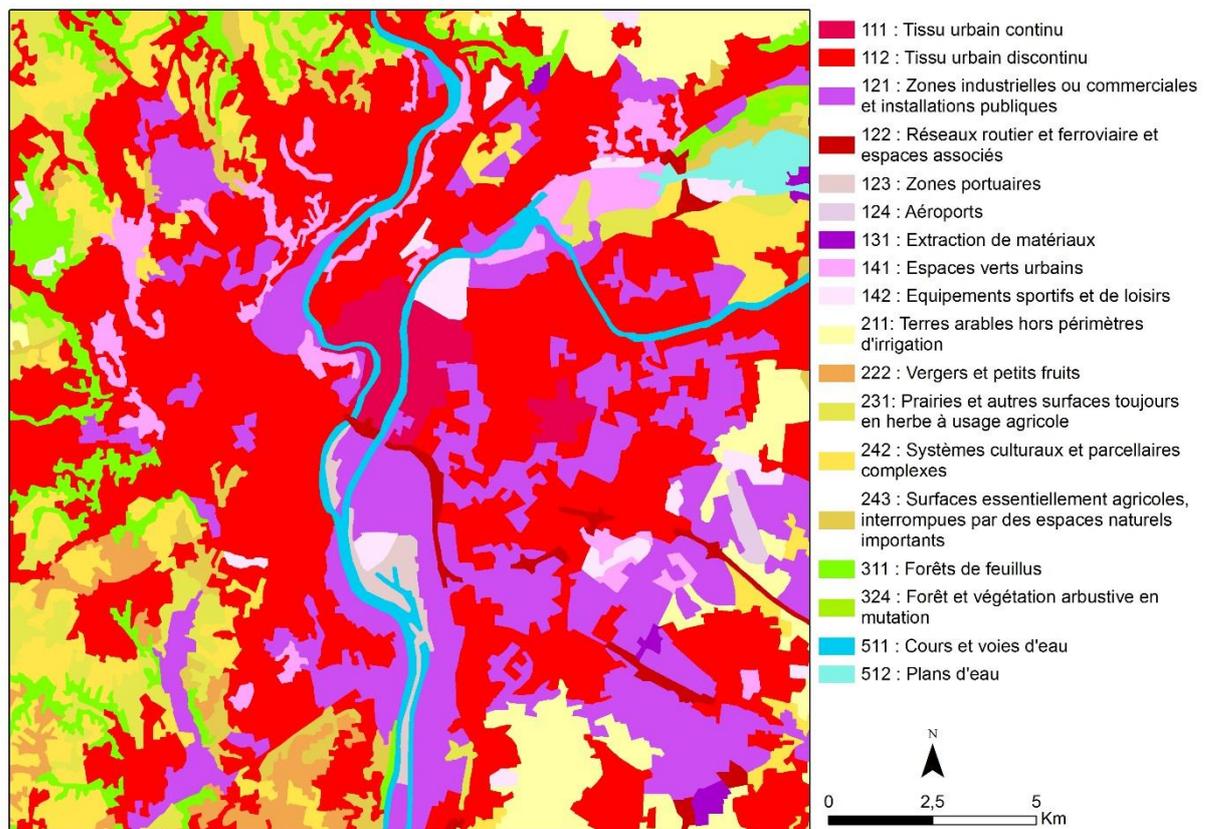


Figure 1. Extrait de la base CORINE Land Cover (2012) au 1/100 000^e sur l'agglomération lyonnaise

1.2.1.2 Couches Haute Résolution

Dans le cadre du programme Copernicus, des couches thématiques raster de Haute Résolution (HR) sont produites de manière complémentaire à la base de données cartographique CORINE Land Cover. Les couches HR sont produites à partir d'images satellites à 20 m de résolution spatiale traitées par classification semi-automatique. Comme pour CLC, les couches HR sont libres d'accès. Elles couvrent 5 thématiques : Imperméabilisation des sols, forêts, surfaces en eau, zones humides et prairies. Pour le moment, il existe qu'un seul millésime des couches HR (2012).

Pour les gestionnaires régionaux et locaux des territoires, les couches HR ne sont pas suffisantes du point de vue de la précision spatiale, des thématiques abordées et de l'absence de plusieurs millésimes. Dès lors, elles ne peuvent satisfaire leurs besoins d'informations à grande échelle. Comme pour la BD CORINE Land Cover, les couches HR ne peuvent être considérées que comme une opportunité d'inscrire un morceau de territoire dans un contexte territorial plus global et standardisé.

1.2.1.3 BD Urban Atlas

La base de données Urban Atlas (anciennement MURBANDY/MOLAND) de l'Agence Européenne de l'Environnement (Fricke et Wolff 2002; Seifert 2009) s'inscrit également dans le programme européen Copernicus. Il s'agit d'une base de données spatialisée pan-européenne de l'occupation et l'utilisation du sol des agglomérations de plus de 100 000 habitants. La BD

Urban Atlas est produite pour une utilisation au 1/10 000^e et cartographie des éléments paysagers compris entre 0.25 ha et 1 ha (*Figure 2*). Sa méthode de production combine une approche de traitements d'images semi-automatique et de la photo-interprétation. Il existe pour le moment que deux millésimes (2006 et 2012). La nomenclature est hiérarchisée en 4 niveaux de précision thématique pour un maximum de 27 classes de description de l'occupation du sol. Son usage premier est de combler une lacune globale de connaissance des espaces urbains en Europe. De plus, l'Urban Atlas permet de comparer facilement entre elles les villes européennes à partir d'une seule et même source de donnée standardisée.

La BD Urban Atlas est 100 fois plus précise que CORINE Land Cover pourtant celle-ci à une portée limitée chez les gestionnaires des territoires urbains concernés par sa couverture. En effet, les planifications des espaces urbains nécessitent une mise à jour régulière de leur cartographie ne correspondant pas forcément au rythme de celle de la BD Urban Atlas. L'emprise spatiale de la BD Urban Atlas pour une agglomération ne concorde pas forcément avec celle de l'entité administrative étudiée par les gestionnaires. L'impossibilité d'associer dans l'analyse cartographique les territoires voisins ou les villes de moins de 100 000 habitants peut s'avérer contraignant. Enfin le caractère générique de la nomenclature limite l'étude des spécificités locales des territoires urbains. Dès lors, contrairement à CORINE Land Cover, la BD Urban Atlas ne s'est pas positionnée comme un consensus cartographique pouvant faire l'objet, localement, d'améliorations ou de précision thématique de la part des acteurs de la ville.

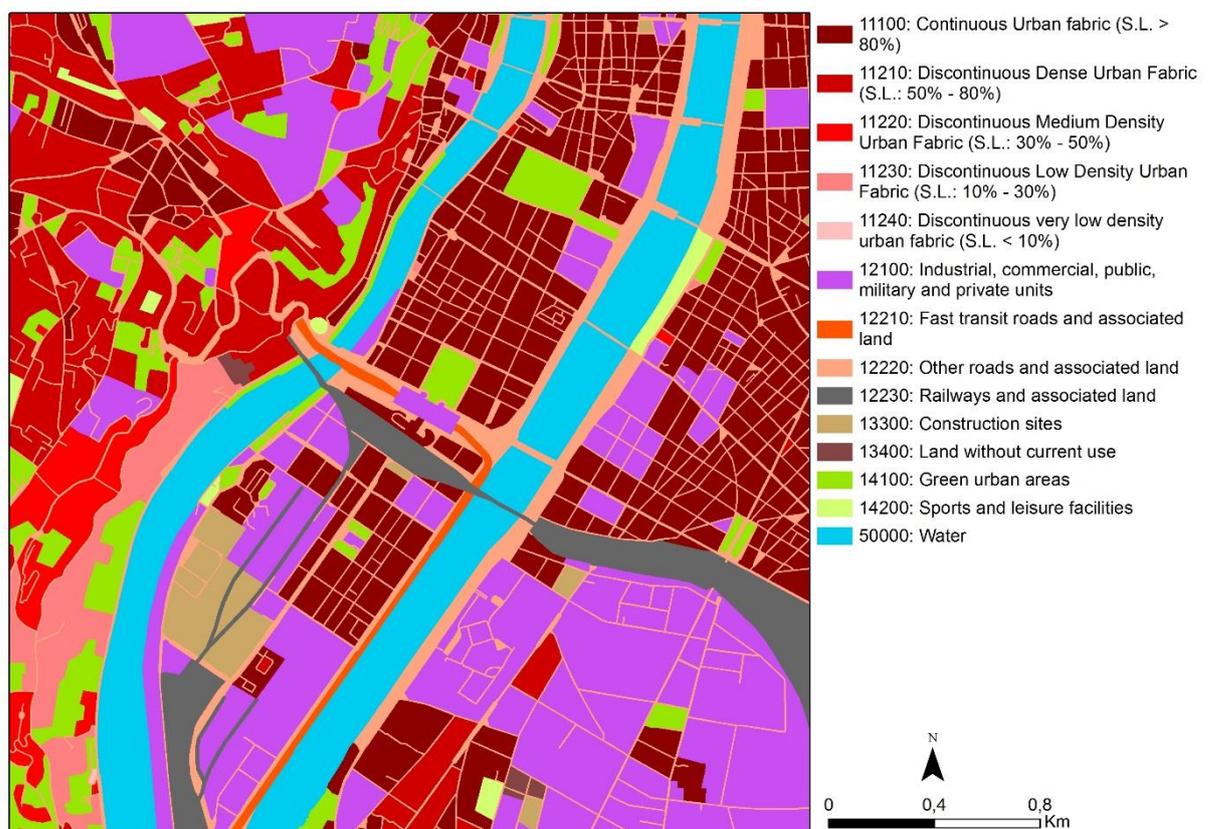


Figure 2. Extrait de la base Urban Atlas (2012) au 1/10 000^e sur le centre-ville de Lyon

1.2.1.4 BD CARTO® IGN

La BD CARTO® est, depuis 2002, l'un des produits cartographiques majeurs de l'Institut Géographique National (IGN) (IGN 2001). Elle inclut une description vectorielle homogène du paysage français au 1/100 000^e. La BD CARTO® est produite par photo-interprétation des orthophotographies de l'IGN et d'images satellites SPOT. La nomenclature se compose de 13 classes généralistes dont la superficie minimale de cartographie varie entre 4 ha et 25 ha (*Figure 3*). La BD CARTO® est mise à niveau de façon continue et n'est pas diffusée selon un millésime précis mais selon des versions de produit.

Le produit BD CARTO® est très peu utilisé par les gestionnaires français qui lui préfèrent CORINE Land Cover. Même si la BD CARTO® propose des délimitations plus précises de certains objets paysagers comme les espaces bâtis (4 ha contre 25 ha pour CLC), la description thématique de la BD CARTO® est trop succincte. Toujours est-il que la BD CARTO® est en aucun cas une base de données spatialisées pour des applications à grande échelle.

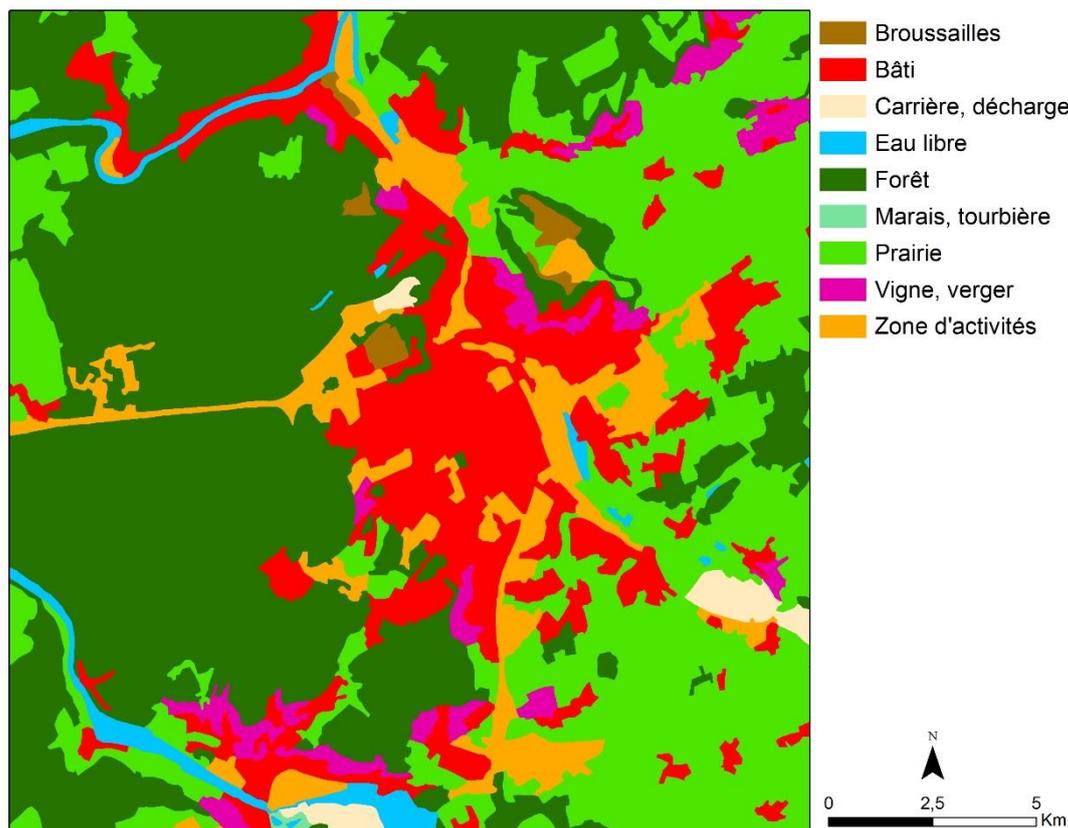


Figure 3. Extrait de la BD CARTO® de L'IGN au 1/100 000^e sur l'agglomération nancéenne

1.2.1.5 SPOT Thema

SPOT Thema est une base de données d'occupation et d'utilisation du sol, à la demande dérivée de l'imagerie SPOT et produite selon une approche hybride associant des traitements d'image à la photo-interprétation. SPOT Thema est commercialisée par AIRBUS Defense & Space et déclinée en trois sous-produits cartographiques de 8, 29 et 46 classes d'occupation du sol allant du 1/50 000^e au 1/10 000^e (*Figure 4*). Il s'agit d'une solution cartographique « clé en

main » laissant une faible marge de manœuvre au gestionnaire pour adapter le produit aux spécificités de son territoire. SPOT Thema reste une solution onéreuse destinés aux professionnels de l'aménagement du territoire ou aux collectivités les plus riches en recherche d'une cartographie, notamment à grande échelle, rapide et opérationnelle.

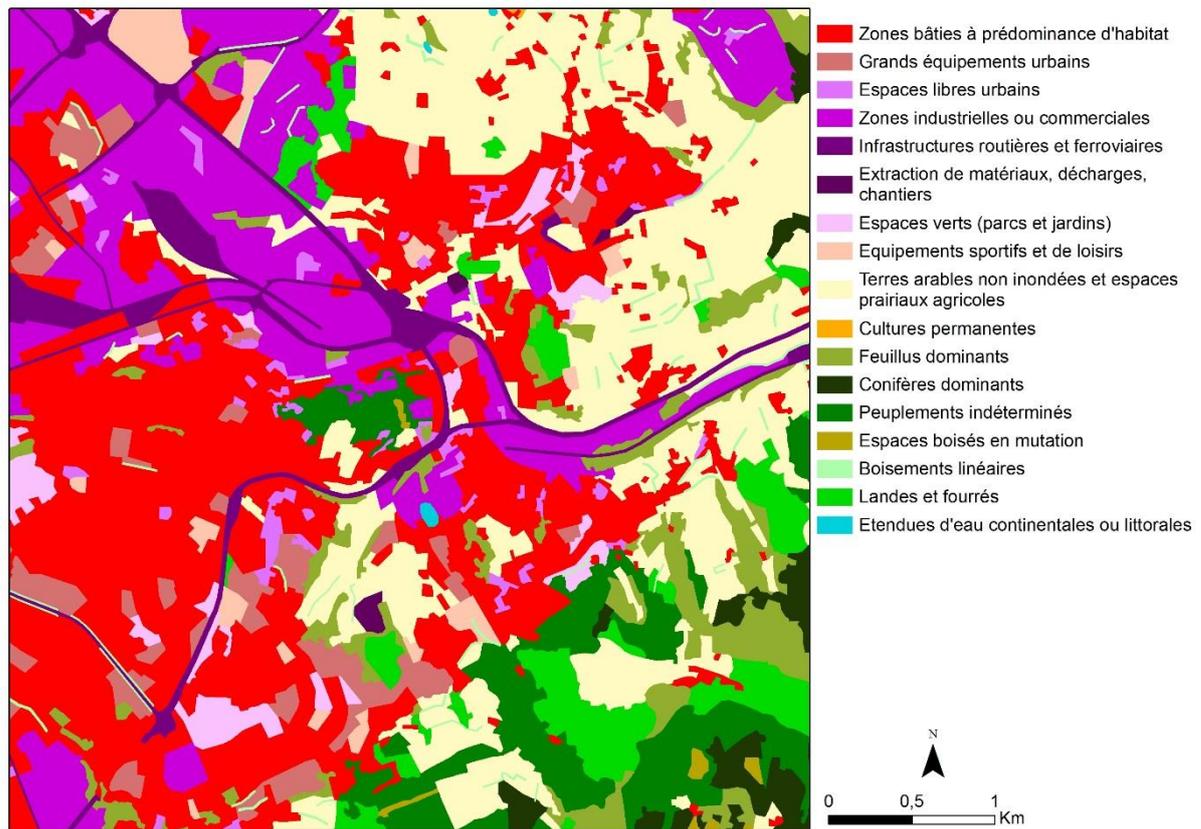


Figure 4. Extrait du produit cartographique SPOT Thema au 1/25 000^e sur l'agglomération stéphanoise

1.2.1.6OSO : « Occupation du Sol »

Le Centre d'Expertise Scientifique sur l'Occupation des SOls (CES OSO) a récemment publié la première carte d'occupation des sols 2016 de la France avec l'imagerie Sentinelle-2 et Landsat 8. Le produit cartographique dénommé OSO se présente pour le moment sous la forme d'une couche thématique raster de 17 classes d'occupation du sol d'une résolution de 10 m (Figure 5). La carte OSO est entièrement conçue et produite à partir de processus algorithmiques de classification d'image. Sa fréquence de mise à jour est prévue chaque année (Inglada 2016).

La carte OSO est un produit issu de recherches scientifiques récentes. Il ne bénéficie pas encore d'un retour d'expérience avancé chez les utilisateurs. L'extrait cartographique (Figure 5) montre, à première vue, une sur-estimation importante des zones industrielles et commerciales sur l'agglomération lyonnaise et d'une faible distinction des classes « bâti » et « bâti diffus ». Toujours est-il que le produit OSO aura du mal à convaincre les gestionnaires locaux en recherche d'une information géographique sub-métrique de l'occupation du sol. Par contre, à l'échelle régionale, ce type de cartographie, produit de manière annuelle, peut s'avérer pertinent.

Toutefois, la faible précision thématique du produit OSO peut en limiter les applications localement.

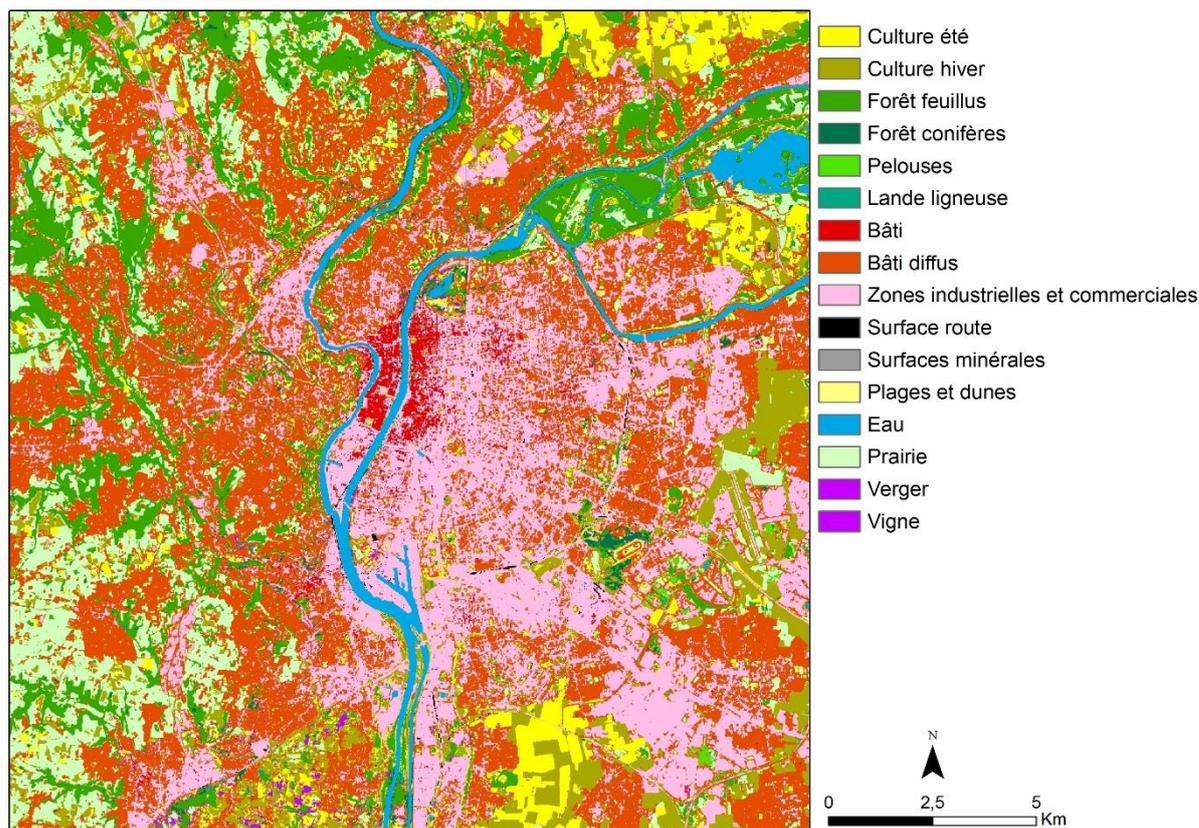


Figure 5. Extrait du produit cartographique OSO « Occupation du Sol » au 1/50 000^e sur l'agglomération lyonnaise

1.2.1.7 MOS francilien

La Région Île-de-France est depuis longtemps pionnière en matière de cartographie d'occupation du sol à grande échelle. En 1982, déjà, la Région réalise son Mode d'Occupation du sol (MOS) à grande échelle (1/5 000^e) décomposé en 130 classes. Régulièrement, celle-ci est mise à jour (1987, 1990, 1994, 1999, 2003, 2008, 2012 et bientôt 2016). La nomenclature évolue également et propose pour le dernier millésime, 81 classes réparties sur un seul et même niveau hiérarchique¹ (I. A. U. 2014).

L'investissement porté par la Région sur ce MOS à grande échelle fait de la région francilienne un OVNI par rapport au reste du territoire national. La région, caractérisée par un dynamisme urbain particulièrement fort, est devenue rapidement autonome et capable de satisfaire elle-même ses besoins cartographiques à grande échelle pour alimenter les opérations d'aménagement du territoire. À contrario, cette situation tend à l'isoler du reste du territoire national. Les analyses comparatives avec les autres territoires français sont rendus difficiles.

¹ <http://carto.iau-idf.fr/webapps/applimos/#>

1.2.1.8BD OCSOL-PACA

La Région Provence-Alpes-Côte d'Azur (PACA) exerce depuis 2003, une politique d'inventaires cartographiques et de diffusion forte sur son territoire via la création du Centre Régional de l'Information Géographique (CRIGE-PACA). Le CRIGE-PACA assure des missions de service public en faveur des usages, de la production et du partage de l'Information Géographique entre les gestionnaires des territoires. Parmi les thèmes abordés par le CRIGE, la cartographie régionale de l'occupation du sol constitue un axe majeur de développement. Son objectif est de proposer à l'ensemble des territoires de la Région, même les plus ruraux, un outil cartographique d'aménagement du territoire, standardisé et adapté au contexte méditerranéen, capable d'aider à répondre efficacement aux obligations réglementaires.

Le CRIGE-PACA a fait produire une base de données régionale nommée BD OCSOL-PACA, actuellement disponible en trois millésimes (1999, 2006 et 2014). La BD OCSOL-PACA est conçue pour une utilisation au 1/50 000^e et se base sur une nomenclature adaptée de CORINE Land COVER (*Figure 6*). Les auteurs ont la volonté de ne pas isoler la nouvelle base par rapport au référentiel européen. Quelques postes supplémentaires (spécifiés du territoire) sont proposés ainsi que certaines redéfinitions de classes, tout en réduisant la superficie minimale des objets cartographiés de façon à permettre une utilisation de la base à plus grande échelle (*section 3.3.1*).

L'accueil de la BD OCSOL-PACA par les utilisateurs régionaux est favorable (Ajoué 2010). Bien que la BD OCSOL-PACA soit une cartographie à moyenne échelle de la région, elle comble un manque de données important pour la majorité des territoires couverts. Parmi les usages les plus fréquents, le CRIGE PACA relève que la BD OCSOL-PACA est souvent utilisée pour réaliser des adaptations, des reclassifications ou des enrichissements locaux de l'occupation du sol. La BD OCSOL-PACA fait alors office de tronc commun pour des besoins cartographiques à grande échelle et permet de cette manière de conserver une cohérence régionale pour la comparaison des territoires.

Il existe de nombreuses autres cartographies régionales sur l'occupation du sol en dehors de la Région PACA (*Tableau 2*). Malheureusement, pour la majorité d'entre-elles, il est difficile d'assumer la modernisation ou la mise à jour de ces BD régionales, d'une part à cause des ressources techniques et financières à mobiliser et d'autre part en raison du prochain référentiel national à grande échelle OCS GE® de l'IGN.

Tableau 2. Exemples de BD régionales sur l'occupation du sol

Produit	BD SIG LR	BD CIGAL	BD SIGALE	OCS Aquitain
Région	Languedoc Roussillon	Alsace	Nord-Pas de Calais	Aquitaine
Échelle d'utilisation	1/50 000 ^e	Du 1/25 000 ^e au 1/10 000 ^e	1/25 000 ^e	1/25 000 ^e
Millésimes	2001/2006	2000/2008/2011-2012	1998/2005/2009	2000/2009

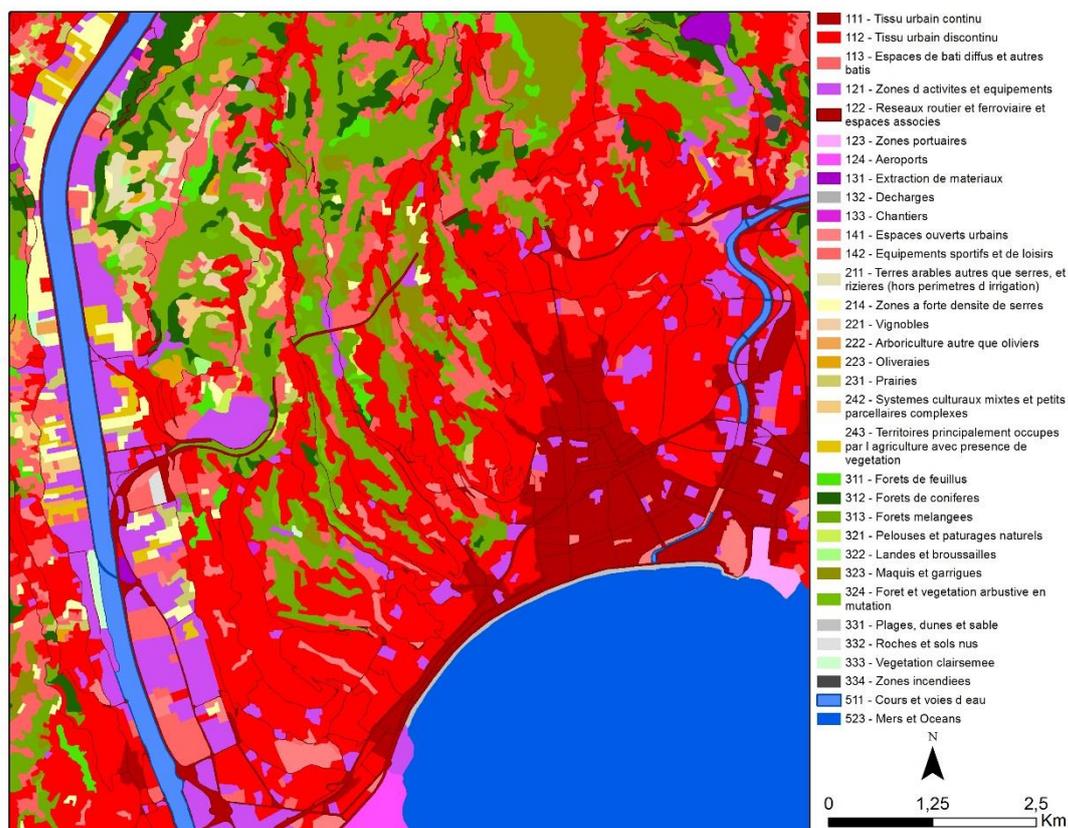


Figure 6. Extrait de la BD OCSOL-PACA (2014) au 1/50 000^e sur l'agglomération niçoise

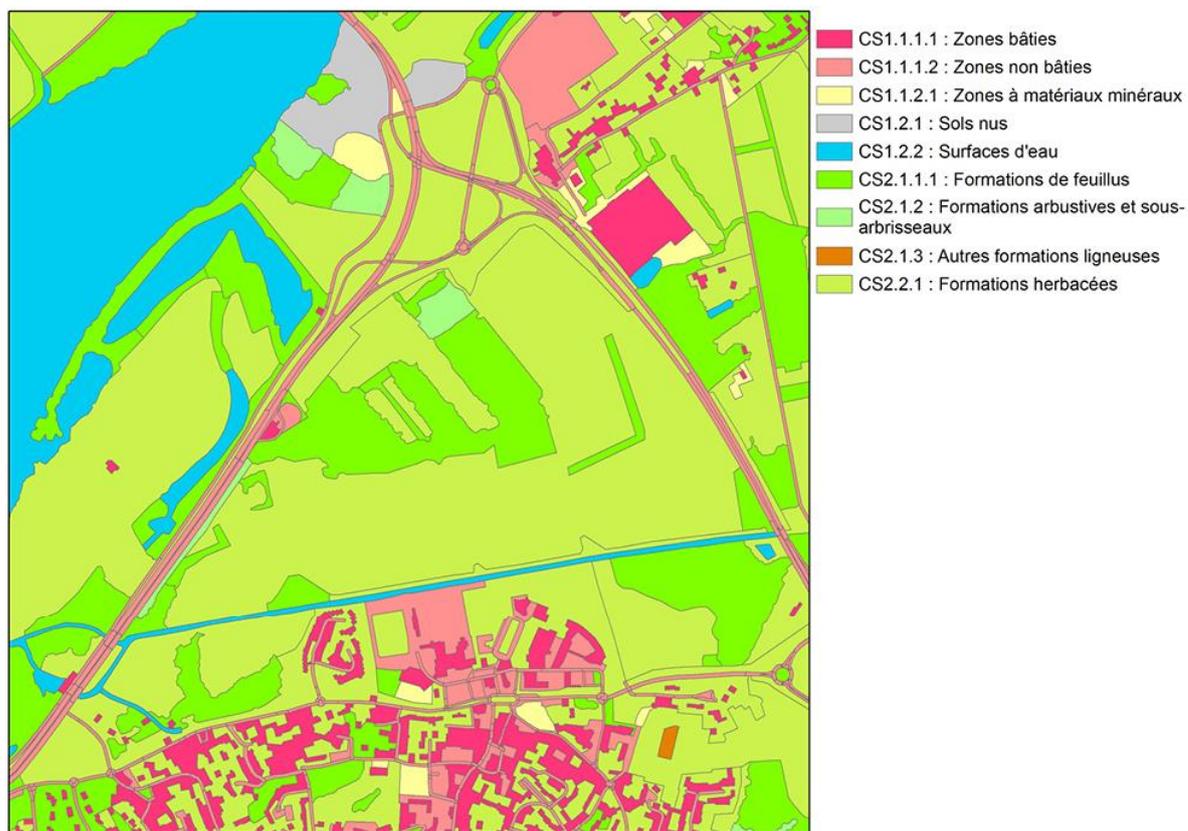
1.2.1.9 OCS GE® IGN

L'Institut Géographique National (IGN) initie en 2012, le projet OCS GE®. Ce projet vise la réalisation d'un référentiel cartographique de l'occupation du sol à grande échelle sur l'ensemble du territoire national à partir de la BD ORTHO® IGN. L'OCS GE® est actuellement en cours de maturation et entre tout juste en phase de production. L'objectif de ce nouveau produit cartographique est d'apporter une réponse concertée aux exigences réglementaires et conforme à la directive INSPIRE. Cette nouvelle donnée doit étoffer l'offre publique des bases de données du Référentiel à Grande Échelle (RGE) distribué par l'IGN. L'IGN indique son souhait de mettre à jour l'OCS GE® tous les 3 à 6 ans (IGN 2016b).

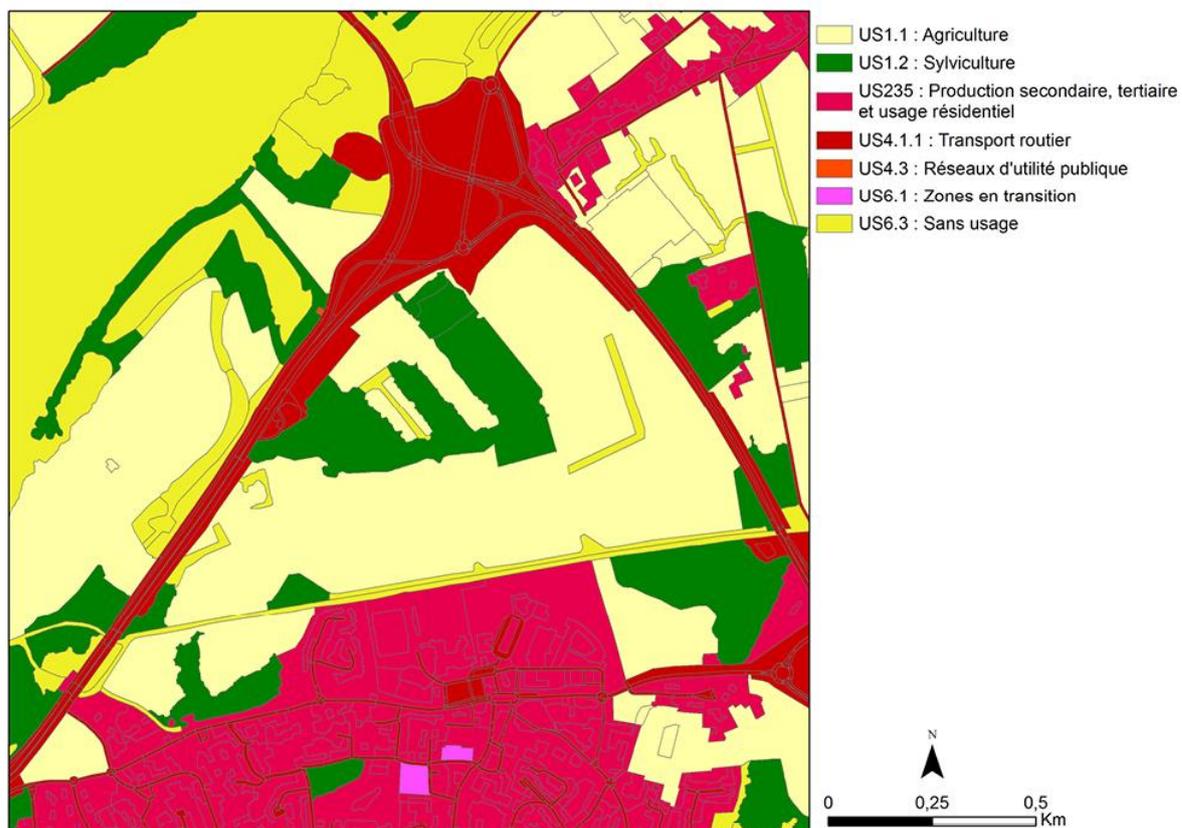
La base OCS GE® est prévue pour une utilisation comprise entre le 1/10 000^e et le 1/5 000^e. Les superficies minimales de cartographie attendues sont comprises entre 200 m² et 5 000 m². La base se construit autour d'une nomenclature innovante qui consiste à « ventiler » la description de la surface terrestre selon 4 dimensions dont 2 sont considérées comme principales et les 2 autres comme secondaires. Les 2 principales sont : la couverture du sol qui se réfère à une « vue *physionomique* » du territoire ; et l'usage du sol qui renvoie à une « vue *économique du territoire par rapport à une activité principale* ». Les 2 autres dimensions sont : la morphologie du sol qui renseigne « la *modélisation de l'espace par rapport à une fonction principale et évalue la densité d'éléments* » (par exemple : Tissu urbain continu ou discontinu, serres agricoles, plantations forestières, etc.) ; et la caractéristique de « l'*état ponctuel des milieux* » (zones humides, coupes rases, incendiés, etc.). Pour le moment, l'IGN prévoit seulement la fourniture des 2 dimensions principales : la couverture du sol composée de 14

classes et l'usage du sol déterminé par 17 classes (*Figure 7*). La méthodologie de production est entièrement attachée à la photo-interprétation appuyée par des données exogènes (BD TOPO®, BD FORET®, RPG, etc.) et un socle polygonal des infrastructures routières et ferroviaires préparé par l'IGN (Gourgand 2014).

Une attente forte est décrite vis-à-vis de l'OCS GE® et de sa couverture nationale (Saffroy et Lambert 2013). Pourtant, il est difficile aujourd'hui de prédire le devenir et l'impact du projet OCS GE® sur le secteur de la cartographie de l'occupation du sol à grande échelle en France. Il suscite également quelques interrogations similaires à celles qui avaient été exposées il y a 15 ans pour la BD TOPO® et la BD CARTO®. Le mode de financement, la licence d'utilisation, la mise à jour, la qualité de production, l'adéquation du produit avec le besoin local et surtout l'articulation avec des bases de données à grande échelle déjà produites sont des préoccupations que les utilisateurs et les concepteurs nourrissent envers le projet OCS GE® de l'IGN. De plus, un certain nombre de doutes sont formulés dans la facilité d'utilisation d'une telle base de données décomposée en 4 dimensions.



(a)



(b)

Figure 7. Extrait de l'OCS GE® IGN au 1/10 000^e sur la région nantaise selon 2 dimensions : (a) couverture du sol, (b) usage du sol

1.2.2 La multiplication des BD Ocsol GE régionales et locales

En 2013, l'Institut Géographique National (l'IGN) a réalisé une étude des besoins des utilisateurs de BD à grande échelle, auprès de 40 organismes publics sur la base d'un inventaire des BD Ocsol existantes (Saffroy et Lambert 2013). Cette étude confirme clairement le retard de La France dans ce secteur. Plus de 70% des utilisateurs sont uniquement dotés de CORINE Land Cover (dont l'utilisation est prévue au 1/100 000^e). Toutefois, l'inventaire montre bien la tendance qui porte les collectivités régionales et locales vers l'acquisition de leur propre Base de Données sur l'Occupation du sol à Grande Échelle (BD Ocsol GE) : entre 20 et 30% des organismes territoriaux interrogés, comprenant des Communautés d'Agglomérations, des Communautés de Communes, une Métropole et des Agences d'Urbanisme, utilisent une BD Ocsol GE régionale et/ou locale; moins de 10% recourent à des produits cartographiques « clé en main » du type SPOT Thema (Figure 8).

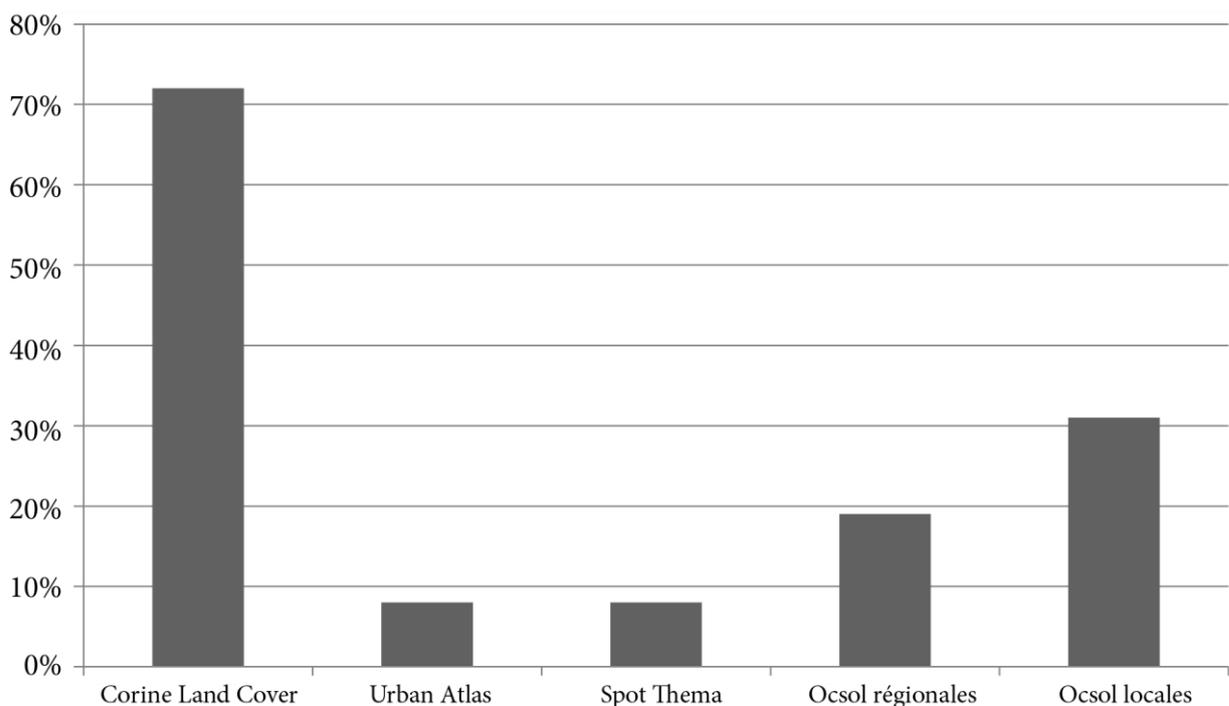


Figure 8. Pourcentage des organismes publics interrogés utilisant ou ayant utilisé au moins une fois une BD OCSOL, d'après l'enquête de l'IGN en 2013

L'ensemble des échelons administratifs, de l'État aux collectivités territoriales locales, s'accordent actuellement sur le besoin d'asseoir des nomenclatures et des méthodes de production partagée pour la création de référentiels cartographiques de l'occupation du sol à grande échelle. L'objectif prioritaire est un besoin d'apporter des informations comparables à grande échelle fiables entre les territoires.

Dans l'attente d'une production nationale à grande échelle, soutenue par le projet OCS GE® de l'IGN, le besoin en BD Ocsol GE est toujours urgent. Les Infrastructures de Données Géographiques (IDG) au niveau régional impulsent, au sein de leur territoire, des mouvements de mutualisation des achats d'imagerie et des méthodologies concertées de production de ces BD Ocsol GE (ou MOS GE). Ces initiatives de proximité travaillent pour apporter des réponses

cartographiques sur-mesure face aux problématiques propres à chaque territoire et à ses spécificités.

Dès lors, une opportunité s'ouvre aux collectivités territoriales plus modestes, d'acquérir (et/ou de disposer) localement, d'un référentiel cartographique à grande échelle pour répondre aux échéances réglementaires. Nous présentons ici deux exemples d'IDG régionales qui soutiennent et organisent une production de BD Ocsol GE mutualisée aux échelons locaux : le CRIGE PACA et la PPige Nord-Pas de Calais.

1.2.2.1 La nomenclature OcsolGe PACA : procédures et recommandations

Malgré le succès de la base de données régionale sur l'occupation du sol (BD OCSOL-PACA) produit au 1/50 000^e (*section 1.2.1.8*), le CRIGE PACA a relevé, après enquête auprès des utilisateurs, l'insuffisance de sa qualité pour les missions d'étude et d'intervention urbaine à grande échelle (Roux 2004). Dès lors, le CRIGE PACA publie, en 2014, un guide technique des procédures et recommandations, de mise en œuvre d'une nomenclature d'occupation et d'utilisation du sol à grande échelle : OcsolGE PACA (Louvet et Ajouc 2014). Ce document de recommandation est à destination des collectivités territoriales de la région (Métropole, Communauté d'agglomération, Communauté de communes, etc.) voulant se lancer dans l'acquisition d'un référentiel cartographique à grande échelle. L'objectif est d'encadrer la réponse cartographique à ces attentes et d'assurer la comparaison entre les territoires. Il ne s'agit pas d'une obligation d'adhésion, par contre la production locale de BD OCSOL GE, comprise entre le 1/10 000^e et le 1/5 000^e, selon les recommandations du CRIGE PACA est soutenue par des subventions régionales. À la fin 2016, 30 % de la Région PACA était couverte par une ou plusieurs cartographies à grande échelle portée essentiellement par des SCoT, des PNR, des intercommunalités et des agences d'urbanisme (Ajouc 2016).

La nomenclature OcsolGE PACA se base sur la nomenclature régionale (BD OCSOL-PACA), elle-même fondée sur le modèle CORINE Land Cover et décline un quatrième niveau de précision thématique. Cette déclinaison apporte une aide substantielle à l'analyse des territoires aux grandes échelles en particulier pour les espaces urbains où les exigences des documents d'urbanismes (SCoT, PLU) l'imposent. La nomenclature permet alors de cartographier des morphologies urbaines complexes (« *Bâti collectif* », « *Bâti mixte* », « *Bâti individuel dans parc paysagers* », etc.), des équipements particuliers (« *Espaces d'équipements collectifs* », « *Équipements eau, énergies, TIC et déchets* », etc.) ou encore présentant des états particuliers (« *Terrains vagues en zone d'activités* », « *Jardins familiaux* » etc.). Pour les espaces agricoles, la nomenclature apporte des précisions sur l'état et les évolutions des cultures. Enfin pour les espaces naturels et semi-naturels, la nomenclature permet de mieux appréhender la fermeture des milieux ou encore de connaître les types de milieux qui subissent le plus l'artificialisation. Le niveau 4 de la nomenclature est un niveau « *à la carte* » non figé. La définition et l'interprétation de ces postes de niveau 4 sont souvent sujettes à divergences. Tous les cas de figures sont difficilement prévisibles dès le départ. Des modifications ou des rajouts de postes sont possibles mais toujours en cohérence avec l'emboîtement de niveau. Il arrive parfois que la déclinaison d'un niveau 5 ponctuel soit nécessaire pour pallier un manque de précision du niveau 4.

La production d'une base de données d'occupation du sol selon la nomenclature Ocsol GE PACA implique également une élévation de l'échelle cartographique au 1/10 000^e appropriée au besoin des utilisateurs notamment dans le cadre d'étude de PLU. L'objectif est de disposer d'une information géographique sur l'occupation du sol suffisamment précise, synthétique, composite et interprétée. L'unité minimale de cartographie est portée entre 500 m² et 2 500 m² en fonction des espaces interpréter (Figure 9).

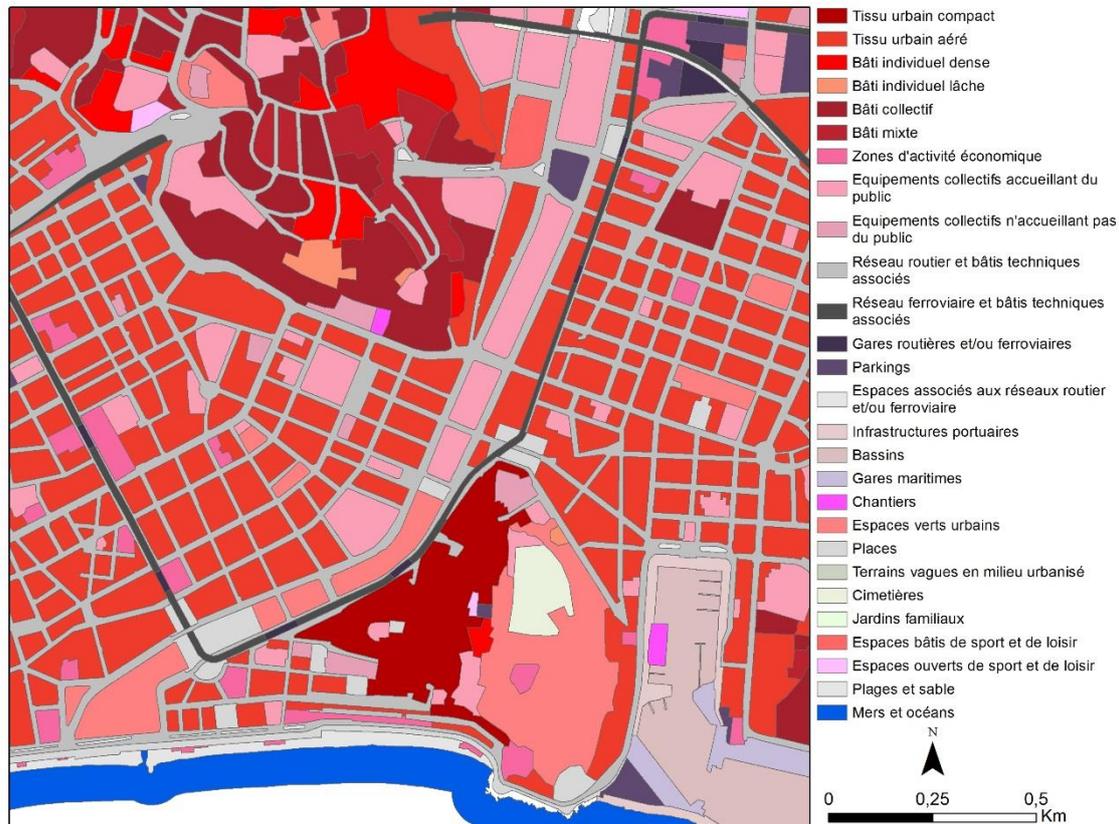


Figure 9. Extrait de la BD Ocsol GE de la métropole Nice Côte d'Azur au 1/10 000^e

1.2.2.2 OCS^{2d} Nord-Pas de Calais

En 2014, le Groupe Régional OCS issu de la Plateforme Publique de l'Information Géographique de la Région Nord-Pas de Calais a lancé « une étude méthodologique pour la mise en œuvre d'une production partagée d'une base de données sur l'occupation du sol du Nord-Pas de Calais ». Le contexte infrarégional déplore une multitude de sources d'information géographique sur l'occupation du sol souffrant d'une absence de coordination globale rendant les productions peu lisibles et des capacités techniques et financières limitées pour actualiser ces informations. L'objectif du groupe de travail est d'aboutir à une réalisation partagée d'un référentiel d'occupation du sol à grande échelle et en établissant sa nomenclature ainsi que sa méthode de production et sa gouvernance.

Les travaux de réflexion s'inscrivent dans les démarches nationales en cours sur le projet OCS GE® de l'IGN (section 1.2.1.9) et aboutissent à une proposition de co-construction d'un nouveau référentiel nommé OCS2D Nord-Pas de Calais. La nomenclature se base sur une distinction du couvert et de l'usage du sol comme pour le produit de l'IGN. La définition d'une

unité minimale de cartographie est fixé à 300 m² pour une utilisation prévue du référentiel entre le 1/3 000^e et le 1/2 000^e. La méthode de production est la photo-interprétation appuyée par des données « *socles* » issues de la BD TOPO® de l'IGN et constituant une première partition du paysage (Décaudin 2016).

Le projet OCS2D Nord-Pas de Calais s'apparente fortement au projet OCS GE® de l'IGN. L'existence du projet régional se justifie en grande partie par le manque de visibilité sur le projet national. En effet, l'OCS GE® IGN apparaît, pour le moment, comme une compilation de bases diverses, avec une nomenclature imparfaite pour la satisfaction des besoins locaux. En effet, le projet OCS2D décline une nomenclature de la couverture à 32 classes et de l'usage du sol à 48 classes contre respectivement 14 classes et 17 classes pour le projet OCS GE® IGN (Gourgand 2014; Décaudin 2016). Par exemple, la nomenclature OCS2D intègre des spécificités liées au contexte littoral (« *prés salés* », « *marais salés* ») et historique (« *terrils* ») de la Région. Le référentiel OCS2D est en cours de production et doit aboutir à une livraison progressive des zones produites en 2017.

1.2.3 Les acteurs de l'offre cartographique

Le panorama des bases de données d'occupation du sol dressé précédemment confirme qu'à l'aube de 2020, la cartographie de l'occupation du sol à grande échelle est au centre des attentes des gestionnaires des territoires. Pour y répondre, ces derniers disposent d'une offre cartographique qui se structure autour de cinq familles d'acteurs majeures : l'Institut Géographique National (IGN), les Centres Régionaux de l'Information Géographique (CRIGEs), les organismes publics de recherche, les producteurs et fournisseurs d'images et les entreprises privées, prestataires de services et de conseils dans ce domaine (Figure 10). Tous apportent des éléments de réponse plus ou moins adaptés aux besoins des commanditaires. Le choix de se tourner vers une solution plutôt qu'une autre est conditionné par plusieurs facteurs.

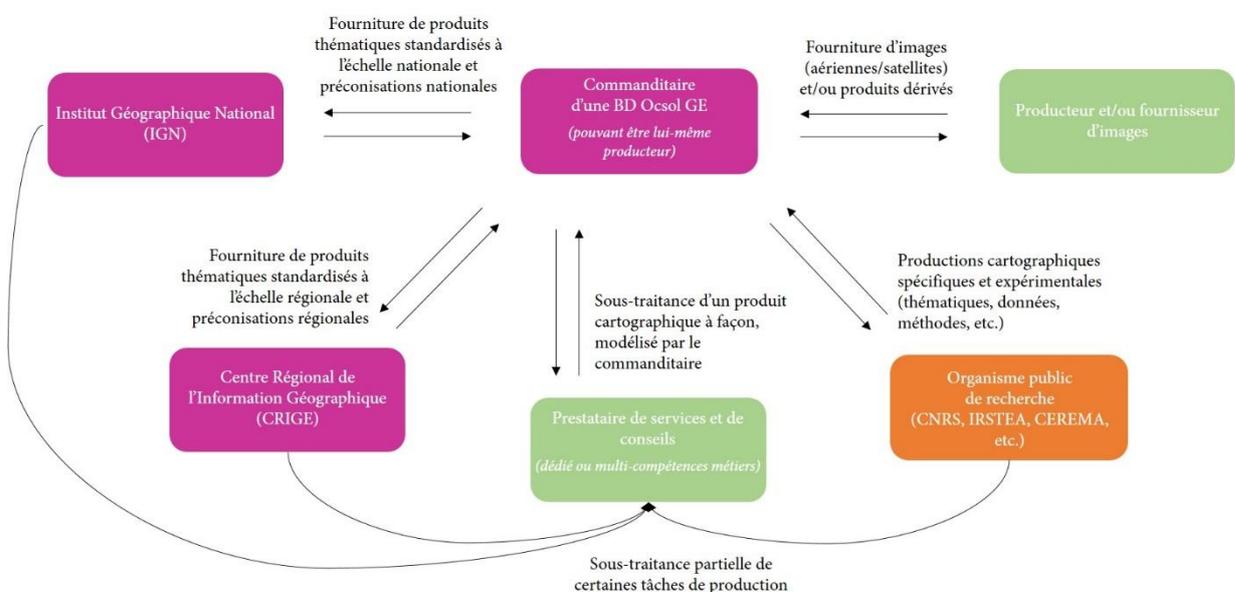


Figure 10. Les acteurs mobilisables pour un commanditaire de BD Ocsol GE

Le coût et les moyens de financement d'une acquisition de BD Ocsol GE peuvent être les premiers de ces facteurs. S'il est contraint par ses ressources financières, un gestionnaire public de territoire (EPCI, PNR, département, etc.) aura alors plus de facilité à se tourner vers des produits thématiques standardisés par l'IGN ou par une Infrastructure de Données Géographiques (IDG), pour lesquels il aura déjà consenti un investissement. Les produits thématiques commerciaux proposés par les fournisseurs d'images restent encore onéreux (SPOT Thema). Le partenariat avec un organisme de public de recherche peut se révéler aussi une alternative intéressante du point de vue financier grâce à un partage des coûts. Cependant, l'approche scientifique et expérimentale engagée par l'entité de recherche peut, dans certains cas, aboutir à un résultat cartographique dévié de l'attente initiale du commanditaire. Enfin, le montage financier d'un projet de BD Ocsol GE prévoyant la sollicitation d'un prestataire de service peut faire l'objet, dans certains cas, de subventions particulières si la méthodologie de production suit des préconisations formulées à l'échelon régional ou national.

La maturité du projet visant l'acquisition d'une BD Ocsol GE va également jouer un rôle primordial. De plus en plus de gestionnaires ont une idée précise de la base de données à mettre en œuvre sur leur territoire afin d'alimenter l'élaboration des différents outils d'aménagements (PLU, SCOT, TVB, PNR, etc.). Cette dynamique s'explique à la fois par le travail de coordination des CRIGE (AFIGEO, 2012), les retours d'expériences des territoires, et la montée en compétences des services territoriaux en matière de SIG. Même si certains gestionnaires, en particulier dans des territoires plus ruraux, se contentent le plus souvent de produits thématiques standardisés à des échelles plus petites et de précisions thématiques moindres, pour différentes raisons (coûts, personnels, etc.), la tendance actuelle s'inscrit bien dans une production de cartographie au plus proche des spécificités locales des territoires à des échelles fines (IGN, 2013).

Toutefois, tous les échelons territoriaux s'accordent aujourd'hui sur le besoin de stabiliser et de partager les nomenclatures et les méthodes de production pour ces référentiels locaux d'occupation du sol ; l'objectif étant de fiabiliser les comparaisons entre les territoires sans perdre d'informations sur les spécificités locales. Le rôle de l'IGN à l'échelle nationale et des CRIGE en région en est d'autant plus renforcé. Pourtant, malgré l'élan du projet OCS GE® de l'IGN en vue de la production d'un référentiel national sur l'occupation du sol à grande échelle, il y aura encore, au niveau régional et local, des besoins que cette donnée standardisée ne couvrira pas. Les craintes sont essentiellement portées sur l'inadaptation d'un standard cartographique aux besoins locaux de grande échelle. De plus, l'inertie d'un tel projet est grande. Encore aujourd'hui, le projet OCS GE® connaît des difficultés pour sa mise en production (redéfinition de nomenclature, financement, mise à jour, mise en place du groupe de travail européen CORINE Land Cover + d'ici 2020).

En conséquence, les prestataires de services et de conseils restent des interlocuteurs privilégiés pour les commanditaires d'une BD Ocsol GE. Ayant vocation à satisfaire au mieux leur client, ils sont les mieux à même d'exécuter une tâche de production cartographique sur-mesure telle qu'elle est définie par le commanditaire, sans autres considérations si ce n'est celle de l'équilibre des coûts.

Cependant, il convient de distinguer deux types de structures : les entreprises dédiées essentiellement à la production de données et les bureaux d'études multi-métiers. Les entreprises

dédiées à la production de données sont généralement des structures qui mobilisent une ressource humaine importante pour les tâches de production (numérisation, photo-interprétation). Celles-ci sont même souvent délocalisées pour assurer une bonne rentabilité. Ces structures répondent essentiellement à des demandes de production sur des grandes superficies (départements, régions, État). L'expertise, le conseil et l'accompagnement des commanditaires dans l'élaboration et la valorisation de la donnée sont limités dans leurs prestations. Les Bureaux d'Études (BE), entre autres en environnement, se positionnent sur des demandes de production de BD Ocsol GE principalement lorsque l'expertise et la valorisation potentielle de ces bases dans des études complémentaires (TVB, PLU, chartes de PNR, etc.) sont requises. Contrairement aux entreprises dédiées à la production de données, les BE interviennent généralement sur des territoires plus petits (EPCI, PNR) et engagent une ressource humaine moins importante, mais plus qualifiée, composée en grande partie d'ingénieurs.

Les travaux poursuivis dans cette thèse se positionnent du point de vue d'un bureau d'études en environnement. La structure enregistre actuellement une augmentation des demandes de BD Ocsol GE. Elle doit anticiper sur ces futurs besoins et se préparer à répondre aux nouvelles demandes de cartographies sur-mesure. Cela passe, entre autres, par une remise en cause du modèle de production actuellement utilisé.

1.3 Problématique de production pour un bureau d'études en environnement : genèse d'un projet de R&D

1.3.1 Positionnement d'un bureau d'études en environnement²

De façon schématique, un bureau d'études en environnement répond aux besoins de ses clients publics ou privés à travers trois axes structurant ses métiers : l'expertise des milieux étudiés (artificiels, naturels et/ou semi-naturels) ; le traitement des données environnementales ; et une aide à l'élaboration d'études d'impact, de plans et de programmes d'actions³...

Les attentes vis-à-vis d'un bureau d'études en environnement peuvent se résumer de la manière suivante :

- réaliser une prestation de qualité,
- pour un prix donné,
- dans un délai donné.

Dès lors, le BE s'inscrit dans un triptyque dans lequel il doit assurer la fiabilité de son intervention (*Figure 11*). Cela comprend la maîtrise d'une gestion de projet parfois complexe comprenant : la mise en place d'un processus de production, l'animation des ressources et d'un environnement humain (équipe interne, partenaires et sous-traitants, client et parties-prenantes), la mobilisation d'équipements matériels spécifiques, l'établissement d'un budget (ressources financières). De plus, le BE doit assurer une technicité appropriée à la demande (compétences, protocoles, certifications, etc.) tout en assurant une rentabilité commerciale de la prestation.

² Sans le préciser par la suite, ces réflexions portent essentiellement sur les bureaux d'études avec des spécialités milieux et territoires. Elles s'appliquent moins à des bureaux d'études travaillant sur des process industriels (traitement de l'air, des eaux, des déchets...).

³ C'est la façon dont Asconit structure ses départements.



Figure 11. Triptyque de la fiabilité d'une prestation pour un bureau d'études

1.3.2 Le rôle d'un bureau d'études en tant que vecteur d'innovation⁴

Les Bureaux d'Études (BE) identifient et affrontent régulièrement des verrous techniques et/ou technologiques au cours de leurs prestations et au travers des veilles scientifiques et techniques sur leurs métiers. Ces verrous ont un impact plus ou moins important sur la qualité des interventions que les BE peuvent proposer. Ainsi, les BE ont en théorie un intérêt fort à s'impliquer dans des projets de Recherche et Développement (R&D), même s'ils ne le font pas tous. En effet, les innovations qui en résultent peuvent permettre de renforcer leur compétitivité, leur image de marque et leur positionnement sur des nouveaux marchés. L'activité de R&D apporte un renforcement et une valorisation des compétences internes d'un BE. La R&D développe également le savoir-faire d'une structure, en particulier en activant la synergie entre les différents métiers du BE et les organismes publics de recherche.

L'expression courante « Recherche et Développement » (R&D) comprend trois types d'activité : la recherche fondamentale, la recherche appliquée et le développement expérimental (OCDE 2016). La **Recherche Fondamentale (RF)** regroupe les travaux de recherche expérimentaux ou théoriques menés dans le but d'acquérir de nouvelles connaissances à partir de phénomènes et de faits observables. Ce type de recherche n'implique *a priori* aucune application ou utilisation particulière. La **Recherche Appliquée (RA)** consiste également en des travaux originaux entrepris pour acquérir des nouvelles connaissances dans le cadre d'un objectif pratique déterminé. Enfin, le **Développement Expérimental (DE)** correspond à des travaux systématiques engagés à partir des connaissances tirées des recherches précédentes. Ce développement aboutit à de nouvelles connaissances techniques en vue d'élaborer ou d'améliorer un produit ou un procédé, existant ou non. Le développement expérimental ne doit pas se confondre avec le développement de produits qui désigne le processus englobant la formulation d'idées jusqu'à la commercialisation d'un produit (bien ou service). Il apporte éventuellement les connaissances génériques pouvant servir au développement du produit.

Contrairement à un schéma classique, la R&D, telle qu'elle est menée dans un bureau d'études comme Asconit, ne suit pas un modèle linéaire qui implique une recherche fondamentale suivie d'une recherche appliquée puis d'un développement expérimental. La R&D génère un grand nombre de flux d'informations et de rétroactions entre les différentes activités (RF, RA et DE) (Figure 12). Le DE peut alors alimenter des réflexions de RF qui peuvent remettre en cause les connaissances acquises en RA. De plus la composante « Terrain » agissant

⁴ Une bonne part de ces réflexions est tirée de l'expérience de 14 ans de R&D au sein du BE Asconit Consultants (Lefrançois *et al.* 2016).

principalement sur le développement expérimental engage des contraintes fluctuantes liées à la réalité opérationnelle d'un domaine d'étude. Par exemple, le changement d'une réglementation ou l'arrivée d'une nouvelle technologie peuvent réorienter la R&D.

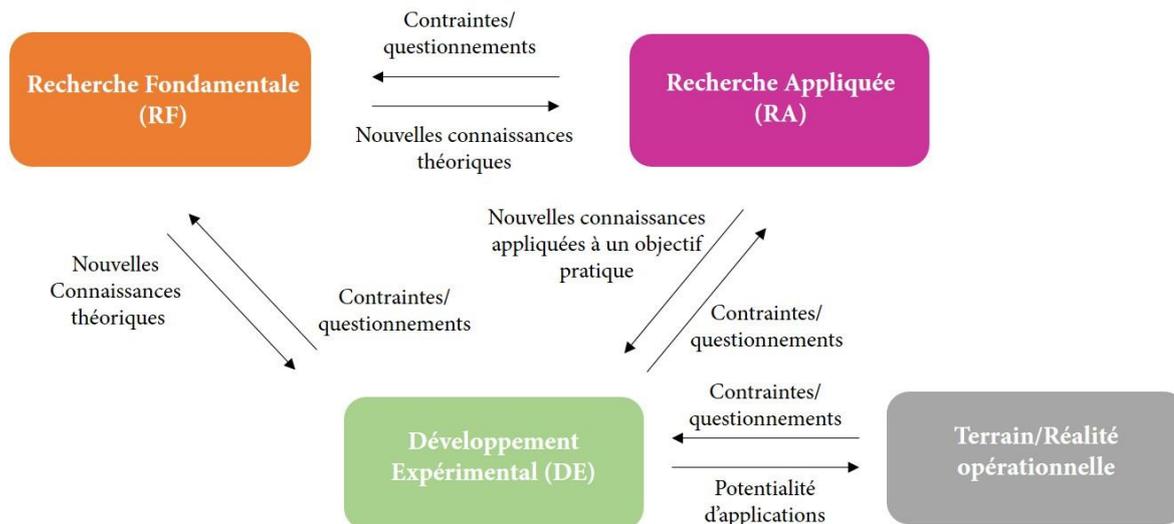


Figure 12. Structuration de la Recherche et développement (R&D)

Le montage et la mise en œuvre de projets de R&D partenariale est une activité courante pour le bureau d'études inscrit dans ce travail de thèse. En tant que structure privée dont l'activité principale reste la prestation de service, la société développe des innovations au bénéfice de ses maîtres d'ouvrage, publics principalement, sans se limiter à la seule valorisation de travaux de recherche menés par des laboratoires (Lefrancois et al. 2016). En pratique, le triptyque partenarial qui a fonctionné dans nombre de projets de R&D menés par Asconit se compose généralement : d'un ou plusieurs maître(s) d'ouvrage, d'un ou plusieurs organismes publics de recherche et du bureau d'études (Figure 13). Souvent, le montage financier d'un projet de R&D repose à la fois sur de l'autofinancement venant des différents partenaires et de la mobilisation de fonds extérieurs (Commission européenne ; État français, à travers en particulier l'ANR, les bourses de doctorat en CIFRE via l'ANRT, la BPI ; les Régions...)

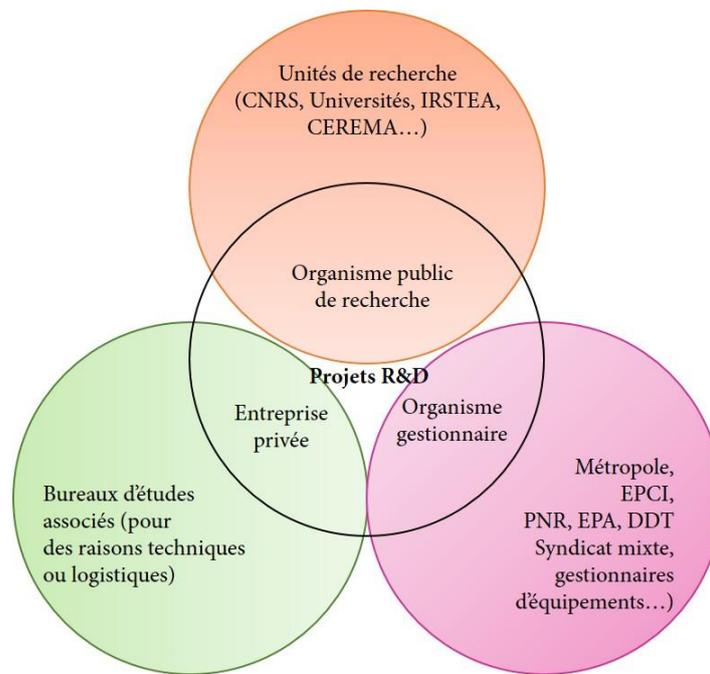


Figure 13. Triptyque partenarial classique (d'après Lefrancois 2016)

Dans ce type de R&D partenariale, l'initiative d'un projet de R&D peut être impulsée par l'un des trois partenaires. Il n'y a pas de règle générale. Cependant les pourparlers entre les potentiels partenaires peuvent prendre un temps important afin que chacun trouve son intérêt (scientifique, technique et commercial...). Afin de répondre à ses objectifs finaux (à terme être à même de répondre aux demandes du marché), l'élaboration du sujet de la recherche doit impérativement répondre au besoin du gestionnaire et l'impliquer sur tous les plans (financement, scientifique et technique). Les laboratoires doivent y trouver un intérêt scientifique ou à minima la validation de leurs travaux à travers des applications pratiques ; c'est aussi pour eux un enjeu de communication. La pleine implication du bureau d'études en phase de montage et de réalisation du projet de R&D est cruciale. En effet, souvent, la faible disponibilité des gestionnaires pour qui la R&D n'est pas une priorité mais répond à un intérêt à moyen long-terme, ou la forte sollicitation des organismes de recherches (enseignements, recherches académiques) peuvent ralentir le projet. Le BE dispose d'une grande latitude décisionnelle pour consacrer du temps et de l'énergie à des projets de R&D qu'il juge prioritaire, sous réserve de trouver le bon montage financier. Si on s'appuie sur l'expérience du BE impliqué dans cette thèse, on constate que l'entreprise s'inscrit souvent en tant que maître d'œuvre d'une R&D (Figure 14).

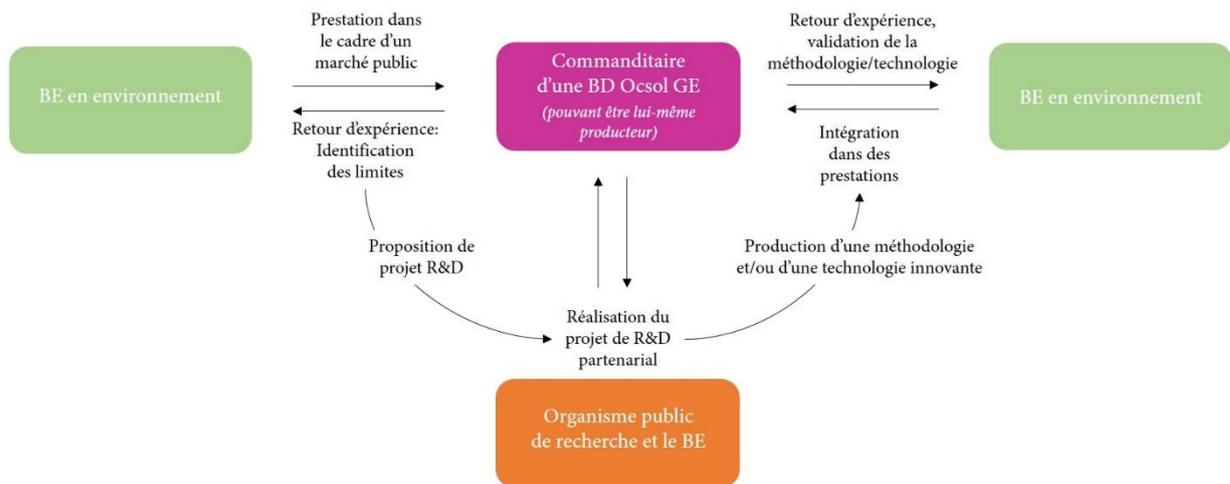


Figure 14. Insertion du projet de R&D au sein des relations entre gestionnaires et bureau d'études privée (d'après Lefrancois 2016)

Le sujet à la base de cette thèse est issu d'une initiative portée directement par l'entreprise en 2011. Son cheminement vers un projet de R&D a suivi un mode d'élaboration particulier. Le sujet a d'abord été étudié par le département de R&D de la société, en lien avec les autres départements concernés, sur la base d'une grille d'aide à la décision. La grille tenait compte de l'intérêt du sujet au regard : des besoins du département, du marché, des collaborateurs disponibles, des capacités de financement mobilisables et des partenaires associables au projet (organismes de recherches, gestionnaires, sous-traitant, etc.). Il a ensuite été discuté et élaboré plus avant avec le laboratoire universitaire porteur scientifique de la thèse (l'unité mixte de recherche CNRS 5600 EVS-ISTHME), avec qui Asconit avait déjà une longue expérience de partenariat, élément très favorable pour faciliter le montage et la mise en place d'un nouveau projet. Le projet a été en grande partie autofinancé. La thèse a bénéficié d'une bourse CIFRE. Le projet dans son ensemble a été accompagné par l'entreprise à délégation de service public OSÉO (devenue BPI en 2013) à travers l'allocation d'une avance remboursable versée au démarrage du projet. Démarrage qui a été effectif à la fin 2012.

1.3.3 Un besoin d'optimisation de la production régulière des BD Ocsol GE exprimé par un bureau d'études

La production de bases de données spatialisées à grande échelle sur l'occupation et l'utilisation des sols (BD Ocsol GE) lors d'études environnementales ou des projets cartographiques, est une activité régulière du bureau d'études (BE) inscrit dans ce projet de recherche.

Cette activité est en grande partie liée aux études portant sur : l'élaboration des Trames Vertes et Bleues (TVB) des territoires dans le cadre des Schémas Régionaux de Cohérence Écologique (SRCE), l'élaboration ou la mise à jour de Schémas de Cohérence Territoriale (SCOT) ou de Plans Locaux d'Urbanisme (PLU), ou encore l'étude d'impacts socio-économiques et environnementaux d'infrastructures ou d'équipements sur un territoire.

L'expérience du BE sur cette activité lui a permis de constater de longue date que les données d'occupation du sol sont produites manuellement via une analyse des imageries aériennes et/ou

satellites. Le traitement des images pour réaliser des cartographies nécessite deux étapes successives :

- le détourage des éléments paysagers visibles sur image sous forme de polygones,
- l'interprétation ou la caractérisation de ces éléments paysagers détournés selon une nomenclature déterminée.

Ces étapes étant réalisées manuellement, le traitement des images est long et les résultats dépendent fortement de l'expertise des intervenants. Le projet de R&D impliquant cette thèse est né de la volonté de s'affranchir de cette forte dépendance à l'expertise humaine et de l'absence de solutions opérationnelles existantes sur le marché.

En association avec l'unité mixte de recherche CNRS 5600 EVS-ISTHME, le Bureau d'études a entrepris une étude de faisabilité portant sur l'automatisation d'une méthode de cartographie des modes d'occupation des sols ([Annexe A](#)).

Les objectifs affichés étaient de :

- proposer une solution technique à ses clients via la commercialisation d'un outil et/ou d'une offre de service associée ;
- garantir des résultats cartographiques plus cohérents et homogènes sur de grands territoires, sans dépendre uniquement de l'interprétation « humaine » ;
- réduire les temps de traitements des imageries.

Ces attentes se sont révélées en résonance avec les efforts considérables, menés depuis une quinzaine d'années par la communauté scientifique, sur la mise en place de méthodes d'extraction automatisées d'informations spatialisées à partir d'imagerie THRS notamment à travers l'approche GEOBIA (GEOgraphic-Object-Based Image Analysis). (Blaschke et al. 2014).

L'objectif de ces avancées était et est encore de pouvoir répondre aux besoins d'informations spatialisées grandissants en termes de précision géométrique et thématique, ainsi que de répétitivité. Pourtant, en dehors des organismes de recherches, ces efforts peinaient et peinent encore aujourd'hui à s'imposer au sein des structures de production opérationnelles comme les bureaux d'études⁵.

Le BE connaissait ces méthodes automatisées, mais, comme la plupart des prestataires, il les avait écartées lors des processus de production d'une BD Ocsol GE. La raison clairement identifiée résidait dans le manque de flexibilité et de robustesse de ces méthodes, d'autant plus que la production cartographique était rarement standardisée d'une demande à une autre. Les producteurs réguliers de BD Ocsol GE n'étaient pas incités à mettre en place des routines algorithmiques de classification de l'occupation du sol, car ils savaient pertinemment que les besoins cartographiques diffèrent lors de la prochaine demande (territoire, nomenclatures, données, échelles, etc.). De plus, le résultat cartographique issu d'une démarche automatisée restait sensible à un grand nombre de paramètres liés à la zone d'étude cartographiée et aux

⁵ Cette réflexion, comme celles qui suivent, rappelle le contexte de l'époque à laquelle cette recherche a été conçue et lancée, mais l'ensemble de ces réflexions restent en grande partie d'actualité.

algorithmes eux-mêmes. Il n'était alors pas garanti que le résultat escompté par la méthode automatisée soit à la hauteur de la demande.

Comme identifié par le BE, les producteurs réguliers de BD Ocsol GE sur-mesure privilégiaient alors des modèles de production plus « *classiques* » basés sur des approches entièrement manuelles de Photo-Interprétation Assistée par Ordinateur (PIAO). Il s'agissait de la seule méthode qui permette de s'adapter facilement aux contraintes liées à des demandes régulières et sur-mesure de cartes d'occupation du sol à grande échelle. Toutefois, la photo-interprétation était aussi la méthode de production la plus onéreuse et la plus exigeante pour le producteur. Généralement, elle consommait beaucoup de temps et exigeait une organisation de production performante pour assurer un délai contraint de prestation. De plus, la PIAO, souvent menée en équipe, restait un exercice très subjectif, pour lequel le producteur peinait à garantir l'homogénéité du résultat cartographique final.

Dès lors, l'un des objectifs des travaux de cette thèse a été de comprendre pourquoi les nouvelles méthodes émergentes de cartographie automatisée ne s'imposaient pas dans les modèles de production opérationnelle des BD OCCSOL GE ? En effet, il était dommage de ne pas envisager l'apport de ces nouvelles méthodes d'automatisation de tâches dans la chaîne de production cartographique. Les producteurs étaient déjà appelés à produire selon des méthodes plus agiles et à recourir à des technologies permettant d'accélérer le processus de production cartographique.

Dans l'analyse que nous avons menée au démarrage de cette thèse, il apparaissait que la réponse passait, en partie, par la compréhension de l'ensemble des composantes régissant un modèle de production opérationnel d'une BD Ocsol GE. Pour y parvenir, nous avons réalisé un ensemble de travaux que nous présentons dans le chapitre suivant : une analyse concrète de la demande à travers une étude de marché, puis une analyse fonctionnelle du besoin lié à une production régulière de BD Ocsol GE. Ces étapes avaient pour objectif de poser les bases d'une démarche de recherche appliquée et d'un développement expérimental en vue de l'optimisation d'un procédé de production lacunaire.

Chapitre 2 :

**Optimiser la production régulière
de BD Ocsol GE sur-mesure :**
*analyse du besoin et orientation de la Recherche
et du Développement (R&D)*

Sommaire

2.1	Analyse de la demande : étude de marché.....	54
2.2	L'Analyse Fonctionnelle (AF).....	57
2.2.1	Principe.....	57
2.2.1.1	<i>Les fonctions.....</i>	<i>58</i>
2.2.1.2	<i>Le recensement des fonctions.....</i>	<i>59</i>
2.2.1.3	<i>L'ordonnancement des fonctions.....</i>	<i>61</i>
2.2.1.4	<i>La caractérisation des fonctions.....</i>	<i>63</i>
2.2.2	Application pour la production régulière de BD Ocsol GE sur-mesure	64
2.2.2.1	<i>« Brain-storming » sur la production régulière d'une BD Ocsol GE .</i>	<i>64</i>
2.2.2.2	<i>L'environnement et la désignation des Fonctions de Service (FS).....</i>	<i>67</i>
2.3	La photo-interprétation comme solution de production.....	69
2.3.1	La photo-interprétation répond encore à un besoin	69
2.3.2	La méthodologie de production par photo-interprétation	70
2.3.2.1	<i>Étape 1 : les objectifs et les données</i>	<i>70</i>
2.3.2.2	<i>Étape 2 : préparation de la photo-interprétation.....</i>	<i>72</i>
2.3.2.3	<i>Étape 3 : la production.....</i>	<i>73</i>
2.3.2.4	<i>Étape 4 : la validation.....</i>	<i>73</i>
2.4	Recherche des pistes d'optimisation de la photo-interprétation.....	74
2.5	Pertinence d'une assistance à la digitalisation.....	77

2.1 Analyse de la demande : étude de marché

Afin de renforcer l'analyse de faisabilité rédigée par le bureau d'étude avant le lancement du projet de Recherche et Développement (R&D), une analyse plus précise de la demande a été lancée à travers une étude de marché réalisée en partenariat avec un cabinet spécialisé (Newton).

L'étude de marché était contextualisé de la manière suivante : le bureau d'études travaille sur une méthode de traitement semi-automatique des cartographies d'occupation du sol dont les principales caractéristiques seront de :

- réduire le temps de production d'une BD Ocsol GE ;
- réduire et faciliter le travail de photo-interprétation à travers des automatisations de tâches de production ;
- garantir des résultats cartographiques sur-mesure, cohérents vis-à-vis du besoin et homogènes sur des grandes superficies.

Les objectifs de l'étude de marché étaient alors de :

- valider la pertinence d'une commercialisation d'une méthode répondant aux caractéristiques précédentes ;
- identifier les marchés d'intérêt ;
- définir les actions à entreprendre pour les atteindre.

Pour y parvenir la méthodologie déployée dans l'étude de marché visaient à :

- étudier les méthodes existantes en matière de production de BD Ocsol GE ;
- identifier les avantages concurrentiels de la méthode envisagée ;
- interroger les acteurs du domaine pour valider l'intérêt et définir les attentes précise des utilisateurs.

Le cabinet a entrepris une série de 13 entretiens téléphoniques avec des diverses structures relayant une approche différentes envers la production de BD Ocsol GE (*Figure 15*). Les résumés des entretiens sont présentés en annexes ([Annexe B](#)).

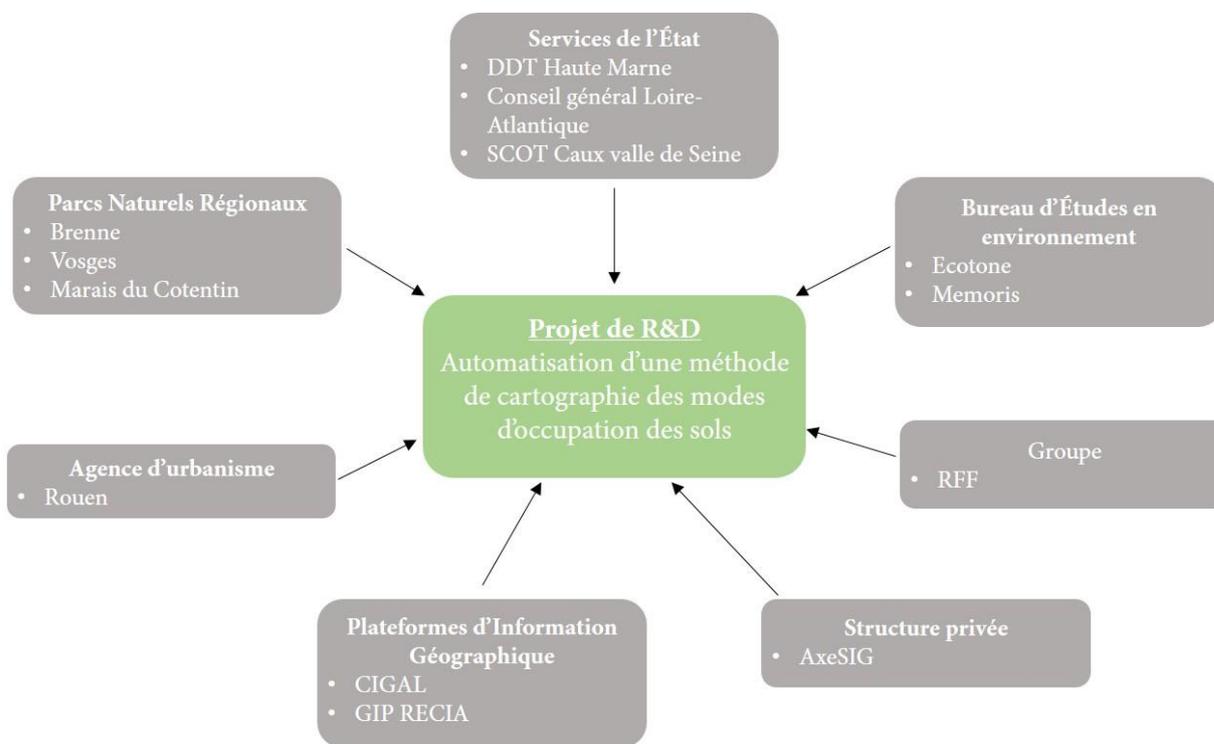


Figure 15. Structures interrogées pour l'étude de marché

Les entretiens ont été structurés autour de 3 items :

- leurs besoins actuels en matière d'informations géographiques sur l'occupation du sol et leurs méthodes d'obtention de cette information ;
- l'intérêt porté pour les méthodes d'extraction et d'identification semi-automatique de l'occupation du sol à partir d'imageries aériennes et/ou satellites ;
- leurs recommandations pour approche semi-automatisée de la production de BD Ocsol.

Les enseignements de cette étude de marché sont présentés ci-dessous.

Il existe un réel besoin d'information sur l'occupation du sol, mais aussi un certain flou dans l'expression des besoins. Cela s'explique en grande partie par la diversité des acteurs demandeurs de données. Tous ne possèdent pas les mêmes compétences vis-à-vis de ces questions. Certains ont en interne les ressources et connaissances nécessaires pour répondre complètement à leur besoin de données. D'autres vont solliciter le soutien des groupes de mutualisation autour de l'information géographique (CRIGEs) ou faire appel à des prestataires de services et de conseils pour les assister dans des tâches de production cartographique. D'autres encore méconnaissent volontairement ou involontairement les enjeux des BD Ocsol GE et continuent à utiliser des bases de données de type CORINE Land Cover pour le suivi de leur territoire.

De plus, l'aspect financier contraint fortement les stratégies d'acquisition de données. Certains acteurs vont pouvoir se permettre de lancer des prestations cartographiques sur le long terme en assurant des mises à jour régulières de leur base de données. D'autres, en revanche, vont se contenter de mises à jour partielles sur des portions de leur territoire jugées prioritaires. Enfin les besoins en matière de nomenclature d'occupation du sol sont très divers en fonction du

positionnement et de la structure. Certains axent leurs besoins vers des descriptions détaillées des espaces urbains (Agence d'urbanisme, SCOT) et d'autres attendent une meilleure prise en compte des espaces naturels et semi-naturels (PNR). La synthèse des besoins est rendue difficile. Les besoins exprimés seront donc fonction du niveau de connaissance et de compétence du commanditaire, des moyens financiers alloués, des délais d'exécution attendus, des données à disposition et des objectifs cartographiques du commanditaire. Il n'existe pas un besoin mais bien des besoins diversifiés en matière de BD Ocsol GE.

Aussi, les bureaux d'études interrogés confirment recourir à la photo-interprétation comme procédé de production cartographique. Maintenant, la majorité des structures sollicitées porte un intérêt pour des solutions cartographiques à moindre coût ou d'un meilleur rapport technique/prix. Ils expriment l'intérêt pour un service rapide qui leur permettrait d'acquérir de donnée à jour pour le suivi de leur territoire. Toutefois, ils attendent une qualité de production cartographique comparable à celle qu'ils connaissent déjà, à savoir celle issue de travaux de photo-interprétation.

Cependant, plusieurs personnes interrogées expriment quelques réticences vis-à-vis de l'automatisation des productions de BD Ocsol GE. Pour certains prestataires, des méthodologies automatisées comme l'approche GEOBIA (GEOgraphic-Object-Based Image Analysis) ont été testées et n'ont pas convaincu. Ils estiment que les technologies existantes (logiciels, algorithmes) ne sont pas ou sont mal adaptées aux besoins réels (échelle de travail, nomenclature, etc.). Ils évoquent une marge de progrès encore importante pour ces procédés. Toutefois plusieurs perçoivent un intérêt pour un service de segmentation semi-automatique de l'image à coût réduit pour gagner du temps sur la production par photo-interprétation. Certains sont préoccupés par la réintégration de leur BD Ocsol GE existante dans un nouveau processus de production semi-automatisé.

Au final, pour les personnes interrogées la recherche à entreprendre devra passer par des démonstrations convaincantes et la réalisation de références opérationnelles auprès de gestionnaires territoriaux. De plus, certains se positionnent déjà sur le projet de l'OCS GE de l'IGN à l'échelon national même si la visibilité sur ce produit standardisée est faible.

Le cabinet en charge de l'étude de marché terminait son rapport par un certain nombre de recommandations visant à orienter et valoriser la recherche appliquée que le bureau d'études souhaitait mener :

- fournir et communiquer des exemples de BD Ocsol GE réalisés à partir des développements expérimentaux qui seront réalisés (systématique) ;
- insister sur la reproductibilité des développements, si cela est possible, pour les entités qui réalisent des suivis d'évolution de l'occupation du sol entre deux périodes ;
- songer à un service de segmentation de l'image uniquement (rapide et à coût réduit), notamment pour les services et structures disposant de compétences de photo-interprétation en interne ;
- évaluer précisément le temps de production cartographique par Km² par rapport à méthode de production entièrement manuelle par photo-interprétation afin de dégager un prix à proposer

L'étude de marché a permis de nous rendre compte d'une demande en matière d'information sur l'occupation du sol importante, mais très mal définie. De plus, l'automatisation de la production pour ce type d'information à grande échelle semblait provoquer une certaine réticence. Pour autant, il apparaissait que les gestionnaires attendaient des réponses plus rapides, et surtout à moindre coûts.

2.2 L'Analyse Fonctionnelle (AF)

Afin de structurer au mieux la démarche de recherche appliquée, il nous est apparu nécessaire d'analyser ce qu'implique la réalisation régulière d'une BD Ocsol GE sur-mesure pour un producteur de données, en particulier pour un bureau d'études en environnement. Pour ce faire, nous avons utilisé une démarche d'Analyse Fonctionnelle (AF), largement pratiquée par les professionnels lors de la conception d'un produit ou d'un service. Ceci nous a permis d'identifier les leviers d'action pouvant conduire à une optimisation du processus de production.

2.2.1 Principe

L'Analyse Fonctionnelle (AF) consiste à rechercher et à caractériser les fonctions offertes par un produit pour satisfaire les besoins de son utilisateur (Tassinari 2006). Dans cette approche, on distingue généralement deux phases consécutives qui sont l'Analyse Fonctionnelle du Besoin (AFB) et l'Analyse Fonctionnelle Technique (AFT) : la première phase doit permettre de traduire le besoin par des fonctions réalisées par un produit. Le besoin se définit par une insatisfaction qui motive la création du produit. La fonction est l'action du produit ou l'une de ses dépendances exprimées par une finalité. Le produit est un élément concret qui répond au besoin à travers la satisfaction des fonctions. Le produit peut être un objet matériel comme une voiture ou un crayon ou il peut s'agir d'un objet immatériel comme un service, un programme ou un fichier informatique comme une BD Ocsol GE ; la seconde phase de l'analyse fonctionnelle (AFT) introduit les préoccupations d'ordre technologique jusqu'ici étrangère avec l'AFB. Elle conduit à la conception détaillée du produit décrit par des fonctions et des solutions technologiques. L'AF est pratiquée selon une approche systémique garantissant l'exhaustivité et la traçabilité des développements. En aucun cas, l'analyse fonctionnelle nuit à la créativité nécessaire pour l'émergence d'un produit.

Les commanditaires d'une BD Ocsol GE ont plusieurs moyens pour satisfaire leur besoin : ils ont la possibilité d'acquérir un produit d'occupation du sol standardisé (ou « clé en main ») de l'IGN ou vendu par certaines sociétés spécialisées ; ou ils peuvent faire une démarche auprès d'un bureau d'études pour acquérir un produit d'occupation du sol à grande échelle sur-mesure. Pour cette deuxième possibilité, l'analyse fonctionnelle est une démarche systématique pour le concepteur du produit BD Ocsol GE. Les raisons de son utilisation sont multiples :

- l'AF est un ensemble d'outils simples et compréhensibles par tous,
- l'AF apporte une expression consensuelle du besoin,
- l'AF garantit une expression stable des raisonnements dans le temps,
- l'AF est indispensable pour la maîtrise des coûts (financiers, humains et de temps)
- l'AF évite une convergence trop rapide vers une solution (ou produit) ayant peu de chance d'être la meilleure.

Dans ce chapitre, nous allons utiliser uniquement une partie de l'Analyse Fonctionnelle du Besoin (AFB). L'objectif est seulement de mettre en évidence le cadre de production des demandes régulières d'acquisition d'une BD Ocsol GE. Grâce à cette première AFB, nous voulons justifier les choix méthodologiques engagés dans ce travail de thèse. Une seconde AFB accompagnée cette fois-ci d'une Analyse Fonctionnelle Technique (AFT) sont menées plus loin (Chapitre 4) pour apporter une réponse au besoin d'optimisation de cette production en série. Il nous semble donc important d'évoquer la démarche de l'analyse fonctionnelle dans son ensemble.

La logique fonctionnelle oblige à se poser les bonnes questions sur les besoins des utilisateurs. Ces questions doivent toujours inclure les attentes objectives ou subjectives de ces derniers. De plus, ces questions doivent couvrir les contraintes d'un environnement particulier. Souvent, ce questionnement reste approximatif ou parfois contradictoire. Une bonne maîtrise de l'analyse fonctionnelle doit conduire à une bonne expression du besoin sur laquelle va se baser le choix des solutions techniques adéquates. Il existe de nombreuses ressources sur le sujet dans la littérature grise (cours en ligne, retours d'expérience...). Il existe également des méthodes déposées sur l'AF (méthode APTE, méthode SADT). Tous sont régis par un tronc commun propre à la pratique de l'AF. Malgré des tentatives de normalisation des termes et concepts, la multiplication des sources peut provoquer des confusions chez les utilisateurs de l'AF. Dans son ouvrage, Tassinari (2006), propose une pratique générique et complète de l'AF. Nous tentons d'apporter ici une synthèse de cette pratique (termes, concepts, démarche), suffisante pour appliquer et comprendre les deux démarches fonctionnelles que nous allons mener dans cette thèse.

2.2.1.1 Les fonctions

Selon l'AFNOR (Association Française de NORmalisation), la fonction est « *l'action d'un produit ou l'un de ses constituants exprimée exclusivement en terme de finalité* ». La finalité peut être liée au fonctionnement et à l'usage du produit mais aussi à la motivation de l'utilisateur pour le produit. La formulation des fonctions est normalisée. Elle se compose d'un verbe ou d'un groupe verbal caractérisant l'action et de compléments représentant l'interaction avec l'environnement du produit. Cette syntaxe est semblable à un langage de programmation. Elle est reconnue dans la communauté des utilisateurs de l'AF. Volontairement, le sujet de la phrase n'est pas mentionné mais il renvoie systématiquement au produit.

Il existe 2 grands types de fonctions :

- les Fonctions de Service (FS),
- les Fonctions Technique (FT).

Les fonctions de service sont distinguées en :

- Fonction Principale (FP),
- Fonction de Contrainte (FC).

La Fonction Principale (FP) est celle qui donne une raison pour laquelle le produit est créé. Il s'agit d'une fonction de service qui répond à l'attente de l'utilisateur.

La Fonction de Contrainte (FC) est celle qui limite la liberté du concepteur dans la réalisation du produit. Il s'agit également d'une fonction de service qui représentent les actions ou/et les réactions du produit par rapport à son environnement. À l'inverse de la FP, la FC n'induit pas un besoin de l'utilisateur. Les origines de la contrainte peuvent être multiples : technologie, données, environnement, coûts, règlements, normes, etc.

La Fonction Technique (FT) intervient lors de l'Analyse Fonctionnelle Technique (AFT). Elle est associée à une Fonction de Service (FS) pour laquelle elle formule une attente vers une solution technique. Il est important de ne pas confondre le terme de « fonction » avec celui de « solution ». Le premier exprime un résultat à atteindre et le second indique le moyen pour l'atteindre.

La compréhension du rôle de ces fonctions est importante car l'analyse fonctionnelle consiste à appliquer une démarche sur ces fonctions pour :

- les recenser,
- les ordonner,
- les caractériser,

2.2.1.2 Le recensement des fonctions

La conception d'un produit commence par le recensement le plus complet possible des fonctions de celui-ci. Un recensement incomplet conduira à une insatisfaction (ou satisfaction partielle) du besoin de l'utilisateur. Il existe de nombreuses méthodes pour effectuer une recherche des fonctions (Tassinari 2006). Elles peuvent être utilisées séparément ou complétées pour consolider la recherche. Nous utilisons ici la combinaison de plusieurs méthodes couramment utilisées dans la communauté des utilisateurs d'AF :

- la recherche informelle et spontanée,
- la recherche par l'étude du cycle de vie du produit,
- la recherche à partir de l'environnement du produit.

La recherche informelle et spontanée

La recherche informelle et spontanée s'apparente à un « *brain-storming* ». Elle consiste à former un groupe de travail avec des intervenants pluridisciplinaire. Le groupe doit comprendre au moins un utilisateur, un concepteur et un technicien du produit. Le groupe échange de manière libérée pour faire émerger un maximum d'observations, de remarques et d'idées sur le produit. Ce type de recherche privilégie la quantité plutôt que la qualité des informations. Le tri des informations s'effectue dans un second temps. Cette recherche peut être perçue comme une méthode introductive. Elle permet d'identifier facilement et rapidement des fonctions. Cependant elle doit impérativement s'accompagner de méthodes de recherche plus rigoureusement afin de valider les fonctions recensées.

La recherche par l'étude du cycle de vie

La recherche par l'étude du cycle de vie du produit induit que le produit matériel ou immatériel possède une durée de vie qu'il lui est propre. Cette vie peut être séquencée en un très grand nombre de phases. Par exemple, pour le « produit » BD Ocsol GE, il est possible de citer la phase de production, d'utilisation normale (ou principale), ou encore de mise à jour. Souvent, le produit est résumé selon le besoin qu'il doit satisfaire à travers son utilisation principale. Mais la prise en compte de chacune des phases de vie du produit rajoute des contraintes qui vont impacter sur sa conception. Cette méthode de recherche permet d'être exhaustif dans l'identification des fonctions. Cependant elle risque de faire apparaître un très grand nombre de fonctions. Pour améliorer la visibilité de l'AF, il convient d'identifier les phases déterminantes du produit pour recenser les fonctions utiles.

La recherche à partir de l'environnement du produit

La recherche à partir de l'environnement du produit consiste à décrire le produit dans son environnement (ou « milieu extérieur »). Le produit n'est jamais indépendant de son environnement. Il s'adapte à lui ou parfois il s'agit de l'environnement qui doit s'adapter à lui. De plus, l'environnement doit être caractérisé en fonction de certaines situations. Par exemple, l'utilisation du produit peut s'effectuer dans des conditions habituelles, occasionnelles ou même exceptionnelle. Toutes les entités qui sont identifiées comme extérieures au produit lors d'une de ses phases de vie (production, utilisation, etc.) sont appelées Éléments du Milieu Extérieur (EME). Les EME peuvent être de plusieurs natures :

- des personnes,
- des éléments physiques,
- des éléments immatériels (règlements, normes, données...)

La définition des EME doit être objective pour l'ensemble des protagonistes du projet. Par exemple, l'esthétique ou le goût ne peuvent pas être des EME car il n'est pas possible d'en donner une définition stable. Les EME conditionnent la formulation des fonctions de service auxquelles le produit doit répondre.

Une fois les EME identifiés, il convient de trouver les fonctions que le produit doit satisfaire vis-à-vis d'eux. Tous les EME doivent être reliés au produit ou bien reliés à plusieurs EME en passant par le produit. Chaque liaison correspond à une Fonction de Service (FS) et peut se définir comme l'action attendue du produit (ou réalisée par lui) pour répondre au besoin. La recherche des fonctions à partir de l'environnement doit être menée de préférence par un groupe de travail comme celui de la recherche spontanée. Cette préconisation limite le caractère aléatoire que pourrait engendrer un travail individuel. Seul, il est difficile d'imager l'intégralité des EME. En pratique, la recherche se réalise à l'aide d'un graphe des interacteurs (ou « *diagramme Pieuvre* » selon la méthode APTE) qui permet de matérialiser les liaisons entre le produit et son environnement (*Figure 16*).

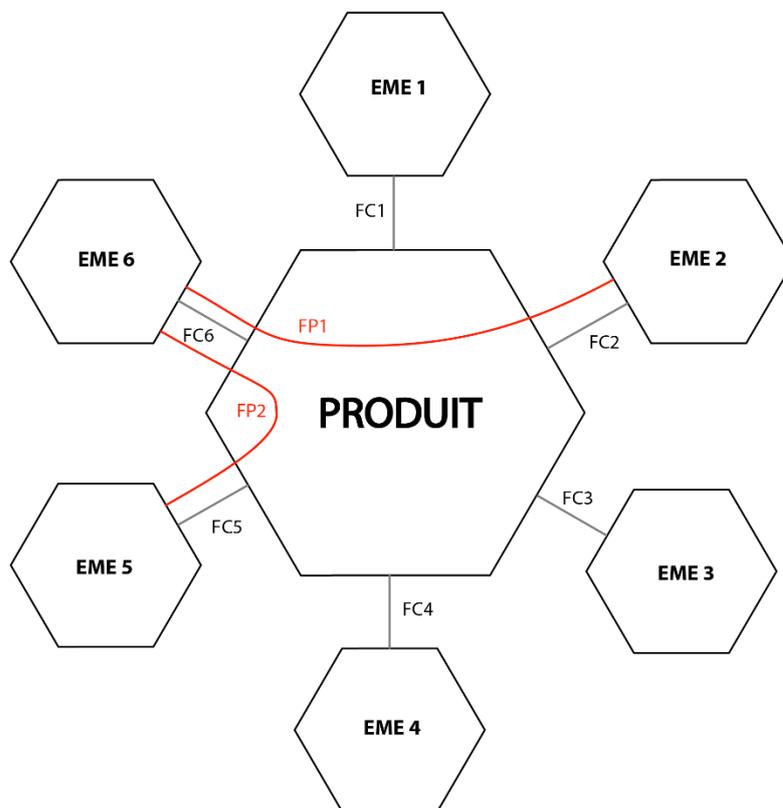


Figure 16. Graphe des interacteurs permettant l'identification des fonctions de services de type FP (Fonction Principale) et de type FC (Fonction de Contrainte) entre les différents Éléments du Milieu Extérieur (EME) et le produit

2.2.1.3 L'ordonnancement des fonctions

A ce stade de l'Analyse Fonctionnelle (AF), il n'est pas rare de se retrouver avec un grand nombre de fonctions de toutes natures identifiées lors du recensement. Il convient alors d'ordonner les fonctions afin de :

- vérifier la logique fonctionnelle,
- contrôler l'exhaustivité de l'AF,
- préfigurer le produit à travers sa logique fonctionnelle,
- servir de support à la recherche des solutions techniques.

Pour réaliser l'ordonnancement des fonctions, il est courant de recourir à la méthode le FAST (Functionnal Analysis System Technique) (Tassinari 2006). La méthode utilise un outil de représentation graphique qui ordonne les Fonctions de Service (FS) et les fonctions Technique (FT). Le diagramme démontre la logique fonctionnelle du produit et doit conduire aux solutions techniques mise en œuvre pour répondre aux fonctions associées.

Le diagramme FAST se présente sous la forme d'un arbre fonctionnelle dont la racine est la fonction de service. Cette dernière subit ensuite une décomposition fonctionnelle selon une ou plusieurs Fonctions Techniques (les troncs et les branches). Enfin, les fonctions techniques sont traduites en Solution Techniques (ST) (les feuilles). La construction d'un diagramme FAST est codifiée. Les fonctions (FT et FS) sont représentées par des blocs rectangulaires. Ces blocs sont

liés entre eux par des traits (non directionnels) qui les ordonnent. Les Fonctions Techniques sont nommées $FT_{ijk\dots}$ où i est le numéro associés à la fonction de service décrite (FS_i). j et k renseignent sur la position de la fonction technique dans l'arbre fonctionnel de FS_i (*Figure 17*).

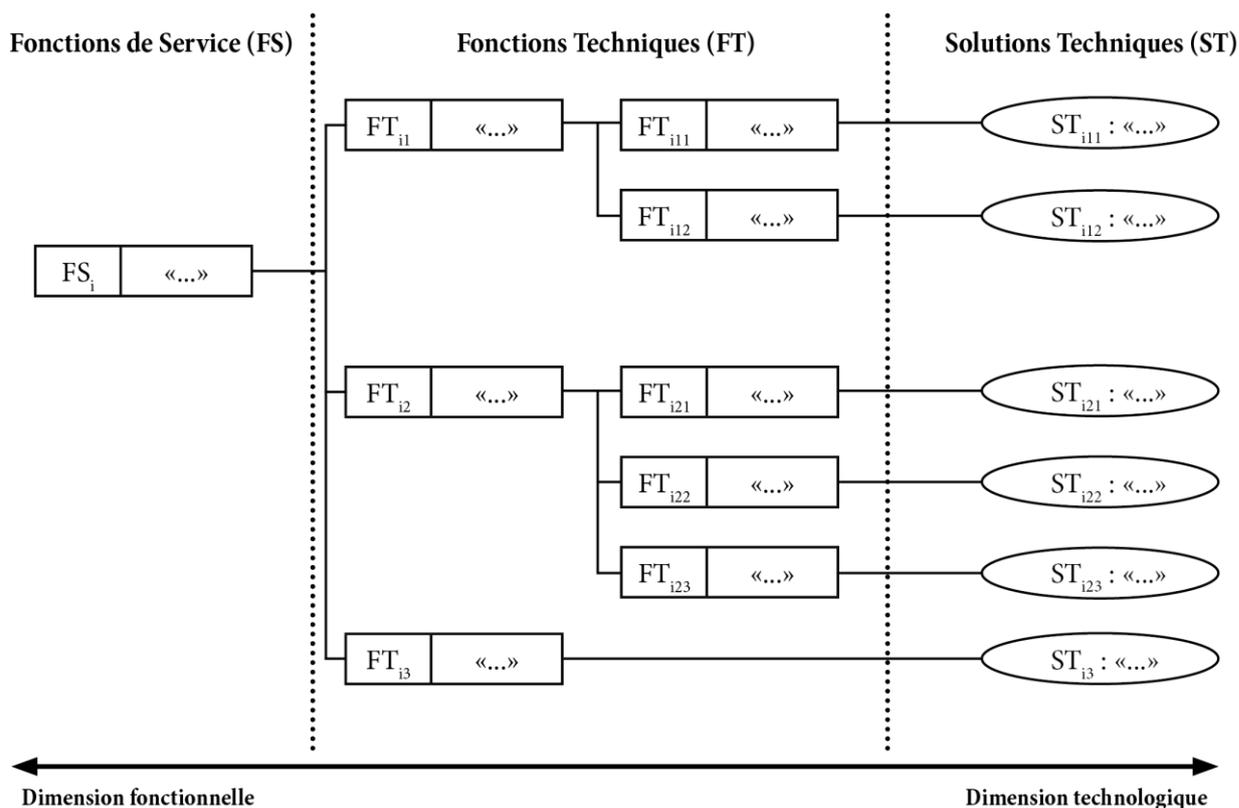


Figure 17. Structuration du diagramme FAST où i est le numéro de la fonction de service

Le positionnement de chaque fonction dans le diagramme FAST (*Figure 18*) est déterminé par les réponses aux trois questions suivantes :

- Pourquoi cette fonction doit-elle être remplie ?
- Comment ?
- Quand ?

Les réponses à ces questions sont apportées par les blocs immédiatement associés à la fonction (*Tableau 3*). Pour la lecture du FAST, il est important de préciser que la question « quand ? » ne réfère pas à la chronologie d'intervention des fonctions. Deux fonctions de même niveau (l'une au-dessus de l'autre) signifient simplement qu'ils ont la même importance fonctionnelle. En aucun cas, cela signifie qu'elles doivent être exécutées en même temps.

Tableau 3. Lire une fonction dans le diagramme FAST

Question	Réponse
Pourquoi la fonction existe-elle ?	Pour réaliser la fonction décrite dans le bloc de gauche
Comment la fonction est-elle réalisée ?	Grâce à la fonction décrite dans le bloc de droite
Quand la fonction intervient-elle ?	En même temps que la ou les fonction(s) décrite dans le ou les bloc(s) du dessus ou du dessous

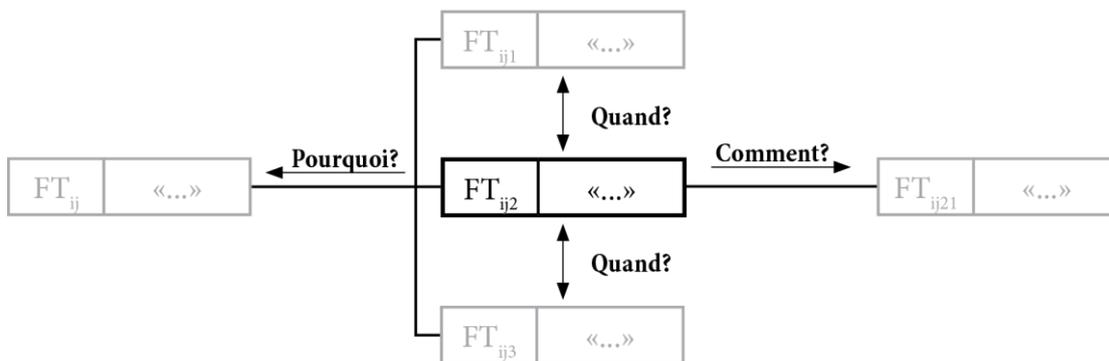


Figure 18. Positionnement d'une fonction dans le diagramme FAST

2.2.1.4 La caractérisation des fonctions

Il ne suffit pas de caractériser une fonction seulement par sa désignation. La fonction doit s'accompagner de plusieurs indicateurs de performance (Figure 19). Dès lors, une fonction se caractérise également par :

- son critère d'appréciation,
- son niveau,
- sa flexibilité.

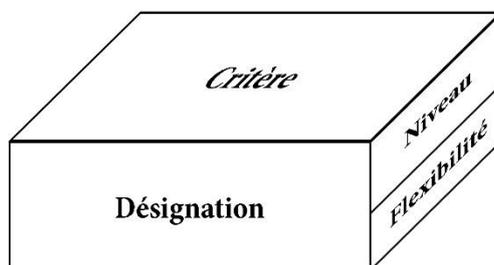


Figure 19. Caractéristiques d'une fonction (d'après Tassinari, 2006)

Selon l'AFNOR, le critère d'appréciation de la fonction, correspond au caractère retenu pour apprécier la manière dont une fonction est remplie ou une contrainte respectée. Très souvent, une fonction peut comporter plusieurs critères d'appréciation. Le critère peut s'apparenter à une mesure du degré de satisfaction de la fonction (Tassinari 2006). La détermination du critère est donc primordiale pour caractériser la fonction.

Le niveau se réfère au critère d'appréciation. Il correspond à la performance ou la précision attendue sur le critère déterminé. Selon l'AFNOR, « le niveau est repéré sur l'échelle adoptée pour un critère d'appréciation d'une fonction ». Dès lors le niveau peut se traduire par une valeur chiffré si le critère est « objectif » ou une référence si le critère est « subjectif » (Tassinari 2006).

La flexibilité est également associée au critère. Il correspond à une indication de tolérance appliqué au critère. Il permet de préciser le degré de négociabilité ou d'impérativité du critère. La flexibilité est couramment codifiée de F0 à F3 (Tableau 4). L'apport d'une flexibilité consiste à introduire une marge de manœuvre entre le concepteur et l'utilisateur. Elle fournit une fourchette d'acceptabilité sur le niveau du critère pour que la fonction soit comme même satisfaite.

Tableau 4. Classes de flexibilité couramment utilisées

Classe de flexibilité	Tolérance	Négociabilité
F0	Flexibilité nulle	Niveau impératif
F1	Flexibilité faible	Niveau peu négociable
F2	Flexibilité moyenne	Niveau négociable
F3	Flexibilité forte	Niveau très négociable

2.2.2 Application pour la production régulière de BD Ocsol GE sur-mesure

Dans cette section, nous utilisons une partie de la démarche de l'Analyse Fonctionnelle du Besoin (AFB) pour la production régulière de BD Ocsol GE. Nous voulons désigner l'ensemble des fonctions à satisfaire pour répondre à ce besoin. Nous ne tenterons pas de les ordonner, de les caractériser et de les hiérarchiser. En effet, Nous connaissons par avance la solution technique habituellement utilisé pour satisfaire l'ensemble des fonctions nécessaire pour produire en série des BD Ocsol GE. La photo-interprétation est la principale réponse technique à ce besoin. Nous voulons plutôt argumenter dans cette section, en quoi la caractérisation des Fonctions de Service (FS) d'une BD Ocsol GE dans sa phase de production peut variée selon les prestations demandées. Nous présentons les contraintes dans lesquels se positionne le travail de thèse. De cette manière, nous justifions comment seront pris les choix méthodologiques pour tenter une optimisation du procédé de production. Pour y parvenir, nous procédons à une recherche informelle et spontanée des fonctions d'une BD Ocsol GE dans le cadre d'une production en série. La phase de vie que nous analysons est principalement la phase de production. Toutefois, nous n'excluons pas une recherche de fonctions dans d'autres phases de vie (utilisation principale, mise à jour). Enfin nous validons la recherche par l'analyse de l'environnement et de l'adaptation ou les interactions de celui-ci avec le produit.

Une analyse fonctionnelle du besoin, cette fois-ci complète, sera menée dans le chapitre 4 lié aux choix de développement expérimental qui découleront de ce présent chapitre.

2.2.2.1 « Brain-storming » sur la production régulière d'une BD Ocsol GE

Nous débutons l'analyse Fonctionnelle du Besoin (AFB) par une recherche intuitive. Nous formons un groupe de travail multidisciplinaire pour une séance de créativité. Le groupe est composé de 8 personnes. Certains membres de ce groupe ont plusieurs compétences :

- 3 utilisateurs de BD Ocsol GE,
- 4 photo-interprètes,
- 2 chef(fe)s de projet (concepteurs),
- 2 télédéTECTEURS,
- 5 géomaticiens.

L'objectif de l'animation est de conduire les protagonistes vers des discussions multidirectionnelles. Le produit BD Ocsol GE et sa production en série doit être abordé sous plusieurs éclairages. Sept grands thèmes sont abordés par le groupe.

L'objectif d'une BD Ocsol GE

La réalisation d'une BD Ocsol GE répond souvent à des grandes problématiques proches (étalement urbain, trames écologiques, etc.). Toutefois, la définition précise des objectifs d'étude par les commanditaires peut varier de façon importante. Certains d'entre eux peuvent focaliser leurs attentes sur des caractéristiques particulières de leur territoire (espaces urbains, espaces agricoles, zones humides etc.) et en délaissier d'autres. Même si le producteur peut jouer un rôle de conseil et être force de proposition auprès de son client, les décisions finales sont prises par ce dernier. Le producteur a une obligation de résultat face à l'objectif formulé par le commanditaire.

Les Commanditaires

Le commanditaire et le ou les utilisateur(s) pour qui la BD Ocsol GE est destinée sont eux-mêmes des variables. Leurs connaissances et compétences sur les BD Ocsol GE peuvent s'avérer être un facteur important dans le déroulement de la prestation. Elle détermine le niveau et la qualité des échanges entre le commanditaire et le producteur. Une bonne capacité à échanger permet de formuler, de façon claire et précise, les objectifs d'étude dès le départ. Cela évite, les redéfinitions et modifications de consigne en cours de prestation.

Les territoires

Une BD Ocsol GE décrit un territoire. Cette variable renferme la complexité paysagère et la problématique sociétale auxquelles le producteur peut faire face lors de la construction d'une BD Ocsol GE. Couvrir un territoire méditerranéen, une zone de haute montagne, un espace littoral, un secteur agricole ouvert ou bocager ou un espace fortement urbanisé constitue un exercice de production différent.

Les données

Le producteur de données cartographiques qui n'est pas, lui-même, producteur-distributeur d'orthophotographies ou d'images satellites, dispose d'une faible marge de manœuvre pour le choix des données qu'il va pouvoir mobiliser pour la construction de la BD Ocsol GE. Très souvent, le commanditaire a déjà établi la liste des données qu'il a en sa possession et qu'il pourra mettre à disposition au producteur. Souvent, on retrouve les mêmes types de données (BD ORTHO®IGN, BD TOPO®IGN, Registre Parcellaire Graphique, etc.). Toutefois, il est difficile pour un producteur de concevoir un processus de production avec des données précises s'il n'est pas certain de pouvoir en disposer. De plus la qualité des données mise à disposition est variable. Dans certains cas, le producteur peut être confronté à des données incomplètes ou approximatives. Les images de référence à interpréter, même issues d'un même capteur ou d'un même produit comme la BD ORTHO®IGN, peuvent présenter des différences de qualité. Les raisons sont dues à la date d'enregistrement, aux techniques et conditions d'acquisition de ces images. Par exemple, pour la BD ORTHO®IGN, les millésimes du début des années 2000 présentent des orthographies de moins bonne qualité que celles produites après 2010. Lorsque le site d'étude est localisé à cheval sur deux territoires ayant fait l'objet de deux campagnes

d'acquisition, le producteur peut faire face à des effets de bordure d'images difficilement maîtrisables.

La description de l'occupation du sol

La description de l'occupation du sol est définie par une nomenclature inédite, spécialement élaborée pour l'étude. Il s'agit d'une variable rédhitive. Très souvent, elle est composée d'un grand nombre de classes. En moyenne, 60 classes sont attendues pour décrire l'occupation du sol à grande échelle sur un territoire. Ce nombre peut varier d'une demande à une autre en fonction des besoins et des moyens de chaque commanditaire. Décrire l'occupation du sol avec un grand nombre de classes possède inévitablement un coût financier plus important. Ainsi pour limiter les coûts, certains commanditaires procèdent à des choix de classes prioritaires. De plus, chaque commanditaire veut pouvoir mettre en valeur des aspects paysagers de son territoire qui lui sont propres. Il peut s'agir d'une pratique agricole (oliveraies, truffières, vignobles), un tissu urbain particulier (périurbanisation, habitat isolé, habitat dans parc paysager, etc.) ou encore des zones humides remarquables. Les commanditaires insistent pour l'intégration de classes uniques dans leur BD Ocsol GE. Il est alors difficile, pour le producteur, d'envisager l'ensemble des cas de figure auxquels il pourra être confronté. La possibilité de construire une nomenclature particulière justifie le recours à une commande auprès d'un bureau d'étude au lieu d'utiliser les produits standards de l'IGN ou de sociétés spécialisées.

La nomenclature est systématiquement accompagnée d'un document décrivant les critères (ou clés) d'identification et d'interprétation de chaque classe d'occupation du sol. Ce document est crucial pour les photo-interprètes. Son rôle principal est de donner une définition précise et exhaustive de la classe à interpréter. Le document donne les cas de figures incluent ou excluent de la classe. Souvent, la classe est illustrée par des exemples identifiés sur différents supports d'imagerie. Le document est parfois étayé par des clés (ou indices) d'interprétations précises. Par exemple, un verger est identifiable par ses alignements d'arbres au sein d'une parcelle agricole. Plus rarement, le document est complété par des arbres de décision pour les classes les plus délicates à interpréter (maquis, garrigues, broussailles, pelouses, etc.). Certains proposent même des modèles comparatifs pour estimer la densité d'un élément paysager (arbres, maisons, surfaces enherbées, etc.). L'exhaustivité de ce document est souvent variable d'une prestation à une autre. Certains commanditaires bénéficient des efforts mutualisés animés par les CRIGE. Par exemple, le CRIGE PACA met à disposition de son réseau un document complet décrivant les clés d'interprétation des classes de la nomenclature qu'il préconise pour l'élaboration d'une BD Ocsol GE sur leur région (Louvet et Ajoué 2014). D'autres commanditaires ne profitent pas de cet avantage. Le document d'aide à l'interprétation est beaucoup moins complet. Dans cette situation, le producteur s'expose plus à des risques d'incompréhension de la classe et des redéfinitions en cours de prestation. Ce risque engendre inévitablement des démarches de correction pour les secteurs déjà photo-interprétés selon une consigne erronée. Il est donc impératif de limiter ce risque.

Les règles cartographiques

Les consignes de cartographie sont également des variables. Même si la tendance des productions actuelles s'oriente vers une homogénéisation des échelles et des règles pour la

construction des BD Ocsol GE (OCS GE@IGN, CRIGE PACA, PPige), des divergences de consignes subsistent. Par exemple, les règles topologiques et géométriques des polygones d'occupation du sol peuvent varier d'une prestation à une autre. Les superficies minimales de saisie des polygones d'occupation du sol sont souvent définies différemment selon les classes d'occupation du sol.

La mise à jour cartographique

La mise à jour de la BD Ocsol GE est une variable importante. Elle constitue une nouvelle phase de vie pour la BD Ocsol GE. Cette phase conditionne la capacité pour le producteur de pouvoir mettre à jour la base de données. Il y a deux types de mise à jour : la mise à jour de maintenance qui apporte des correctifs ou des enrichissements sur la BD Ocsol GE déjà créée ; la mise à jour de millésime qui permet de réaliser pour une seconde année l'actualisation du millésime produit. Le producteur doit donc être capable de prévoir les passerelles méthodologiques nécessaires pour les deux types de mise à jour.

La gestion de projet

Les délais et coûts de réalisation de la BD Ocsol GE sont également des variables de production. Ils ne sont pas forcément bien pris en compte. Pourtant, le producteur doit pouvoir composer avec un calendrier de réalisation et un budget prévisionnel. Pour respecter son calendrier et le prix vendu, le producteur doit limiter les redéfinitions d'objectifs et les modifications de consigne lors de la cartographie. Il doit également éviter de remettre en question sa méthode de production en cours de processus au risque de décaler les échéances et de perdre de l'argent.

2.2.2.2 L'environnement et la désignation des Fonctions de Service (FS)

Le « *brain-storming* » a dégagé un certain nombre d'Éléments du Milieu Extérieur (EME) de la BD Ocsol GE lors de sa production en série. Pour disposer d'une image claire de cet environnement, nous utilisons un graphe des interacteurs (le « *diagramme Pieuvre* »). Celui-ci nous permet d'établir et formuler facilement les relations entre les EME et le produit par des Fonctions de Service (FS) (*Figure 20*).

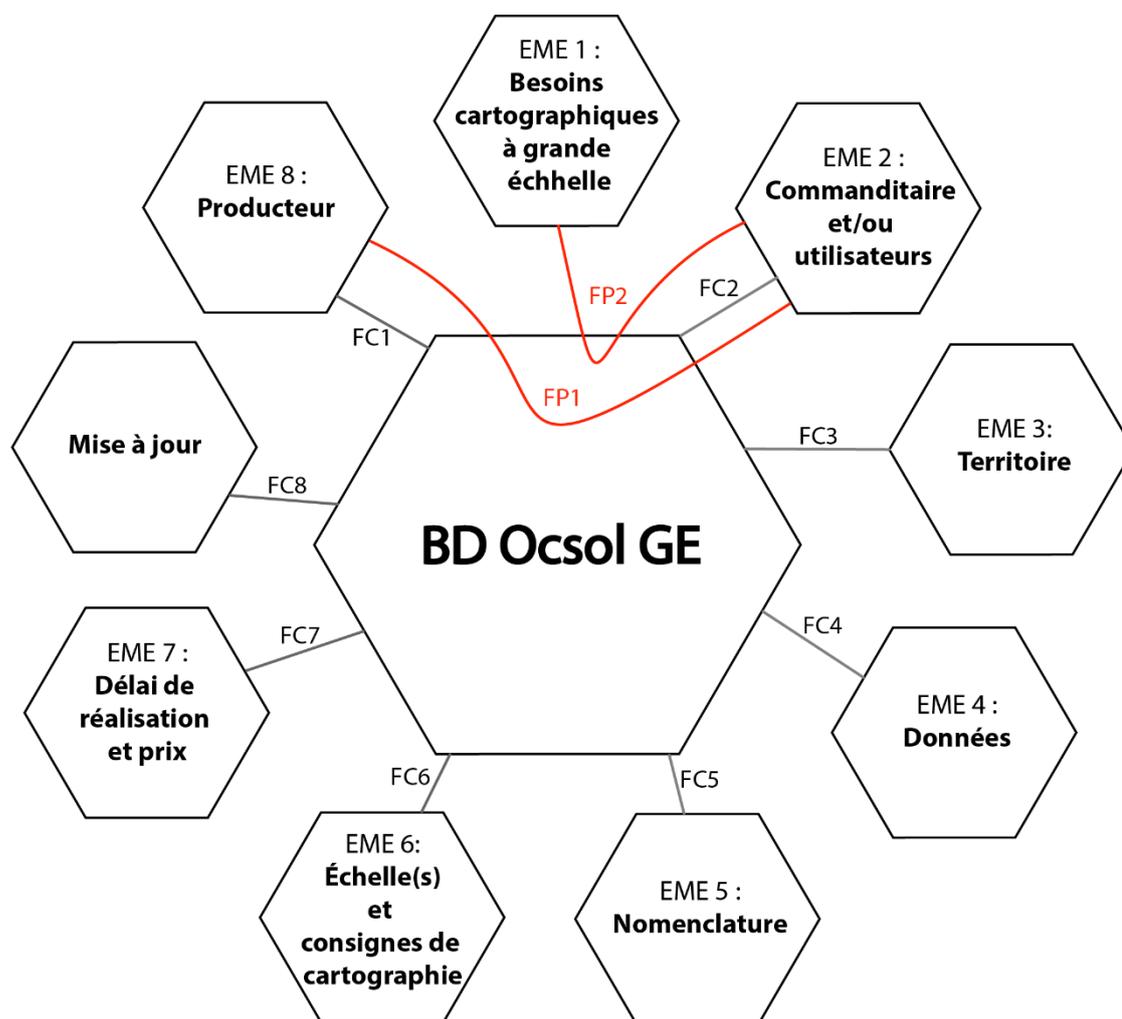


Figure 20. Graphe des interacteurs permettant l'identification des fonctions de service de type FP (Fonction Principale) et de type FC (Fonction de Contrainte) entre les différents Éléments du Milieu Extérieur (EME) et le produit BD Ocsol GE pour sa phase de production

Pour la phase de vie « production » du produit BD Ocsol GE, nous identifions neuf EME qui génèrent deux fonctions principales, numérotées FP1 et FP2 ainsi que huit fonctions de contrainte, numérotées de FC1 à FC8 :

- FP1 : permettre au producteur d'être rémunéré par le commanditaire et/ou les utilisateurs ;
- FP2 : permettre au commanditaire et/ou aux utilisateurs de répondre aux besoins cartographiques ;
- FC1 : être rentable pour le producteur ;
- FC2 : être facilement utilisable pour le commanditaire et/ou les utilisateurs ;
- FC3 : s'adapter au territoire ;
- FC4 : s'adapter aux données ;
- FC5 : respecter la nomenclature de l'occupation du sol ;
- FC6 : respecter le ou les échelles et les consignes de cartographie ;
- FC7 : respecter un délai de réalisation et un prix.
- FC8 : prévoir les mises à jour de la BD Ocsol GE

Pour rappel, nous ne poursuivons pas la démarche de l'analyse fonctionnelle par les phases d'ordonnancement, de caractérisation et de hiérarchisation des fonctions ici désignées. Cela n'est pas nécessaire dans notre recherche car nous connaissons déjà la réponse technique habituellement employé pour produire en série des BD Ocsol GE. La solution technique est en grande partie apportée par la Photo-Interprétation Assistée par Ordinateur (PIAO). Nous avons d'ores et déjà posé le cadre dans lequel va s'inscrire notre recherche d'optimisation du procédé de production. Il s'agit d'un besoin de production régit par de nombreuses variables difficilement contrôlable par le producteur. La section suivante a pour objectif de détailler un système de production entièrement basé sur la PIAO. De cette manière, nous voulons pouvoir exprimer un besoin intelligible et justifié d'optimisation de la production en série de BD Ocsol GE.

2.3 La photo-interprétation comme solution de production

2.3.1 La photo-interprétation répond encore à un besoin

Se positionner comme un producteur régulier de BD Ocsol GE signifie être capable d'intégrer toutes les variables décrites dans les sections précédentes dans sa méthode de production. Il s'agit d'un exercice périlleux. Il est difficile de prévoir l'intégralité des cas de figures qui vont se présenter pour décrire un territoire déterminé. Très souvent, le processus de production est ponctué de redéfinitions des classes d'occupation du sol. Les modifications des consignes d'interprétation sont aussi récurrentes. L'identification d'éléments géographiques particuliers non perçus au début du projet conduit parfois à devoir les intégrer en cours de production. À ces préoccupations, il faut rajouter les changements d'interlocuteurs (utilisateur, commanditaire), les diverses formulations des objectifs d'étude, l'adaptation à différents types de données, des consignes de production particulières et la prise en compte de nomenclatures sur mesure.

Dans ces conditions, la robustesse d'une méthode de production est difficile à assurer. La Photo-Interprétation Assistée par Ordinateur (PIAO) est perçue ici, comme le meilleur moyen de résoudre cette équation de production. Même si la PIAO est une pratique lourde pour le producteur, elle conserve des avantages indéniables par rapport aux techniques de traitements numériques de l'image pour ce type de production. La PIAO est une solution de souplesse capable d'absorber la majorité des variables de production. Le photo-interprète apporte une capacité inégalable de formation, de compréhension et d'apprentissage d'un phénomène, même complexe sur l'image (Provencher et Dubois 2007). La pratique continue de la photo-interprétation enrichit l'expertise intellectuelle de celui qui la mène. Le photo-interprète est un « *outil* » qui s'affute au fil de la pratique en termes de rapidité d'exécution et de justesse d'interprétation. Il devient une ressource de production incontournable, de plus en plus performante et capable d'apporter un regard critique sur la production afin d'enrichir et de capitaliser les expériences. Du point de vue du commanditaire (ou utilisateur(s)) de la BD Ocsol GE, il est plus facile de comprendre la démarche intellectuelle de la photo-interprétation et de se l'approprier que de s'initier aux traitements numériques, souvent plus complexe et exigeant des compétences de spécialistes.

L'expertise humaine mise à contribution lors de la photo-interprétation semble, aujourd'hui, toujours incontournable pour répondre aux attentes portées sur les BD Ocsol GE. Toutefois, nous voulons décortiquer le processus de production par PIAO pour cibler un potentiel levier d'action

en vue d'optimiser sa réalisation. Notre hypothèse nous conduit à envisager l'ajout de traitements numériques de l'image pour assister le travail du photo-interprète.

2.3.2 La méthodologie de production par photo-interprétation

De manière générale, la construction d'une BD Ocsol GE par photo-interprétation suit une méthodologie de production relativement récurrente. Ce processus est observé chez la plupart des producteurs de données sur l'occupation du sol. La raison repose sur les contraintes imposées par les commanditaires et les moyens mobilisés pour atteindre les objectifs de production. Il est possible de résumer ce processus de production en quatre grandes étapes. La *Figure 21* présente le déroulement général de ces étapes conduisant à la fourniture d'une BD Ocsol GE par photo-interprétation. Ce schéma constitue le point de départ pour la recherche d'une solution optimisée de production d'une BD Ocsol GE.

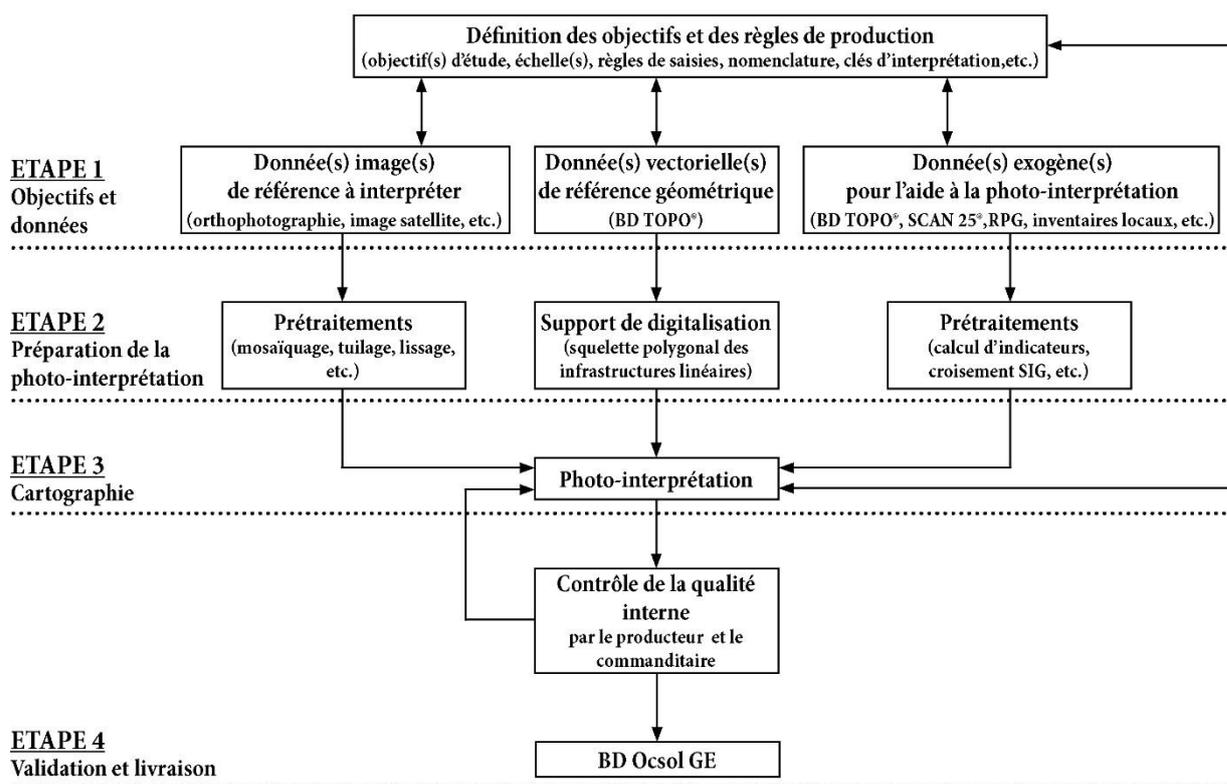


Figure 21. Logigramme de production pour la réalisation d'une BD Ocsol GE par photo-interprétation

2.3.2.1 Étape 1 : les objectifs et les données

L'étape 1 est l'étape préparatoire pour l'ensemble de la chaîne de production. C'est ici que sont formulés les objectifs, définies les règles et sélectionnées les données qui vont contraindre la production de la BD Ocsol GE. Cette étape est, en général, réalisée en collaboration avec le commanditaire de la BD Ocsol GE.

Dans un premier temps il s'agit d'une étape de formulation du besoin cartographique. Le commanditaire (ou gestionnaire) formule un besoin sous forme de problème à observer et à suivre sur son territoire (ontologie du problème). Par exemple, le gestionnaire exprime un besoin de disposer de données spatiales précises sur l'occupation du sol pour étudier le phénomène

d'étalement urbain sur son territoire. Un autre souhaiterait ce même type de données pour mener des actions en faveur d'une trame écologique efficace sur son territoire. Ces deux exemples montrent qu'il existe plusieurs applications possibles pour justifier le recours à une BD Ocsol GE.

La modélisation de l'ontologie du problème en une ontologie du produit est ensuite l'objet de la phase de conception d'une BD Ocsol GE adaptée. En d'autres termes, il s'agit de l'Analyse Fonctionnelle de la BD Ocsol GE voulue. Ce n'est pas obligatoirement l'apanage du producteur. Elle peut être menée par le gestionnaire lui-même ou par un groupe de travail pouvant mobiliser le gestionnaire, un organisme de mutualisation des expériences (CRIGE), un laboratoire de recherche et le producteur. Le cahier des charges (ou CCTP) est le résultat du travail de modélisation. Il pose un cadre théorique pour l'obtention d'un produit « idéal » pour répondre au besoin exprimé par le commanditaire. Il s'agit d'un document contractuel dans lequel est formulé toutes les contraintes et les règles auxquelles le producteur devra se confronter (échelles, règles de saisies, nomenclature).

La phase de modélisation est avant tout basée sur les données mobilisables pour la construction de la BD Ocsol GE. Les données contraignent elles-mêmes la réalisation d'une BD Ocsol GE. Le choix d'une donnée plutôt qu'une autre peut être la conséquence de plusieurs facteurs comme l'absence d'une donnée sur un territoire, une donnée obsolète ou un coût financier important. Au final, même s'il est identifié, théoriquement, qu'une donnée propose des caractéristiques « idéales » pour répondre aux attentes exprimées sur la BD Ocsol GE, pour des raisons de coûts, le choix peut se porter sur une donnée alternative en connaissance de ses limites. Par conséquent, le choix ou l'utilisation contrainte d'une donnée peut impacter le modèle de production de façon plus ou moins importante.

Il existe trois catégories de données :

- l'imagerie de référence à interpréter,
- les données vectorielles de référence géométrique,
- les données exogènes pour l'aide à l'interprétation.

L'imagerie de référence à interpréter est la donnée principale pour la réalisation de la BD Ocsol GE. Le choix de cette donnée est crucial. Pour une production par photo-interprétation, les critères de sélection de la donnée image portent sur sa date d'acquisition, sa résolution spatiale et sa disponibilité. En France, la BD ORTHO® de l'IGN est très souvent la réponse à ce besoin. Sa fréquence de mise à jour correspond, dans la plupart des cas, à des pas de temps satisfaisants pour les gestionnaires d'un territoire. Sa résolution spatiale de 50 cm ou de 20 cm (ORTHO HR®) se prête bien à un exercice de photo-interprétation à grande échelle. Enfin, sa disponibilité est facilitée par sa diffusion gratuite depuis le 1er janvier 2012 pour l'exécution de missions de services publics. Malgré tout, la BD ORTHO® n'est pas la seule alternative à la donnée image de référence. Pendant longtemps, la donnée image représentait une part importante du coût financier de la production. L'achat d'une image satellite à Très Haute Résolution Spatiale (THRS) pour un exercice de photo-interprétation était rarement envisagé. La rapide évolution des techniques d'acquisitions additionnées à l'émergence des organisations de mutualisation des achats permettent de diminuer considérablement ce coût. Peu à peu, les images satellites issues des capteurs Pléiades ou RapidEye sont positionnées comme des alternatives à la BD ORTHO®.

Les données vectorielles de référence géométrique ont pour vocation à être utilisées comme un « squelette » polygonal de référence pour la construction de la BD Ocsol GE sur lequel vient s'appuyer la numérisation du paysage par le photo-interprète. Cette catégorie de données n'est pas obligatoire pour produire une BD Ocsol GE. En France, il est courant d'utiliser la BD TOPO® pour cela. Elle s'avère une source de données incontournable pour alimenter une BD Ocsol GE. La composante « réseaux » de la BD TOPO® offre une cartographie de façon exhaustive l'ensemble du réseau viaire sur le territoire national. Grâce à cette donnée, il est possible de récupérer un « squelette » de polygones des infrastructures linéaires sur un territoire. Elle permet d'obtenir un cadre de photo-interprétation efficace.

Les données exogènes pour l'aide à l'interprétation sont les données utiles pour aider le photo-interprète dans sa décision d'attribution d'une classe d'occupation du sol à un polygone. En fonction des données mobilisables, le photo-interprète peut disposer d'une batterie de données vectorielles ou raster pour l'assister dans sa tâche. Parmi les plus courantes, on recense la BD TOPO®, le SCAN 25®, le Registre Parcellaire Graphique (RPG), la BD Forêt®, des orthophotographies ou images satellites à des dates différentes. Il peut également disposer de données complémentaires dites de métier (inventaires des zones humides, des équipements, etc.). Le nombre de données exogènes est variable en fonction des territoires. Sur les territoires fortement urbanisés, souvent, de nombreuses données peuvent être mobilisées. En revanche, sur des territoires plus ruraux, les données exogènes sont moins nombreuses. Néanmoins, la quantité de données exogènes n'est pas forcément une assurance de la qualité d'interprétation. En trop grand nombre, elles peuvent dans certains cas se contredire et générer de la confusion chez le photo-interprète.

2.3.2.2 Étape 2 : préparation de la photo-interprétation

L'étape 2 constitue, cette fois-ci, la préparation de l'exercice de photo-interprétation. Elle se focalise sur les prétraitements des trois catégories de données précédemment décrite. L'objectif est de formater ces données « brutes » pour faciliter la tâche du photo-interprète.

Pour la ou les donnée(s) image(s) à interpréter, les prétraitements ont pour but d'améliorer la visualisation de l'image. Très souvent, la ou les image(s) de référence revêtent des caractéristiques différentes lors de leur mise à disposition par le commanditaire au producteur. Le producteur se retrouve confronté à des formats de fichier différents, des projections géographiques différentes, des portions d'image à reconstituer ou encore des volumes de données importants. Il convient donc au producteur de standardiser dès le départ, ces données pour ne pas avoir à faire face à des problèmes de visualisation de l'image de référence en cours de photo-interprétation.

Concernant les données vectorielles de référence géométrique, les prétraitements portent sur la sélection et la transformation d'informations spatiales pertinentes au sein de ces fichiers SIG. Souvent, ce travail préparatoire consiste à pratiquer un « squelette » de polygones des infrastructures linéaires (routes et voies ferrées) à partir de la BD TOPO®. À l'état brut, il n'est pas possible de l'intégrer dans la construction de la BD Ocsol GE. Tout d'abord, son exhaustivité n'est pas pertinente pour les objectifs d'utilisation d'une BD Ocsol GE. Cette dernière n'a pour objet de devenir un inventaire des infrastructures routières et ferroviaires. Ainsi, il est nécessaire d'effectuer une sélection des informations considérées comme les plus importantes pour la base

de données (autoroutes, routes nationales, échangeurs, etc.). Enfin ces données spatiales, représentées sous forme de polygones, doivent subir une transformation en polygone pour prendre en compte l'emprise au sol réelle de l'infrastructure routière ou ferroviaire. Par exemple, l'emprise au sol d'une autoroute est beaucoup plus importante que celle d'une route départementale.

Enfin, les prétraitements des données exogènes peuvent être très variables en fonction des données disponibles et de leur pertinence pour l'étude. L'objectif est de proposer au photo-interprète, des informations complémentaires pertinentes, fiables et synthétiques. Les prétraitements sont de plusieurs natures : des croisements SIG, des classifications simplifiées, des modélisations d'indicateurs (densité, morphologie, statistiques descriptives), ou encore des traitements de l'image pour mettre en valeur certaines informations contenues dans l'image (NDVI, ACP ...).

2.3.2.3 Étape 3 : la production

L'étape 3 correspond à l'exercice de production de la BD Ocsol GE par photo-interprétation. En règle générale, elle constitue l'étape la plus longue du processus de production. Elle est réalisée, le plus souvent, par une équipe de photo-interprètes. Cet exercice exige une coordination rigoureuse entre les personnels. La photo-interprétation est réalisée sur la ou les données images de référence, à partir d'un « *squelette* » de polygones de référence et à l'aide de données exogènes (vecteurs ou raster). La photo-interprétation est contrainte par des consignes de cartographie (*section 2.2.2.1*). Le photo-interprète est soumis aux règles de saisie des polygones d'occupation du sol (échelles, UMC et LMC). Il doit également interpréter dans le respect de la nomenclature mise en place.

Toutefois, la photo-interprétation n'est pas une simple étape d'exécution de règles de saisie ou d'application d'une nomenclature stricte. Le photo-interprète a la capacité de faire remonter des cas de figure non prévus lors de l'élaboration du cahier des charges. Il capitalise un retour d'expérience sur la production. Plusieurs cas de figure sont possibles : un élément du paysage peut être difficile à intégrer dans une des classes de la nomenclature et ainsi exiger la création d'une nouvelle classe d'occupation du sol ; l'unité minimale de cartographie pour une classe d'occupation du sol peut s'avérer inappropriée au regard des éléments cartographiés ; les critères d'interprétation d'une classe d'occupation du sol (*section 2.2.2.1*) peut apparaître insuffisante et confuse. Au final, le photo-interprète a une véritable responsabilité dans le processus de production. Il est le premier garant du respect des règles de production exprimées lors de la définition du besoin cartographique. Mais il est également une ressource précieuse pour l'enrichissement et l'adaptation de la base de données au territoire étudié.

2.3.2.4 Étape 4 : la validation

L'ultime étape du processus de production d'une BD Ocsol GE est la validation de celle-ci. La BD Ocsol GE est confrontée à un contrôle de qualité interne. Celui-ci consiste en une mesure du niveau de similitude existant entre la base de données spatialisées produite et celle définie dans le cahier des charges. Le contrôle est mené, dans un premier temps par l'organisme producteur. Il veille à la conformité géométrique, topologique et sémantique des polygones composant la base de données spatiale. Il veille également à la conformité de la production avec les règles établies au départ et durant la photo-interprétation. Le ou la chef(fe) de projet mène un

contrôle des attributions de classes d'occupation du sol. Le contrôle est effectué à l'aide d'un échantillonnage aléatoire des polygones de chaque classe proportionnellement à leurs représentativités sur le territoire. Si le contrôle qualité identifie des erreurs, le produit est renvoyé aux photo-interprètes pour une correction. Une fois validée, le producteur peut procéder à la livraison d'une version bêta de celle-ci auprès de son commanditaire. Ce dernier a également une tâche de contrôle qualité interne. Cette phase est équivalente au contrôle mené par le producteur et entraîne le même retour à la production si une erreur est constatée. Dans tous les cas, si la BD Ocsol GE subit une correction, elle doit systématiquement repasser par un contrôle qualité interne exercé par le producteur.

Une fois que la BD Ocsol GE a passé tous les contrôles, elle peut être livrée officiellement au commanditaire puis diffusée par ce dernier. Généralement, une période de maintenance est prévue pour rectifier, de façon ponctuelle, les erreurs de digitalisation et/ou d'interprétation non identifiées lors du contrôle.

2.4 Recherche des pistes d'optimisation de la photo-interprétation

Nous avons distingué quatre étapes dans le processus de production en série de BD Ocsol GE par photo-interprétation : le choix des données, la préparation des données, la photo-interprétation et la validation. Pour toutes ces étapes, il est possible d'exprimer une ou plusieurs hypothèses permettant d'optimiser l'étape elle-même ou sa conséquence sur une autre étape et ainsi l'ensemble du processus de production. Toutefois, la vérification de chacune de ces hypothèses n'aura pas forcément le même impact sur le besoin unanime d'améliorer les temps, les coûts et la qualité de production en série de BD Ocsol GE par photo-interprétation. Il s'agit maintenant d'identifier l'hypothèse offrant la meilleure valeur ajoutée à ce besoin global.

Nous écartons d'emblée la possibilité d'intervenir sur la première étape liée aux choix des données pour apporter un ou des éléments d'optimisation. Le produit recherché n'est pas standardisé. Cette étape est systématiquement inédite et nécessite de prendre le temps de définir les besoins avec le client en fonction des données qu'il dispose. Dans ce contexte il est difficile d'établir une hypothèse basée sur le choix d'une donnée particulière si nous ne sommes pas certains d'en disposer pour chaque prestation.

Nous choisissons également d'écarter la quatrième étape associée à la validation de la BD Ocsol GE avant sa livraison au client. Nous considérons cette étape comme difficilement compressible. Elle est le garant de la qualité de la production et de la conformité avec le besoin cartographique. Il est possible d'imager des routines semi-automatisées pour faciliter certaines tâches du contrôles qualité (échantillonnages aléatoires, contrôle topologiques, contrôles géométrique des polygones aberrants, etc.). Toutefois, nous n'en espérons pas un gain de productivité conséquent.

La préparation de la photo-interprétation en deuxième étape fait intervenir un ensemble de prétraitements appliqués aux différentes catégories de données (imagerie de référence, donnée(s) vectorielle(s) de référence géométrique, données exogènes pour l'aide à l'interprétation). Les prétraitements sont traduits par des manipulations numériques qui peuvent être automatisés. Dans une hypothèse d'optimisation, nous ciblons l'élaboration du squelette polygonal des infrastructures linéaires. La réalisation du squelette nécessite une multitude manipulation SIG

(sélection, croisement, transformation géométrique). Son automatisation complète pourrait apporter un gain de temps non négligeable. De plus, l'intégration de ces manipulations dans une même solution technique pourrait limiter les risques d'erreurs lors de son implémentation. Elle permettrait également de garantir la traçabilité des opérations.

L'étape 3 associé à la photo-interprétation est le cœur du processus de production. Il s'agit de l'étape la plus consommatrice en temps, en personnels et en argent dans le processus de production (*section 2.3.2.3*). Son optimisation est donc primordiale si l'on souhaite diminuer manière substantielle le cout global de la production. L'exercice de photo-interprétation assistée par ordinateur (PIAO) se décompose en trois tâches consécutives (*Figure 22*) :

- l'analyse visuelle de l'image,
- la délimitation des contours (ou digitalisation) des éléments paysagers,
- l'identification de l'occupation du sol.

L'analyse visuelle fait appel aux capacités intellectuelles du photo-interprète pour la compréhension du paysage sur l'image (Provencher et Dubois 2007). Il s'agit d'une compétence qui s'améliore avec la pratique continue de la photo-interprétation. Il repère de plus en plus rapidement les indices compris dans l'image lui permettant d'ajuster précisément son interprétation. Son analyse de l'image devient plus en plus performante. Inconsciemment il pratique une certaine ontologie dans la lecture de l'image. Le photo-interprète est capable d'apporter un regard critique sur son analyse visuelle afin d'enrichir et de capitaliser les expériences.

La délimitation des contours (ou digitalisation) des éléments paysagers suit immédiatement la première analyse visuelle du photo-interprète sur l'image. À l'aide des outils d'édition numérique, il donne forme aux polygones qui viennent circonscrire les éléments géographiques sur l'image (massifs forestier, parcelles agricole, bâtiments, etc.). Ce travail s'effectue en lien avec les consignes cartographiques reçues au début du projet. Le photo-interprète doit délimiter de manière exhaustive l'ensemble des éléments géographiques qu'il aura repéré sur l'image et qui sont mentionnés dans la nomenclature. La délimitation s'opère dans le respect d'une superficie et d'une largeur minimale du polygone à une échelle de saisie déterminée. La digitalisation des contours sur un large territoire pour la production d'une BD Ocsol GE est un exercice long et rébarbatif. L'ensemble des photo-interprètes interrogés lors du « *brainstorming* » (*section 2.2.2.1*) s'accordent à dire que cette tâche chronophage les fatigue rapidement et provoque une lassitude précipitée pour l'exercice de photo-interprétation. Par conséquent, une pratique trop longue de la digitalisation empâtie sur la qualité de production. L'attention des photo-interprètes est mise à mal et ne permet pas d'assurer un travail de délimitation homogène sur l'ensemble du territoire d'étude.

L'identification de l'occupation est la dernière tâche demandée au photo-interprète. Elle consiste à attribuer une étiquette d'identification sur les polygones précédemment délimité lors de la digitalisation. L'identification correspond à la désignation d'une classe d'occupation du sol compris dans la nomenclature. Il s'agit d'une démarche plus intellectuelle qui concrétise l'analyse visuelle de l'image. Dans le cadre de la production d'une BD Ocsol GE, les possibilités d'attribution peuvent être nombreuses, jusqu'à 70 classes parfois. L'identification de

l'occupation exige du photo-interprète une attention importante et une forte concentration tout au long de la cartographie.

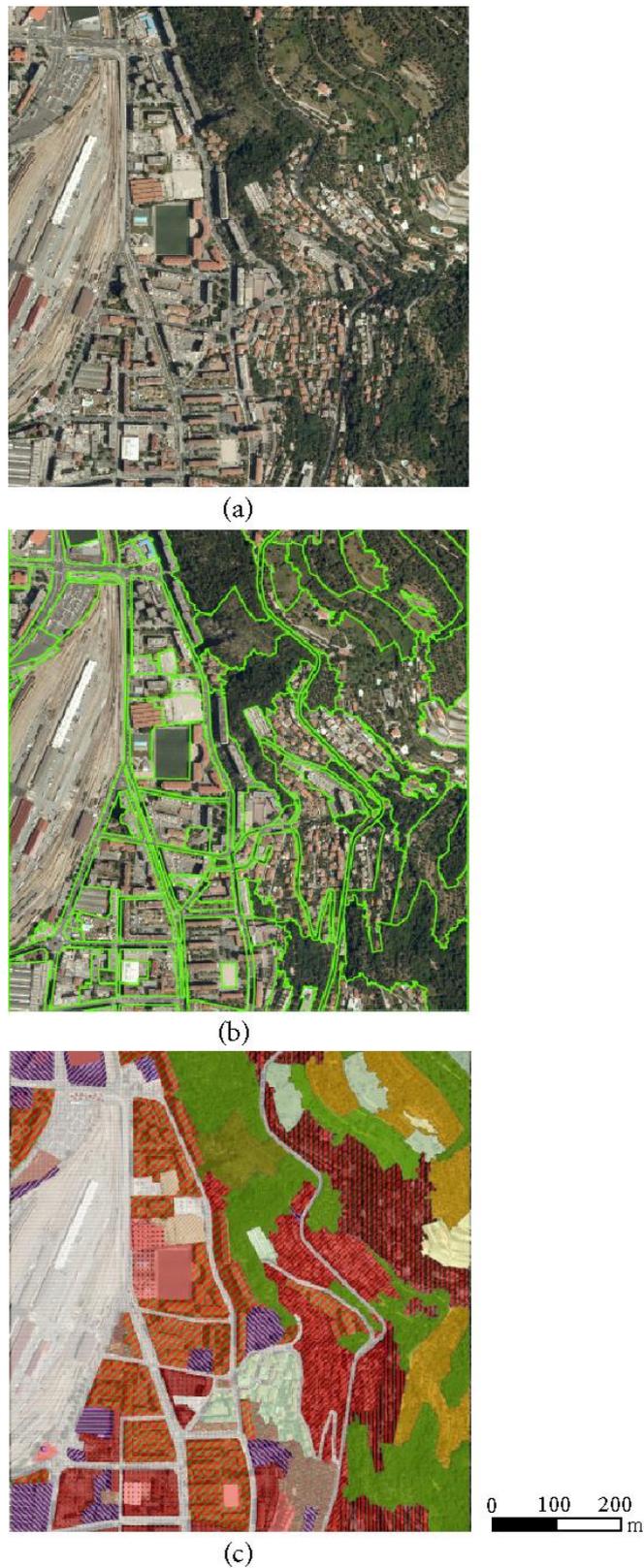


Figure 22. Démarche de la PIAO : (a) analyse de l'image THRS ; (b) digitalisation des éléments paysagers ; (c) attribution de classes d'occupation du sol

2.5 Pertinence d'une assistance à la digitalisation

Notre objectif est de développer une solution d'optimisation de l'exercice de photo-interprétation. L'analyse des différentes pistes d'optimisation nous permet de dégager des possibilités de développement mais aussi des priorités. Nous avons volontairement écarté d'intervenir sur l'étape 1 du choix des données et l'étape 4 de la validation de la BD Ocsol GE. Pour l'étape 1, nous risquons de nous contraindre techniquement dans un cadre de production sur mesure. Pour l'étape 4, la potentialité de mettre en routine certaines opérations de validation nous paraît pas une priorité et nous permet pas d'espérer une optimisation significatif de la chaîne de production.

Maintenant, nous nous focalisons sur l'étape de photo-interprétation. Parmi les tâches induites à la photo-interprétation, nous écartons d'intervenir sur l'analyse visuelle de l'image par le photo-interprète. Elle peut difficilement être concurrencée par un algorithme de traitement d'image. La formation avancée du photo-interprète ou l'apport de données exogènes sont les seuls leviers envisageables pour l'optimisation de l'analyse visuelle. Cependant, nous nous accordons à dire que l'optimisation de l'analyse visuelle n'apportera pas un gain de temps considérable sur l'ensemble du processus de production. La tâche d'identification de l'occupation du sol est également mise de côté. Nous ne souhaitons pas porté immédiatement un axe de développement particulier pour optimiser cette tâche. Il s'agit d'une démarche intellectuelle trop complexe régit par un trop grand nombre de classes d'occupation du sol. Les avancées importantes en matière de classification semi-automatique de l'image pourraient laisser entrevoir une possibilité de dégrossir ce travail d'identification mené par le photo-interprète. Il existe de nombreux algorithmes permettant d'espérer une classification de l'image performante et robuste selon des classes simples d'occupation du sol (Caloz et Collet 2001). Toutefois, nous pensons que cela n'apporterait pas une valeur ajoutée significative au photo-interprète tout de même contraint à cette tâche. Une description simple du paysage selon des classes génériques de l'occupation du sol (espace forestier, espace artificialisé, espace agricole, espace naturelle, etc.) apporte peu au photo-interprète déjà en capacité de distinguer facilement et rapidement ce type de classe. Nous ciblons la tâche de digitalisation des éléments géographiques sur l'image comme la piste d'optimisation la plus sérieuse. Cette tâche est qualifiée de fastidieuse et d'extrêmement consommatrice de temps par les photo-interprètes. De plus elle est identifiée comme une cause principale de dégradation de la qualité de la BD Ocsol GE.

Nous proposons le recours à une segmentation d'image pour assister la digitalisation des polygones d'occupation du sol. L'apport d'une segmentation numérique se positionnerait comme un prétraitement complémentaire à la mise en place d'un support de digitalisation (*Figure 23*). Cette proposition est motivée par deux observations : l'assistance efficace que procure le squelette polygonal de référence des infrastructures linéaires à l'exercice de digitalisation ; les nombreuses avancées techniques et technologiques en matière de segmentation d'image (algorithmes, logiciels, etc.) (Pal et Pal 1993; Blaschke 2010). Dès lors, notre hypothèse se justifie par gain potentiel de productivité qu'un prédécoupage complet du paysage pourrait apporter à la pratique de la photo-interprétation.

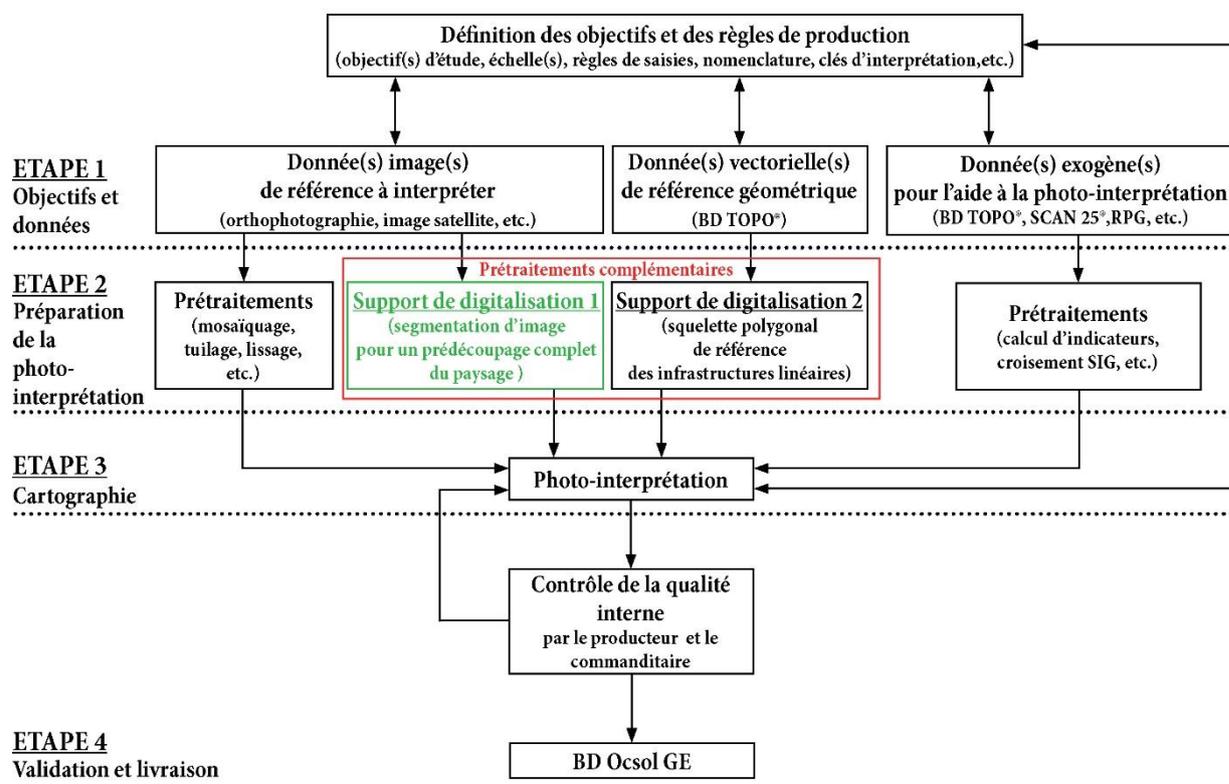


Figure 23. Hypothèse pour optimiser la production régulière de BD Ocsol GE par photo-interprétation : ajout d'un prétraitement pour la mise en place d'un support de digitalisation complémentaire (en vert) basé sur une segmentation de l'image à interpréter

La principale interrogation soulevée par cette hypothèse est de savoir comment une segmentation numérique peut apporter une aide efficace au travail du photo-interprète. Nous réalisons dans le chapitre 4 une seconde Analyse Fonctionnelle (AF) pour la création d'une assistance à la digitalisation à partir d'une segmentation d'image. L'objectif est de mettre en évidence l'ensemble des conditions et des prérequis à la mise en place d'une telle assistance pour le photo-interprète. Au-delà des verrous techniques et technologiques que nous tentons d'identifier, l'AF doit prendre en compte le contexte contraignant et variable que nous impose la production de BD Ocsol GE sur mesure (*section 2.2.2*). Pour y parvenir, nous avons pu mener l'analyse fonctionnelle dans le cadre de trois prestations commerciale confiées au bureau d'études par des commanditaires français de BD Ocsol GE :

- l'association d'émergence du projet de Parc Naturel Régional (PNR) de l'Aubrac,
- la Métropole Nice Côtes d'Azur (NCA),
- la communauté d'agglomération Durance Luberon Verdon (DLVA).

Les trois prestations sont présentées dans le chapitre 3. Elles offrent l'opportunité de conduire l'exercice de production d'une BD Ocsol GE sur mesure en conditions réelles et contraintes. Ces retours d'expériences sont développés de façon continue dans les chapitres suivant.

Confrontation du projet à la réalité du marché :
trois prestations diversifiées d'élaboration de BD Ocsol GE

Sommaire

3.1	Trois territoires, trois enjeux, trois besoins.....	83
3.1.1	Le projet de PNR de l'Aubrac : la reconnaissance d'un territoire rural à haute valeur environnementale	83
3.1.2	Métropole Nice Côte d'Azur : entre urbanisation dense et haute-montagne....	86
3.1.3	Durance Luberon Verdon Agglomération : en proie à une forte périurbanisation	88
3.2	Les cahiers des charges.....	91
3.2.1	L'imagerie de référence.....	93
3.2.2	Les données exogènes	96
3.2.3	Échelles et Unité Minimale de Cartographie.....	97
3.2.4	Le squelette polygonal des infrastructures linéaires : routes et voies ferrées ...	98
3.2.5	La photo-interprétation	100
3.3	Les nomenclatures.....	100
3.3.1	L'adaptation de Corine Land Cover, niveau 1 à 3.....	101
3.3.2	Un niveau 4 pour une cartographie à grande échelle	105
3.3.3	Un niveau 5 ponctuel.....	108
3.4	Conduite d'une R&D progressive.....	109

Le choix a été fait d'appuyer le développement de la méthodologie sur des études de cas concrètes correspondant à des commandes dans le cadre de marchés publics. En effet, à notre sens, la mise en œuvre du projet de R&D visant l'optimisation du procédé de fabrication d'une BD Ocsol GE ne pouvait que bénéficier du fait de s'appuyer sur des demandes concrètes de prestation cartographique à grande échelle et sur-mesure. Cela nous permettait de nous confronter aux exigences contractuelles inhérentes à ce type de marché. C'était à notre sens le meilleur moyen pour identifier tous les éléments qui peuvent contraindre ou à l'inverse faire entrevoir les potentialités d'optimisation du processus de production.

Le bureau d'étude possédait à son actif peu de références en matière de production de BD Ocsol GE. Jusqu'ici, ses offres proposaient la photo-interprétation assistée par ordinateur comme méthode exclusive de production. Le pari consistant à décrocher un nouveau marché pour expérimenter de nouvelles méthodes de production, sur ce type de prestation, s'est révélé risqué, car il était sans garantie de succès. L'offre technique proposée lors des réponses à appel d'offre a été bâtie à la fois sur les compétences du bureau d'études en matière de photo-interprétation, les compétences métiers des équipes (urbanistes, écologues, agronomes...) et des tests de faisabilité plus ou moins concluants sur l'apport des techniques de traitements d'image de télédétection à l'optimisation des temps de production. Même si à ce stade, il était impossible de s'assurer de l'efficacité de cet apport pour le commanditaire et le producteur, le discours développé apportait des éléments et des illustrations pédagogiques sur ces méthodes peu connues. En aucun cas, l'apport d'algorithmes de traitements d'images n'était présenté comme une solution cent pour cent « automatique » et un substitut total à la photo-interprétation, mais plutôt présenté comme un complément.

Entre 2013 et mi-2014, cinq réponses à l'appel d'offres ont été réalisées dans l'optique de décrocher, a minima une prestation. Au final, trois commanditaires ont répondu favorablement à notre offre de prestation. La première d'entre-elles, en octobre 2013, est une offre soumise pour « *l'élaboration de trois cartographies du mode d'occupation du sol (MOS), années 2004, 2009 et 2014, sur le périmètre de la Métropole Nice Côte d'Azur et celui du Schéma de Cohérence Territoriale* ». L'analyse des offres prend du retard mais le marché est notifié à l'entreprise en juin 2014. Entre temps, en janvier 2014, le bureau d'études propose une offre pour la « *Cartographie de l'occupation des sols, identification et diagnostic de la trame écologique, de l'Aubrac et de son pourtour* », qui lui est confié en mars 2014. Enfin, en juillet 2014, une troisième étude lui est attribuée portant sur la « *Réalisation de bases de données d'occupation du sol à grande échelle sur le territoire de la Durance Luberon Verdon Agglomération* ».

Les trois marchés accordés au bureau d'études sont une aubaine pour l'application de cette thèse. Tout d'abord, ils permettent l'expérimentation grandeur nature des développements. Ensuite, ces trois applications permettent d'appréhender trois visions et expériences de la discipline et donc des problématiques techniques différentes. Enfin une application sur trois territoires permet d'assurer une mesure de la robustesse des développements proposés. Ce chapitre a pour première vocation de présenter le contexte de ces trois études, les territoires en question et l'analyse du besoin pour chacune de ces offres. Ensuite, il propose un focus sur les différents cahiers des charges fonctionnels et les nomenclatures soumises au producteur. De plus, nous souhaitons également attirer l'attention sur les particularités d'une conduite de recherche à travers trois prestations successives et dans un contexte de production fortement contrainte.

3.1 Trois territoires, trois enjeux, trois besoins

3.1.1 Le projet de PNR de l'Aubrac : la reconnaissance d'un territoire rural à haute valeur environnementale

Dès 2002, les préfets des régions Auvergne, Midi-Pyrénées et Languedoc-Roussillon se retrouvent sur les plateaux de l'Aubrac et reconnaissent ensemble les enjeux de préserver et de valoriser cette région rurale de moyenne montagne. Ils y observent un patrimoine paysager, architectural et culturel encore bien préservé, une économie rurale vulnérable tournée vers l'agropastoralisme, des savoir-faire artisanaux et gastronomiques reconnus et une richesse faunistique et floristique exceptionnelle. En 2013, les trois régions obtiennent un avis d'opportunité permettant de lancer un processus de création d'un Parc Naturel Régional (PNR) pour atteindre ces objectifs de protection et de mise en valeur du territoire de l'Aubrac. La bonne réalisation de ce projet passe en grande partie par la constitution d'un socle commun de connaissance sur le territoire. Celui-ci est présenté sur la *Figure 24*. La réalisation d'un référentiel cartographique à grande échelle s'avère donc essentielle.

L'avis d'opportunité à la création du PNR intervient dans un contexte national où l'application des lois « Grenelle » tente de limiter la fragmentation et la dégradation dans le temps de certains types de milieux naturels. L'isolement ou la perte de connexion de ces milieux porte atteinte à leur qualité. Ces changements de l'occupation du sol sont observés en lien direct avec les phénomènes d'étalement urbain et les évolutions des pratiques agricoles (intensification, déprise pastorale, des vergers et des vignobles) (Lambin et al. 2001).

Les stratégies de conservation et de restauration de ces milieux sont traduites de façon réglementaire à l'échelle régionale, dans le Schéma Régional de Cohérence Écologique (SRCE) élaboré, mis à jour et suivi conjointement par la Région et l'État. Ce Schéma est régi par le code de l'environnement (*articles L. 371-3 et R. 371-25 à 31*) prenant en compte les orientations nationales pour la préservation et la remise en bon état des continuités écologiques et la directive cadre sur l'eau. Le contenu du SRCE repose en grande partie sur la constitution d'une trame écologique à la fois terrestre et aquatique appelée la Trame Verte et Bleue (TVB) régionale, pour l'identification des réservoirs de biodiversité, des habitats naturels et des corridors écologiques. Les SRCE ont également pour vocation d'être pris en compte à l'échelle infrarégionale dans les différents documents d'urbanisme (SCOT, PLU/PLUi/PLUm).

Outre l'élaboration de SRCE réglementaire pour chacune des trois régions couvrant les plateaux de l'Aubrac, le choix de la création du PNR de l'Aubrac reste pertinent. Il s'agit de mettre en place un outil de développement territorial, à échelle fine, ayant pour vocation de protéger et valoriser le patrimoine naturel, culturel et humain d'un territoire rural habité.

À l'échelle du Massif Central, Les dix PNR existants se sont regroupés en 2000, à travers l'association IPAMAC⁶ avec le partenariat du laboratoire EVS/ISTHME et du CEMAGREF. L'objectif de cette association est multiple. Elle vise l'identification d'un réseau écologique à l'échelle du Massif Central avec une extension vers les Pyrénées et elle mène, en parallèle, plusieurs actions communes à tous les parcs du Massif Central en matière de tourisme également.

⁶ http://www.parcs-massif-central.com/association-ipamac_7.html

Le projet de cartographie du PNR de l'Aubrac trouve une pertinence dans le prolongement du projet porté par l'IPAMAC. Il s'insère dans une démarche identique et dans l'optique d'apporter une expérience à plus grande échelle au 1/25 000^e. Pour mener à bien ce projet, l'association d'émergence du PNR de l'Aubrac est créée en 2010. Outre l'intégration du projet avec celui porté par l'IPAMAC, l'association doit assurer une cohérence du projet avec les SRCE Auvergne, Languedoc Roussillon et Midi-Pyrénées. Celui-ci sera alors considéré, par les régions, comme une déclinaison au niveau locale de la TVB.

La rédaction de la charte du PNR de l'Aubrac se base sur un diagnostic initial du territoire. Ce diagnostic territorial induit la nécessité pour l'association de se doter d'un référentiel d'occupation et d'utilisation du sol à grande échelle. Ce référentiel doit permettre d'établir un état zéro de l'occupation du sol à une date afin d'identifier et de diagnostiquer la trame écologique de l'Aubrac et de son voisinage immédiat. Le résultat de ce diagnostic doit alimenter la définition des objectifs, des enjeux et le plan d'action pour la conservation ou la restauration de cette trame.

La réalisation d'un référentiel d'occupation et d'utilisation du sol est un exercice inconnu pour l'association d'émergence du parc. Pour cette raison, elle choisit de s'appuyer sur l'expérience et les travaux menés par les PNR des Causses du Quercy, des Grands Causses et du Haut Languedoc intégrés dans l'association IPAMAC⁷. Le PNR des Causses du Quercy, le PNR des Grands Causses, le PNR du Haut-Languedoc et le PNR des Pyrénées ariégeoises ont engagé une « *Étude des conditions d'élaboration d'une carte d'occupation du sol de type Corine Land Cover de niveau 4 et 5 au 1/25 000^e* ». L'expérience de ces parcs a permis d'aboutir à un référentiel d'occupation du sol à grande échelle basé sur le référentiel CLC adapté jusqu'à un niveau 5 relatif aux étagements de la végétation. Cette nomenclature spécifique s'inspire des développements menés par l'association IPAMAC et les laboratoires associés. L'objectif pour l'association d'émergence est de réitérer l'opération des trois parcs de Midi-Pyrénées sur le territoire du projet de PNR de l'Aubrac.

⁷ <http://www.trame-ecologique-massif-central.com>



Des monts du Cantal au Nord Aveyron, la vallée de la Truyère présente un caractère encaissé. Façonnés par de nombreux cours d'eau alimentant la Truyère, les paysages sont fragmentés par un fort étagement de la végétation composé de chênes, de frênes et d'hêtre (photo 1).



le haut plateau ouvert constitue le « cœur emblématique » de l'Aubrac. Il se caractérise par des pelouses d'altitudes parsemées de gros rochers. Le couvert boisé est faible et organisé en bandes de résineux pour la protection du bétail face aux intempéries (photo 2). Ce territoire renferme des espèces faunistiques et floristiques rares dont leur préservation est un enjeu important. Les burons patrimoniaux attestent la présence l'Homme sur ce territoire sauvage.



Projet de PNR de l'Aubrac

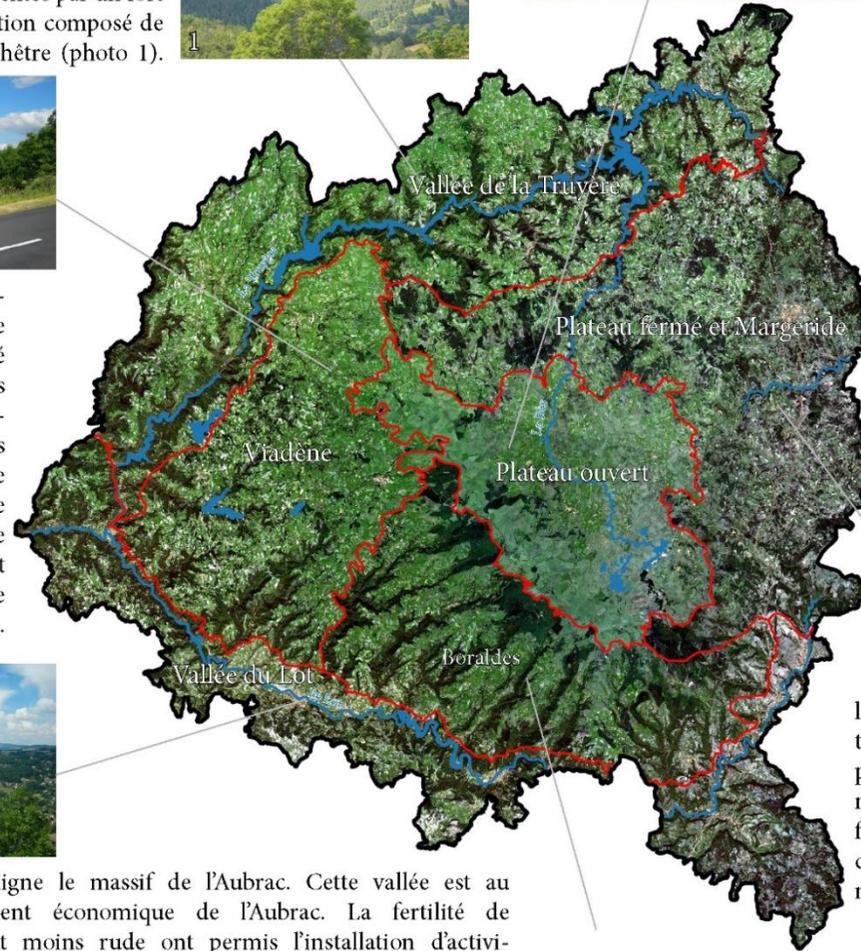
Le territoire d'étude est une zone de moyenne montagne se situant en plein cœur du Massif central. Il s'étend sur les Régions Auvergne, Languedoc Roussillon et Midi-Pyrénées et respectivement. En 2012, la zone concernée pour le projet de PNR couvre une superficie de 3272 km² sur 107 communes.



Le nord de la Viadène est un territoire de plateau bocagère composé de prairies bocagères quelques cultures céréalières. Ces espaces sont dédiés à l'élevage (photo 6). Au sud, Le paysage se caractérise par des coteaux abritant un territoire viticole et arboricole modeste.



la vallée du Lot souligne le massif de l'Aubrac. Cette vallée est au cœur le développement économique de l'Aubrac. La fertilité de son sol et son climat moins rude ont permis l'installation d'activités agricoles mais aussi d'activités tournées vers la rivière (photo 5). les Boraldes est un ensemble de petits affluents qui se dessinent vers le Lot à travers des vallées courtes mais profondes. L'étagement de la végétation est important avec une variété de feuillus et de résineux. (photo 4).



la Margeride est un haut plateau boisé qui se caractérise par des massifs forestiers denses majoritairement constitués de futaie de conifères. Autour de ces massifs, les prairies permanentes dominent (photo 3).



Figure 24. Présentation du site d'étude du projet de PNR de l'Aubrac - crédit photos : B. Segala, 2014

3.1.2 Métropole Nice Côte d'Azur : entre urbanisation dense et haute-montagne

La Métropole Nice Côte d'Azur (NCA) est créée en 2012⁸ au titre de la loi de réforme des collectivités territoriales de 2010 (N°2010-1563). Il s'agit de la fusion de l'ex Communauté urbaine de Nice Côte d'Azur (CANCA), de trois ex communautés de communes des Alpes-Maritimes (Vésubie-Mercantour, La Tinée et Stations du Mercantour) et de la Commune de la Tour-sur-Tinée afin de créer un nouveau type d'EPCI avec des compétences élargies.

La nouvelle donne territoriale et la complexité paysagère, amène cette nouvelle organisation à constituer un socle commun de connaissances sur les problématiques et enjeux du territoire au sein d'un nouveau périmètre (*Figure 25*). Par cette connaissance, il s'agit de coordonner de façon homogène les actions publiques sur l'ensemble du territoire et d'apporter une vision cohérente vis-à-vis des grandes agglomérations européennes. La fusion d'une communauté urbaine importante comme celle de Nice avec une commune et trois communautés de communes à caractère rural accentue d'autant plus ce besoin pour limiter le rapport de force économique et politique inégal entre « *Nice et le reste du territoire* ».

À travers sa compétence pour l'aménagement de l'espace, la Métropole Nice Côte d'Azur a lancé en 2014, le projet de réalisation du Mode d'Occupation du Sol (MOS) à grande échelle sur l'ensemble de son territoire à plusieurs dates (2004, 2009, 2014). Ce projet est porté par le service pour la Planification Urbaine de la Direction Aménagement et Urbanisme indépendamment du service de cartographie et des SIG de la Métropole.

Comme pour de nombreux organismes désirant se doter d'un MOS, la démarche reste, pour eux, peu connue. Pour cette raison, la Métropole NCA a cherché l'appui du Centre Régional de l'Information Géographique de la Région Provence-Alpes-Côte-d'Azur (CRIGE PACA). Le CRIGE a apporté un accompagnement multiple sur la construction d'un cahier des charges, la compréhension des concepts liés à la réalisation d'une BD Ocsol GE et la conception de la nomenclature. Il apporte également son aide pour le suivi de la prestation de production.

Le portage du projet par le service de l'urbanisme révèle clairement l'objectif premier de la constitution d'un MOS à grande échelle. Il s'agit pour la Métropole d'appuyer la conduite d'études nécessaire à l'élaboration du PLUm et du SCOT sur le territoire métropolitain. De façon réglementaire, celui-ci vise à apporter des éléments de réponses chiffrés et spatialisés aux exigences urbanistiques liées entre autres aux Lois « *Grenelle* » et ALUR. De manière plus large, la Métropole expose ses intentions par ce MOS d'apporter un moyen d'observation global, de suivi et d'analyses pour :

- l'occupation actuelle, passée ou à venir de l'occupation et l'utilisation du sol ;
- les caractères dominants et particuliers d'un territoire ;
- la mise en comparaison des territoires ;
- les enjeux écologiques ;
- l'évolution des activités agricoles et forestières.

⁸ <http://www.nicecotedazur.org/>



Figure 25. Présentation du site d'étude de la Métropole Nice Côte d'Azur – crédit photos : M.Vitter 2015

3.1.3 Durance Luberon Verdon Agglomération : en proie à une forte périurbanisation

La communauté d'agglomération Durance Luberon Verdon Agglomération (DLVA) est un EPCI récent mis en place au 1er janvier 2013⁹. Le territoire de la DLVA est présenté sur la *Figure 26*. Elle est née de la fusion de trois communautés de communes existantes (CLDV, ILO et SUD 04) et de deux communes ne faisant pas encore partie d'un regroupement de type intercommunal (Riez et Roumoules). L'objectif de cette mutation territoriale est d'apporter, à l'ensemble des communes qui la compose, des compétences élargies notamment en matière d'aménagement de l'espace communautaire. Il s'agit de proposer à un ensemble de 62 000 habitants (dont 23 000 dans la ville centre de Manosque) des solutions et des actions en phase avec les enjeux et problématiques liés à l'urbanisme et l'environnement.

Dans la même optique que la Métropole Nice Côte d'Azur, la DLVA doit élaborer son prochain SCOT en cohérence avec les nouvelles exigences du « Grenelle » de l'environnement. Un MOS à grande échelle à plusieurs dates (1999, 2010) s'avère une nécessité incontournable pour apporter les informations exigées par le code de l'urbanisme vis-à-vis du rapport de présentation intégrant le SCOT.

La construction d'un MOS à grande échelle sur plusieurs dates est portée par le service « *Système d'Information Territorial* » (SIT) de la DLVA. Ce service intègre les compétences de collecte, de suivi, de gestion et de maîtrise des informations spatialisées sur l'ensemble du territoire à travers les SIG. Ce projet de MOS à grande échelle est également suivi par le CRIGE PACA. De la même manière que pour la Métropole NCA, le CRIGE apporte son expérience et un accompagnement dans la réalisation d'un projet de type nouveau pour la communauté d'agglomération.

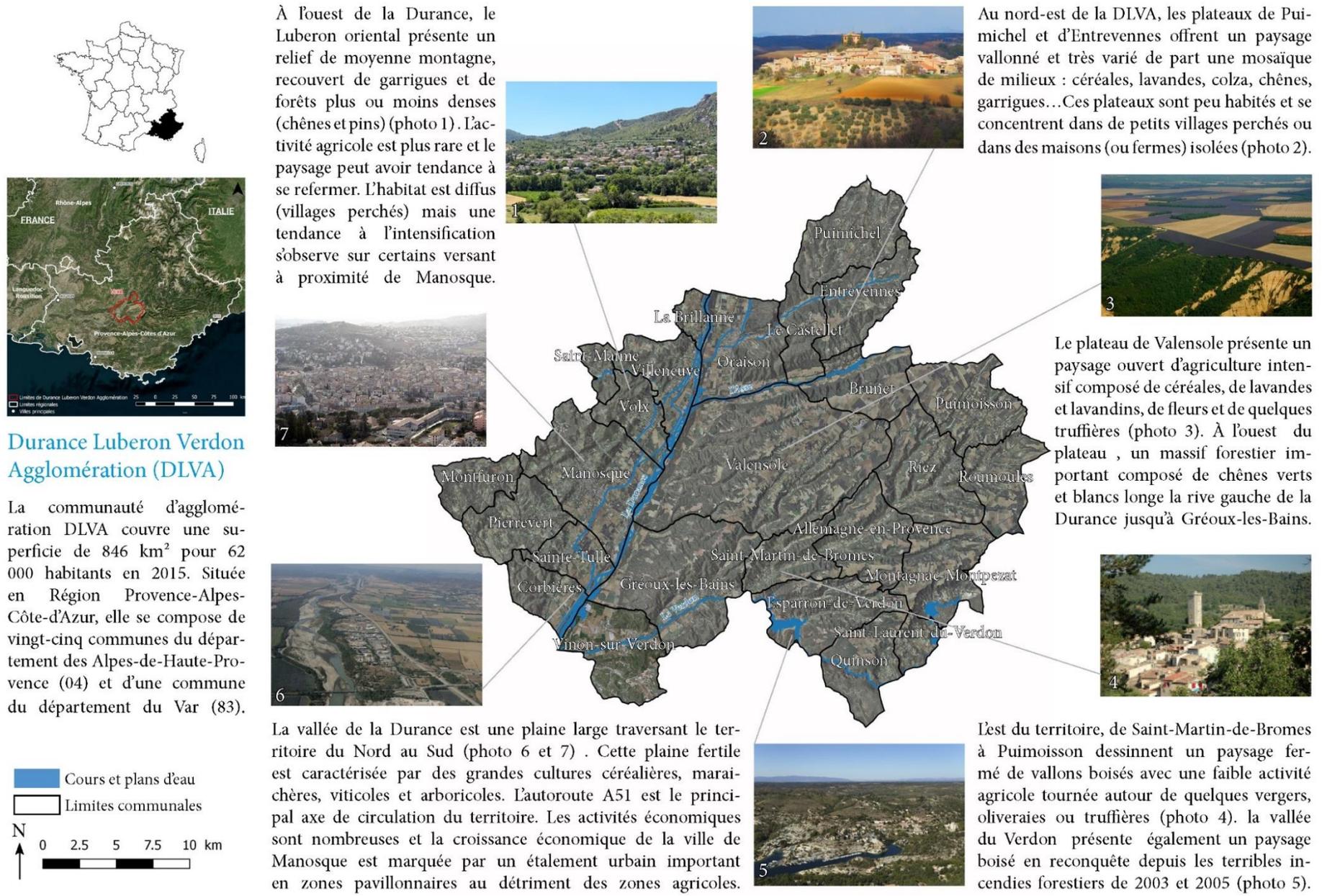
Au-delà des objectifs réglementaires vis-à-vis du SCOT, la DLVA à travers le service SIT à l'intention de « rentabiliser » ce MOS à grande échelle dans son utilisation. Le MOS est perçu ici comme un outil d'aménagement « *multi-usages* » pouvant alimenter de nombreux autres projets de territoire :

- le lancement d'une étude « Trame Verte et Bleue » ;
- l'aide à la réalisation des plans locaux d'urbanisme ;
- le Programme Local de l'Habitat et le Plan de Déplacements Urbains ;
- la mise en place de plusieurs observatoires thématiques sur les zones d'activités, l'agriculture ou l'environnement.

Cette intention s'inscrit logiquement dans un souci d'économie budgétaire touchant l'ensemble des collectivités territoriales en France mais pas seulement. L'idée recherchée est d'éviter la construction d'informations spatialisées redondantes et non interopérables à travers ces différents projets. Dans une logique de mutualisation, le service vise une portée à connaissance et un accompagnement, auprès des différents services de la DLVA, sur l'utilisation des potentialités d'un outil tel que le MOS à grande échelle. Ils exposent un besoin de rationaliser

⁹ <http://ww.dlva.fr/>

les actions territoriales à partir d'un outil de travail commun, simple de compréhension et accepté par tous.



À l'ouest de la Durance, le Luberon oriental présente un relief de moyenne montagne, recouvert de garrigues et de forêts plus ou moins denses (chênes et pins) (photo 1). L'activité agricole est plus rare et le paysage peut avoir tendance à se refermer. L'habitat est diffus (villages perchés) mais une tendance à l'intensification s'observe sur certains versants à proximité de Manosque.

Au nord-est de la DLVA, les plateaux de Puimichel et d'Entrevennes offrent un paysage vallonné et très varié de part une mosaïque de milieux : céréales, lavandes, colza, chênes, garrigues... Ces plateaux sont peu habités et se concentrent dans de petits villages perchés ou dans des maisons (ou fermes) isolées (photo 2).

Le plateau de Valensole présente un paysage ouvert d'agriculture intensif composé de céréales, de lavandes et lavandins, de fleurs et de quelques truffières (photo 3). À l'ouest du plateau, un massif forestier important composé de chênes verts et blancs longe la rive gauche de la Durance jusqu'à Gréoux-les-Bains.

La vallée de la Durance est une plaine large traversant le territoire du Nord au Sud (photo 6 et 7). Cette plaine fertile est caractérisée par des grandes cultures céréalières, maraichères, viticoles et arboricoles. L'autoroute A51 est le principal axe de circulation du territoire. Les activités économiques sont nombreuses et la croissance économique de la ville de Manosque est marquée par un étalement urbain important en zones pavillonnaires au détriment des zones agricoles.

L'est du territoire, de Saint-Martin-de-Bromes à Puimoisson dessinent un paysage fermé de vallons boisés avec une faible activité agricole tournée autour de quelques vergers, oliveraies ou truffières (photo 4). la vallée du Verdon présente également un paysage boisé en reconquête depuis les terribles incendies forestiers de 2003 et 2005 (photo 5).

Figure 26. Présentation du site d'étude de la DLVA – crédits photos : DLVA, 2015 ; B.Cabassot, 2015 ; F. Van der Beken, 2008

3.2 Les cahiers des charges

Chacun des commanditaires élabore un Cahier des Clauses Techniques Particulières (CCTP) ou cahier des charges propre aux besoins fonctionnels du MOS à grande échelle nécessaires sur son territoire. L'étude croisée de ces derniers présente des points communs, des différences, des spécificités, des libertés de méthodes ou au contraire des contraintes fermes dans l'exécution des tâches. Pour le producteur, une lecture attentive est essentielle pour savoir comment positionner le mieux possible son offre technique et financière en fonction de ses équipes, ses moyens et ses compétences. Pour cela, la lecture attentive doit repérer les tâches et exigences récurrentes de celles qui ne le sont pas dans ce type de prestation. L'idée est d'élaborer des « routines » de fonctionnement pour les aspects redondants à faible valeur ajoutée afin de mettre l'accent sur l'expertise avancée du producteur sur la prestation pouvant faire la différence avec la concurrence.

En France, pour de nombreux EPCI ou structures demandeuses d'un MOS à grande échelle sur leur territoire, l'écriture d'un CCTP et l'élaboration d'une nomenclature spécifique est un exercice nouveau ou récent. Pour les trois cas d'études présentés ici, le commanditaire a rédigé son CCTP et élaboré sa nomenclature avec le soutien d'un Centre Régional pour l'Information Géographique (le CRIGE PACA pour la Métropole NCA et la DLVA) ou le fruit d'une expérience similaire sur un territoire voisin (Les trois PNR de Midi-Pyrénées intégrant l'IPAMAC pour le projet de PNR de l'Aubrac). Cette sous-partie a pour objectif de présenter et d'expliquer les différents CCTP adoptées par les commanditaires de manière commune. L'objectif est de mettre en évidence les éléments et les facteurs clés pour un producteur pour rendre ce type de prestation rentable et concurrentiel.

Le *Tableau 5* présente une synthèse des CCTP pour les trois projets. Il n'existe pas de format standard ou de norme dans l'élaboration des CCTP. Parfois clairement indiquées ou parfois implicitement évoquées, les consignes d'un CCTP peuvent être mal interprétées par un potentiel producteur. Afin de s'assurer de la bonne compréhension du besoin fonctionnel, le commanditaire met en place une période de questions-réponses entre lui et les potentiels producteurs déposant une offre technique. Parfois même, la réalisation d'un test de production est demandée sur une petite zone du territoire.

Tableau 5. Synthèse des trois cahiers des charges pour la production de BD Ocsol GE

	Projet de PNR de l'Aubrac	Métropole Nice Côte d'Azur	Durance, Luberon, Verdon Agglomération
Date de référence	Entre 2008 et 2010	2004, 2009 et 2014	1999 et 2010
Imagerie de référence	Espaces agricoles et naturels : Mosaïque d'images satellites RAPIDEYE entre 2008 et 2010 <i>Résolution : 5 m</i> Espaces urbains : BDORTHO®2012 De l'IGN <i>Résolution : 50 cm</i>	BDORTHO®2004 De l'IGN <i>Résolution : 50 cm</i> Orthophotographie 2009 <i>Résolution : 20 cm</i> Orthophotographie 2014 <i>Résolution : 20 cm</i> PLEIADES 2014 <i>Résolution : 2.5 m</i>	Orthophotographie 1999 Source : IGN Résolution : 50 cm Orthophotographie 2010 Source : Groupement de commandes (GRIGE PACA) Résolution : 20 cm
Échelle d'utilisation de la cartographie	1/25 000 ^e	Espaces urbains : 1/5 000 ^e Espaces agricoles et naturels : 1/10 000 ^e	Espaces urbains : 1/5 000 ^e Espaces agricoles et naturels : 1/10 000 ^e
Superficie et Largeur minimale de cartographie (SMC/LMC)	SMC : 2500 m ² LMC : 25 m	SMC variable en fonction des postes de la nomenclature : de 500 m ² à 2500 m ² LMC : 10 m	SMC variable en fonction des postes de la nomenclature : de 500 m ² à 2500 m ² LMC : 10 m
Données exogènes mises à disposition et couvrant le territoire d'étude	-BDTopo® V2 2012 -SCAN25® V2 -BDCarto® -BDAlti® (25m) -RPG 2010 -Carte de Végétation -Carte géologique -Carte des habitats -Inventaires locaux	-BDTopo® V2 2010 -PCI 2011 -SCAN25® V2 -BDAlti® (25m) -RPG 2010 -BD Forêt 2004 -OCSOL PACA -Inventaires locaux -Données sur les équipements et voiries -POS/PLU informatisés	-BDTopo® V2 2011 -PCI 2012 -SCAN25® V2 -RPG 2010 -BD Forêt 2009 -OCSOL PACA -Données sur les équipements et voiries -POS/PLU informatisés -Données sur les incendies de forêts
Squelette polygonal des infrastructures routières et ferroviaires	oui	oui	oui
Méthodologie de production	« La méthode principale de production est la photo interprétation assistée par ordinateur (PIAO) (...) à l'aide d'outils interactifs de numération et de contrôle du respect des spécifications. »	« La méthodologie utilisée sera la photo-interprétation et/ou télédétection de zones homogènes. »	« La numérisation se fera par digitalisation de zones homogènes en se basant sur la nomenclature et sur les spécifications techniques détaillées précédemment. »

3.2.1 L'imagerie de référence

L'imagerie aérienne ou satellite orthorectifiée à Très Haute Résolution Spatiale (THRS) est le support de production principal. Il s'agit de la donnée de référence pour la saisie d'informations spatialisées sur l'occupation du sol. Seule l'image choisie pour une année précise fait office d'arbitrage géométrique, topologique et sémantique dans l'édition de polygones d'occupation du sol sur l'année en question. Le choix de l'image est déterminant pour le commanditaire. Plusieurs critères de sélection sont posés :

la **résolution spatiale** de l'image, déterminée comme idéale à 50 cm (Provencher et Dubois 2007; Louvet et Ajouc 2014) pour produire de l'information spatialisée sur l'occupation et l'utilisation du sol à grande échelle ;

la **couverture spatiale** sur l'ensemble du territoire d'étude avec une ou plusieurs images d'un même capteur ;

la **résolution temporelle** de ou des image(s). S'il y a un recours à plusieurs images pour couvrir l'ensemble du territoire d'étude, il est préférable de sélectionner des images d'une même année, idéalement de la même saison. Pour une étude de l'occupation du sol à plusieurs dates, il est parfois nécessaire de se contraindre aux exigences temporelles et de pas de temps stipulé dans des différents documents d'aménagement du territoire ;

le **prix et la disponibilité** des image(s) sont également considérés par le commanditaire. Il est soucieux de limiter l'impact budgétaire des données dans la prestation. De plus, il est souvent non garant de la date de livraison de données en cours d'acquisition et de traitements par des organismes producteurs (par exemple, l'IGN ou le CNES en France) lors du lancement de la prestation.

Il est évident que la satisfaction de l'ensemble de ces critères est difficile à atteindre. Les trois cas d'étude, présentés ici, illustrent cela.

La communauté d'agglomération de la DLVA a opté pour la BD ORTHO® de l'IGN comme donnée source pour la construction de son MOS à grande échelle. La résolution spatiale est idéale pour produire de la grande échelle, la couverture spatiale par la BD ORTHO® est satisfaite sur l'ensemble du territoire de la DLVA. Le choix de deux dates d'acquisition pour réaliser un MOS diachronique respecte un pas de temps réglementaire de onze ans pour répondre au besoin de la DLVA de mesurer les consommations d'espaces. Son coût d'acquisition est limité par l'accessibilité facilitée de la BD ORTHO® de l'IGN auprès des collectivités territoriales. Les données images de 1999 et 2010 sont dites « *sur étagère* » car elles est déjà acquises et traitées. Il n'y a donc pas de problème de disponibilité et de livraison.

La Métropole Nice Côte d'Azur a également opté en début de projet pour la BD ORTHO® de l'IGN comme donnée de référence pour son MOS à grande échelle sur trois dates. La résolution spatiale est également idéale et la couverture assurée sur l'ensemble du territoire. Le choix des dates de référence 2004 et 2009 sont en phase avec la disponibilité des clichés et le pas de temps de 5 ans préconisé dans les documents d'urbanisme. La BD ORTHO® 2014 de l'IGN est affichée en cours de production lors du lancement du projet. Malheureusement les conditions d'acquisition et les temps de préparation par l'IGN n'ont pas permis une livraison

avant septembre 2015 pour un début de la prestation fin 2014. Malgré un coût financier supplémentaire, la Métropole NCA décide d'acquérir une série d'images Pléiades pour remplacer temporairement la BD ORTHO® 2014 en cours de livraison. Ce choix se fait sous la contrainte réglementaire de l'élaboration du SCOT. L'imagerie Pléiades offrent une résolution spatiale de 2,5 m en multibande et de 0,70 m en panchromatique. Son interprétation visuelle s'avère logiquement moins confortable que pour la BD ORTHO® (50 cm) mais suffisante pour produire une BD Ocsol GE. Par contre, la couverture spatiale sur l'ensemble du territoire en 2014 n'est pas assurée par l'imagerie Pléiades. Les conditions météorologiques n'ont pas permis d'obtenir une seule image Pléiades 2014 exploitable sur un petit secteur du Mercantour (*Figure 27*). Un compromis a été trouvé pour utiliser la BD ORTHO® 2012 disponible pour remplacer l'absence d'information en 2014 sur ce secteur. Par chance, il s'agit d'un secteur à faible mutation dans le temps.



Figure 27. Couverture des images Pléiades sur le périmètre de la Métropole NCA

Le projet de PNR de l'Aubrac présente un cas particulier. L'association d'émergence a opté pour l'imagerie satellite RapidEye® (*Figure 28*) acquise dans le cadre du programme GEOSUD¹⁰ (Kazmierski et al. 2014). L'utilisation de ces images se justifie par le choix d'une année unique et la plus récente possible (2011) pour constituer la base de données d'occupation

¹⁰ Le programme GEOSUD permet « la mise à disposition de couvertures satellitaires annuelles d'été, haute résolution de la France, et d'assurer la mise en réseau de la communauté scientifique et de la communauté des acteurs de la gestion autour de sa valorisation ». <http://geosud.teledetection.fr/>

du sol sur l'ensemble du territoire du projet de PNR de l'Aubrac (sur trois départements). La BD ORTHO® de l'IGN ne pouvait pas offrir une couverture intégrale du périmètre d'étude sur une même année. Ce choix a pour objectif d'assurer une correspondance avec le travail similaire mené antérieurement pour le groupement des parcs naturels régionaux de Midi-Pyrénées en 2012. Lancés en 2008, les capteurs RapidEye® possèdent une résolution spatiale de 5m (après orthorectification). Cette résolution s'avère faible pour produire une BD Ocsol GE (Figure 29). Malgré une mise en garde, le commanditaire maintient son choix et propose, en complément, l'utilisation de la BD ORTHO® IGN 2008 sur l'Aveyron, 2010 sur le Cantal et 2009 et 2012 sur la Lozère comme support de production de référence dans les zones urbaines. La différence de date de la BD ORTHO® est acceptée dans une hypothèse de faible évolution des espaces artificialisés sur le territoire de l'Aubrac. De plus, la déclinaison avancée de la nomenclature dans les espaces artificialisés semble secondaire dans l'élaboration de la charte du parc (CCTP étude Trame Verte et Bleue de l'Aubrac, 2014).

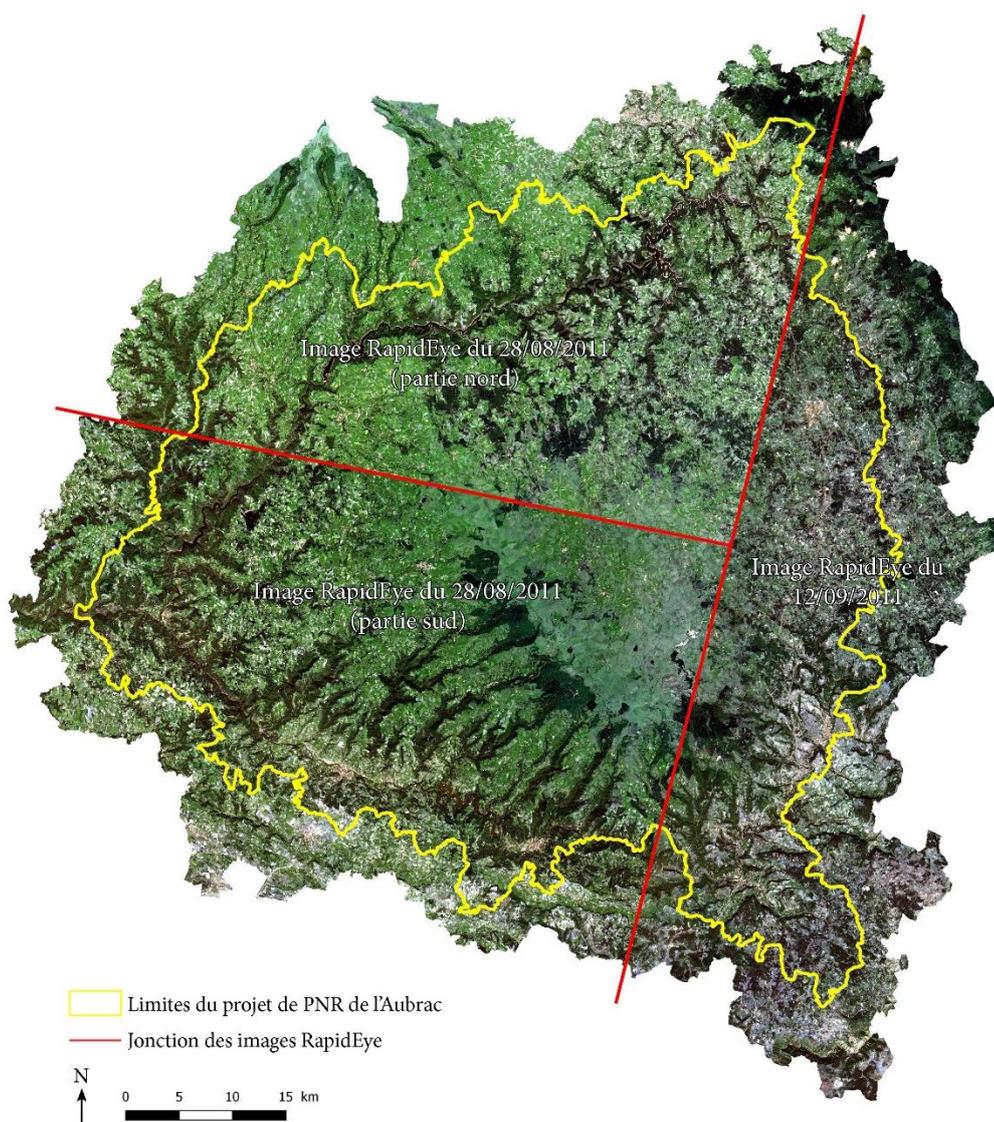


Figure 28. Mosaïque d'images RapidEye sur le périmètre d'étude du projet de PNR de l'Aubrac

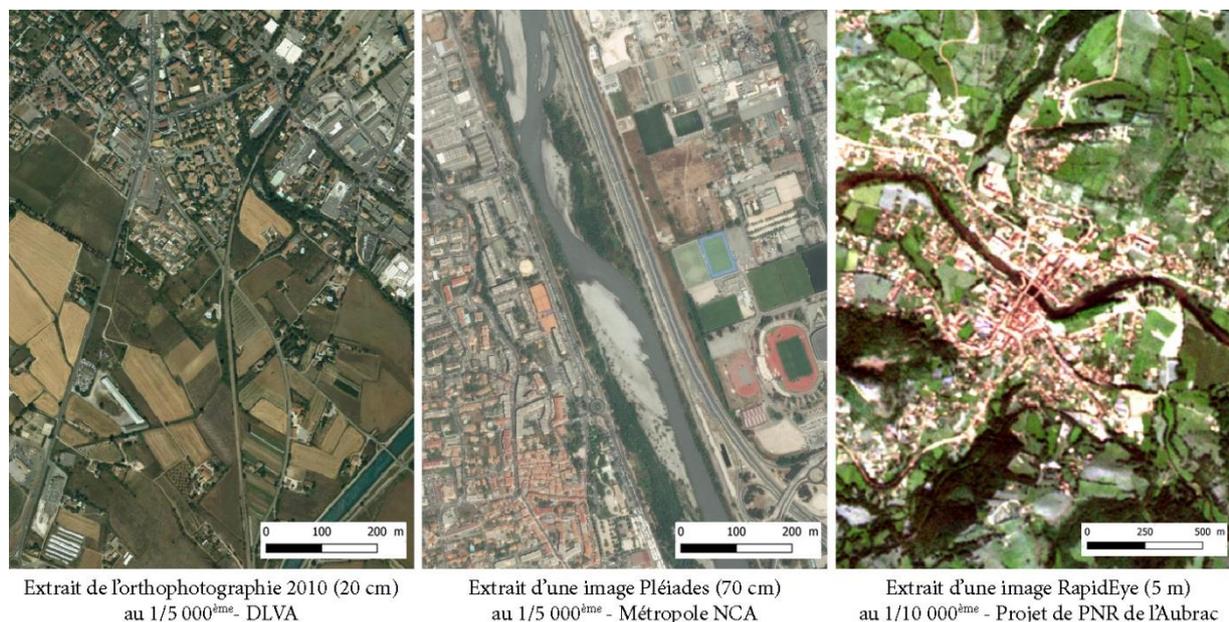


Figure 29. Extraits des données de référence utilisés pour les trois cas d'application

3.2.2 Les données exogènes

Les données exogènes ou auxiliaires ont pour principale vocation d'apporter des éléments ou indices à l'interprétation de l'imagerie source. Ces données complémentaires n'ont pas pour vocation de se substituer à la photo-interprétation. Par contre, dans certains cas elles peuvent contribuer à l'élaboration d'un référentiel polygonal reconnu comme le squelette des infrastructures linéaires (routes, voies ferrées) (Gourgand 2014; Louvet et Ajouc 2014). En règle générale, pour chacune des prestations concernant la réalisation d'un MOS à grande échelle, les données exogènes mises à disposition du producteur sont en grande partie les mêmes. Cela se confirme dans les trois cas d'étude présentés ici.

Les données du RGE® de l'IGN sont systématiquement proposées pour l'aide à l'interprétation (Tableau 5). Parmi elles, la BD TOPO® contribue en grande partie à l'élaboration du squelette routier et ferré. Elle apporte également de nombreuses informations sur l'urbanisme (bâti, équipements, découpages administratifs) et l'hydrographie (cours et plans d'eau). La BD ALTI® apporte une compréhension sur le relief de la zone d'interprétation. La BD FORET® appuie l'interprétation du type des couverts boisés (feuillus, résineux, etc.). De la même manière, le Scan25® apporte une perception de la pente, des toponymes et la localisation d'équipements urbains ou de milieux naturels ou semi naturels particuliers (écoles, casernes, zones humides, tourbières, couverts boisés, etc.). Le Registre Parcellaire Graphique (RPG) est également une donnée récurrente dans ce type de prestation. Il permet d'appuyer des décisions d'interprétation sur les milieux agricoles. Dans le cas de territoire urbain, la donnée cadastrale numérisée délivrée par la DGFIP est souvent mobilisable. Outre ces données exogènes courantes, le commanditaire peut mettre à disposition une série de données complémentaires propre à son territoire. Il s'agit souvent d'inventaires locaux sur les espaces naturels comme les zones humides ou sur les équipements urbains. Dans la majeure partie des cas, le commanditaire propose une quantité de données exogènes exhaustives sans savoir si elles seront vraiment utiles à l'interprétation ou inversement.

3.2.3 Échelles et Unité Minimale de Cartographie

Les notions d'échelles, d'Unité Minimale de Cartographie (UMC) apportent, dans le cahier des charges, les informations sur les précisions géométriques attendues pour la production de BD Ocsol GE.

Tout d'abord, l'échelle de saisie (ou échelle de numérisation) ne doit pas être confondue avec l'échelle d'utilisation (ou de lecture) optimale de la donnée. Cette dernière correspondant à l'échelle à laquelle l'utilisateur doit consulter et exploiter la base de données spatialisée pour éviter toute mauvaise interprétation de la précision géométrique, topologique et sémantique. L'échelle de saisie n'intéresse que le producteur de la donnée. En règle générale, elle est fixée à une échelle deux fois plus grande que l'échelle d'utilisation (Provencher et Dubois, 2007). Par exemple, pour une échelle d'utilisation désirée au 1/10 000^e, le producteur effectuera une saisie et une interprétation des polygones d'occupation du sol au 1/5 000^e. L'objectif recherché est de rendre la tolérance d'erreur à la saisie au 1/5 000^e non visible à l'échelle d'utilisation de 1/10 000^e (Figure 30).

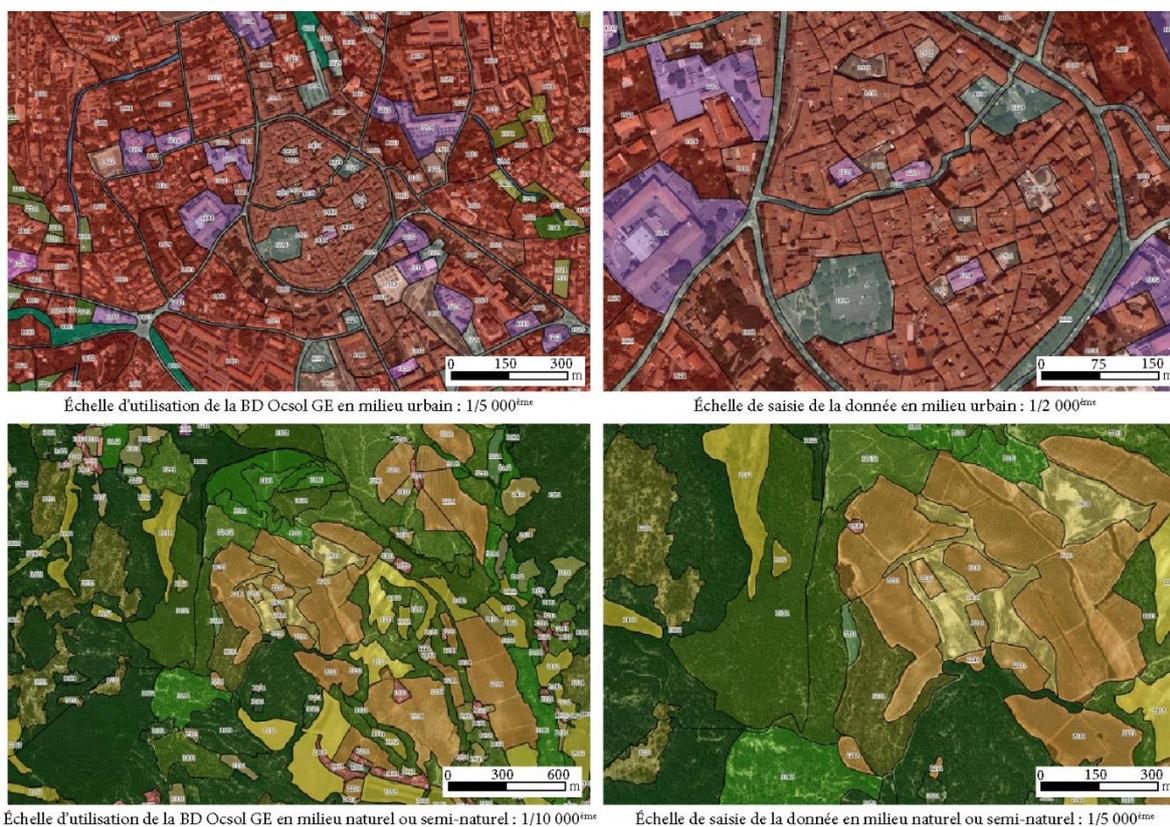


Figure 30. Échelle de lecture et échelle de saisie de la BD Ocsol GE de la DLVA en milieu urbain et rural

À travers les trois cas d'études présentés, cette distinction d'échelle est bien comprise. L'échelle 1/10 000^e est appréciée pour l'utilisation d'une donnée Ocsol GE. Cependant, pour le projet de PNR de l'Aubrac, cette échelle est fixée au 1/25 000^e. La raison réside en grande partie à cause de la moins bonne précision spatiale de l'imagerie Rapideye® comme donnée source de l'interprétation. D'autre part, ce choix se base sur l'harmonisation de leur référentiel avec les référentiels au 1/25 000^e des autres parcs de Midi-Pyrénées. Pour des territoires à caractère plus

urbain, comme celui de Nice ou bien de Manosque, les commanditaires apportent ou exigent une donnée plus fine dans les espaces artificialisés. Le passage d'une utilisation au 1/10 000^e au 1/5 000^e dans les espaces urbains permet d'appréhender des éléments géographiques, en moyenne, de plus faible emprise au sol (bâti isolé, espace vert urbain, place, etc.).

La détermination d'une échelle de saisie permet également de fixer des seuils de collectes des objets paysagers, nommés couramment Unité Minimale de Cartographie (UMC). Il est possible de rencontrer ce terme sous d'autres noms (UMI/LMI pour Unité ou Largeur Minimale d'intérêt (Gourgand 2014)). La superficie est exprimée en m² et la largeur en m et fixent un seuil de surface et de largeur à partir duquel un élément géographique est saisi ou non dans la base de données spatialisée. Ces seuils sont garants de l'homogénéité du tracé et de l'interprétation de l'occupation et l'utilisation du sol sur l'ensemble de la base. Le choix des seuils est réalisé en fonction des niveaux de précision globale et d'exhaustivité demandée mais aussi en fonction du coût financier de la production. Par exemple, la saisie d'éléments géographiques avec une UMC de 200 m² engendre un temps de production plus long par rapport à la saisie d'éléments géographiques avec une UMC de 2 500 m², par conséquent le prix de la production augmente.

En règle générale, les surfaces et largeurs minimales indiquées par les commanditaires sont variables en fonction des postes de la nomenclature et de l'échelle de saisie. Sur le projet de PNR de l'Aubrac, l'ensemble des UMC est fixé à 2 500 m² de superficie et 25 m de largeur. La raison repose sur une échelle de saisie trop petite (1/12 500^e) ne permettant pas de saisir efficacement des éléments plus petits que 2 500 m². Les échelles de saisie indiquées par la Métropole NCA et la DLVA permettent de fixer des seuils plus fins. Dans les espaces artificialisés, les seuils sont compris entre 500 m² et 2 500 m² pour les surfaces et de 10 à 20 m pour les largeurs. Dans les espaces agricoles et forestiers, les seuils de 2 500 m² et de 20 m sont conservés dans l'hypothèse d'une plus forte emprise au sol des postes de nomenclature composant ces espaces. Pour les espaces de zones humides les seuils sont compris entre 1 000 m² et 2 500 m² pour les surfaces et de 10 m à 20 m pour les largeurs. Enfin les éléments à caractère linéaire comme les routes, les voies ferrées ou les cours d'eau sont uniquement exprimés par une largeur minimale, en générale de 8 m minimum.

3.2.4 Le squelette polygonal des infrastructures linéaires : routes et voies ferrées

De façon générale, il est entendu par squelette d'infrastructures linéaires, la réalisation d'une ossature (ou socle) polygonale des infrastructures routières et ferroviaires. La construction de ce squelette est rendu possible et facilitée en France par la BD TOPO® de l'IGN qui inventorie l'ensemble des réseaux routiers et voies ferrées au niveau national sous forme de polygones. Sans cette donnée précieuse, il serait difficile de concevoir la réalisation d'un squelette d'infrastructures linéaires. La digitalisation surfacique des linéaires routiers et ferroviaires à partir d'une image source s'avère un exercice difficile (perte du tracé sous couvert boisé, resserrements, élargissements, tunnels...) et surtout coûteux car elle exigerait une échelle de saisie très fine. En plus de géolocaliser le tracé des réseaux routiers et ferroviaires, la BD TOPO® IGN apporte des informations de descriptions sur chacun des tronçons qui les composent. Il est donc possible d'utiliser ces éléments de descriptions comme la largeur du tronçon, son importance vis-à-vis des autres tronçons ou encore sa position par rapport au sol (ponts, tunnels, etc.) pour construire une emprise surfacique de la trame viaire (*Figure 31*).



Figure 31. Extrait de l'ossature routière de l'OCS GE produite par l'IGN sur la commune d'Aureilhan en région Midi-Pyrénées – source : IGN, 2015

L'élaboration d'un squelette polygonal des infrastructures linéaires intervient en aval de la photo-interprétation. Il est important de préciser ici que le squelette n'a pas vocation à être un inventaire exhaustif des réseaux routiers et ferroviaires. Par contre la génération de ce socle polygonal à plusieurs intérêts : tout d'abord, les réseaux routiers et ferroviaires sont des éléments structurant du paysage d'un territoire (Gourgand 2014). Ils permettent la jonction entre les différentes parties du territoire et induisent souvent des limites artificielles faciles à comprendre entre les espaces urbains, naturels et semi-naturels. Par exemple, le passage d'un quartier de grands ensembles à une zone d'habitats pavillonnaires ou le passage d'un espace agricole à un espace forestier. Même si en réalité, les transitions entre les espaces ne sont pas toujours aussi brutales, la prise en compte des réseaux routiers et ferroviaires permet de synthétiser la compréhension du paysage pour la phase de photo-interprétation ; les réseaux routiers et ferroviaires sont également des éléments qui évoluent peu dans le temps. Ainsi, leur prise en compte permet de rendre facilement compatible (géométrie et topologie) la construction d'une base de données sur plusieurs dates ; d'autres parts l'utilisation d'une base nationale comme la BD TOPO® de l'IGN permet d'entrevoir une compatibilité du squelette avec d'autres territoires ou d'autres bases de données.

Dans le cadre des prestations pour la Métropole Nice Côte d'Azur et la DLVA, la démarche d'élaboration d'un squelette est soutenue par le CRIGE PACA. Ce dernier apporte aux commanditaires des préconisations techniques afin d'harmoniser, à l'échelle de la région, la création des ossatures d'infrastructures linéaires. Pour le projet de PNR de l'Aubrac, un socle polygonale basé sur les réseaux routiers et ferroviaires est également demandé mais sans consigne particulière.

3.2.5 La photo-interprétation

La Photo-Interprétation Assistée par Ordinateur (PIAO) reste la méthode privilégiée par les commanditaires de BD Ocsol GE (Robert et Autran 2012; Roy 2013). La raison de ce choix se base sur la complexité du découpage et de l'interprétation qu'ils induisent. L'expertise humaine avancée semble incontournable pour appréhender des postes de nomenclature complexes comme les zones humides, les équipements particuliers, les espaces agricoles, etc. L'utilisation d'algorithmes semi-automatiques pour réaliser cette phase semble, à leur égard, trop risquée et sans garantie. Les cas d'études présentés ici, confirment ce choix. Aucun des commanditaires n'évoque l'utilisation de la télédétection numérique pour la détection et l'identification des classes d'occupation du sol. Cependant aucun ne les interdit non plus. Seul, la Métropole NCA précise « *la méthodologie utilisée sera la photo-interprétation et/ou la télédétection de zones homogène* ». Cette précision reflète un certain inconfort général chez les commanditaires envers les techniques de télédétection. Pour rappel, la photo-interprétation est l'approche analogique de la télédétection qui comprend également la photogrammétrie et la télédétection numérique (Bonn et Rochon 1992). Dans le langage courant ou non initié, le mot « *télédétection* » est souvent utilisé, à tort, pour désigner uniquement l'approche numérique de celle-ci. Certes plus récente, l'approche numérique se concentre sur la reconnaissance automatique des formes à partir d'algorithmes de traitements d'image. On parle, dans ce cas, plutôt de photo-identification que de photo-interprétation qui, elle, induira toujours l'intelligence et le raisonnement humain (Chevalier 1966; Philipson 1997; Provencher et Dubois 2007).

3.3 Les nomenclatures

Encore aujourd'hui, la base de données spatialisée européenne CORINE Land Cover initiée en 1985 et produite pour les années 1990, 2000, 2006 et 2012 constitue l'unique source d'information sur l'occupation du sol pour de nombreux gestionnaires territoriaux (Saffroy et Lambert 2013). Pour rappel (*section 1.2.1.1*), cette base de donnée est conçue pour une utilisation de son échelle d'utilisation au 1/100 000^e, avec une UMC minimale de 25 ha et une UMC de détection de changement de 5 ha qui ne répond plus aux exigences (aux besoins) d'une cartographie à grande échelle. Le besoin d'augmenter l'échelle d'utilisation et de diminuer la taille des Unités minimales de Cartographie (UMC) est primordial. Par contre elles s'inspirent toujours du modèle de nomenclature proposé par CORINE Land Cover (CLC). Les trois cas d'études présentés dans cette partie en sont les illustrations. Toutefois, la nomenclature CLC a nécessité une adaptation aux besoins récents en matière d'informations sur l'occupation et l'utilisation du sol. La première sous-partie montre l'apport de nouvelles définitions et des ajouts de nouvelles classes sur les niveaux 1 à 3 de CLC dans le cadre des trois cas d'études. Les deux sous-parties suivantes exposent la déclinaison d'un niveau 4 et d'un niveau 5 de la nomenclature CLC pour satisfaire un besoin de précision thématique supplémentaire des commanditaires.

3.3.1 L'adaptation de Corine Land Cover, niveau 1 à 3

Le *Tableau 6* et le *Tableau 7* présentent l'adaptation de la nomenclature CLC du niveau 1 à 3 en fonction des différentes études. Le projet de PNR de l'Aubrac s'appuie grandement sur l'expérience des trois PNR de Midi-Pyrénées. L'association d'émergence du parc s'applique à utiliser la même nomenclature que celle utilisée par les trois autres parcs. Les choix et l'adaptation de la nomenclature sont élaborés par l'ARPE de Midi-Pyrénées en s'appuyant sur le travail de l'association IPAMAC autour du projet d'identification d'une trame écologique du Massif Central. Pour la Métropole NCA et la DLVA, la nomenclature s'appuie sur les préconisations du CRIGE-PACA soucieux d'une harmonisation des référentiels à grande échelle sur l'ensemble de la région.

Cette contextualisation est importante. Elle explique qu'il n'existe pas une seule adaptation de la nomenclature CLC mais bien plusieurs. Ces adaptations s'appuient à la fois sur les objectifs stratégiques voulant être atteints par la base de données spatialisée et l'expérience du territoire. Le point commun de ces adaptations est la volonté de ne pas déstructurer complètement le système d'emboîtement, les libellés et le codage proposé par CLC. Si une modification doit être apportée, elle doit pouvoir être réalisée en cohérence avec ces derniers. L'objectif est d'éviter l'isolement de la base de données spatialisée à produire par rapport au référentiel européen.

Tableau 6. Nomenclature Corine Land Cover adaptée pour la Métropole NCA et la DLVA

	Niv.1	Niv. 2	Niv. 3
rajout ou modification de poste par rapport à CLC	1 – Espaces artificialisés	11 – Zones urbanisées	111. Tissu urbain continu
			112. Tissu urbain discontinu
			113. Espaces de bâti diffus et autres bâtis
		12 – Zones industrielles ou commerciales, infrastructures et équipements	121 – Zones d'activité et équipements
			122 – Réseaux routier et ferroviaires et espaces associés
			123 – Zones portuaires
			124 – Aéroports
		13 – Mines, décharges et chantiers	131 – Extraction de matériaux
			132 – Décharges
			133 – Chantiers
		14 – Espaces ouverts et zones de loisirs	141 – Espaces ouverts urbains
			142 – Équipements sportifs et de loisirs
classes retenues uniquement pour la Métropole NCA	2 – Espaces agricoles	21 – Terres arables	211 – Terres arables autres que serres et rizières
			213 – Rizières
			214 – Zones à forte densité de serres
		22 – Cultures permanentes	221 – Vignobles
			222 – Arboriculture autre qu'oliviers
			223 – Oliveraies
			224 – PAPAM
		23 - Prairies	231 – Prairies
		24 – Zones agricoles complexes ou en mutation	241 – Cultures annuelles associées aux cultures permanentes
			242 – Syst. culturaux mixte et petits parcellaires complexes
			243 – Friches agricoles et délaissés en zone agricole
			244 – Espaces agro-forestiers
classes non retenues pour la Métropole NCA et la DLVA	3 – Forêts et Milieux semi-naturels	31 - Forêts	311 – Forêts de feuillus
			312 – Forêts de conifères
			313 – Forêts mélangées
		32 – Milieux à végétation principalement arbustives et/ou herbacée	321 – Pelouses et pâturages naturels ou semi-naturels
			322 – Landes et broussailles
			323 – Maquis et Garrigues
			324 – Forêts et végétations arbustives en mutation
		33 – Espaces ouverts, sans ou avec peu de végétation	331 – Plages, sable et dunes
			332 – Roches nues
			333 – Végétation clairsemée
			334 – Zones incendiées
			335 – Glaciers et neiges éternelles
4 – Zones humides	41 – Zones humides intérieures	411 – Marais intérieurs et roselière	
		412 – Tourbières	
		413 – Autres zones humides intérieures	
42 – Zones humides maritimes	421 – Marais maritimes		
	422 – Marais salants		
5 – Surfaces en eau	51 – Eaux continentales	511 – Cours et voies d'eau	
		512 – Plans d'eau	
	52 – Eaux maritimes	521 – Lagunes littorales	
523 – Mers et océans			

Tableau 7. Nomenclature Corine Land Cover adaptée pour le projet de PNR de l'Aubrac

	Niv.1	Niv. 2	Niv. 3
rajout ou modification de poste par rapport à CLC	1 – Territoires artificialisés	11 – Zones urbanisées	111 – Tissu urbain continu
			112 – Tissu urbain discontinu
			113 – Habitat rural isolé
		12 – Zones industrielles ou commerciales et réseaux de communication équipements	121 – Zones industrielles ou commerciales
			122 – Réseaux routier et ferroviaires et espaces associés
			123 – Zones portuaires
			124 – Aéroports
			125 – Infrastructures de production d'énergie
		13 – Mines, décharges et chantiers	126 – Friches industrielles et délaissées
			131 – Extraction de matériaux
			132 – Décharges
		14 – Espaces verts artificialisés non agricoles	133 – Chantiers
			141 – Espaces verts urbains
classes non retenues pour le projet de PNR de l'Aubrac	2 – Territoires agricoles	21 – Terres arables	142 – Équipements sportifs et de loisirs
			211 – Terres arables hors périmètres d'irrigation
			212 – Périmètres irrigués en permanence
	22 – Cultures permanentes	213 – Rizières	
		221 – Vignobles	
		222 – Vergers et petits fruits	
	23 – Prairies	223 – Oliveraies	
		231 – Prairies	
	24 – Zones agricoles hétérogènes	241 – Cultures annuelles associées aux cultures permanentes	
		242 – Systèmes culturaux et parcellaires complexes	
		243 – Surf. essentiellement agri, coupées par des esp.nat importants	
		244 – Territoires agro-forestiers	
	3 – Forêts et Milieux semi-naturels	31 – Forêts	311 – Forêts de feuillus
312 – Forêts de conifères			
313 – Forêts mélangées			
32 – Milieux à végétation arbustives et/ou herbacée		321 – Pelouses et pâturages naturels ou semi-naturels	
		322 – Landes et broussailles	
		323 – Végétation sclérophylle	
		324 – Forêts et végétations arbustives en mutation	
33 – Espaces ouverts, sans ou avec peu de végétation		331 – Plages, dunes et sable	
		332 – Roches nues	
		333 – Végétation clairsemée	
		334 – Zones incendiées	
		335 – Glaciers et neiges éternelles	
		336 – Coupes forestières	
4 – Zones humides	41 – Zones humides intérieures	411 – Marais intérieurs	
		412 – Tourbières	
		413 – Prairies humides	
42 – Zones humides maritimes	421 – Marais maritimes		
	422 – Marais salants		
5 – Surfaces en eau	51 – Eaux continentales	511 – Cours et voies d'eau	
		512 – Plans d'eau	
	52 – Eaux maritimes	521 – Lagunes littorales	
		523 – Mers et océans	

La première notification importante porte sur la terminologie du mot « espace » utilisée par le CRIGE-PACA pour remplacer celui de « territoire » proposé par CLC au niveau 1. Même si pour l'utilisateur, cette différenciation peut sembler anodine, elle traduit une précision importante sur la vocation du niveau 1 comme description de la couverture du sol et non de l'usage. En effet, en géographie, la notion de territoire est autonome et n'est en aucun cas un synonyme ou substitut de la notion d'espace. Le territoire est une portion d'espace terrestre perçue à travers ses rapports avec des groupes humains qui l'occupent et qui l'aménagement (Elissalde 2005). Cette précision n'est pas prise en compte dans la nomenclature du projet de PNR de l'Aubrac.

Dans les « **territoires** » ou « **espaces** » **artificialisés**, les trois commanditaires, créent un nouveau poste « 113 – *Habitat rural et isolé* » pour le projet de PNR et « 113 – *Espaces de bâti diffus et autres bâtis* » pour la Métropole NCA et la DLVA. L'objectif est de prendre en compte dans ces bases, la réalité du mitage urbain sur les territoires là où CLC ne pouvait pas le cartographier à cause de son UMC trop grande (25 ha). Les postes « 125 – *Infrastructures de production d'énergie* » et « 126 – *Friches industrielles et délaissées* » sont créés pour la nomenclature du projet de PNR. A l'inverse, la Métropole NCA et la DLVA préfèrent voir ces postes spécifiques au niveau 4 et redéfinissent pour cela le poste « 121 – *Zones d'activité* » en « 121 – *Zones d'activité et équipements* ». Les commanditaires de la région PACA transforment le poste « 141 – *Espaces verts urbain* » en « 141 – *Espaces ouverts urbains* » afin d'élargir les déclinaisons possibles en niveau 4 pour ce poste.

L'association d'émergence du projet de parc conserve la structuration CLC pour les « **territoires** » **agricoles**. En revanche, la Métropole NCA et la DLVA proposent de rassembler les postes initiaux « 211 – *Terres arables hors périmètres d'irrigation* » et « 212 – *Périmètres irrigués en permanence* » en un poste unique « 211 – *Terres arables autres que serres et rizières* ». La caractéristique de l'irrigation semble ici non appropriée. Ils préfèrent décliner le poste « 214 – *Zones à fortes densité de serres* », au niveau 3, considéré comme important en contexte méditerranéen. Ils précisent également le poste « 222 – *Vergers et petits fruits* » en poste « 222 – *Arboriculture autre qu'oliviers* » afin de donner un caractère plus agricole à ce poste et éviter l'intégration des petits vergers de particuliers. Le rajout du postes « 224 – *PAPAM* » pour Plantes À Parfum, Aromatique et Médicinales (lavandes, lavandins, basilics, coriandres, romarins, thym...) est particulier aux territoires méditerranéens. Leur importante emprise au sol amène à les considérer comme un poste à part entière en niveau 3. Enfin le poste de niveau 2 « 24 – *Zones agricoles hétérogènes* » est redéfini en « 24 – *Zones agricoles complexes ou en mutation* ». L'idée générale est de préciser des postes de niveau 3 en accord avec une approche plus fine de l'occupation et l'utilisation du sol.

Pour les **forêts et milieux semi-naturels**, les zones d'études méditerranéennes accordent une modification du poste « 323 – *Végétation sclérophylle* » en poste « 323 – *Maquis et garrigues* » plus parlant et proche de leur paysage même si leur définition reste floue. La nomenclature du projet de parc du PNR de l'Aubrac ajoute un poste « 336 – *Coupes forestières* » là où les deux autres commanditaires intègrent cet élément dans le poste « 324 – *Forêts et végétations arbustives en mutation* ».

Enfin, les **zones humides et surfaces en eau** connaissent peu d'évolution sur les trois premiers niveaux. Dans tous les cas, le poste « 413 » est rajouté. Pour le projet de PNR de

l'Aubrac, celui-ci signifie « *Prairies humides* » et pour la Métropole NCA et la DLVA, il signifie « *Autres zones humides intérieures* ». Malgré tout, les terminologies utilisées pour ces espaces restent fragiles. L'utilisation d'un terme plutôt qu'un autre pour la cartographie des zones humides peut avoir un impact sur des actions réglementaires pour ce type de milieu.

Bien que les nomenclatures soient adaptées aux espaces et aux territoires, les commanditaires sont libres de sélectionner les postes qui apparaîtront dans leur base de données spatialisée. De manière générale, certains postes ne sont pas retenus tout simplement car ils ne sont pas ou peu représentés sur la zone d'étude (zones portuaires, zone à fortes densités de serres, glaciers et neiges éternelle, etc.). Cette sélection se fait naturellement et par expérience des territoires.

3.3.2 Un niveau 4 pour une cartographie à grande échelle

La nomenclature CORINE land cover est construite de manière officielle sur 3 niveaux de nomenclature (EEA 1994). Cependant celle-ci prévoit la création potentielle d'un niveau 4 pour anticiper certaines spécificités territoriales dans les différents pays couverts. Dans le respect de l'échelle d'utilisation, des UMC/LMC et de l'emboîtement des niveaux, les éléments géographiques ne trouvant pas leur place dans la terminologie des classes de niveau 3 peuvent faire l'objet d'une déclinaison dans un quatrième niveau. En France, ce sont les Départements d'Outre-Mer (DOM) qui portent quelques spécificités en niveau 4 pour CLC.

Cette potentialité d'un niveau 4 a très vite présenté un intérêt pour les productions cartographiques à grande échelle. Dès lors, il devient intéressant de mettre en valeur des caractéristiques spécifiques d'un territoire en préservant un socle commun et reconnu de nomenclature pour comparer les territoires à des échelles plus petites. En général, Cette démarche est initiée au niveau infrarégional par des entités locales comme les Métropoles, les EPCI, les agences d'urbanisme ou encore un syndicat mixte (Saffroy et Lambert 2013). Néanmoins, il n'est pas vraiment possible de parler de niveau 4 « *officiel* » ou « *de référence* ». En France, on parle plutôt de « *préconisations* » (Louvet et Ajouc 2014) ou de « *prescriptions* » (Gourgand 2014) de nomenclature porté par des organismes compétents en la matière (IGN, CRIGE, Recherche). L'objectif est de conserver un relatif cadre commun de production entre toutes les initiatives de création de BD Ocsol GE au niveau local, régional et national. Malgré tout, les commanditaires directs de BD Ocsol GE (Métropoles, EPCI, agences d'urbanismes, syndicats mixtes, etc.) possèdent une certaine autonomie pour composer un niveau 4. Ils peuvent ainsi apporter des besoins de précisions thématiques spécifiques (par exemple, sur les tissus urbains, les densités des couverts forestiers, les zones humides, etc.) sur une partie ou l'ensemble du territoire d'étude. Il est important de noter que le coût financier supplémentaire pour la production d'un niveau 4 conditionne en partie l'intégration ou non de certains postes de nomenclature en niveau 4.

Dans les trois études présentées ici, la demande d'un niveau 4 est spécifiée. Le *Tableau 8* compare les choix de postes retenus par les commanditaires. Deux stratégies se dégagent :

Le projet de PNR de l'Aubrac opte pour 56 postes en niveau 4. Ce choix repose en partie sur le choix de l'imagerie Rapideye® retenue comme donnée source à l'interprétation de l'occupation du sol. La résolution spatiale limitée de ce capteur (5 m) ne permet pas d'envisager une nomenclature de niveau 4 exhaustive. Même si l'association d'émergence propose d'utiliser

les BD ORTHO® de l'IGN pour les espaces artificialisés, ces espaces sont peu déclinés en niveau 4 en raison de la faible emprise au sol qu'ils représentent sur ce territoire. Hormis quelques postes particuliers intéressants pour l'élaboration de la charte du parc comme les postes « 1251 – Centrales électriques », les « 1252 – Parcs ou centrales éoliennes », les « 1253 – Fermes ou centrales photovoltaïques » et les « 1261 – Friches industrielles et les délaissés », l'accent est essentiellement porté sur les milieux naturels et semi-naturels (« 2114 – Jachères », « 2115 – Cultures bocagères », « 4131 – prairies humides », etc.).

La Métropole NCA retient 44 postes en niveau 4. L'intégralité de ces postes porte sur les espaces artificialisés. Pour la DLVA il s'agit de 39 postes sur 75 postes en niveau 4 dédiés à ces mêmes espaces. Ces deux commanditaires ont clairement mis l'accent de leur nomenclature sur les territoires urbains. Les exigences du SCOT et l'élaboration du PLU pour ces deux territoires en sont les principales raisons. Ce choix est également motivé par l'imagerie THRS donnant la possibilité d'interpréter des morphologies urbaines complexes (« 1124 – Bâti collectif », « 1125 – Bâti mixte », etc.) et des équipements particuliers (« 1214 – Espaces d'équipements collectifs accueillant du public », « 1217 – Terrains vagues en zone d'activités », etc.). La Métropole NCA ne retient aucun poste en niveau 4 pour les espaces agricoles, les forêts et milieux semi-naturels, les zones humides et les surfaces en eau. Le niveau 3 est considéré comme suffisant vis-à-vis de leur besoin d'informations spatialisées pour ces milieux. Ce choix leur permet également de limiter l'impact budgétaire pour la production d'un niveau 4 sur un grand territoire comme le leur. À l'inverse, La DLVA souhaite décliner assez largement les espaces agricoles du point de vue des cultures permanentes très représentées sur les territoires méditerranéens. Elle choisit également de décliner les forêts et milieux semi-naturels, les zones humides et les surfaces en eau selon les préconisations du CRIGE PACA pour étudier de façon précise la mutation de ces espaces sur le territoire. Seul le poste « 3141 – bosquets et haies » est un rajout propre à la nomenclature de niveau 4 adoptée par la DLVA.

Le niveau 4 de la nomenclature est un niveau « à la carte » non figé. La définition et l'interprétation de ces postes de niveau 4 sont souvent sujettes à divergences. Tous les cas de figures sont difficilement prévisibles dès le départ du projet cartographique. Des modifications ou des rajouts de postes sont toujours possible en cours de production mais doivent toujours rester en cohérence avec l'emboîtement de niveau.

3.3.3 Un niveau 5 ponctuel

La déclinaison de la nomenclature vers un niveau 5 n'est pas nécessairement liée à une notion d'échelle spatiale visant à cartographier des objets paysagers de plus petite taille. Le plus souvent, le niveau 5 arrive en ultime recours à un besoin de précision thématique. Toutefois, il est peu observé dans les réalisations de BD Ocsol GE et reste très ponctuel. Par ailleurs, le niveau 5, n'est pas ou peu décrit dans les différents documents de préconisations ou de prescriptions pour la production de BD Ocsol GE (Gourgand 2014; Louvet et Ajouc 2014). Le niveau 5 peut se justifier pour décliner certaines classes d'occupation du sol à partir d'un croisement sous SIG avec une donnée exogène difficilement interprétable sur l'image. Par exemple, pour caractériser la végétation selon l'altitude ou l'exposition. Pour le producteur de la base de données, l'utilisation d'un niveau 5 peut se justifier pour résoudre un litige d'affectation de classes au niveau 4 lors de l'interprétation. Le niveau 5 permet de conserver une information géographique particulière et remarquable qui sera facilement récupérable si le commanditaire souhaite réaffecter cette classe marginale dans une classe de niveau 4.

Pour la Métropole NCA, aucune déclinaison en niveau 5 n'est demandée. Pour le projet de la DLVA, un unique poste a subi une déclinaison en niveau 5. Il s'agit du poste « 3243 – Coupes rases et incidents » décliné en « 32431 – Coupes associées aux lignes Haute Tension (HT) et coupe-feu » et « 32432 – Autres coupes rases (production de bois... »). La décision de décliner ce poste 3243 a été prise en cours de production à la suite de la photo-interprétation de zones tests par le producteur et d'une discussion avec le commanditaire. L'emprise au sol des coupes forestières liées aux lignes HT était trop importante pour les ignorer. La codification en niveau 5 permet de les mettre en évidence sans les confondre dans un autre poste possédant une description proche. L'isolement de ce poste permet de retrouver facilement ces éléments géographiques particuliers. Ainsi, il est facile de les réaffecter dans un autre poste après coup, si le commanditaire estime que cela est nécessaire.

Seul le projet de PNR de l'Aubrac demande un niveau 5 conséquent basé sur le croisement sous SIG de la BD Ocsol avec l'étagement de la végétation sur la zone d'étude. Par exemple, une forêt de feuillus en altitude a de fortes chances de présenter des caractéristiques faunistiques et floristiques différentes d'une forêt de feuillus en plaine. Ce niveau 5 est le fruit des recherches menées dans le cadre du projet d'identification d'une trame écologique du Massif Central par l'association IPAMAC. Les différences bioclimatiques sont traduites par un étagement du paysage par rapport à l'altitude. D'après les travaux de l'IPAMAC, seul l'étage collinéen (inférieur à 800-1 000 m d'altitude) et l'étage montagnard (de 800-1000 m à 1700-1900 m) peuvent être retenus sur le périmètre du projet de PNR de l'Aubrac. Avec un point culminant de 1 469 m les étages sub-alpin, alpin et nival ne sont pas représentés sur la zone d'étude. La caractérisation par l'étagement ne concerne que certains postes liés aux espaces agricoles et aux forêts et milieux semi-naturels. Il s'agit principalement des milieux prairiaux, forestiers, de pelouses et pâturages naturels, de landes et de végétations clairsemées. 16 nouveaux postes sont créés en niveau 5 (Tableau 9) où le libellé du niveau 4 est repris suivi du suffixe « collinéen » ou « montagnard » pour préciser son appartenance à un étage bioclimatique.

Tableau 9. Déclinaison en niveau 5 de la nomenclature de la BD Ocsol GE du projet de PNR de l'Aubrac

Niv. 4	Niv. 5
2311 - Prairies permanentes naturelles/de fauche ou de longue rotation	23111 – Prairies permanentes naturelles/de fauche du collinéen
	23112 – Prairies permanentes naturelles/de fauche du montagnard
2312 – Prairies avec bocage	23121 – Prairies permanentes naturelles/de fauche avec bocage du collinéen
	23122 – Prairies permanentes naturelles/de fauche avec bocage du montagnard
3111 – Forêt de feuillus	31111 – Forêts de feuillus du collinéen
	31112 – Forêts de feuillus du montagnard
3112 - Peupleraie	
3113 – Ripisylve ou autre forêt rivulaire	
3121 – Forêt de conifère	31211 – Forêts de conifères du collinéen
	31212 – Forêts de conifères du montagnard
3122 – Plantation de résineux ou reboisement de résineux	
3131 – Forêts mélangées	31311 – Forêts mélangées du collinéen
	31312 – Forêts mélangées du montagnard
3211 – Pelouses et pâturages naturels	32111 – Pelouses du collinéen
	32112 – Pelouses du montagnard
3221 – Landes et broussailles	32211 – Landes et broussailles du collinéen
	32212 – Landes et broussailles du montagnard
3231 – Végétation sclérophylle	
3241 – Forêts claires et végétation arbustive en mutation	
3311 – Plages, dunes et sables continentaux	
3321 – Roches nues	
3331 – Végétation clairsemée	33311 – Végétation clairsemée et/ou dégradée du collinéen
	33312 – Végétation clairsemée et/ou dégradée du montagnard
3341 – Zones incendiées	
3361 – Coupes forestières	

3.4 Conduite d'une R&D progressive

Les travaux menés dans cette thèse ont largement été soutenus par les questions et les enseignements issus des prestations de service réalisées auprès des trois commanditaires des études précédentes (l'Association d'émergence du PNR de l'Aubrac, la Métropole Nice Côte d'Azur, la Communauté d'Agglomération de Manosque). Ainsi, la conduite du projet R&D a été fortement appliquée à des situations de production contraintes et opérationnelles. La R&D pratiquée ici s'est principalement axée autour d'une recherche appliquée et d'un développement expérimental, en lien fort avec trois terrains différents (Figure 32) soulevant des problématiques

spécifiques. La part de recherche fondamentale est alors minimale, et s'attache surtout à des questionnements plutôt qu'à l'apport de nouvelles connaissances théorique.

La conduite des trois prestations par le bureau d'études a été menée de manière successive entre 2014 et 2015. D'abord pour le projet de PNR de l'Aubrac, puis pour la Métropole Nice Côte d'Azur, enfin pour la Communauté d'Agglomération de Manosque (DLVA). Le déroulement successif de ces prestations a fortement conditionné les travaux de recherche et de développement menés pour optimiser le procédé de fabrication de BD Ocsol GE sur-mesure. En effet, le développement expérimental développé au cours de la première prestation pour le PNR de l'Aubrac a permis un premier retour d'expérience utile à la seconde prestation pour la Métropole Nice Côte d'Azur. Celle-ci a également permis de réaliser un certain nombre d'aller-retour qui ont alimenté la troisième prestation pour la DLVA (Figure 32). Au final, les travaux ont profité d'un apprentissage progressif au fil de ces trois prestations. Chaque application a renseigné des spécificités qui ont pu enrichir la recherche appliquée et le développement expérimental présentés dans cette thèse.

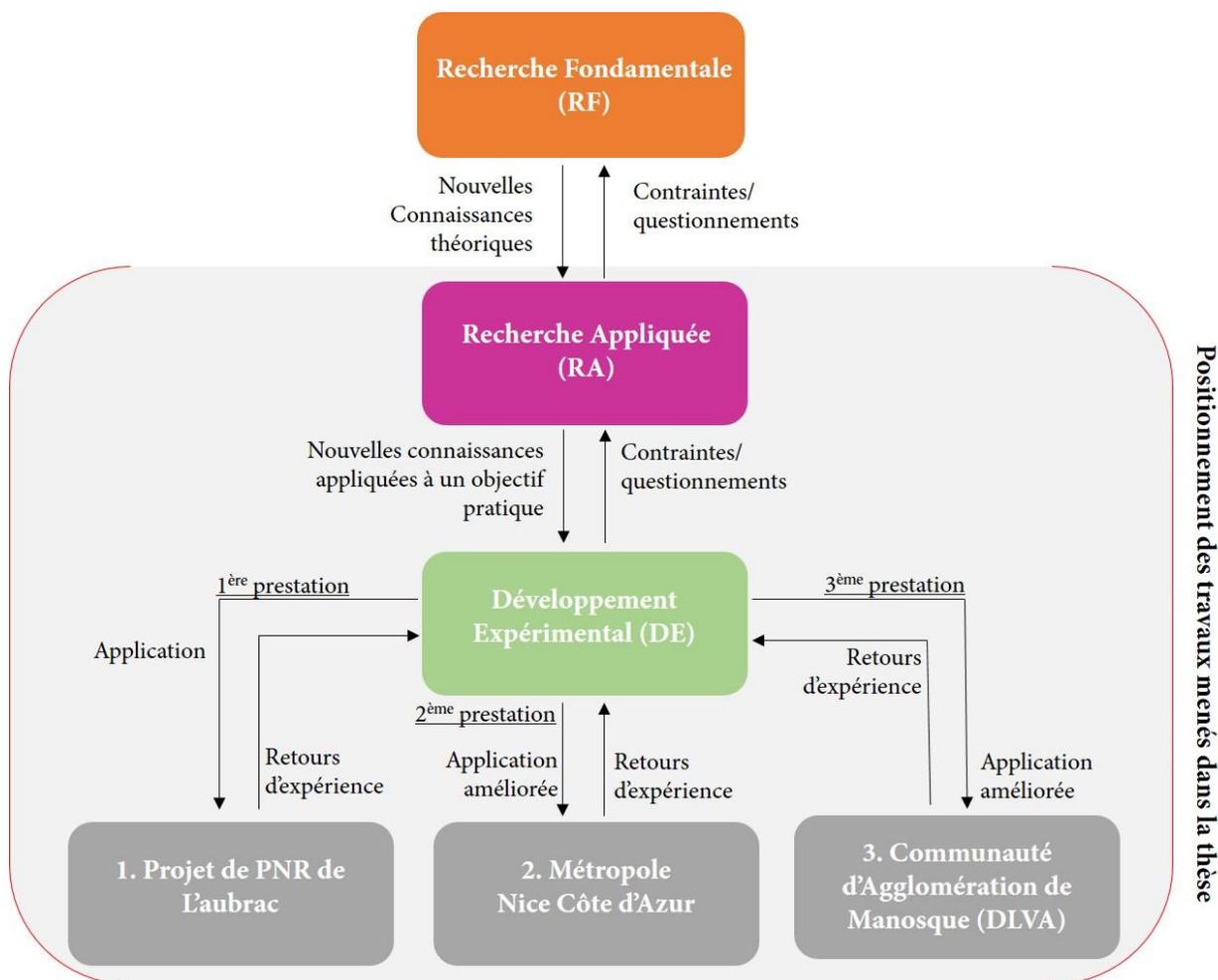


Figure 32. Positionnement des travaux de thèse menés dans le projet R&D

Conclusion de la première partie

La cartographie de l'occupation et de l'utilisation du sol à grande échelle est, aujourd'hui, clairement identifiée comme un besoin incontournable pour la gestion et le suivi opérationnel des territoires. Pourtant, à l'aube de 2020, ce besoin reste difficile à définir. L'avènement des images à Très Haute Résolution Spatiale (THRS) et des Systèmes d'information Géographique (SIG), durant ces dernières années, a permis d'ouvrir de nombreux champs d'applications cartographiques à grande échelle. Ce sont les gestionnaires locaux, voire régionaux, qui expriment le plus d'attentes envers ces nouveaux produits cartographiques. Il s'agit, pour eux, de disposer d'un outil cartographique capable de fournir une information précise sur l'état et l'usage de la surface terrestre selon une description thématique adaptée à leur besoin de management du territoire. L'objectif est d'assurer les opérations courantes de planification territoriale, de suivre les dynamiques économiques, sociales et environnementales et de se positionner sur les devenirs possibles des territoires.

En France, l'absence de référentiel national d'information cartographique à grande échelle sur l'occupation du sol, encore jusqu'à aujourd'hui, laisse les gestionnaires locaux se débrouiller seuls pour se doter d'un outil cartographique performant. Cette obligation est induit par une pression réglementaire renforcée depuis 2010 quant au suivi de l'occupation du sol et à la production de documents d'action aux échelons locaux. Les produits cartographiques les plus connus et encore largement utilisés, comme la BD CORINE Land Cover, s'avèrent insuffisants pour répondre aux exigences réglementaires. On assiste donc à une multiplication de Bases de Données spatialisées locales de l'Occupation du sol à Grande Échelle (BD Ocsol GE). Ces nombreuses initiatives cartographiques de proximité apportent des réponses cartographiques sur-mesure face aux problématiques propres à chaque territoire et à ses spécificités. Dans ce contexte, la standardisation de la cartographie de l'occupation du sol à grande échelle est difficile à concevoir et à mettre en place. Malgré l'élan du projet OCS GE® de l'Institut Géographique National (IGN) pour la production d'un référentiel national sur l'occupation du sol à grande échelle, il est à prévoir qu'il y aura encore aux niveaux régional et local, des besoins que cette donnée standardisée ne couvrira pas.

De fait, les cartes d'occupation du sol à grande échelle conservent un fort enjeu de production, notamment pour les prestataires de service qui exercent cette activité régulièrement. Le bureau d'études (BE) en environnement qui s'inscrit dans ce travail de thèse s'est emparé de cette question et a lancé, en 2012, un projet de Recherche et Développement (R&D) ambitieux. Le projet R&D mentionne un objectif d'automatisation d'une méthode de cartographie des modes d'occupation des sols à grande échelle. Toutefois, l'étude de faisabilité menée par le BE montre que les méthodes innovantes de cartographie issues de la télédétection et du traitement de l'image peinent à s'imposer pour ce type de production cartographique sur-mesure. La photo-interprétation est encore largement préférée pour sa capacité à s'adapter facilement aux contraintes des demandes inédites de cartographie à grande échelle. Toutefois elle reste une méthode de production lourde et difficilement rentable pour le producteur.

Il apparaît donc nécessaire de développer une méthode de production plus agile permettant de répondre régulièrement à des demandes cartographiques à grande échelle.

L'étude de marché, présentée dans le chapitre 2 confirme qu'il existe une réelle demande d'information sur l'occupation du sol même si celle-ci est exprimé de manière variée pour atteindre des objectifs différents. De plus, l'étude de marché confirme le recours systématique à la photo-interprétation comme procédé de production cartographique à grande échelle. Ainsi, une attention est portée pour des solutions cartographiques à moindre coût ou du meilleur rapport technique/prix. Cependant, les BD Ocsol GE restent des produits à forte expertise. L'automatisation de la production cartographique à grande échelle suscite des interrogations qui devront être levé par des travaux de référence.

L'analyse fonctionnelle d'une production régulière de BD Ocsol GE, menée par la suite, apporte les conditions dans lesquelles la recherche de pistes méthodologiques d'optimisation doit s'effectuer :

- permettre au producteur d'être rémunéré par le commanditaire et/ou les utilisateurs ;
- permettre au commanditaire et/ou aux utilisateurs de répondre aux besoins cartographiques ;
- être rentable pour le producteur ;
- être facilement utilisable pour le commanditaire et/ou les utilisateurs ;
- s'adapter au territoire ;
- s'adapter aux données ;
- respecter la nomenclature de l'occupation du sol ;
- respecter le ou les échelles et les consignes de cartographie ;
- respecter un délai de réalisation et un prix.

Le grand nombre de contraintes induit par une production régulière de BD Ocsol GE laisse peu de possibilité de substituer la photo-interprétation par une approche totalement automatisée. Dès lors, nous considérons que la photo-interprétation doit rester la méthode de production principale de BD Ocsol GE. Nous accordons un intérêt particulier à la segmentation numérique d'image en tant qu'outil d'optimisation de l'exercice de photo-interprétation, lors de la production d'une BD Ocsol GE.

Afin d'inscrire nos recherches dans un contexte de production opérationnelle, nous nous sommes vus confier trois prestations cartographiques de la part de commanditaires publics que sont : l'association d'émergence du projet de PNR de l'Aubrac, la Métropole Nice Côte d'Azur, et la communauté Durance Verdon Agglomération (DLVA). Nous avons voulu nous confronter aux exigences contractuelles inhérentes à ce type de marché afin d'identifier tous les éléments qui peuvent contraindre ou à l'inverse faire entrevoir, les potentialités d'optimisation du processus de production. Au final, chaque prestation est une opportunité d'enrichissement d'un travail de R&D principalement axée autour d'une recherche appliquée et d'un développement expérimentale.

Deuxième partie :
**Optimiser l'exercice de
photo-interprétation**

Introduction

Dans cette partie, nous présentons le développement d'une série d'outils dédiés à la mise en place d'une assistance à la digitalisation pour l'exercice de photo-interprétation d'une BD Ocsol GE. Le développement de ces outils est réalisé à l'aide des études supports présentées dans le chapitre 3. Cette partie est structurée de la manière suivante :

- dans le chapitre 4, nous menons l'analyse fonctionnelle de la segmentation en tant qu'assistance à la digitalisation. Cette analyse fonctionnelle nous permet d'exposer les choix techniques adoptés tout au long de ce travail ;

- dans le chapitre 5, nous présentons l'ensemble des prétraitements nécessaires à la réalisation d'une segmentation d'image ;

- dans le chapitre 6, nous développons la méthode de segmentation d'image ;

- et enfin, le chapitre 7 est dédié aux post-traitements de la segmentation d'image nécessaire à la finalisation de l'assistance à la digitalisation.

Chapitre 4 :

**Réalisation d'une assistance à la digitalisation à partir
d'une Segmentation d'Image (SI)**
Analyse fonctionnelle et méthodologie générale

Sommaire

4.1	Analyse Fonctionnelle du produit : assistance à la digitalisation à partir d'une SI	118
4.1.1	Recensement des fonctions du produit.....	118
4.1.1.1	<i>Recherche spontanée.....</i>	<i>118</i>
4.1.1.2	<i>L'environnement du produit et la désignation des fonctions.....</i>	<i>123</i>
4.1.2	L'ordonnancement des fonctions.....	125
4.1.3	La caractérisation des fonctions de service.....	127
4.2	Méthodologie générale pour la réalisation du produit	128
4.2.1	Les prétraitements.....	128
4.2.2	La segmentation d'image	130
4.2.3	La finalisation de l'assistance à la digitalisation	130
4.2.4	La mise à disposition de l'assistance à la digitalisation	130
4.3	Choix d'un développement technique en « modules emboîtés »	130

Dans le chapitre 2, nous avons mené une Analyse Fonctionnelle du Besoin (AFB) pour la production régulière de Base de Données sur l'Occupation du sol à Grande Échelle (BD Ocsol GE) en bureau d'étude. L'AFB a montré un cadre de production régi par de nombreuses variables (commanditaires, données, territoires, échelles, consignes de cartographie, etc.) sur lesquels le producteur en bureau d'étude à peu de main mise. Elle a montré également que la Photo-Interprétation Assistée par Ordinateur (PIAO) est la meilleure solution opérationnelle pour répondre aux besoins cartographiques à grande-échelle et sur-mesure.

Le recours à une Segmentation d'Image (SI) pour assister la digitalisation est motivé par le gain potentiel de temps qu'un prédécoupage du paysage pourrait apporter à la pratique de la PIAO. La mise au point d'une assistance à la digitalisation soulève de nombreuses interrogations techniques. Toutefois, deux questions majeures en découlent : comment une segmentation d'image peut apporter une aide efficace au travail du photo-interprète ? Dans quelle mesure cette assistance peut s'intégrer dans un processus de production en série extrêmement contraignant ? Dans ce chapitre, nous réitérons la démarche de l'Analyse Fonctionnelle (AF) pour entreprendre la création d'une assistance à la digitalisation à partir d'une SI. À l'aide de la démarche et des outils de l'AF décrit dans le chapitre précédent, nous recensons, ordonnons, caractérisons et hiérarchisons les fonctions devant être remplies par une assistance à la digitalisation dans notre contexte de production. Nous terminons ce chapitre par la présentation de la méthodologie générale mise en place pour développer des solutions techniques adaptées.

4.1 Analyse Fonctionnelle du produit : assistance à la digitalisation à partir d'une SI

4.1.1 Recensement des fonctions du produit

4.1.1.1 Recherche spontanée

L'adaptation d'une segmentation d'image à un exercice de photo-interprétation nécessite de dresser un bilan des apports respectifs de la digitalisation réalisée manuellement et de la digitalisation issue d'une SI. Ce bilan est construit par un groupe de travail composé de photo-interprètes experts, de télédéTECTEURS et d'utilisateurs fréquents de la BD Ocsol GE (10 personnes). Grâce à son expérience, le groupe s'exprime, de manière ouverte, sur les différences observées et ressenties entre ces deux méthodes. 8 points de discussions sont abordés ici :

- Le besoin de BD Ocsol à grande échelle est de plus en plus formulé pour couvrir de larges territoires (> 500 km²). Cette exigence engendre une explosion du volume de données nécessaires en termes de taille de fichier (*Tableau 10*). Les images à Très Haute Résolution Spatiale (THRS) sont beaucoup plus volumineuses (plusieurs giga-octets) que des images à moyenne ou faible résolution. Elles renferment beaucoup plus d'informations qui sont indispensables pour une application à grande échelle (résolution spatiale, profondeur du pixel, etc.). Le volume fichier des données vectorielles de références géométriques et des données exogènes est aussi de plus en plus important. Les conséquences, pour la pratique de la PIAO, sont des risques de ralentissement dans la visualisation des données à l'écran. Néanmoins, cette crainte est minimisée par l'augmentation des performances des ordinateurs, l'utilisation de format de compression des fichiers minimisant la perte de qualité visuelle de la donnée (ecw, raster catalog, virtual raster) et par des découpages possibles de la donnée en fichier de plus petite taille. Le

volume important des données est un facteur plus problématique lorsque l'on souhaite pratiquer un traitement d'image comme la SI. Les calculs sont très rapidement alourdis et atteignent très vite les limites de capacité des logiciels et du matériel.

Tableau 10. Aperçu de la variabilité et de l'importance des volumes de ou des donnée(s) image(s) de référence à interpréter en fonction des prestations

	Projet de PNR de l'Aubrac		Métropole Nice Côte d'Azur				Durance, Luberon, Verdon Agglomération	
Emprise	3 272 km ²		1 461 km ²				846 km ²	
Donnée(s) de référence	RapidEye® Entre 2008 et 2010	BD ORTHO® entre 2009 et 2011	BD ORTHO® 2004	BD ORTHO® 2009	BD ORTHO® 2014	Pléiades 2014	BD ORTHO® 1999	BD ORTHO® 2010
Format	.tif	.ecw	.ecw	.ecw	.ecw	.jpeg2	.ecw	.ecw
Taille du ou des fichier(s)	3,41 Go	22.4 Go	3,71 Go	14 Go	78,5 Go	10,6 Go	2,91 Go	3,21 Go

- En France, le recours à la BD TOPO® pour réaliser un socle polygonal de référence des infrastructures linéaires (routes et voies ferrées) est devenu systématique pour la réalisation d'une BD Ocsol GE. Cette exigence n'est pas une contrainte pour la pratique de la photo-interprétation. Au contraire elle permet d'en faciliter son exécution de la même manière que nous recherchons à la faciliter avec l'apport d'une assistance à la digitalisation à partir d'une SI (Gourgand 2014). Par contre, celle-ci pose un problème plus général pour l'intégration de données vecteurs dans un procédé de segmentation d'image. La décision d'incorporer une donnée vectorielle de référence dans la construction d'une BD Ocsol GE est motivée, en grande partie, par le tracé cohérent qu'elle propose et qu'il convient de conserver. Très souvent, le recours à une SI semi-automatique induit une transformation de la géométrie de ces vecteurs par leur rastérisation (Figure 33). Le rendu visuel des réseaux est alors altéré.



Figure 33. Extrait (a) d'un socle polygonal de référence des infrastructures linéaires issue de la BD TOPO® IGN, (b) modifié géométriquement lors du processus de SI

- La SI ne répond pas aux besoins de délimitation des postes de nomenclature dans les espaces urbains. Elle réalise un découpage précis des contrastes comme les ombres portées, les

contours des bâtiments, les espaces verts, les espaces bitumés ou asphaltés ou encore la terre battue. Or, la plupart des nomenclatures des espaces urbanisés se focalisent sur une distinction des tissus urbains, des formes d'habitat et de l'emprise des activités et des équipements et non sur une délimitation des objets et des matériaux qui les composent. Le découpage attendu suit une logique d'usage plus « administrative » ou « parcellaire » à laquelle la SI ne peut répondre (Figure 34).



Figure 34. Différence entre un découpage des espaces urbains réalisé par digitalisation (a) manuelle et (b) par une SI

- L'ensemble du groupe de travail déplore un manque de maîtrise sur le résultat de la SI. Il est difficile d'impacter la réaction d'un algorithme de segmentation sur une image donnée. Le paramétrage de l'algorithme est déterminant. La validation d'une segmentation est souvent effectuée à la suite d'une série de tests selon différents paramétrages de l'échelle de segmentation. Le choix d'une SI plutôt qu'une autre est un compromis réfléchi par l'humain mais exécuté par la machine alors qu'une digitalisation manuelle est un compromis réfléchi par l'humain et exécuté par lui-même. Malgré tout, on s'accorde sur le fait qu'une légère sur-segmentation numérique, vis-à-vis du résultat que l'on souhaite obtenir, est le meilleur compromis (Figure 35). Néanmoins, si la légère sur-segmentation semble plus simple à corriger à travers un exercice de fusion d'objets aux propriétés proches, elle constitue une tâche de traitement supplémentaire pour le photo-interprète ;

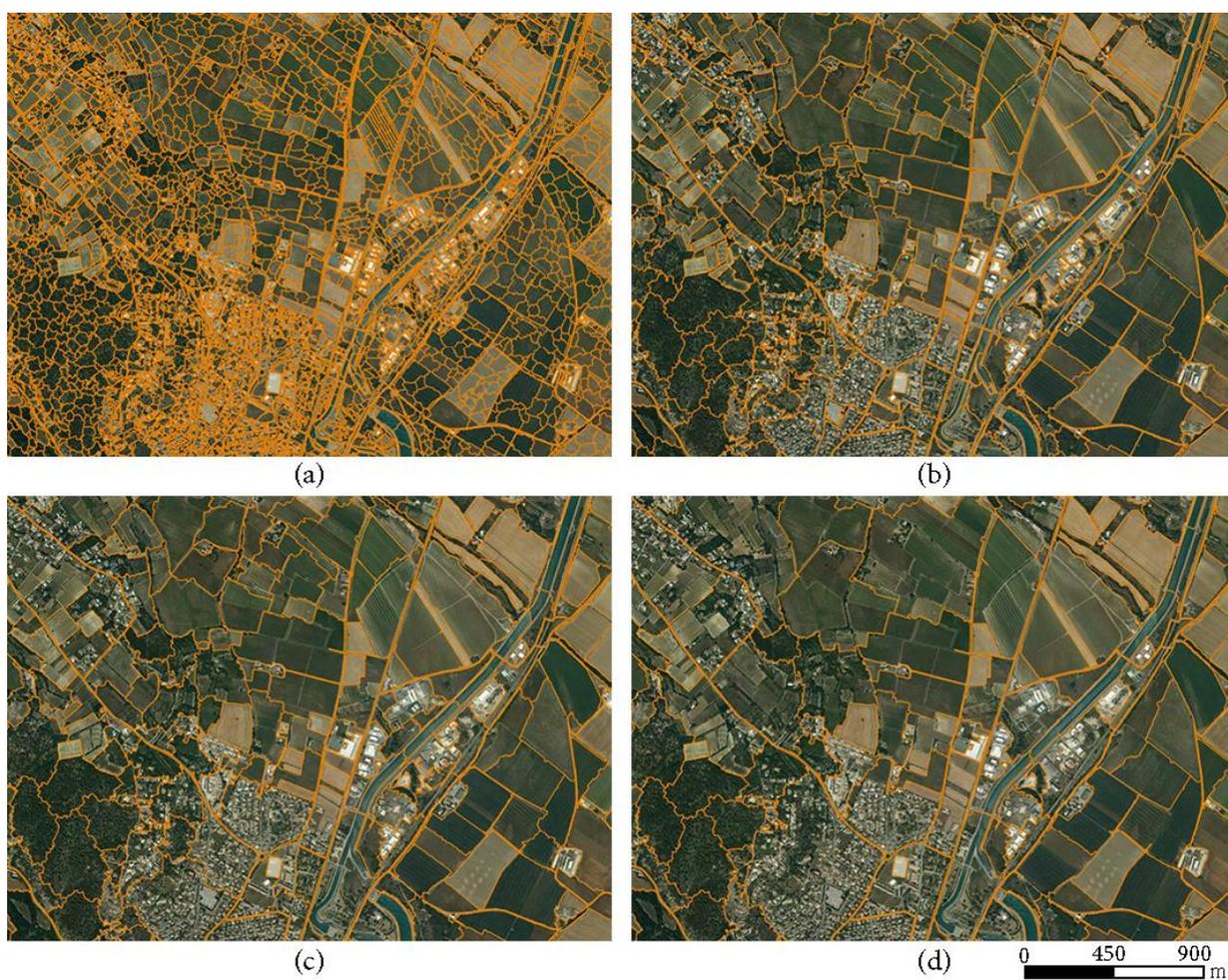


Figure 35. Exemples de différentes segmentations et analyse du niveau de découpage du paysage pour la réalisation d'une BD Ocsol GE : (a) sur-segmentée, (b) légèrement sur-segmentée, (c) légèrement sous-segmentée et (d) sous-segmentée

- le photo-interprète digitalise dans le respect d'une unité minimale de collecte (UMC) en deçà de laquelle une entité géographique ne peut être cartographiée. Souvent, la SI doit subir une élimination des petits polygones pour se conformer à cette règle ;
- le photo-interprète digitalise dans une logique de généralisation parcellaire et recherche un découpage simplifié de l'occupation du sol. La SI opère des découpages complexes comme sur l'exemple de la Figure 36.



Figure 36. Différence de tracés entre (a) une digitalisation manuelle et (b) une segmentation

- La SI a tendance à générer des polygones « tentaculaires » à la fois longs et fins (Figure 37). Le photo-interprète considère ce type d'objet comme incohérent et de plus, difficile à corriger par photo-interprétation ;

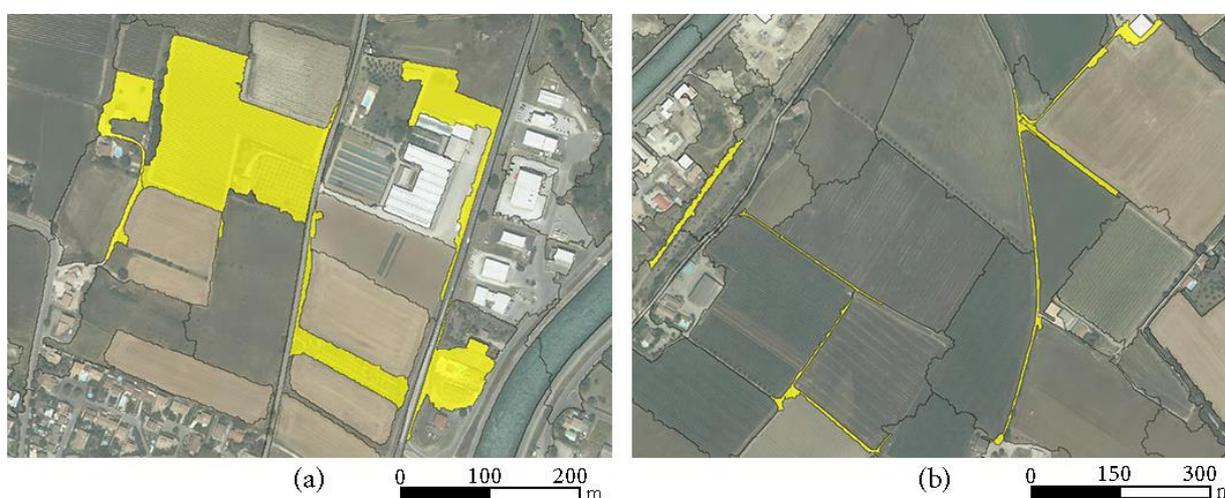


Figure 37. Exemple (a et b) d'objets « tentaculaires » (en jaune) générés par une segmentation

- Le groupe précise que l'effet « marches d'escalier » engendré par le traitement raster de la SI doit impérativement subir un traitement de simplification géométrique pour s'apparenter au tracé linéaire pratiqué par le photo-interprète (Figure 38). Les raisons invoquées sont souvent d'ordre cartographique (ou « esthétique ») plus que thématique. Les utilisateurs des BD Ocsol GE sont sensibles au tracé linéaire et non dentelé comme celui produit par un traitement raster. De plus, le recours à des corrections sur le découpage de la SI par digitalisation manuelle risque d'apporter une hétérogénéité de tracé non appréciée. Enfin, la simplification est justifiée pour limiter le poids du fichier de la SI. Si celle-ci n'est pas simplifiée, elle risque de comporter un grand nombre de vertex alourdissant la donnée et sa manipulation ;



Figure 38. Exemples de tracés produits par (a) une digitalisation manuelle et (b) une segmentation

4.1.1.2 L'environnement du produit et la désignation des fonctions

Dans le chapitre 2, nous avons utilisé un graphe des interacteurs (ou « *diagramme pieuvre* ») pour mettre en évidence les Éléments du Milieu Extérieur (EME) du produit à développer (ou l'environnement du produit) (*section 2.2.1*). Grâce à cet outil graphique il est facile de désigner les fonctions du produit devant être satisfait vis-à-vis de son environnement (*Figure 39*). Les témoignages du groupe de travail lors de la recherche spontanée alimentent l'élaboration du graphe des interacteurs. Les fonctions désignées sont établies principalement pour la phase de vie « *production* » du produit. Toutefois nous intégrons quelques fonctions en lien avec l'utilisation principale de l'assistance à la digitalisation menée par le photo-interprète lui-même.

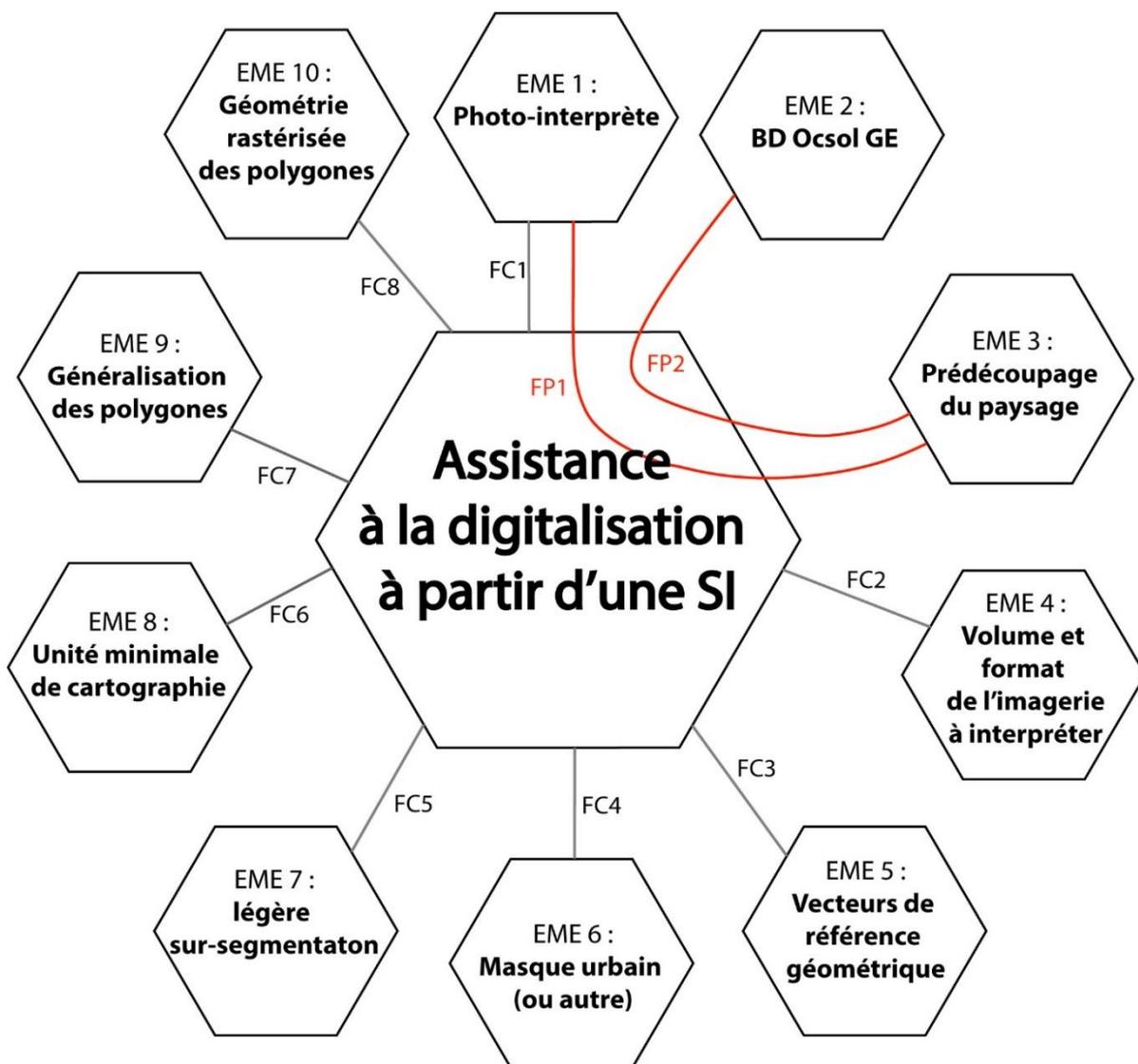


Figure 39. Graphe des interacteurs et des fonctions de service de type FP (Fonction Principale) et FC (Fonction de Contrainte) entre les différents Éléments du Milieu Extérieur (EME) appliqué à l'assistance à la digitalisation par segmentation

Nous identifions 9 EME qui vont impacter la production d'une assistance à la digitalisation à partir d'une SI. Elles génèrent 1 fonction principale nommée FP1 et 8 fonctions de contraintes, numérotées de FC1 à FC8 :

- FP1 : faciliter la production de la BD Ocsol GE ;
- FC1 : être ergonomique et simple à utiliser par le photo-interprète ;
- FC2 : s'adapter au volume et au format de l'imagerie à segmenter ;
- FC3 : intégrer une ossature polygonale de référence (infrastructures linéaires) ;
- FC4 : intégrer un masque urbain (ou autre) ;
- FC5 : être paramétrée pour obtenir une légère sur-segmentation ;
- FC6 : respecter l'unité minimale de cartographie ;
- FC7 : généraliser la forme des polygones ;
- FC8 : obtenir une géométrie polygonale cohérente avec l'échelle de photo-interprétation.

4.1.2 L'ordonnement des fonctions

L'ordonnement des fonctions permet de valider la logique fonctionnelle du produit. Le groupe de travail mis en place mène l'ordonnement grâce à la méthode FAST (*section 2.1.1*). Pour notre cas d'étude, l'assistance à la digitalisation fait intervenir de nombreuses fonctions liées à son environnement complexe. Pour chaque fonction de service (Fonction Principale (FP) ou Fonction de Contrainte (FC)), il convient de formuler une ou plusieurs Fonctions Techniques (FT) qui débouchera vers une ou plusieurs solutions Techniques (ST). Une FT peut, elle-même, être déclinée en plusieurs sous fonctions techniques. Le détail et la justification de l'ordonnement des fonctions que nous menons est trop lourd pour le présenter dans une seule et même figure. La Figure 40 montre un ordonnancement simplifié de l'ensemble des fonctions de service (FP ou FC) recensées. Seules les fonctions techniques (FT) d'ordre 1 associées aux différentes fonctions de service sont exposées ici. Certaines de ces FT connaissent des déclinaisons en sous-fonctions techniques (d'ordre 2 ou 3). Leur désignation et leur détail sont introduits dans les chapitres suivants. Nous ne présentons pas non plus les solutions techniques (ST) associées dans cette figure. Sans une justification complète de différentes fonctions ou sous-fonctions techniques, elles seraient difficilement compréhensibles dans ce chapitre. La présentation des solutions techniques intervient dans les chapitres suivant.

Le diagramme FAST simplifié montre un système fonctionnel conséquent (*Figure 40*). Quinze fonctions techniques d'ordre 1 sont déjà identifiées. Certaines fonctions de service sont déclinées en plusieurs FT d'ordre 1. Une de ces fonctions techniques est même associée à deux fonctions de service (FT3/4-1). La visualisation du diagramme FAST simplifié préfigure le produit. Il nous sert à la fois de support à la recherche des solutions techniques mais aussi à la structuration d'une méthodologie générale de production d'une assistance à la digitalisation. Chaque fonction technique doit intégrer une phase (ou étape) de la méthodologie générale. Cet exercice est mené plus loin. Avant cela, il convient de poursuivre la démarche de l'analyse fonctionnelle à travers les étapes de caractérisation et de hiérarchisation des fonctions services.

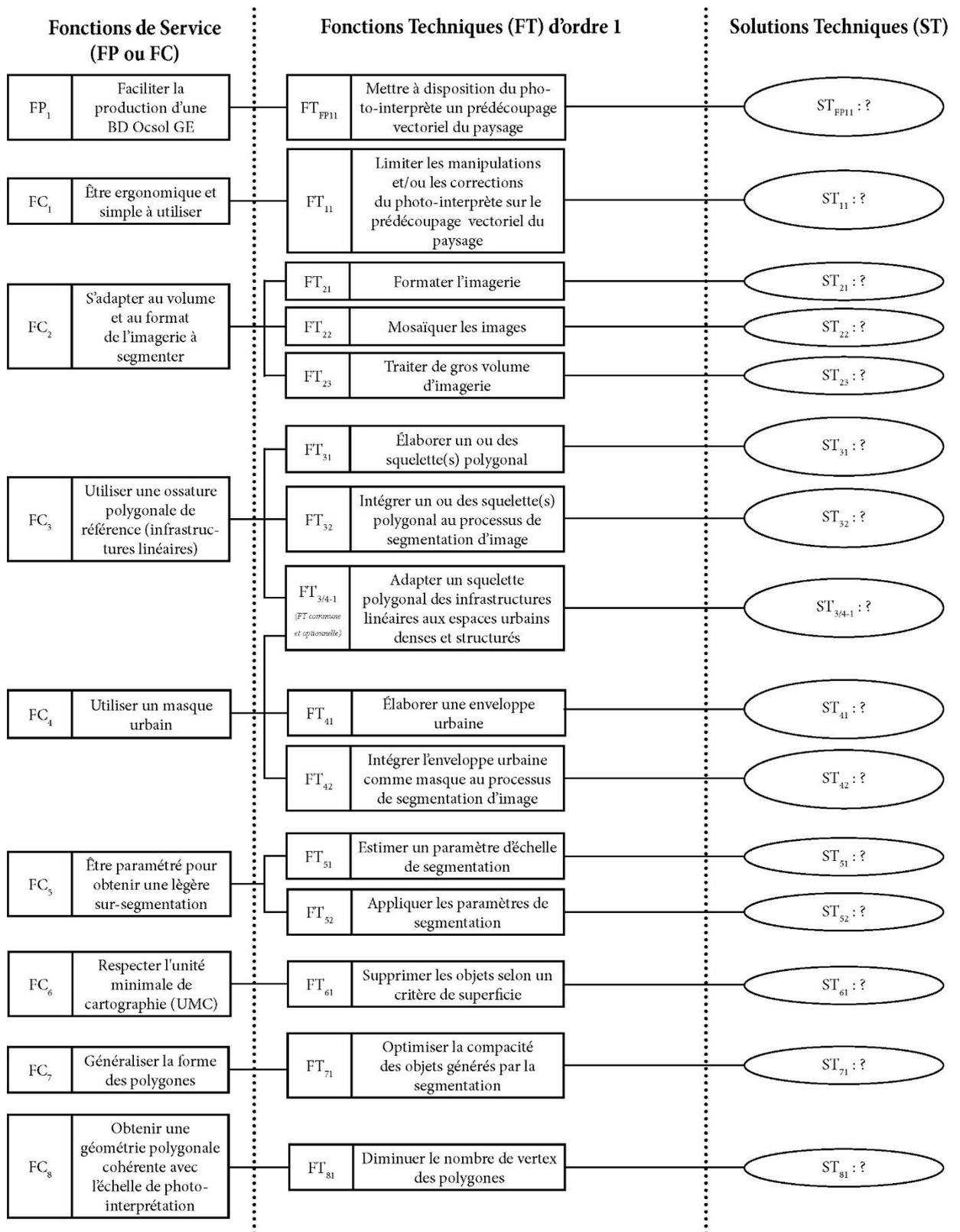


Figure 40. Ordonnancement simplifié des fonctions (FAST) pour la création d'une assistance à la digitalisation à partir d'une segmentation d'image

4.1.3 La caractérisation des fonctions de service

La caractérisation permet de préciser les attentes portées sur chacune des fonctions de service (FS) (*section 2.1.1.4*). Cette tâche fixe les conditions de validation pour lesquelles une fonction est satisfaite. De cette manière, la caractérisation permet de justifier les choix techniques adoptés. La caractérisation des FS recensées pour la mise en place de l'assistance à la digitalisation est détaillée dans le *Tableau 11*. Celle-ci est une nouvelle fois suivie par le groupe de travail multidisciplinaire (utilisateurs, techniciens, producteurs, etc.).

Pour rappel, nous attendons de cette caractérisation :

- **le ou les critère(s) d'appréciation** de la fonction, qui correspond(ent) au caractère retenu pour apprécier la manière dont une fonction est remplie ou une contrainte respectée ;
- **le niveau du critère**, qui correspond à la performance attendue par le critère ;
- **La flexibilité du critère**, qui correspond à une indication permettant de préciser son degré de négociabilité ou d'impérativité.

Tableau 11. Caractérisation des fonctions de service liées à la mise en place d'une assistance à la digitalisation

FS	Critère d'appréciation	Niveau du critère	Flexibilité
FP1	Qualité du support de digitalisation	Critère visuel	Peu négociable
	Augmentation de la productivité de la PIAO par rapport à une PIAO recourant à une digitalisation manuelle	>30 %	Négociable
FC1	Apprentissage du photo-interprète	<20 mn	Peu négociable
FC2	Format de fichier	Format en .tif	Impératif
	Volume important de données (> à 5 Go)	Traitement par tuilage des images	Peu négociable
	Volume raisonnable de données (<= à 5 Go)	Traitement sur l'image entière	Peu négociable
FC3	Ossature polygonale de référence	Critère visuel	Peu négociable
FC4	Isolement des espaces urbains	Critère visuel	Peu négociable
FC5	Résultat de la SI	Critère visuel	Négociable
FC6	Taille des polygones	Critère paramétrable (500m ² , 1000m ² , 2500m ² ,etc.)	Négociable
FC7	Forme générale des polygones	Critère visuel	Négociable
FC8	Tracé des polygones	Algorithme de simplification de ligne (paramétrable)	Négociable

4.2 Méthodologie générale pour la réalisation du produit

Pour le moment, nous avons recensé, ordonné et caractérisé les fonctions liées au fonctionnement, à l'usage d'une assistance à la digitalisation et aux motivations de l'utilisateur (le photo-interprète) pour elle. Grâce à ce diagnostic, il convient maintenant d'établir l'orientation méthodologique qui va structurer la réalisation et la mise à disposition de l'assistance à la digitalisation à partir d'une Segmentation d'Image (SI).

La méthodologie se décompose en quatre grandes étapes (*Figure 41*) : (1) les prétraitements, (2) la segmentation d'image, (3) les post-traitements et (4) la mise à disposition de l'assistance à la digitalisation. Pour chaque phase, nous précisons la ou les fonctions de service rendu (FP ou FC). Nous prévoyons qu'une même fonction de service peut intervenir dans plusieurs phases de la méthodologie. Le détail de chaque étape est apporté dans les chapitres suivants.

4.2.1 Les prétraitements

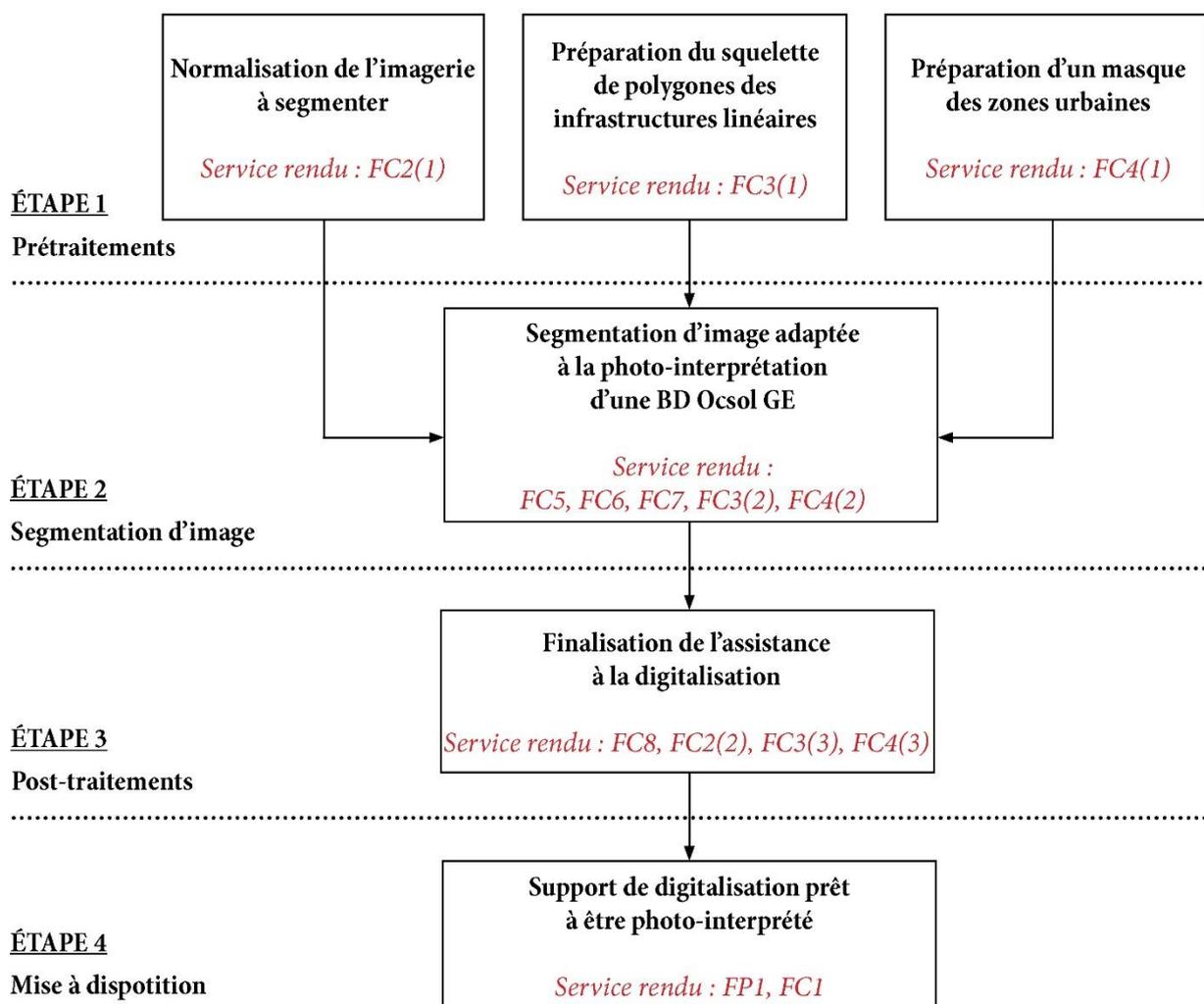
La première étape est dédiée aux prétraitements nécessaires aux données sur lesquelles porte la segmentation :

- l'imagerie,
- l'ossature polygonale de référence des infrastructures linéaires (routes, voies ferrées, etc.) ou autre,
- le masque des secteurs à ne pas prédécouper (zone urbaine ou autre).

Tout d'abord, l'imagerie à segmenter connaît un prétraitement de standardisation avant le processus de segmentation (FC2). Cette nécessité est liée à la diversité des formats et des volumes de données reçue par le producteur régulier de BD Ocsol GE. Il est impératif de formater cette diversité selon un protocole d'entrée de la donnée. Ce prétraitement doit palier à tous les cas de figures et évite de repenser tout le processus lorsqu'une nouvelle configuration de donnée se présente au producteur.

Ensuite, les prétraitements incluent la réalisation de l'ossature polygonale des infrastructures linéaires (routes et voies ferrées) (FC3). L'intégration de cette donnée vectorielle dans la BD Ocsol GE est récurrente. Une attention particulière doit être portée à cette tâche car ce squelette de polygones impacte la SI de façon non négligeable. Si cette ossature est jugée non conforme aux attentes après la segmentation d'image, le producteur est contraint de relancer l'ensemble du processus de segmentation.

Enfin, l'élaboration d'une enveloppe urbaine fait partie des prétraitements qui vont contraindre la segmentation d'image (FC4). L'enveloppe urbaine est destinée à être utilisée comme un masque urbain. Cela est lié au constat de mauvaise performance de la segmentation d'image dans les espaces urbains pour l'élaboration d'une BD Ocsol GE. Ainsi le masque est nécessaire pour isoler ces espaces où la SI ne sera pas pratiquée. De plus, les limites de ce masque doivent être pertinentes vis-à-vis du découpage « *cadastré* » attendu dans ce type de milieu.



Services rendus :

- FP1: faciliter la production d'une BD Ocsol GE
- FC1: être ergonomique et simple à utiliser
- FC2: s'adapter au volume et au format de l'imagerie à segmenter
- FC3: intégrer une ossature polygonale de référence (infrastructures linéaires)
- FC4: intégrer un masque urbain (ou autre)
- FC5: être paramétré pour obtenir une légère sur-segmentation
- FC6: respecter l'Unité Minimale de Cartographie (UMC)
- FC7: généraliser la forme des polygones
- FC8: simplifier la géométrie rastérisée des polygones

Figure 41. Méthodologie générale pour la réalisation d'une assistance à la digitalisation à partir d'une segmentation d'image

4.2.2 La segmentation d'image

La seconde étape est consacrée au processus de segmentation de l'image (SI). Le processus se décline en quatre phases :

- l'importation des données vectorielles en charge de contraindre la SI (squelette de polygones des infrastructures linéaires) (FC3 et FC4) ;
- le paramétrage et l'implémentation de l'algorithme de segmentation (FC5) ;
- le nettoyage des tracés indésirables pour l'exercice de photo-interprétation d'une BD Ocsol GE (FC6 et FC7) ;
- l'exportation vectorielle de la SI.

4.2.3 La finalisation de l'assistance à la digitalisation

Cette étape de la méthodologie est appliquée aux post-traitements de la SI pour finaliser la construction de l'assistance à la digitalisation. Plusieurs démarches sont décrites ici :

- la gestion d'un résultat vectoriel volumineux (taille de fichier) d'une segmentation réalisée sur une zone d'étude de grande superficie (FC2) ;
- la nécessité de simplifier la géométrie du tracé pour éliminer l'effet raster (« *marche d'escalier* ») (FC8) ;
- le contrôle de la géométrie des données vectorielles de référence liée au squelette des infrastructures linéaires et à l'enveloppe urbaine (FC3 et FC4).

4.2.4 La mise à disposition de l'assistance à la digitalisation

L'ultime étape s'attache à la mise à disposition du support de digitalisation au photo-interprète. L'étape 4 doit rendre compte de la fonction de service principale qui porte sur l'efficacité et la performance de l'assistance pour la production d'une BD Ocsol (FP1). De plus, Cette étape doit capitaliser sur l'expérience et le ressenti du photo-interprète dans son utilisation de l'assistance à la digitalisation (FC1). De cette manière, l'objectif est de mettre en évidence : des points d'amélioration pour l'assistance, des perspectives de développement, des nouveaux verrous technologiques et des nouveaux usages du produit.

4.3 Choix d'un développement technique en « modules emboîtés »

Le grand nombre de fonctions de service à satisfaire rend difficile la tâche de recherche de solutions techniques appropriées. Cette difficulté est accentuée par la nécessité d'articuler certaines fonctions entre elles. Par exemple, la FC3 et la FC4 sont dédiées respectivement à l'élaboration du squelette polygonal des infrastructures linéaires et la construction d'un masque de traitement. Elles doivent parfaitement s'intégrer dans le processus de segmentation qui s'en suit. Pour faciliter la recherche de solutions techniques, nous optons pour une approche de développement par « *modules emboîtés* ». Cette approche consiste à créer plusieurs modules spécifiques et indépendants conservant une capacité d'emboîtement avec d'autres modules en lien avec la méthodologie générale de production de l'assistance (*Figure 42*).

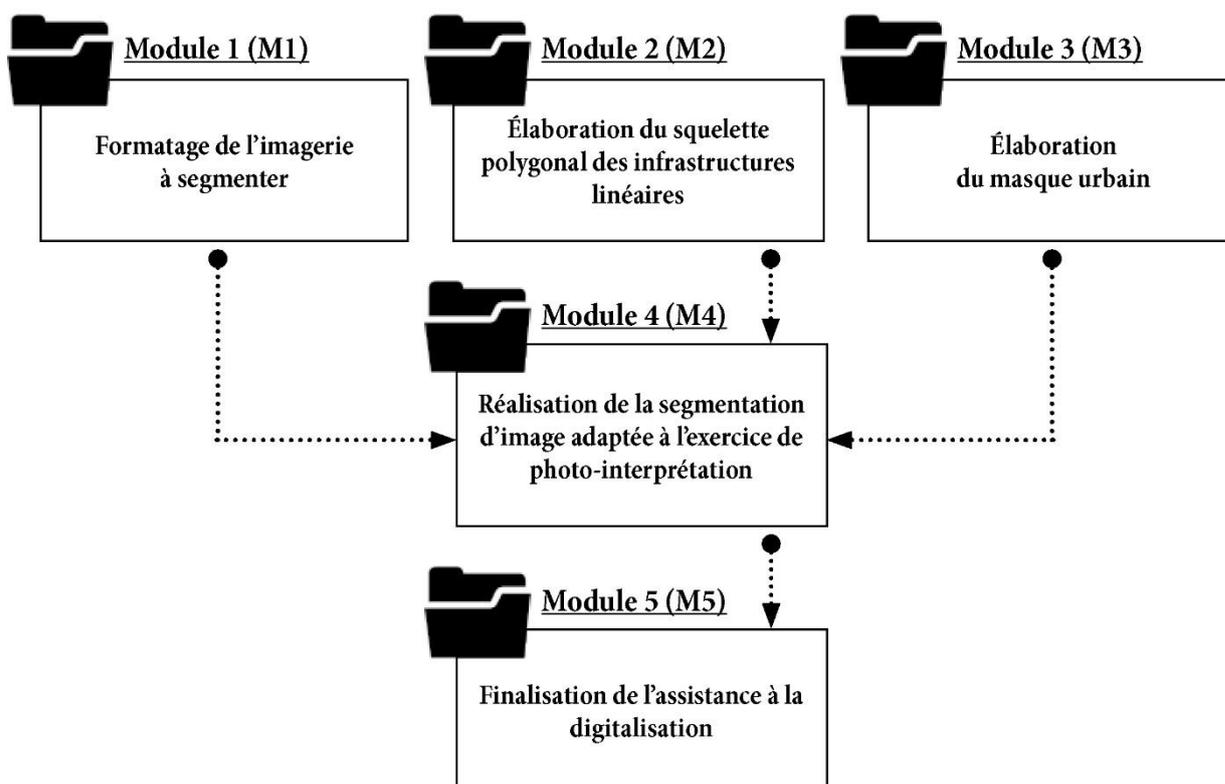


Figure 42. Construction de l'assistance à la digitalisation à partir de 5 modules indépendants et non contraignants

Cinq modules sont identifiés et développés :

- un module pour la normalisation de l'imagerie à segmenter (M1) ;
- un module pour l'élaboration du squelette polygonal des infrastructures linéaires (M2) ;
- un module pour l'élaboration d'un masque urbain (M3) ;
- un module pour la segmentation d'image (M4) ;
- un module pour la finalisation de l'assistance à la digitalisation (M5).

Les trois premiers modules (M1, M2 et M3) sont dédiés aux tâches de prétraitements pour l'exécution du module centrale (M4) consacrée à la segmentation. Le module M5 est attaché à la post-segmentation pour la pratique de la photo-interprétation.

Chacun des modules intègre une ou plusieurs solutions techniques propres à satisfaire une fonction technique, elle-même rattachée à une fonction de service de l'assistance à la digitalisation. Chaque module est développé de manière à assurer une interopérabilité de ses entrées ou sorties avec un autre module qui peut lui être associé. De cette manière, l'utilisateur est libre d'exécuter ou non certains modules en fonction de son besoin. Pour la mise en place d'une assistance à la digitalisation, les modules de prétraitements ne sont pas obligatoires. Si l'utilisateur ne souhaite pas intégrer un squelette polygonal des infrastructures linéaires dans le processus de segmentation, il peut ne pas exécuter le module associé (M2) sans risque d'impacter l'exécution du module de segmentation (M4).

L'indépendance et l'emboîtement de ces modules ont imposé une architecture informatique sous forme de répertoires et de fichiers. Ainsi, chacun des modules est composé d'un dossier général de travail. La structuration de ces dossiers est propre aux objectifs du module. Les dossiers sont décrits en détail dans les chapitres suivants. Cependant, tous les modules intègrent deux sous-dossiers communs. Le premier sous-dossier intègre la ou les donnée(s) d'entrée subissant le traitement. L'utilisateur du module est en charge de les positionner dans ce dossier de travail. Cette exigence assure la bonne intégration des données par les scripts d'exécution du traitement. Le second sous dossier est dédié à la récupération de la ou les donnée(s) en sortie du traitement.

Chapitre 5 :
Prétraitements des données
Préalables à la segmentation d'image

Sommaire

5.1	FC2 : s'adapter au volume et au format de l'imagerie à segmenter	134
5.1.1	Formatage de l'imagerie à segmenter.....	134
5.1.2	Ordonnancement des fonctions techniques relatives à la FC2.....	135
5.1.3	FT ₂₁ : convertir l'imagerie en format TIF	136
5.1.4	FT ₂₂ : mosaïquer les images.....	137
5.1.5	FT ₂₃ : tuiler l'image	138
5.2	Module 1 : formatage de l'imagerie à segmenter.....	143
5.3	FC3 et FC4: préparation des vecteurs structurant la SI.....	145
5.3.1	Ordonnancement des fonctions techniques relatives à la FC3 et la FC4	145
5.3.2	FT ₃₁ : élaborer le squelette polygonal des infrastructures linéaires	147
5.3.2.1	<i>Principe</i>	<i>147</i>
5.3.2.2	<i>Étape 1 : sélection des infrastructures routières et ferroviaires utiles (FT₃₁₁).....</i>	<i>149</i>
5.3.2.3	<i>Étape 2 : transformation géométrique et assemblage (FT₃₁₂).....</i>	<i>150</i>
5.3.2.4	<i>Étape 3 : fermeture des petits espaces « vide » formés par l'ossature</i> <i>151</i>	
5.3.2.5	<i>Application aux cas d'études</i>	<i>152</i>
5.3.3	FT ₄₁ : élaborer le masque urbain	156
5.3.3.1	<i>Choix méthodologique.....</i>	<i>156</i>
5.3.3.2	<i>Principe des solutions techniques développées</i>	<i>157</i>
5.3.3.3	<i>ST₄₁₃ : assemblage du masque urbain et du squelette polygonal des</i> <i>infrastructures linéaires.....</i>	<i>160</i>
5.3.3.4	<i>Applications aux cas d'études.....</i>	<i>161</i>
5.3.4	FT _{3/4-1} : adapter le squelette polygonal des infrastructures linéaires aux espaces urbains denses et structurés, le cas du centre-ville de Nice.....	163
5.4	Module 2 : élaboration du squelette polygonal des infrastructures linéaires.....	166
5.5	Module 3 : élaboration du masque urbain	167
5.6	Conclusion sur les prétraitements des données	169

Dans ce chapitre, nous présentons les différents prétraitements qui doivent être apportés aux données utiles à la réalisation d'une segmentation d'image (*Figure 43*). Nous avons identifié trois services associés aux prétraitements des données : le premier service porte sur **l'adaptation des développements au volume et aux formats des images à segmenter auxquelles le producteur est soumis (FC2)** ; le second, à **l'intégration des vecteurs de référence géométrique (FC3)** et le dernier, à **la construction du masque (FC4)**. Pour chacun de ces services, nous précisons, d'abord, les attentes à l'aide d'une analyse fonctionnelle technique. Ensuite, nous détaillons les solutions techniques adoptées en les illustrant par les trois cas d'études (Projet de PNR de l'Aubrac, DLVA, Métropole Nice Côte d'Azur).

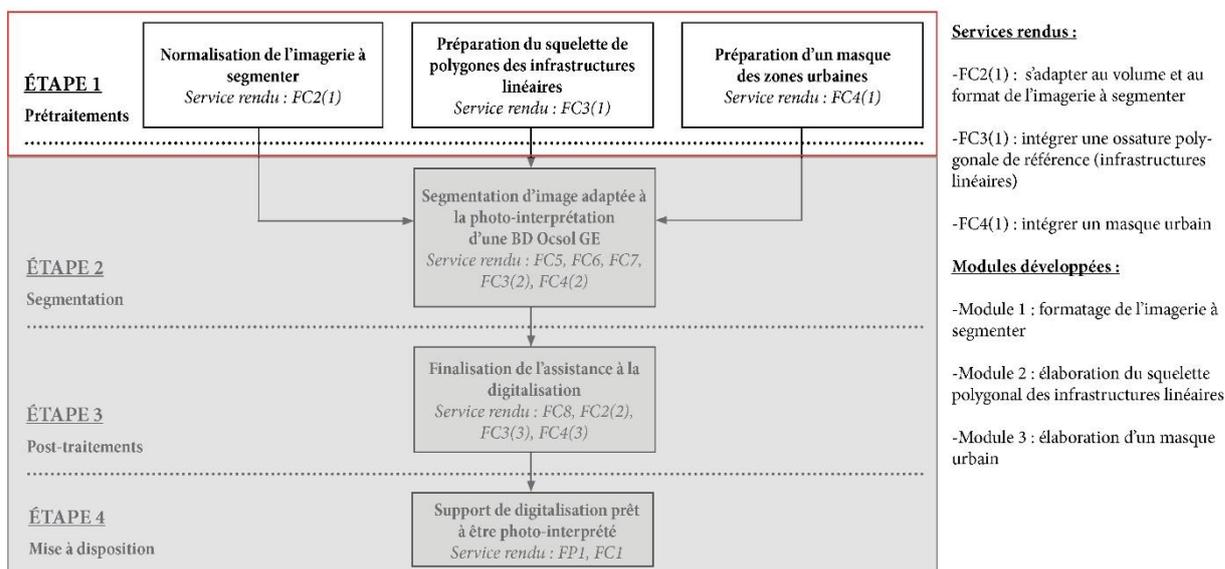


Figure 43. Rappel de la méthodologie générale et opérations de prétraitements des données

5.1 FC2 : s'adapter au volume et au format de l'imagerie à segmenter

La nature de l'imagerie à l'origine de la construction d'une BD Ocsol GE est l'une des premières interrogations du producteur. Au-delà des questions portant sur la résolution spatiale et la qualité générale des images, le producteur se questionne aussi sur les modalités de mise à disposition de ces données. S'agit-il d'une multitude d'images non mosaïquées ou d'une image unique sur l'ensemble du territoire ? Dans quel format de fichier sont-elles mises à disposition ? Et surtout quel est le volume (taille des fichiers) des images ? Ces questionnements sont moins problématiques lorsque le producteur opte pour une digitalisation manuelle. La majorité des formats de fichiers est lue par la plupart des logiciels de SIG et les volumes importants de données sont palliés par des formats de compression des fichiers qui facilitent leur lecture (ecw, rastercatalog, etc.). Par contre, lorsque l'on souhaite développer une segmentation d'image, ces questions restent pertinentes.

5.1.1 Formatage de l'imagerie à segmenter

Le ou les image(s) de télédétection THRS mise(s) à disposition (ortho photographies, images satellites, etc.) se distingue(nt) selon leur format, leur volume et leur présentation. Ces trois critères peuvent paraître secondaires mais très souvent, ils conditionnent les choix

méthodologiques, les méthodes ou les outils pour les traiter. Il est important que ces critères soient normés pour le développement de la solution d'assistance à la digitalisation. Dans notre méthodologie, nous faisons le choix de formater l'imagerie de la manière suivante pour exécuter la SI :

- l'imagerie doit être en format TIF (Tagged Image File Format);
- l'imagerie doit être composée d'une image unique sur l'ensemble de la zone d'étude et non d'une multitude d'images ;
- Si l'imagerie est caractérisée par un volume important (taille de fichier), il sera nécessaire d'adapter les traitements aux capacités de calcul du matériel et/ou du logiciel par un tuilage de la donnée.

5.1.2 Ordonnement des fonctions techniques relatives à la FC2

Le choix des critères de normalisation de l'imagerie à segmenter permet d'élaborer l'ordonnement des fonctions techniques à l'aide d'un diagramme FAST (Function Analysis System Technique) pour la **fonction de service FC2** (Figure 44). Ainsi, nous identifions les Fonctions Techniques (FT) et les Solutions Techniques (ST) qui répondent aux questions de format et de volumétrie de la donnée image. Quatre fonctions techniques sont formulées. Les trois premières (**FT₂₁**, **FT₂₂** et **FT₂₃**) sont décrites dans ce chapitre. **FT₂₄** est une fonction supplémentaire dédiée au réassemblage des segmentations réalisées sur des tuiles d'images dans le cadre du traitement d'un gros volume de données. Il s'agit d'une fonction de post-traitement de la segmentation décrit dans le chapitre 7.

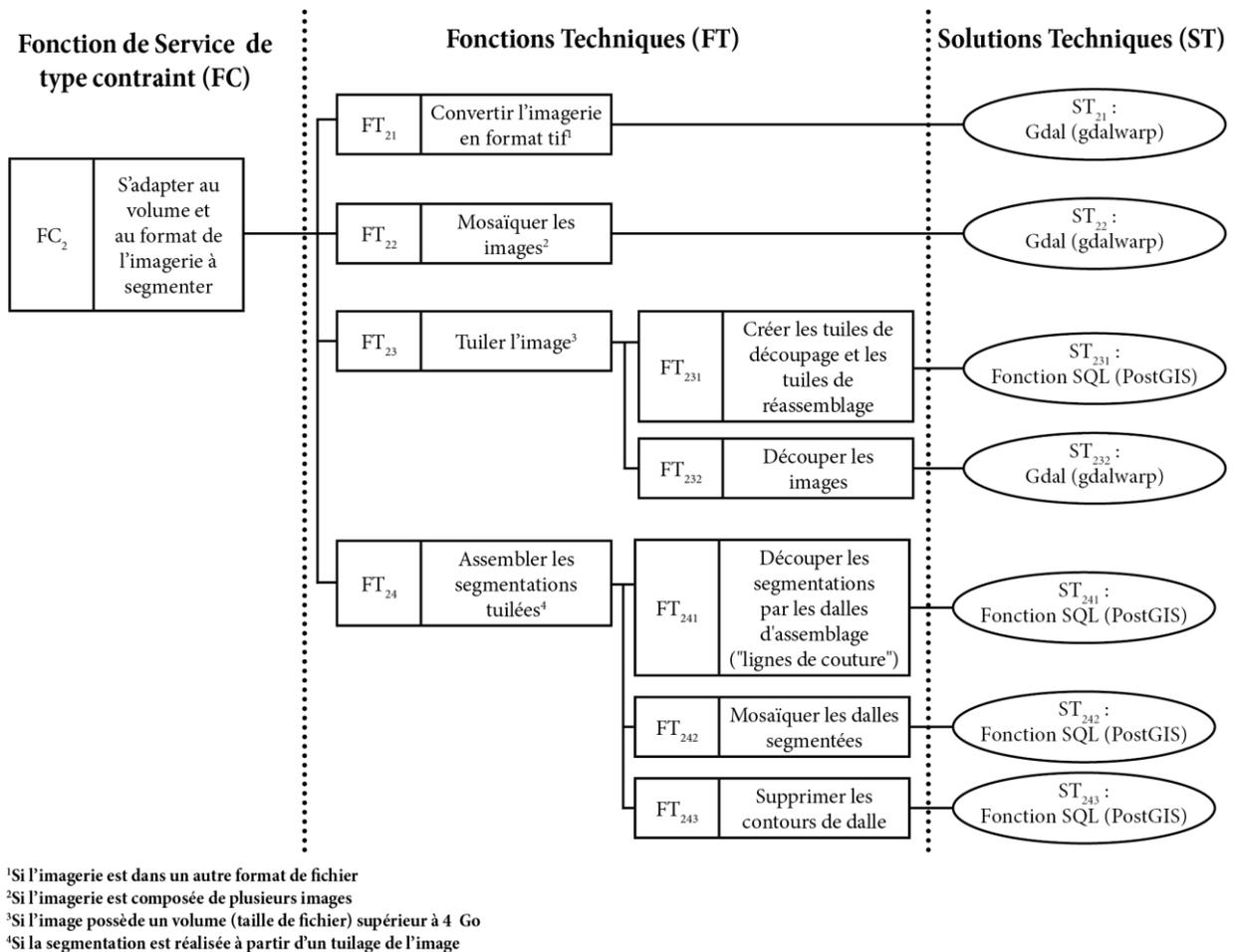


Figure 44. Ordonnement (FAST) des fonctions techniques liées à la fonction de service FC2 associée à la préparation des données image

5.1.3 FT21 : convertir l'imagerie en format TIF

Le format TIF est un format de fichier raster. Le choix de ce format est préféré car il s'agit d'un format libre, universel et pris en charge par de nombreux logiciels de traitement d'image. De plus, le format TIF permet de stocker des images en noir et blanc ou en couleur de taille importante (> à 4 Go) sans déperdition de qualité. La **fonction technique FT₂₁ est dédiée à la conversion de l'imagerie dans ce format de fichier choisi** (Figure 45).

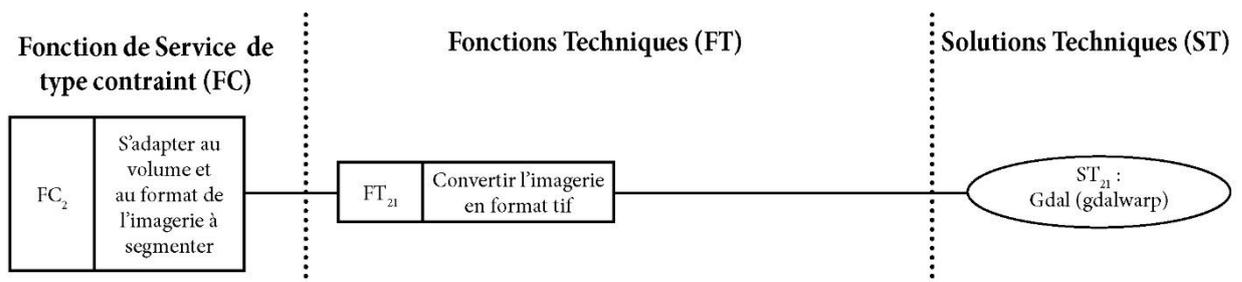


Figure 45. Rappel de l'ordonnement de la fonction technique FT₂₁

Pour le projet de PNR de l'Aubrac, le travail de photo-interprétation doit être réalisé sur l'imagerie RapidEye. La donnée mise à disposition est déjà en format TIF. La FT₂₁ ne s'applique donc pas au projet de parc.

Par contre, l'application de la FT_{21} est nécessaire pour les prestations menées pour la Métropole Nice Côte d'Azur et la communauté d'agglomération DLVA. Pour ces deux territoires d'études, les images de référence pour le travail de photo-interprétation sont les orthophotographies RVB issues de la BD ORTHO® de l'IGN. Le format des fichiers image mis à disposition est le ECW (Enhanced Compression Wavelet). Ce format propriétaire est porté par une société éditrice de données géographiques. Il s'agit d'un format de compression avec pertes. Le format ECW est particulièrement adapté au stockage, à la lecture et au partage de photographies aériennes ou d'images satellites. Cependant l'utilisation de ce format induit une dégradation de la richesse pixellaire vis-à-vis de l'image brute acquise par le capteur. Cette perte est négligeable pour des applications simples de localisation ou de lecture d'un paysage. En revanche, lorsque l'on souhaite pratiquer un exercice poussé de photo-interprétation ou appliquer des traitements d'images pour extraire des informations discriminantes sur l'occupation du sol, l'utilisation de ce format est dommageable. Il n'est pas possible de retrouver toute la richesse pixellaire de l'image acquise à partir du fichier converti en ECW. Pour le producteur, le seul moyen d'obtenir des images sans perte d'information est d'en faire la demande auprès de son commanditaire. La démarche peut être longue sans garantie de succès. Très souvent, le producteur doit se contenter de l'imagerie en format ECW pour réaliser sa prestation.

Le format ECW n'est pas forcément pris en charge par les logiciels de traitement d'image. Il s'agit de la principale raison pour exercer une conversion du format ECW au format TIF. Nous préférons travailler avec un format universel et reconnu par la majorité des algorithmes de traitement d'image afin d'éviter les déconvenues liés au format de fichier.

5.1.4 FT_{22} : mosaïquer les images

Parfois, l'imagerie mise à disposition est composée d'une multitude de fragments (ou dalles) d'images couvrant la zone d'étude dont nous ne maîtrisons pas le découpage (*Tableau 12*). L'implémentation de l'algorithme de segmentation sur un trop grand nombre d'images risque d'alourdir les traitements et de générer des effets de bord difficilement maîtrisables. Il est donc impératif de **limiter la multiplication des processus de segmentation d'image**. C'est la raison pour laquelle nous souhaitons mosaïquer en une seule image l'imagerie fragmentée. La fonction technique FT_{22} répond à ce besoin (*Figure 46*).

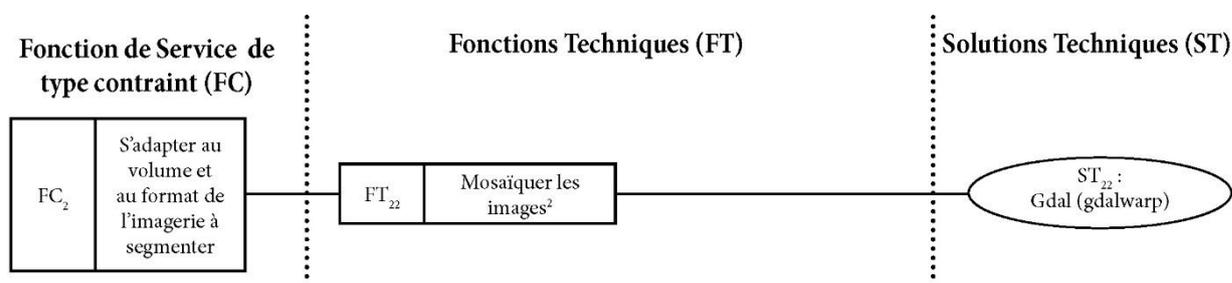


Figure 46. Rappel de l'ordonnancement de la fonction technique FT_{22}

Tableau 12. Type d'imagerie mis à disposition par les commanditaires des trois études de cas

	Projet de PNR de l'Aubrac	Métropole Nice Côte-d'Azur	Durance Luberon Verdon Agglomération
Composition de l'imagerie mise à disposition pour la photo-interprétation	3 images RapideEye® de 2008	631 dalles de la BD ORTHO 2009	1 image mosaïquée de la BD ORTHO® 2010 pour le département 04 + 1 image mosaïquée de la BD ORTHO® 2011 pour le département 83

5.1.5 FT23 : tuiler l'image

L'imagerie THRS atteint très vite des volumes importants de données (> 4 Go) lorsqu'elle couvre de grandes superficies. De plus, le choix de mosaïquer l'imagerie (FT₂₂) accroît le volume de la donnée à traiter. Le facteur taille du fichier est contraignant pour la réalisation d'une Segmentation d'Image (SI). Le principal risque est la mauvaise ou la non prise en charge des volumes importants de données par les logiciels ou les bibliothèques de traitement d'image. Cette contrainte technique peut être contournée par la parallélisation des traitements sur des portions régulières de l'image (ou dalles). Les traitements sont alors allégés et peuvent être exécutés sur des grands volumes de données. La fonction technique FT₂₃ apporte cette solution dans du traitement d'une image THRS « lourde » (> 4 Go) (Figure 47).

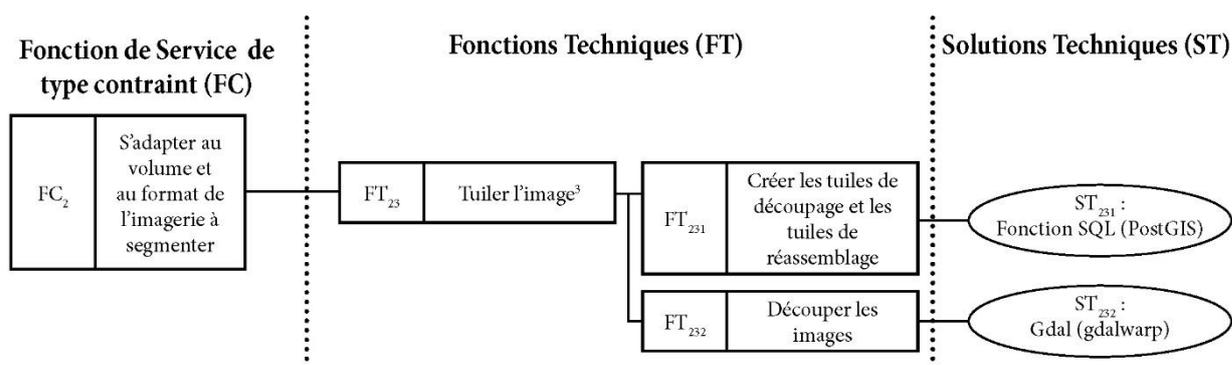


Figure 47. Rappel de l'ordonnancement de la fonction technique FT23

Cependant, l'exécution d'une segmentation sur des dalles d'image peut comporter un inconvénient majeur lié à la création des objets en bordure d'image. Il existe un effet de bord de l'image qui contraint la formation des objets et provoque une incompatibilité avec les objets générés sur l'image voisine (Figure 48). L'effet de bord peut être rapidement néfaste pour le photo-interprète utilisant une assistance à la digitalisation et exiger de lui un travail de correction chronophage.

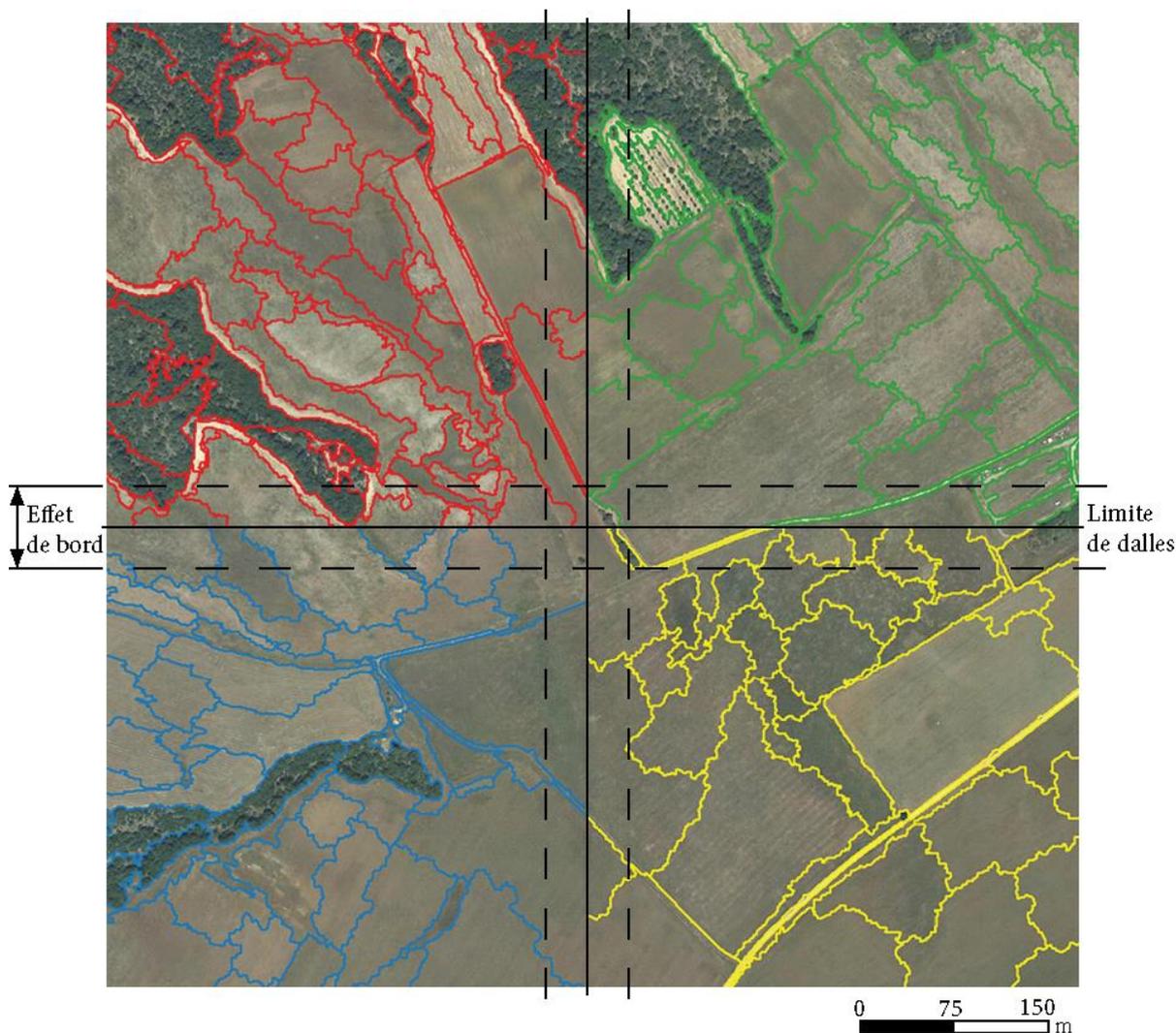


Figure 48. Effet de bord dans la création des objets lié à l'exécution de l'algorithme de segmentation sur des dalles d'image contiguës

Pour pallier ce problème, il convient d'exécuter la segmentation sur des portions d'image se chevauchant (ou tuile d'image). Les tuiles d'images sont construites à partir d'un fichier SIG surfacique (polygones). Il s'agit d'un carroyage avec un chevauchement correspondant à 10% de la taille de la tuile choisie. Par exemple pour une tuile de découpage de 1 000 m sur 1 000 m, le chevauchement entre deux tuiles sera de 100 m. La construction de ces tuiles doit être associée à la construction d'un second carroyage pour l'assemblage de l'ensemble des segmentations en une unique segmentation sur l'ensemble de la zone d'étude. Ce carroyage d'assemblage, que l'on nomme « *ligne de couture* » passe par le centre de la zone de chevauchement des tuiles. Le principe du tuilage est illustré sur la Figure 49.

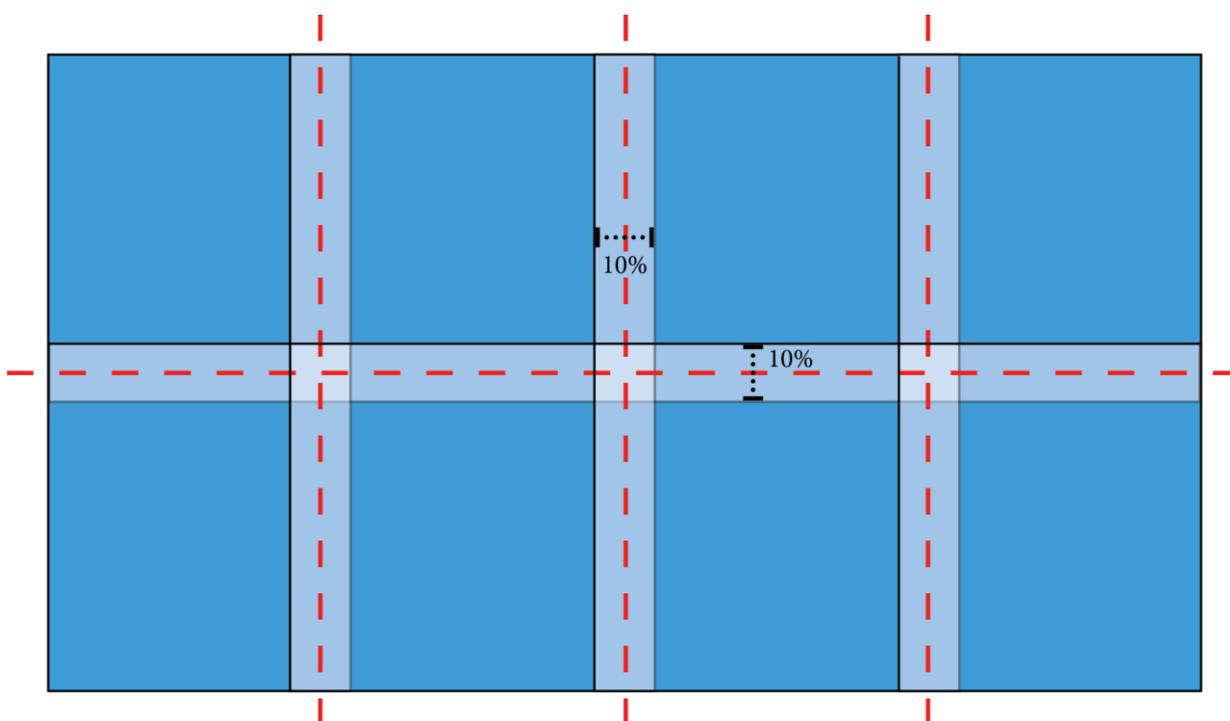


Figure 49. Principe du tuilage avec un chevauchement de 10% et du carroyage d'assemblage en rouge (ou « ligne de couture »)

L'effet escompté par ce tuilage est décrit sur la Figure 50. Nous recherchons à éloigner l'effet de bord pour ne plus subir la création d'objets « instables » en bordure d'image et non compatible avec les objets créés sur l'image voisine. À une certaine distance du bord de l'image, nous constatons que la création des objets se stabilise entre les 2 images. La délimitation des objets devient identique sur les deux tuiles. La ligne médiane du chevauchement des images (ou « ligne de couture ») s'avère donc le point idéal pour assembler les différentes segmentations afin d'éviter les effets de bords néfastes.

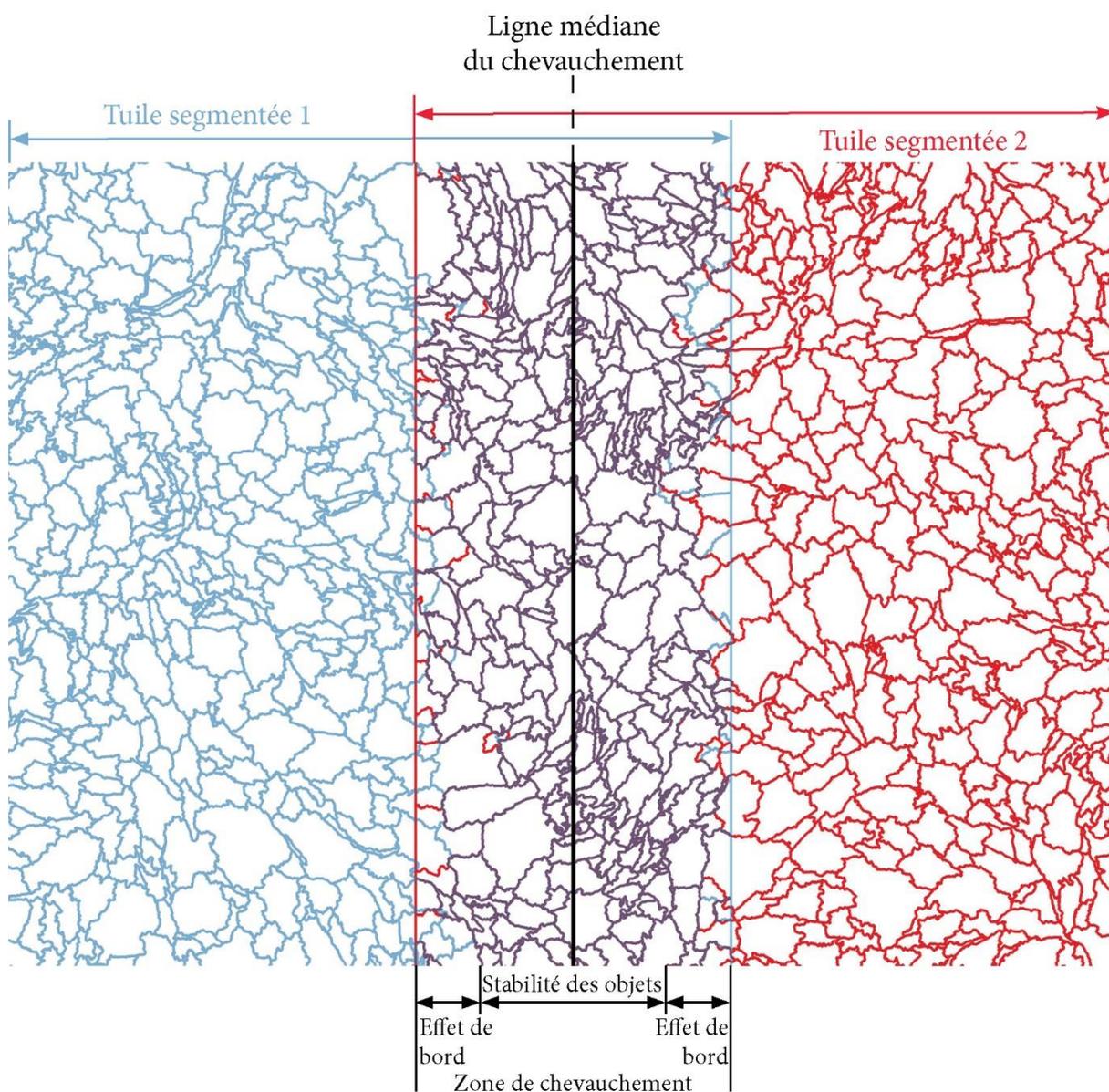


Figure 50. Impact du tuilage sur la création des objets lors de la segmentation d'image

L'application d'une Segmentation d'Image (SI) parallélisée par tuilage est conduite sur le territoire de la Métropole Nice Côte d'Azur. Ce projet induit l'exécution d'une SI sur une image de type BD ORTHO® de l'IGN de 14 Go. Pour cette prestation, nous avons découpé l'imagerie en 50 vignettes de 10 km sur 10 km avec une superposition de 1000 m (Figure 51).

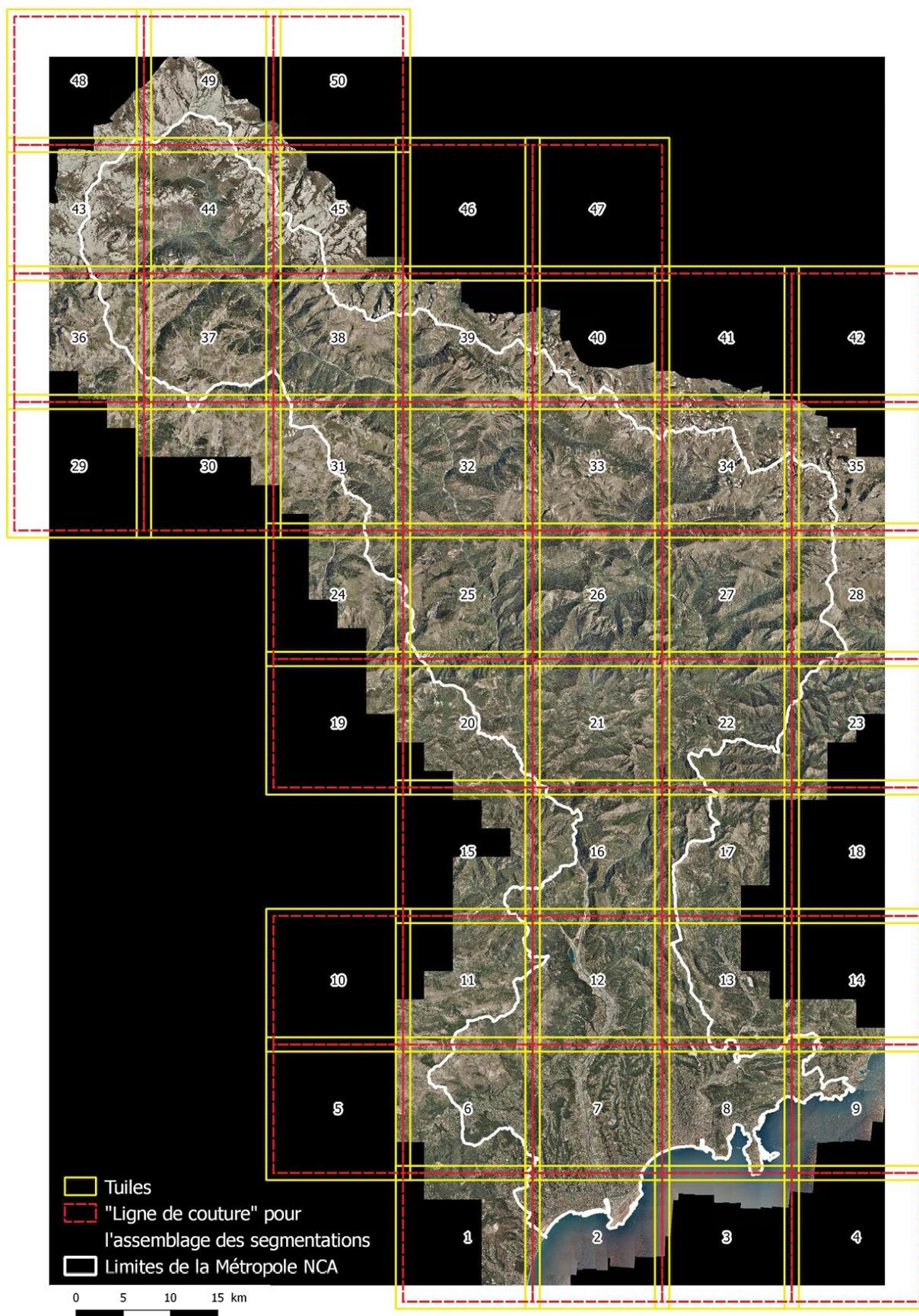


Figure 51. Tuilage de l'imagerie sur le territoire de la Métropole Nice Côte d'Azur (NCA)

5.2 Module 1 : formatage de l'imagerie à segmenter

La recherche de solutions aboutit à la mise au point du **module 1 : formatage de l'imagerie à segmenter**. La structuration du dossier du module est présentée sur la *Figure 52*. Le module est construit à partir d'un dossier principal (ou dossier racine) lui-même composé de deux sous dossiers et d'un fichier de paramétrage et de lancement du module. Le premier dossier est celui des données d'entrée. Dans celui-ci, l'utilisateur (ou producteur) doit positionner l'imagerie à segmenter. Il doit également indiquer (si besoin) le fichier SIG correspondant à l'emprise de l'imagerie pour le tuilage de celle-ci. Le second dossier est celui des données de sortie. Il contient les résultats des différentes tâches du module. En fonction de la configuration du fichier de paramétrage et d'exécution, tous les sous-dossiers ne sont pas nécessairement utilisés. Le recours au module peut se faire pour la conversion de l'imagerie et/ou pour le mosaïquage de l'imagerie et/ou pour le tuilage de l'imagerie.

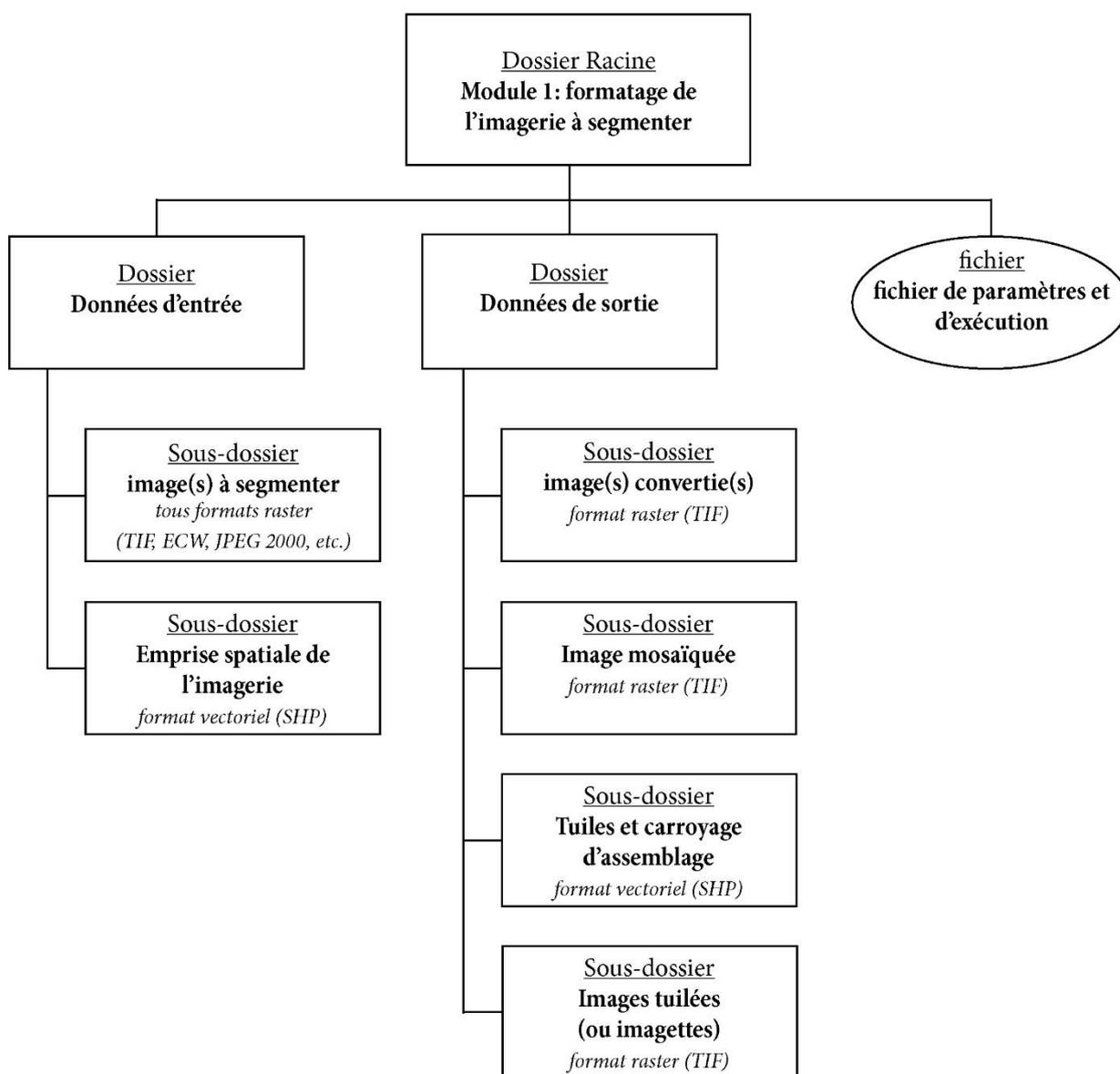


Figure 52. Structuration du module 1 consacré au formatage de l'imagerie à segmenter

Les scripts d'exécution du module sont détaillés en annexe ([Annexe C](#)). Pour des raisons de secret d'affaires, il est possible que le présent document ne soit pas délivré avec cette annexe.

Nous précisons que le module emprunte la librairie GDAL (Geospatial Data Abstraction Library) pour les tâches de conversion, de mosaïquage et de tuilage de l'imagerie. GDAL est une librairie d'algorithmes libre permettant de lire et de traiter des formats vecteurs et raster de données géospatiales. Cette bibliothèque peut être consultée et utilisée à partir de nombreux langages de programmation (C, C++, Python, R, etc.).

Le module fait appel également aux fonctions de PostGIS pour la création des tuiles de découpage et du carroyage d'assemblage pour le traitement des gros volumes de données. PostGIS est une extension du Système de Gestion de Base de Données (SGBD) libre PostgreSQL pour lire et manipuler des informations spatialisées (points, lignes, polygones).

5.3 FC3 et FC4: préparation des vecteurs structurant la SI

L'analyse fonctionnelle de l'assistance à la digitalisation à partir d'une SI distingue la Fonction de Contrainte **FC3 dédiée à l'intégration des vecteurs de référence géométrique** et la Fonction de Contrainte **FC4 dédiée au masque urbain**. Ces deux FC ont une même vocation. Elles doivent contraindre le tracé de la segmentation d'image par des délimitations du paysage déjà reconnues et validées.

Dans le premier cas, la **FC3** est justifiée par le besoin quasi systématique d'intégrer dans la construction d'une BD Ocsol GE un ou des vecteurs de référence géométrique. Comme évoqué dans le chapitre 4, la réalisation et l'intégration d'un squelette polygonal des infrastructures linéaires (routes, rails, etc.) est devenu une étape récurrente dans les prestations de réalisation des BD Ocsol GE en France. Pour preuve, les cahiers des charges des trois cas d'études (Projet de PNR de l'Aubrac, DLVA et Métropole NCA) incluent ce besoin de disposer de ce type d'ossature polygonale. Pour nos développements, il est donc indispensable de systématiser cette étape en conservant la capacité de s'adapter aux différentes demandes sur l'intégration de référentiel géométrique.

Dans le second cas, la **FC4** est dérivée du constat de non performance de la segmentation d'image pour les espaces urbains dans le cadre de la réalisation d'une BD Ocsol GE (*section 4.1.1.1*). Par cette fonction de contrainte, il est indispensable d'intégrer dans nos développements une manière d'isoler et de préserver les espaces urbains de l'exécution d'une SI. Cela passe par la construction d'un vecteur de référence géométrique dont la fonction est de masquer les espaces urbains. La construction de ce masque présente l'avantage de limiter les corrections dans la délimitation des espaces urbains et non urbains.

5.3.1 Ordonnement des fonctions techniques relatives à la FC3 et la FC4

Même si la justification de la FC3 et celle de la FC4 sont différentes, ces fonctions ont pour objectif de structurer la segmentation d'image. Ainsi, nous présentons l'ordonnement des fonctions de service dans un diagramme FAST combiné (*Figure 53*).

Pour la FC3 et la FC4, nous identifions 4 Fonctions Techniques (FT) de niveau 1 dont une est commune aux deux FC (FT_{3/4-1}). Cette fonction commune fait appel aux solutions techniques développées pour les deux FC. Il s'agit de pallier une lacune observée (durant la prestation sur le territoire de la Métropole NCA) dans l'élaboration du squelette polygonal des infrastructures linéaires, dans des espaces urbains denses et structurés comme ceux de Nice. Nous la décrivons, plus loin, dans ce chapitre.

Le diagramme FAST décline également pour la FC3 et la FC4 deux FT (FT₃₂, FT₃₃, FT₄₂ et FT₄₃). Les FT₃₂ et FT₄₂ sont dédiées à l'intégration du squelette ou du masque urbain dans le processus de segmentation. Les FT₃₃ et FT₄₃ sont consacrées à garantir la géométrie originale des référentiels dans la construction de la BD Ocsol GE. Les solutions techniques apportées pour ces fonctions sont décrites dans le chapitre 6 pour les FT₃₂ et FT₄₂ et dans le chapitre 7 pour les FT₃₃ et FT₄₃.

La **FT₃₁** et la **FT₄₁** portant respectivement sur l'élaboration du squelette polygonale des infrastructures linéaires et celle du masque urbain font l'objet de ce chapitre. Ces deux fonctions sont elles-mêmes déclinées par des FT de niveau 2 (**FT₃₁₁**, **FT₃₁₂**, **FT₄₁₁**, **FT₄₁₂** et **FT₄₁₃**).

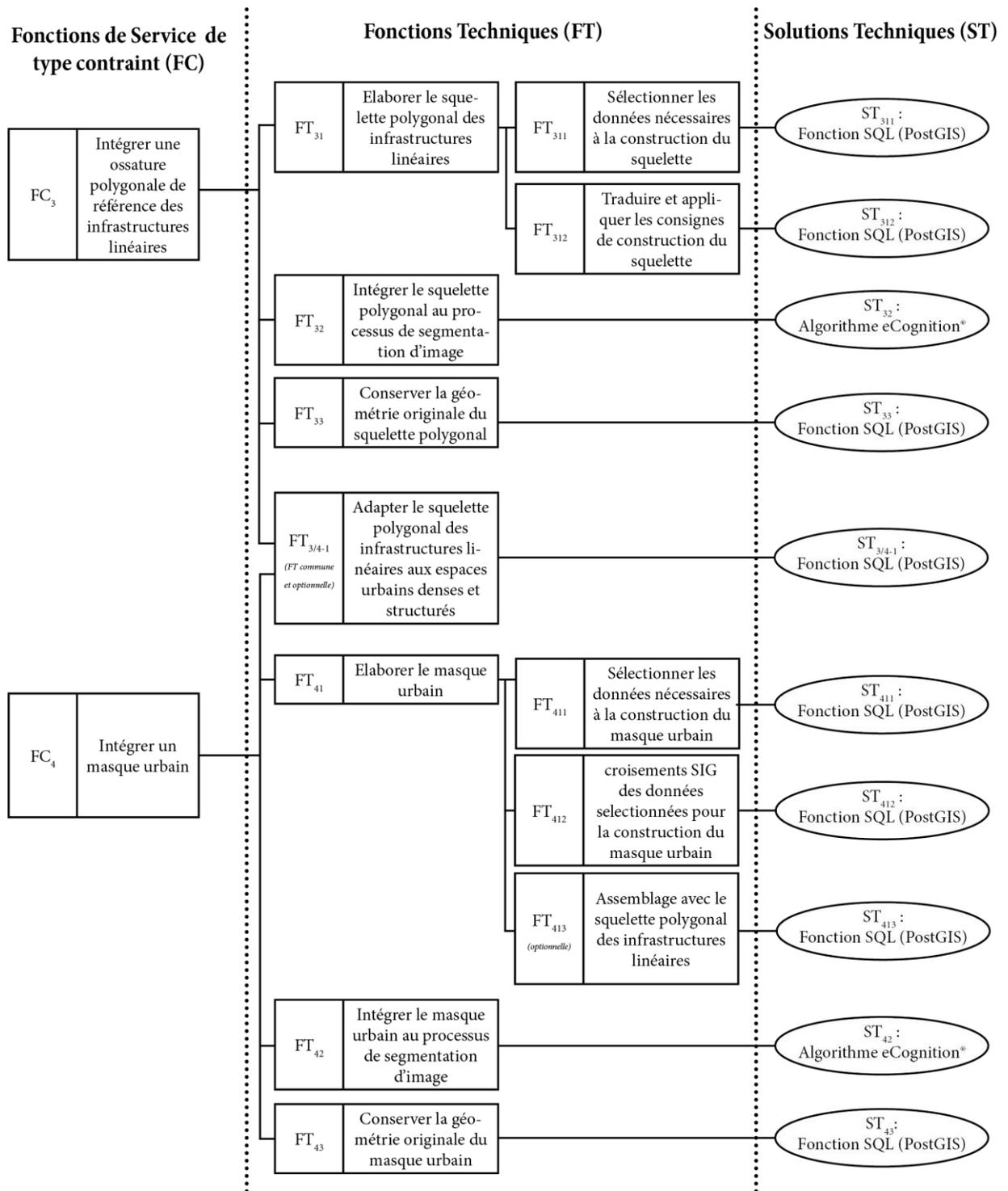


Figure 53. Ordonnancement (FAST) des fonctions techniques liées aux fonctions de service FC₃ et FC₄ associés à la préparation des vecteurs structurant la segmentation

5.3.2 *FT₃₁* : élaborer le squelette polygonal des infrastructures linéaires

5.3.2.1 Principe

En France, l'intégration d'un squelette polygonal des infrastructures linéaires dans la construction d'une BD Ocsol GE est motivée par la disponibilité de la BD TOPO® de l'IGN. La BD TOPO® contient une description vectorielle des éléments du territoire et de ses infrastructures. Cette base de données spatiales exhaustive offre une précision métrique et est exploitable du 1/5 000^e au 1/50 000^e. Souvent, la BD TOPO® fait office de référence spatiale, difficilement contestable, pour l'aide à la décision dans l'aménagement du territoire. Elle est reconnue par la majorité des acteurs territoriaux en France. Parmi les thèmes couverts par la BD TOPO®, la cartographie du réseau routier et du réseau ferroviaire offre une bonne opportunité pour construire une ossature polygonale de référence à la BD Ocsol GE. Plusieurs raisons sont évoquées pour mettre en place cette ossature :

- faciliter la lecture ou la localisation sur la BD Ocsol GE en offrant des repères connus à l'utilisateur ;
- éviter la digitalisation manuelle de grandes infrastructures linéaires et tentaculaires ;
- faciliter la construction de la BD Ocsol GE en donnant des points d'accroches à l'édition des polygones d'occupation du sol ;
- disposer d'une emprise au sol régulière et renseigné dans la table attributaire de la BD TOPO® ;
- faciliter la délimitation des contours ;
- assurer la cohérence et la continuité cartographique de ces infrastructures linéaires souvent difficiles à digitaliser (perte du tracé, polygones longs et fins, etc.) ;
- faciliter la mise à jour de la BD Ocsol GE pour une autre année à partir d'éléments paysagers considérés comme stables dans le temps.

La BD Ocsol GE n'a pas vocation à intégrer de façon exhaustive le réseau routier et ferroviaire de la BD TOPO®. La BD Ocsol GE n'est pas un inventaire de ces infrastructures. Ainsi, il est nécessaire d'apporter un certain nombre de prétraitements à la BD TOPO® pour sélectionner, transformer et intégrer les informations utiles à la construction de la BD Ocsol GE. Dans un souci de mutualisation des productions de BD Ocsol GE, des entités comme le CRIGE PACA ou l'IGN (Gourgand 2014; Louvet et Ajouc 2014) ont édité des prescriptions et des préconisations dans la construction des ossatures polygonales des infrastructures linéaires (routes et voies ferrées). Ces documents de cadrage donnent un ensemble de consignes pour hiérarchiser et sélectionner les tronçons d'infrastructures utiles pour la base de données à partir de la BD TOPO®. Ils indiquent également la manière de convertir l'information linéaire en information surfacique pour respecter l'emprise au sol des différents types d'infrastructures. Enfin, les documents de consignes apportent des informations sur la façon de les intégrer dans la construction de bases de données.

Les prescriptions pour la construction d'une ossature polygonale des réseaux routiers et ferroviaires sont largement acceptées et exigées par les commanditaires de BD Ocsol GE. Il revient au producteur de les intégrer dans son processus de production de la manière la plus systémique. Cette étape est identifiée, par le producteur, comme ayant une faible valeur ajoutée

sur l'ensemble du processus de production. Elle exige uniquement une traduction et l'application d'une série de consignes. Même si elle existe, la part d'expertise est réduite.

La solution technique pour la FT₃₁ (élaborer le squelette polygonal des infrastructures linéaires) est une chaîne de traitement capable de traduire et d'appliquer les consignes de construction d'une ossature polygonale. La chaîne de traitement est capable de s'adapter aux modifications de consignes pouvant intervenir selon les prestations. La *Figure 54* présente les principales étapes d'élaboration d'une ossature polygonale des infrastructures routières et ferroviaires à partir de la BD TOPO®.

La BD TOPO® est organisée en dix grands thèmes d'éléments ou d'infrastructures composant un territoire (IGN 2016a). Ces thèmes sont structurés en classe qui regroupe des objets géographiques de même genre (ponctuel, linéaire ou surfacique), de même dimension (2D ou 3D) et décrit par les mêmes attributs.

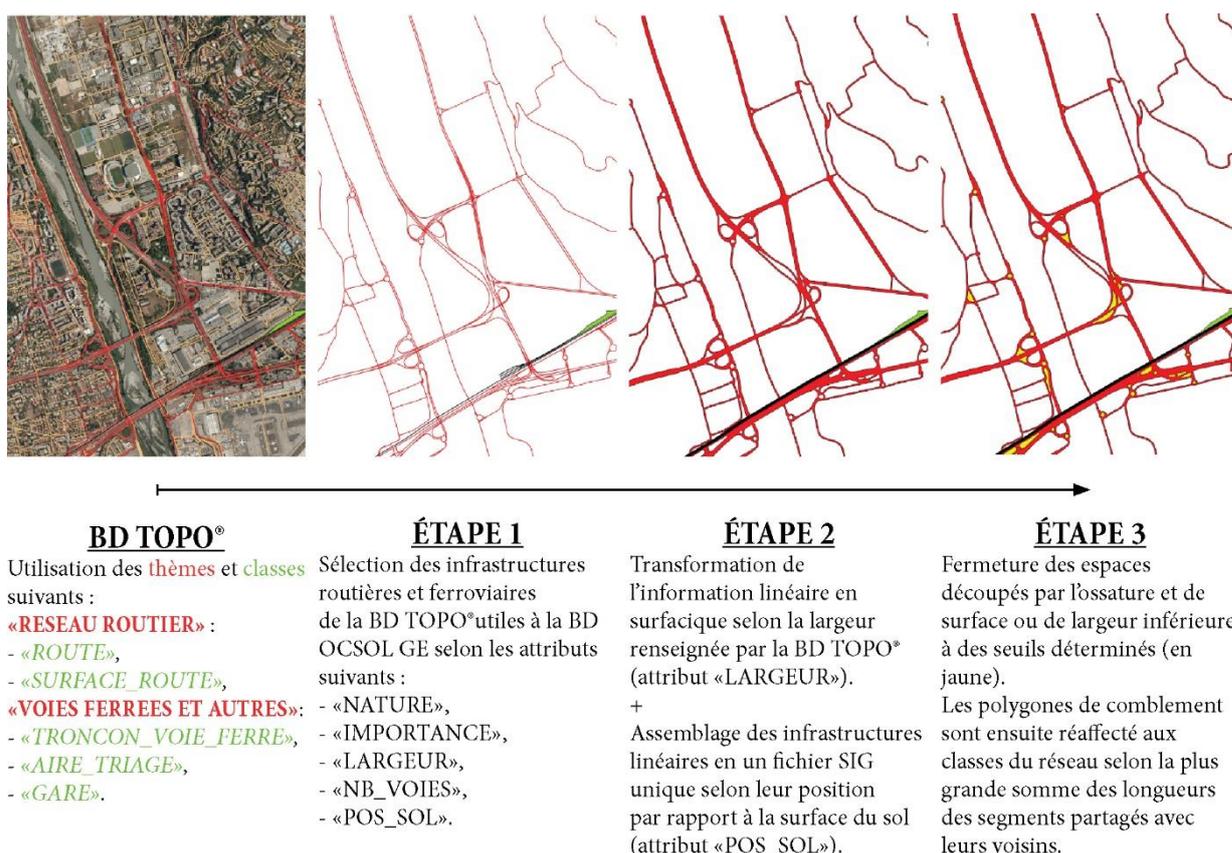


Figure 54. Étapes d'élaboration de l'ossature polygonale des infrastructures routières et ferroviaires à partir de la BD TOPO®

5.3.2.2 Étape 1 : sélection des infrastructures routières et ferroviaires utiles (FT311)

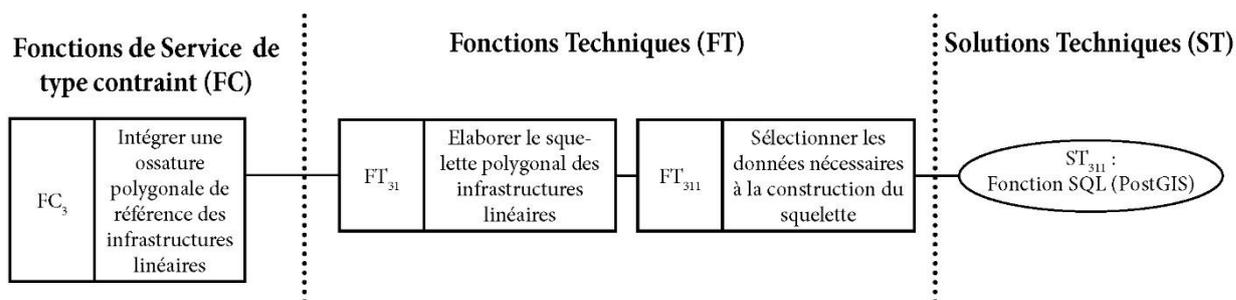


Figure 55. Rappel de l'ordonnancement de la fonction technique FT311

Un certain nombre d'attributs décrivant les classes utiles à la construction de l'ossature permettent de réaliser la première étape de sélection des infrastructures routières et ferroviaires utiles à l'élaboration de la BD Ocsol GE (Figure 55). Pour la classe « ROUTE » nous disposons de cinq critères de sélection (Tableau 13). Pour la classe « SURFACE_ROUTE », un seul critère de sélection est retenu (Tableau 14). La classe linéaire « TRONCON_VOIE_FERRE » est sélectionnable à partir de trois critères (Tableau 15). Contrairement à la classe « ROUTE », la hiérarchisation des tronçons par le trafic et la largeur de l'infrastructure ne sont pas des attributs renseignés pour les chemins de fer. L'ensemble des objets composant la classe « AIRE_TRIAGE » est intégré à la construction de l'ossature. Il en est de même pour les objets de la classe « GARE » à la condition que ceux-ci touchent un objet sélectionné du thème « VOIES FERREES ET AUTRES ».

Tableau 13. Critères de sélection des tronçons routiers – Classe « ROUTE »

Critères de sélection	Attribut	Description	Valeurs possible de l'attribut
Catégorie de route	« NATURE »	Nature du tronçon de route	«Autoroute», «Quasi-autoroute», «Bretelle», «Route à 2 chaussées», «Route à 1 chaussée», «Route empierrée» ou «chemin»
Connectivité	« IMPORTANCE »	Hiérarchisation du réseau routier basée sur le trafic routier	«1», «2», «3», «4» et «5»
Largeur de la chaussée	« LARGEUR »	Largeur de la chaussée (d'accotement à accotement)	Valeur : décimal Unité : mètre
Nombre de voies	« NB_VOIES »	Nombre total de voies de circulation	de 0 à 10 (valeur 0 réservé aux tronçons dont l'information est inconnue)
Position par rapport au sol	« POS_SOL »	Donne le niveau de l'infrastructure par rapport à la surface du sol	1, 2, 3,... tronçon situé au-dessus du niveau du sol (pont, viaduc,...) 0 tronçon situé au niveau du sol -1, -2, -3,... tronçon situé en dessous du niveau du sol (tunnel)

Tableau 14. Critère de sélection des surfaces routières – « SURFACE_ROUTE »

Critères de sélection	Attribut	Description	Valeurs possible de l'attribut
Catégorie de surface routière	« NATURE »	Nature des surfaces routières	«Parking», «Péage», «Place ou « carrefour»

Tableau 15. Critères de sélection des tronçons de chemin de fer – Classe «TRONCON_VOIE_FERRE»

Critères de sélection	Attribut	Description	Valeurs possible de l'attribut
Catégorie de chemin de fer	« NATURE »	Nature du tronçon de chemin de fer	«Principale», «Voie de service», «Voie non exploitée», «Transport» ou «Funiculaire ou crémaillère»
Nombre de voies	« NB_VOIES »	Attribut indiquant si une ligne de chemin de fer est constituée d'une seule voie ferrée ou de plusieurs	de 0 à 4 (valeur 0 réservé aux tronçons dont l'information est inconnue)
Position par rapport au sol	« POS_SOL »	Donne le niveau de l'infrastructure par rapport à la surface du sol	1, 2, 3,... tronçon situé au-dessus du niveau du sol (pont, viaduc,...) 0 tronçon situé au niveau du sol -1, -2, -3,... tronçon situé en dessous du niveau du sol (tunnel)

Dans un souci d'adaptation de la méthode au besoin d'une ossature polygonale des infrastructures routières et ferroviaires, la solution technique (ST₃₁₁) laisse la possibilité à l'utilisateur d'intégrer ou non un critère supplémentaire de sélection des infrastructures et d'ajuster les valeurs associées. De plus la solution technique permet d'intégrer, au processus de création de l'ossature, des infrastructures routières ou ferroviaires exceptionnelles dont les attributs ne répondent pas aux critères de sélection mais sont jugés, par l'utilisateur, comme importants pour la BD Ocsol GE. Cette adaptation se réalise par l'importation de ces infrastructures exceptionnelles à partir d'un ou des plusieurs fichiers SIG linéaires ou surfaciques (polygones) disposant des attributs nécessaires à leur identification et leur éventuelles transformations géométriques (linéaires vers surfaciques).

5.3.2.3 Étape 2 : transformation géométrique et assemblage (FT₃₁₂)

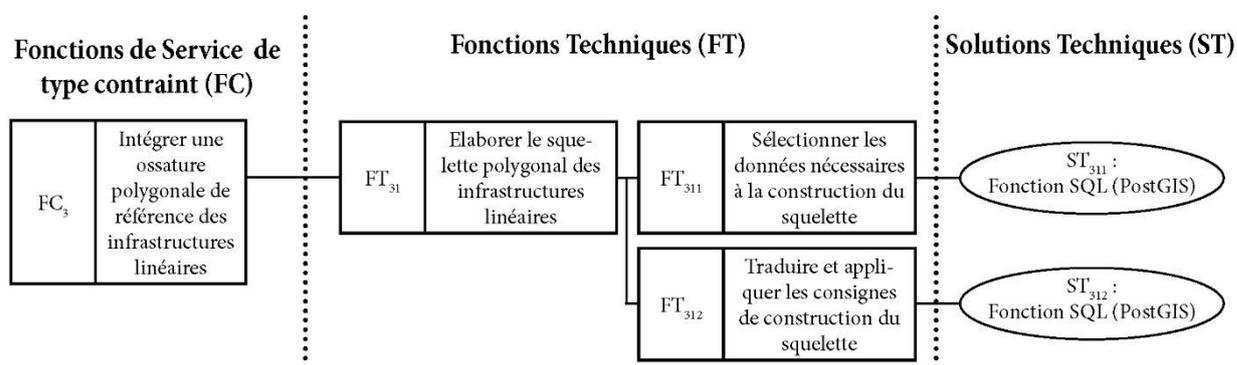


Figure 56. Rappel de l'ordonnancement de la fonction technique FT312

La seconde étape de construction de l'ossature est consacrée à **la transformation de l'information linéaire en information surfacique suivi de l'assemblage des différentes classes dans un fichier SIG surfacique unique (ST₃₁₂)** (Figure 56).

La transformation géométrique ne concerne que les classes linéaires « ROUTE » et « TRONCON_VOIE_FERRE » après sélection. Pour la classe « ROUTE », la transformation consiste en l'application d'une zone tampon de part et d'autre la ligne basée sur la valeur

décimale renseignée par l'attribut « *LARGEUR* » de la classe. L'attribut « *LARGEUR* » n'est pas renseigné systématiquement. Cela est surtout vérifié pour des tronçons secondaires de plus faible importance. Pour pallier cette contrainte, il est possible alors de déterminer une largeur minimale à appliquer pour les tronçons non renseignés (*Figure 57*). Pour la classe « *TRONCON_VOIE_FERRE* », l'attribut « *LARGEUR* » n'est pas renseigné. La transformation géométrique par la création d'une zone tampon est modélisée en fonction de la nature du tronçon.



*Figure 57. Tronçons routiers de la BD TOPO@ IGN (en jaune) transformés en information surfacique (en rouge) de 8m de largeur par défaut ou selon la valeur renseignée dans l'attribut « *LARGEUR* »*

L'assemblage des classes composant l'ossature polygonale des infrastructures routières et ferroviaires est réalisé à l'aide de l'attribut « *POS_SOL* » afin de respecter l'ordre de visualisation de l'élément à partir d'un point de vue aérien. Il renseigne sur le niveau de l'infrastructure par rapport au sol et donc sa position par rapport à une autre infrastructure qui l'intersecte. L'ordre d'assemblage est justifié lorsque la trame viaire est dense.

5.3.2.4 Étape 3 : fermeture des petits espaces « vide » formés par l'ossature

L'ultime étape de construction de l'ossature polygonale intégrant la *ST₃₁₂* (*Figure 56*) consiste à simplifier sa géométrie. Pour cela nous procédons à une fermeture des espaces découpés par l'ossature selon une surface ou une largeur inférieure à des seuils déterminés (*Figure 58*). Cette action de généralisation de l'ossature permet de combler des espaces considérés comme trop petits pour la BD Ocsol GE. Les espaces comblés par un polygone sont

réaffectés à l'infrastructure routière ou ferroviaire adjacente avec laquelle il partage le maximum de longueurs communes.

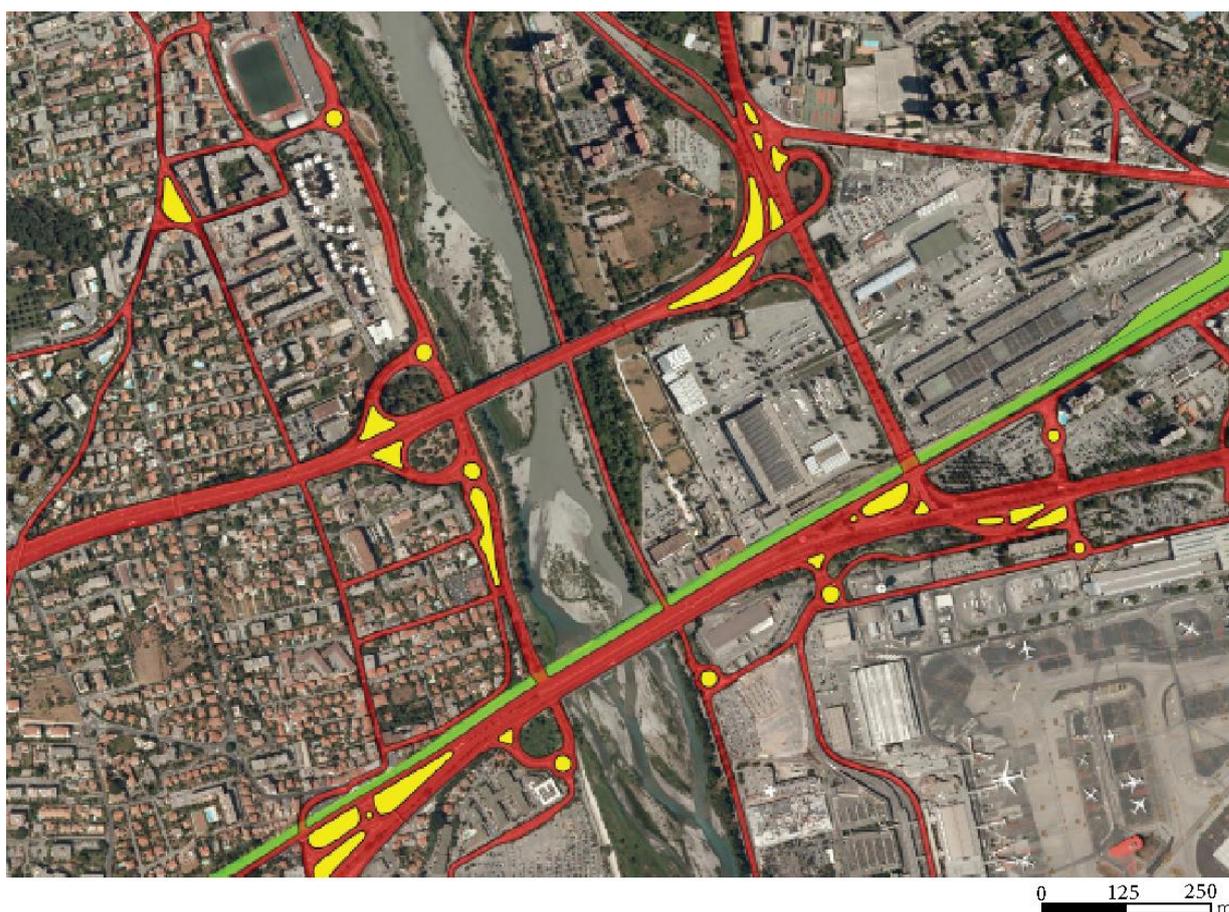


Figure 58. Comblement des petits espaces (en jaune) générés par l'ossature routière de la BD TOPO®IGN (en rouge) et ferroviaire (en vert) selon un seuil de surface et de largeur déterminé par l'utilisateur

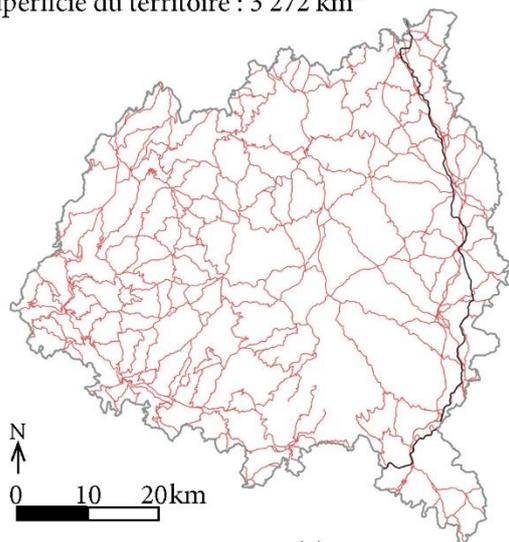
5.3.2.5 Application aux cas d'études

L'application des solutions techniques ST₃₁₁ (sélection des infrastructures routières et ferroviaires utiles) et ST₃₁₂ (transformation géométrique et assemblage) a été menée sur les trois cas d'études (Figure 59). Le Tableau 16 précise les différentes valeurs d'attribut de la BD TOPO® de l'IGN ainsi que les règles de transformation de l'information linéaire en information surfacique des tronçons routiers et ferroviaires. Il indique également les seuils fixés pour la fermeture des espaces découpés par l'ossature. La trame viaire présente logiquement une densité plus importante en fonction des territoires cartographiés. Les espaces urbains de l'agglomération de Manosque ou du littoral niçois (Figure 60) sont nettement plus fragmentés par l'ossature polygonale que les espaces ruraux du territoire de l'Aubrac ou de l'arrière-pays niçois (Figure 61).

Tableau 16. Sélection et paramétrage appliqué à partir des données de la BD TOPO® IGN pour la construction des ossatures polygonales des trois cas d'étude

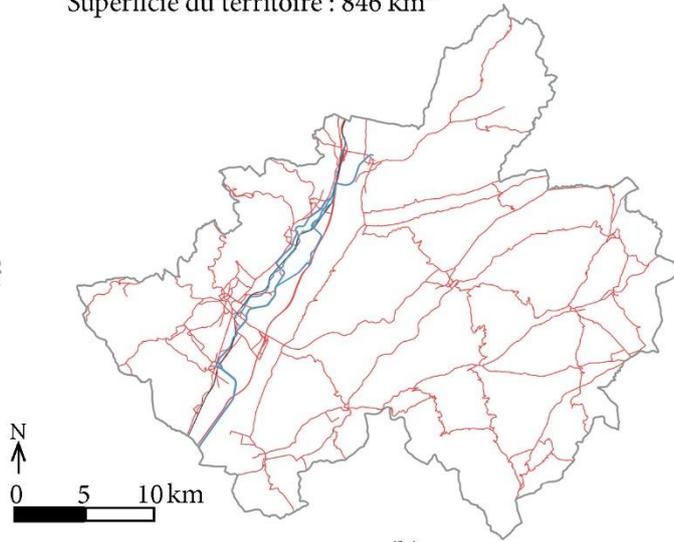
	Projet de PNR de l'Aubrac	Durance Luberon Verdon Agglomération	Métropole Nice Côte- d'Azur
Classe « ROUTE » du thème « RESEAU ROUTIER » de la BD TOPO®			
« NATURE »	«Autoroute», «Bretelle», «Route à 2 chaussées», «Route à 1 chaussée»	«Autoroute», «Bretelle», «Route à 2 chaussées», «Route à 1 chaussée»	«Autoroute», «Bretelle», «Route à 2 chaussées», «Route à 1 chaussée»
« IMPORTANCE »	« 1 » à « 4 »	« 1 » à « 4 »	« 1 » à « 4 »
« LARGEUR »	>= 10 m	>= 8 m	>= 8 m
« NB_VOIES »	>= 2	>= 2	>= 2
« POS_SOL »	>= 0	>= 0	>= 0
Classe « SURFACE_ROUTE » du thème « RESEAU ROUTIER » de la BD TOPO®			
« NATURE »	«Péage»	«Péage»	«Péage»
Classe « TRONCON_VOIE_FERRE » du thème « VOIES FERREES ET AUTRES » de la BD TOPO®			
« NATURE »	«Principale»	«Principale»	«Principale», «Transport urbain»
« NB_VOIES »	>= 2	>= 2	>= 2
« POS_SOL »	>= 0	>= 0	>= 0
Classe « AIRE_TRIAGE » du thème « VOIES FERREES ET AUTRES » de la BD TOPO®			
« NATURE »	« aire_triage »	« aire_triage »	« aire_triage »
Données complémentaires			
Classe « AIRE_TRIAGE »	Oui	Oui	Oui
Classe « GARE »	Oui	Oui	Oui
Données SIG complémentaires	Rajout de tronçons routiers non pris en compte par les critères de sélection	-Rajout de tronçons routiers non pris en compte par les critères de sélection -Intégration du canal de Provence à partir de la BD TOPO®	Non
Paramètres appliqués pour la transformation géométrique de l'information linéaire et la généralisation du squelette			
Largeur appliquée aux tronçons routiers	largeur minimale de 10 mètres si la largeur renseignée par l'attribut « LARGEUR » est inférieure	largeur minimale de 8 mètres si la largeur renseignée par l'attribut « LARGEUR » est inférieure	largeur minimale de 8 mètres si la largeur renseignée par l'attribut « LARGEUR » est inférieure
Largeur appliquée aux tronçons ferroviaires	10 mètres	8 mètres pour les tronçons d'une seule voie. Pour les tronçons > à 1 voie $L = \text{« NB_VOIES »} * 1.5 + 4$ (4 pour les 2m de chaque côté de la voie)	8 mètres pour les tronçons d'une seule voie. Pour les tronçons > à 1 voie $L = \text{« NB_VOIES »} * 1.5 + 4$ (4 pour les 2m de chaque côté de la voie)
Fermeture des espaces découpés par l'ossature selon une surface	< 2 500 m ²	< 500 m ²	< 500m ²
Fermeture des espaces découpés par l'ossature selon une largeur	< 25 m	< 10 m	< 10 m

Superficie du territoire : 3 272 km²

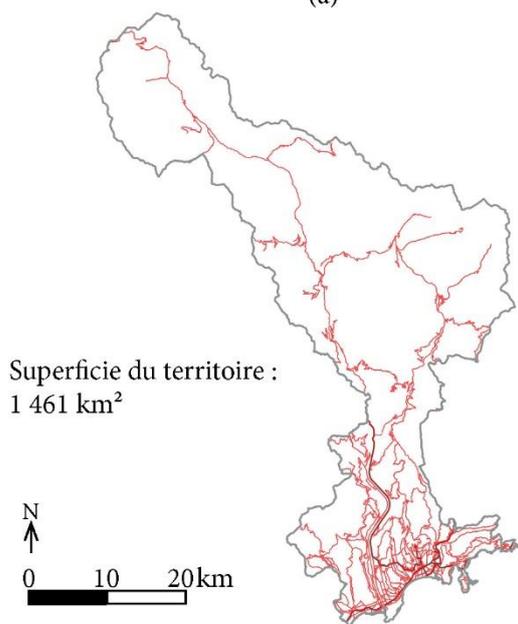


(a)

Superficie du territoire : 846 km²



(b)



(c)

- Limite des zones d'étude
- Infrastructures routières
- Infrastructures ferroviaires
- Canaux

Superficie du territoire :
1 461 km²

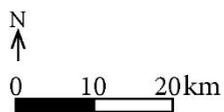


Figure 59. Squelettes polygonaux des infrastructures linéaires pour les 3 cas d'étude : (a) projet de PNR de l'Aubrac ; (b) Communauté d'Agglomération de Manosque (DLVA) ; (c) Métropole Nice Côte d'Azur

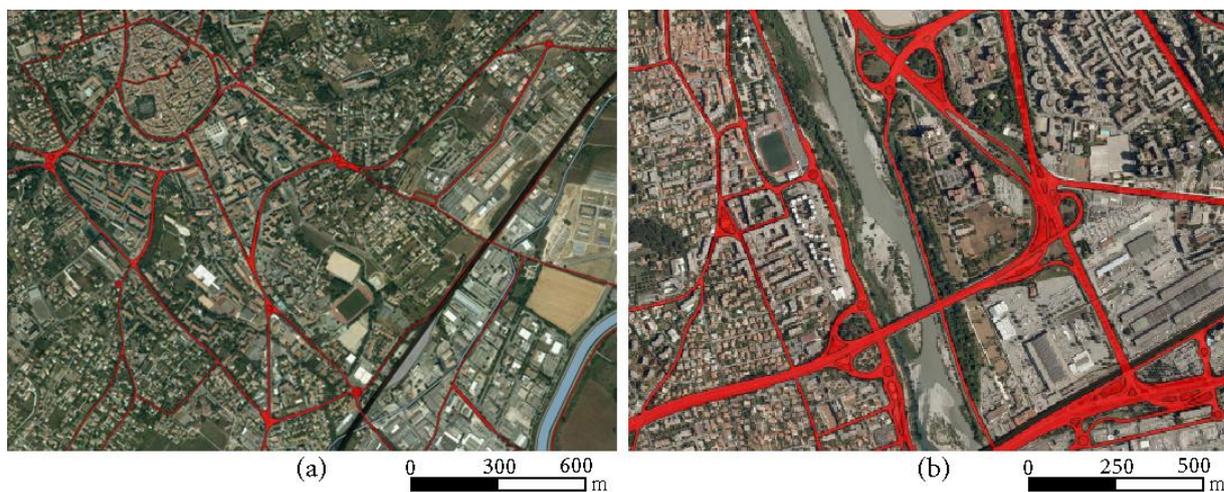


Figure 60. Extraits de l'ossature polygonale des infrastructures linéaires dans des espaces urbains : (a) Manosque (DLVA) ; (b) Métropole Nice Côte d'Azur

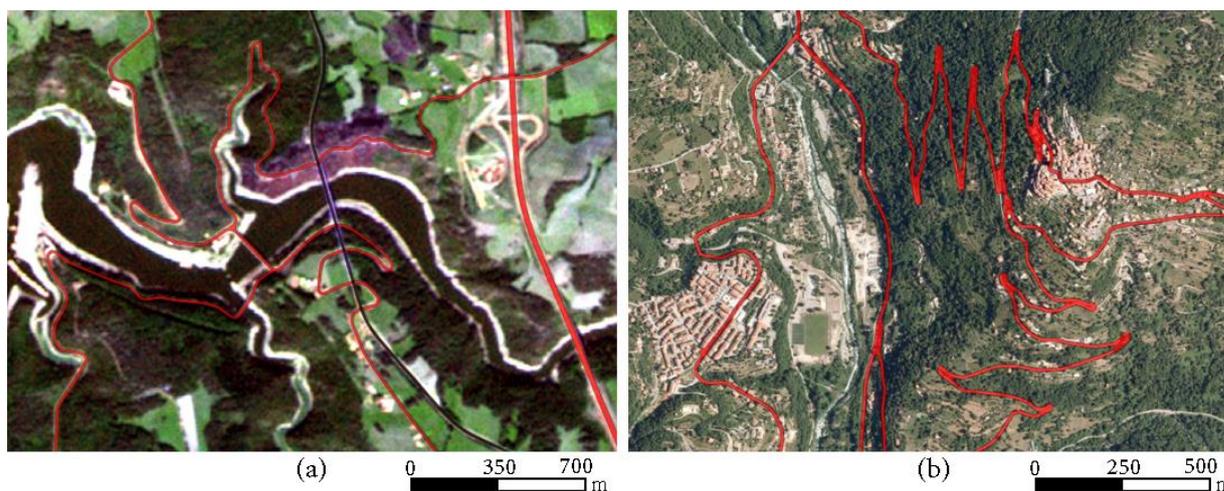


Figure 61. Extraits de l'ossature polygonale des infrastructures linéaires dans des espaces ruraux : (a) projet de PNR de l'Aubrac ; (b) Métropole Nice Côte d'Azur

5.3.3 FT41 : élaborer le masque urbain

5.3.3.1 Choix méthodologique

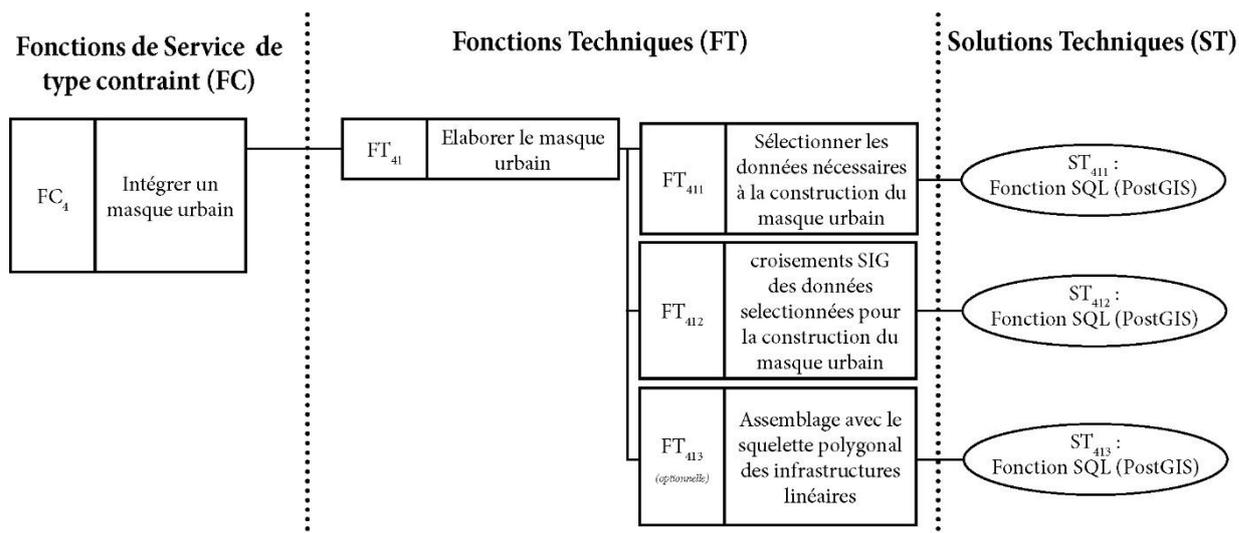


Figure 62. Rappel de l'ordonnancement de la fonction technique FT41

La FT₄₁ a pour vocation d'isoler les espaces urbains d'une implémentation de l'algorithme de segmentation d'image (Figure 62). L'élaboration d'un masque urbain consiste à créer une cartographie binaire du territoire entre les espaces urbains et les espaces non urbains. Il existe plusieurs façons pour produire ce type de cartographie binaire pouvant être regroupées en trois principales approches :

- les méthodologies utilisant uniquement l'imagerie (télédétection numérique et/ou photo-interprétation) ;
- les méthodologies utilisant uniquement des données vectorielles existantes (traitements SIG) ;
- Les méthodologies combinant les deux premières approches.

Nous procédons à un choix méthodologique basé exclusivement sur l'utilisation de données vectorielles. La raison de ce choix repose sur la richesse des bases de données vectorielles disponibles en France et décrivant les espaces urbains (BD TOPO®, PCI vecteur, etc.). L'utilisation de la télédétection numérique et/ou de la photo-interprétation ne nous semble pas être un choix pertinent pour une application sur le territoire français. Le compromis entre la robustesse, la performance et le temps nécessaires à l'application d'une approche basée sur l'imagerie est jugé moins évident que pour une approche uniquement basée sur des données vectorielles disponibles. La solution hybride n'est également pas retenue pour les mêmes raisons.

En France, il est courant d'utiliser les classes de bâtis surfaciques de la BD TOPO® pour élaborer un masque urbain. Plusieurs opérations successives de déformations morphologiques de la donnée (dilatation, érosion), sont pratiquées afin de dériver des « tâches » polygonales des espaces urbains (Loriot et Di Salvo 2008). Cette pratique s'avère insuffisante pour notre besoin. L'inconvénient majeur est identifié sur l'approximation de la jonction entre les espaces urbains et les espaces non urbains. Celle-ci est uniquement justifiée par un seuil de distance fixé de

manière empirique depuis le bâti. Ces opérations ne prennent pas en compte l'emprise cadastrée des espaces urbains (bâtiment avec son espace associé) (*Figure 63*).



Figure 63. Délimitation approximative d'une « tache urbaine » (en jaune) réalisée par déformation morphologique (dilatation-érosion) à partir des bâtiments vectorisés de la BD TOPO® de l'IGN (en rouge)

5.3.3.2 Principe des solutions techniques développées

Les solutions techniques **ST₄₁₁** et **ST₄₁₂** ont pour objectif de **fournir une enveloppe urbaine limitant les reprises manuelle par photo-interprétation des jonctions entre les milieux urbains et non urbains**. Il mobilise deux sources de données essentielles :

- les bâtiments vectorisés issus de la BD TOPO® ou de la DGFIP ;
- le plan cadastral vectorisé issu de la BD TOPO® ou de la DGFIP.

Le principe général est d'attribuer un caractère « *urbain* » aux parcelles cadastrales à partir de la densité de bâtiments observée au sein de chacune d'elle (*Figure 64*). La chaîne de traitement élaborée dans le cadre du module donne la possibilité à son utilisateur d'ajuster le caractère urbain attribué. Il doit définir un pourcentage d'emprise spatiale des bâtiments dans la parcelle cadastrale à partir duquel la parcelle est considérée comme « *urbaine* » (*Figure 65*).

De plus, l'utilisateur a la possibilité d'intégrer des données vectorielles complémentaires afin d'améliorer l'attribution du caractère « *urbain* » à une parcelle (ST411). Par exemple, pour le territoire de la DLVA et la Métropole NCA, nous avons complété la construction du masque à l'aide des zonages vectorisés POS-PLU disponibles. Cette donnée a permis d'améliorer la prise en compte de certains secteurs urbanisés non actualisés dans la BD TOPO®. L'outil donne également la possibilité de dériver des indicateurs statistiques pour faciliter la décision d'attribution (ST411). Pour le territoire de la DLVA, nous avons calculé la compacité des parcelles cadastrales via l'indice *I_g* de Gravelius (Équation 1).

$$I_g = P/2 * \sqrt{(\pi * A)} \quad 1$$

Où *P* est le périmètre du polygone et *A* sa superficie. L'hypothèse ici, est d'écarter les parcelles de forme linéaire et de faible largeur peu susceptibles d'abriter des constructions

(Figure 66). Cette hypothèse n'a pas été exprimée pour le territoire de la Métropole NCA. La morphologie des parcelles construites y est plus aléatoire en raison du relief marqué.

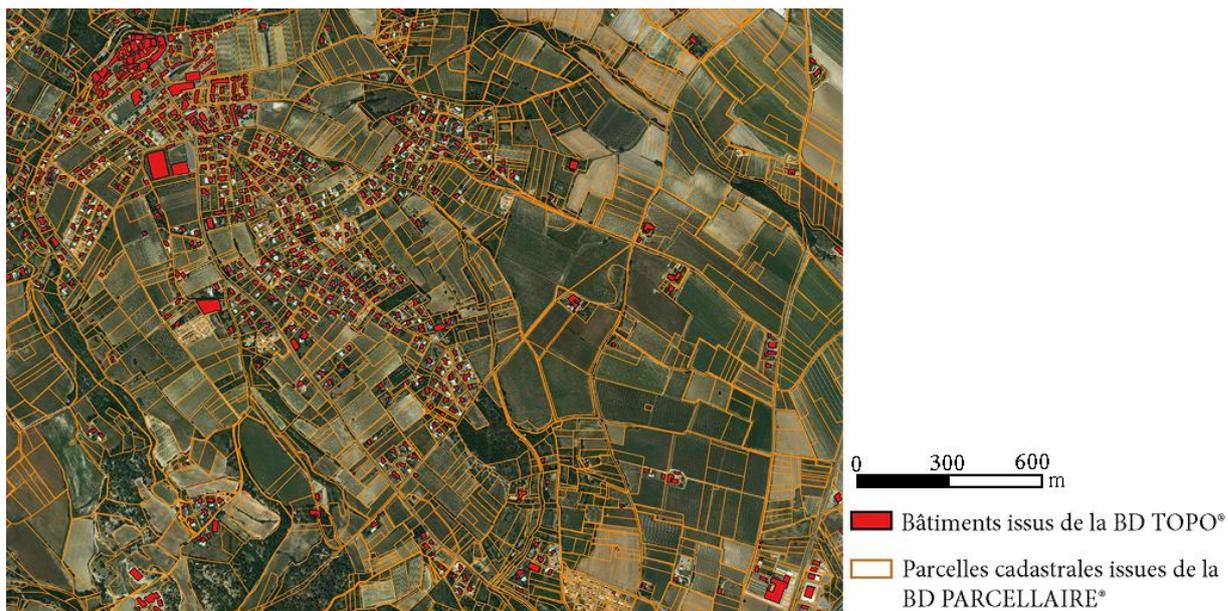


Figure 64. Élaboration du masque urbain à l'aide des bâtiments de la BD TOPO® IGN et des parcelles cadastrales de la BD PARCELLAIRE® IGN

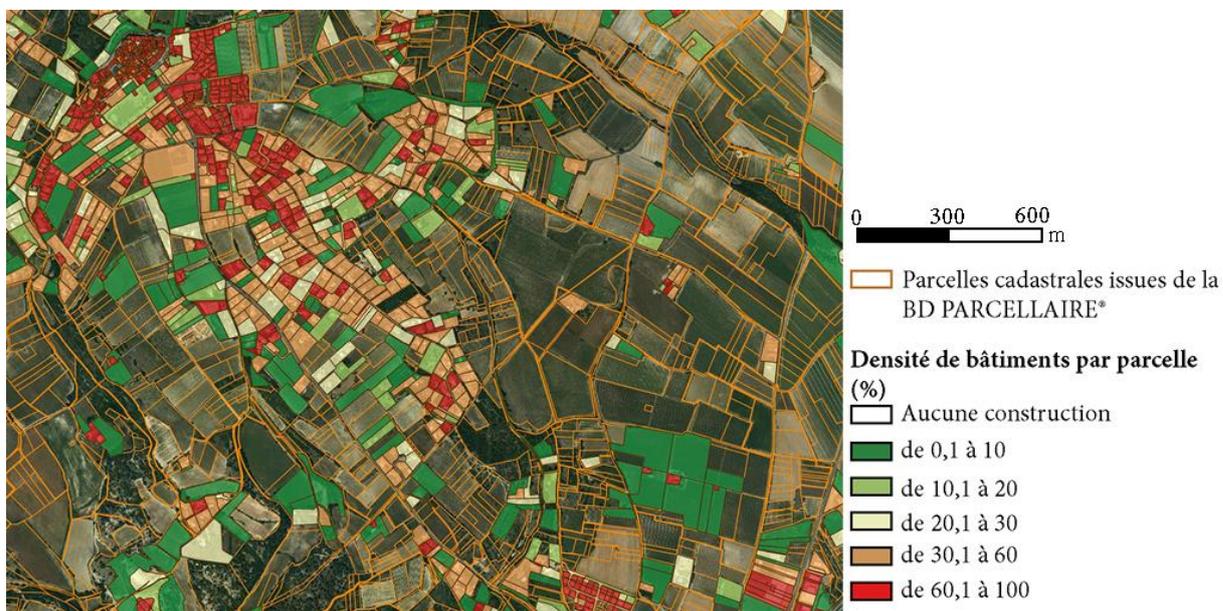


Figure 65. Calcul de la densité de bâtiments de la BD TOPO® IGN par parcelle cadastrale de la BD PARCELLAIRE® IGN

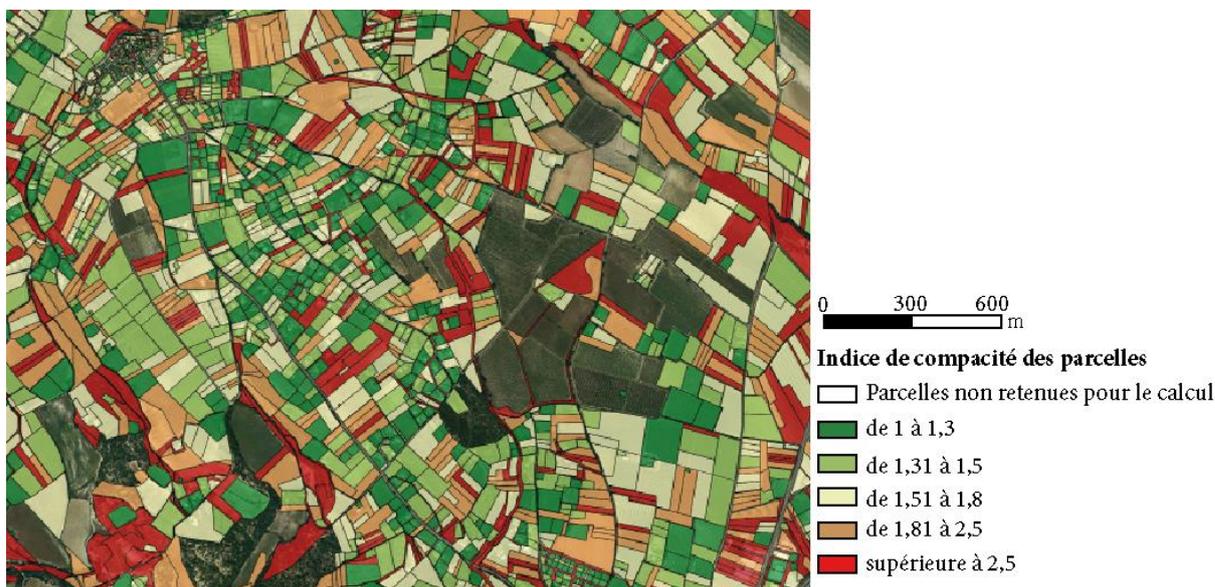


Figure 66. Calcul d'un indice de compacité des parcelles cadastrales pour la construction du masque urbain

Au final, le module est développé pour traduire des règles de décision propre à chaque utilisateur (ST₄₁₂). En aucun cas, celui-ci prétend apporter une réponse unique à la construction d'un masque urbain. Il est alors possible de construire un masque urbain exhaustif intégrant l'habitat isolé ou, au contraire, inclure uniquement dans ce masque les zones urbaines les plus denses (Figure 67).



Figure 67. Masque urbain (ou « tache urbaine ») construit à partir des solutions techniques proposées (ST₄₁₁ et ST₄₁₂)

L'outil répond également au besoin de disposer d'une enveloppe urbaine limitant les reprises manuelles par photo-interprétation grâce à l'apport du découpage cadastrale. De plus, la solution technique ST₄₁₂ intègre des post-traitements visant à faciliter l'utilisation du masque urbain dans le cadre d'une assistance à la digitalisation (Figure 68). Ces post-traitements veillent à

généraliser la délimitation de l'enveloppement urbaine en comblant les petits espaces enclavés selon un seuil de surface et de largeur définis par l'utilisateur. Un contrôle de la conformité topologique et géométrique du fichier SIG est également appliqué.



Figure 68. Exemple de délimitation cadastrée du masque urbain obtenue à l'aide des solutions techniques proposées (ST₄₁₁ et ST₄₁₂)

5.3.3.3 ST₄₁₃ : assemblage du masque urbain et du squelette polygonal des infrastructures linéaires

La Fonction Technique (FT₄₁₃) est une fonction optionnelle (Figure 69). L'objectif de la solution technique dérivée est **d'assembler le masque urbain précédemment construit (FT₄₁) avec l'ossature polygonale des infrastructures routières et ferroviaires généré par la FT₃₁**. La ST₄₁₃ permet donc la combinaison de ces deux fichiers SIG et prévoit des post-traitements adaptés pour pallier aux anomalies topologiques incontournables de ce type de croisement SIG (polygones artefacts, petits espaces enclavés, auto-intersections, etc.).

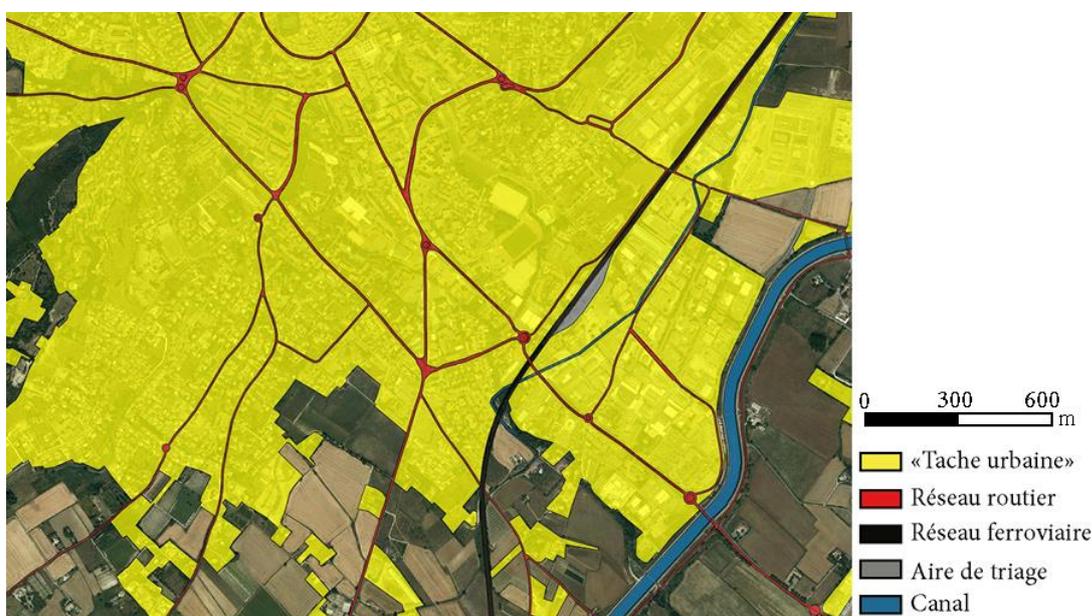


Figure 69. Assemblage du masque urbain avec le squelette polygonal des infrastructures routières, ferroviaires et supplémentaires (canal)

5.3.3.4 Applications aux cas d'études

L'application des solutions techniques pour l'élaboration du masque urbain (ST_{411} , ST_{412} et ST_{413}) a été menée pour la communauté d'agglomération DLVA (Figure 71) et de la Métropole Nice Côte-d'Azur (Figure 72). Les différents paramètres utilisés pour les applications sont résumés dans le *Tableau 17*. Pour le projet de PNR de l'Aubrac, nous n'avons pas réalisé de masque urbain pour deux raisons. Tout d'abord, les espaces urbains sur le périmètre d'étude sont marginaux. Ils sont essentiellement composés de petits bourgs ou d'habitats isolés. Ils ne font pas l'objet d'une attention particulière par le commanditaire. Les espaces urbains n'ont pas besoin d'être cartographiés selon une nomenclature avancée contrairement aux espaces urbains de la DLVA et la Métropole Nice Côte d'Azur. Enfin, l'imagerie RapidEye à 5 m de résolution spatiale devant servir à la digitalisation de l'occupation du sol ne permet pas de distinguer clairement le découpage cadastral des espaces urbains (Figure 70). Ainsi il n'est pas nécessaire d'isoler ces espaces pour l'implémentation d'un algorithme de segmentation d'image.



Figure 70. Extrait d'une image RapidEye (5 m) au 1/10 000^e sur le territoire du projet de PNR de l'Aubrac

Tableau 17. Paramètres appliqués pour la construction du masque urbain

	Durance Luberon Verdon Agglomération	Métropole Nice Côte- d'Azur
Bâtiments vectorisés	Classes de la BDTOPO® : « BATI_INDIFFERENCIE », « BATI-REMARQUABLE », « BATI_INDUSTRIEL », « CIMETIERE », « PISTE_AERODROME », « TERRAIN_SPORT ».	Classes de la BDTOPO® : « BATI_INDIFFERENCIE », « BATI-REMARQUABLE », « BATI_INDUSTRIEL », « CIMETIERE », « PISTE_AERODROME », « TERRAIN_SPORT ».
Parcelles cadastrales	PCI vecteur de la DGFIP	PCI vecteur de la DGFIP
Seuil de densité de bâtiments par parcelle (%)	> 12%	> 5%
POS-PLU vectorisés	Requête selon les attributs : « TYPEZONE » et « LIBELONG »	Requête selon les attributs : « TYPEZONE » et « LIBELONG »
Indice de compacité des parcelles	< 2,5	Non utilisé
Fermeture des espaces découpés par le masque urbain selon une surface	< 500 m ²	< 500 m ²
Fermeture des espaces découpés par l'ossature selon une largeur	< 10 m	< 10 m
Assemblage avec le squelette polygonal des infrastructures linéaires	Oui	Oui

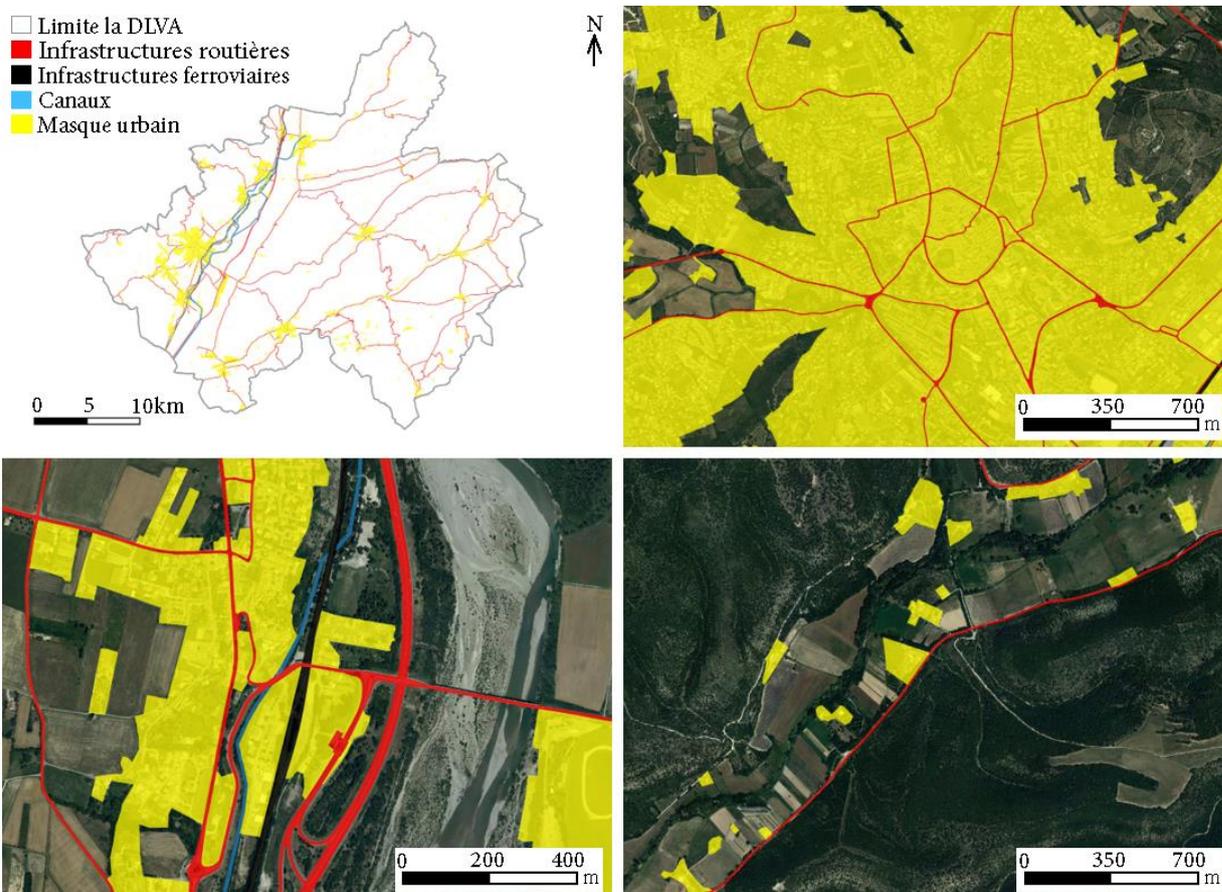


Figure 71. Extraits du masque urbain assemblé aux infrastructures linéaires sur le territoire de la communauté d'agglomération de Manosque

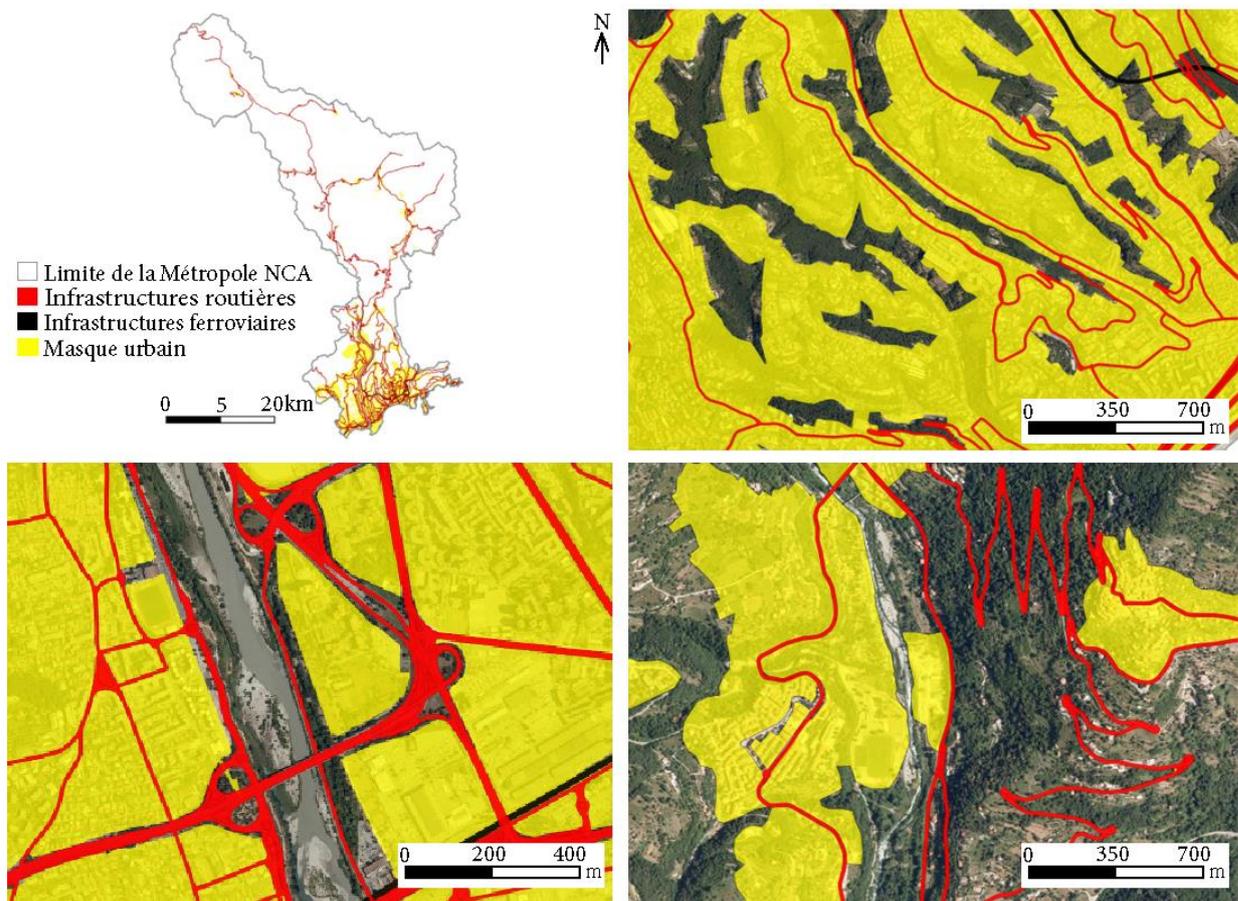


Figure 72. Extraits du masque urbain assemblé aux infrastructures linéaires sur le territoire de Métropole Nice Côte d'Azur

5.3.4 FT_{3/4-1} : adapter le squelette polygonal des infrastructures linéaires aux espaces urbains denses et structurés, le cas du centre-ville de Nice

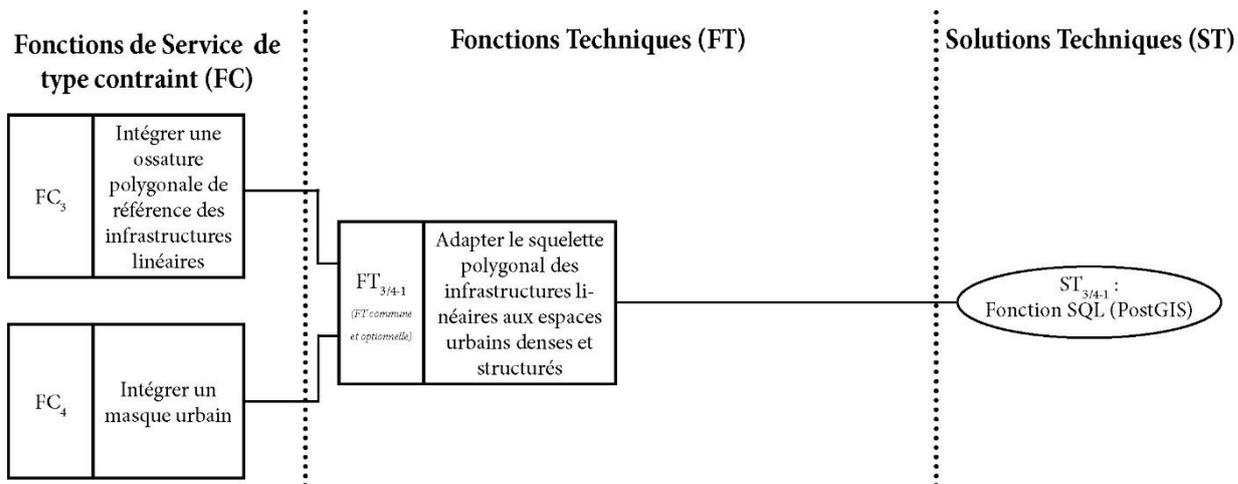


Figure 73. Rappel de l'ordonnancement de la fonction technique FT₄₁

La FT_{3/4-1} est exprimée à la suite d'une lacune observée sur le squelette des infrastructures routières générée pour le territoire de la Métropole Nice Côte d'Azur (Figure 73). Le résultat cartographique de l'ossature polygonale sur un espace urbain dense et structuré comme celui de la ville de Nice s'avère insuffisant. Le maillage du réseau routier de la ville est mal pris en compte

hors celui-ci occupe une emprise au sol importante par rapport à la superficie totale de la commune. La modélisation d'un squelette polygonal à partir des informations contenues dans la classe « *ROUTE* » de la BD TOPO® et des préconisations émises par différentes entités (IGN, CRIGE PACA) ne permet pas d'obtenir une représentation cohérente de la trame viaire dans ce type d'espace urbain (*Figure 74*).

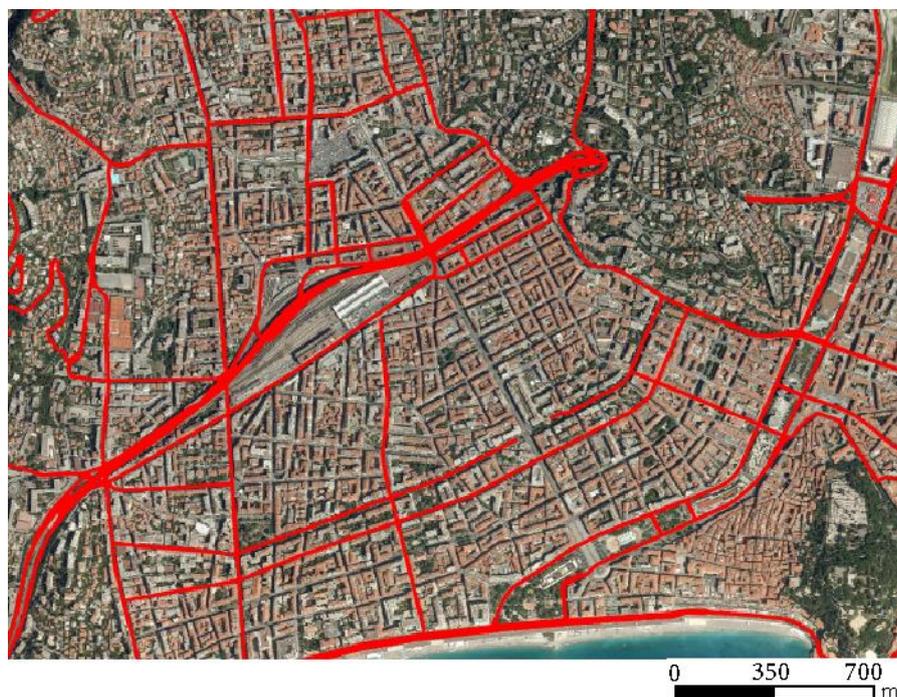


Figure 74. Squelette polygonal des infrastructures routières (en rouge) réalisées à partir de la BD TOPO® sur le centre de ville de Nice selon les préconisations du CRIGE PACA

De plus, dans le cadre de l'étude pour la Métropole NCA, la nomenclature de l'occupation du sol associée aux espaces urbains comporte la classe « *1221 – Réseau routier et bâtis techniques associés* ». Cette classe doit contenir les chaussées et les surfaces annexes telles que les trottoirs, accotements (y compris pour le stationnement), séparateurs (îlot, terre-plein), surfaces de dégagements, péages et les délaissés de voirie. Cette définition entraîne inévitablement un travail important de reprise manuelle par photo-interprétation du squelette polygonal créé à partir de la BD TOPO® (*Figure 75*). L'application d'une zone tampon autour des tronçons routiers avec une largeur fixe ne permet pas de cartographier de façon efficace la voirie d'un espace urbain dense et structuré comme celui de Nice.

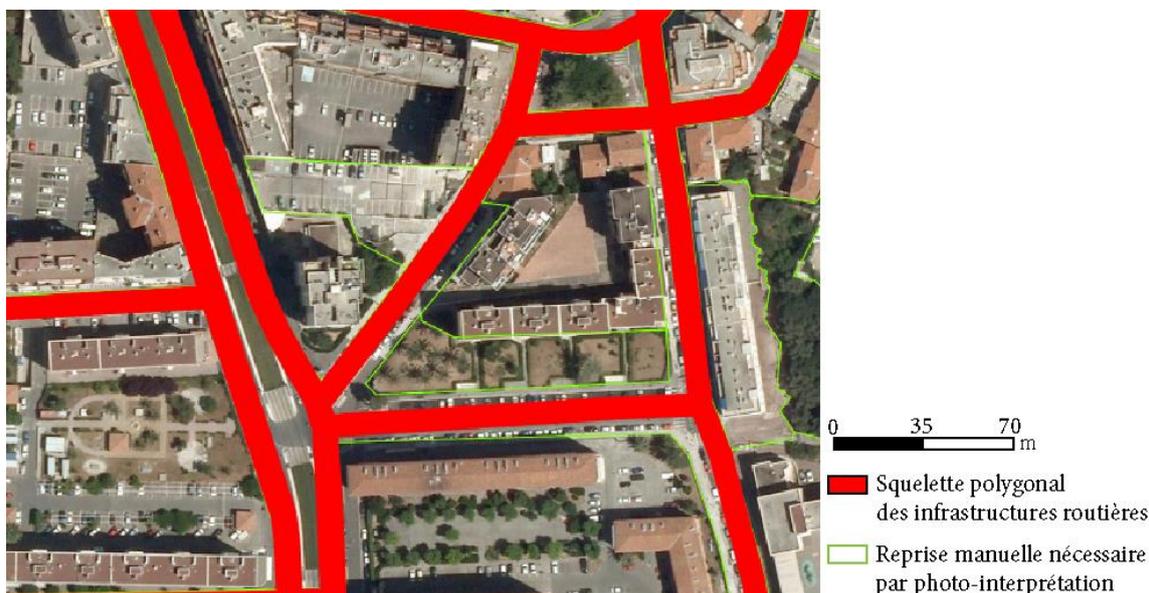


Figure 75. Compléments apportés par digitalisation manuelle au squelette polygonal des infrastructures routières (BD TOPO®IGN) dans les espaces urbains denses de Nice

Pour pallier à cette lacune de l'ossature polygonale en milieu urbain dense et structuré, la ST_{3/4-1} utilise, une nouvelle fois, les parcelles cadastrales vectorisées issues du PCI vecteur de la DGFIP ou de la BD PARCELLAIRE® de l'IGN (Figure 76).

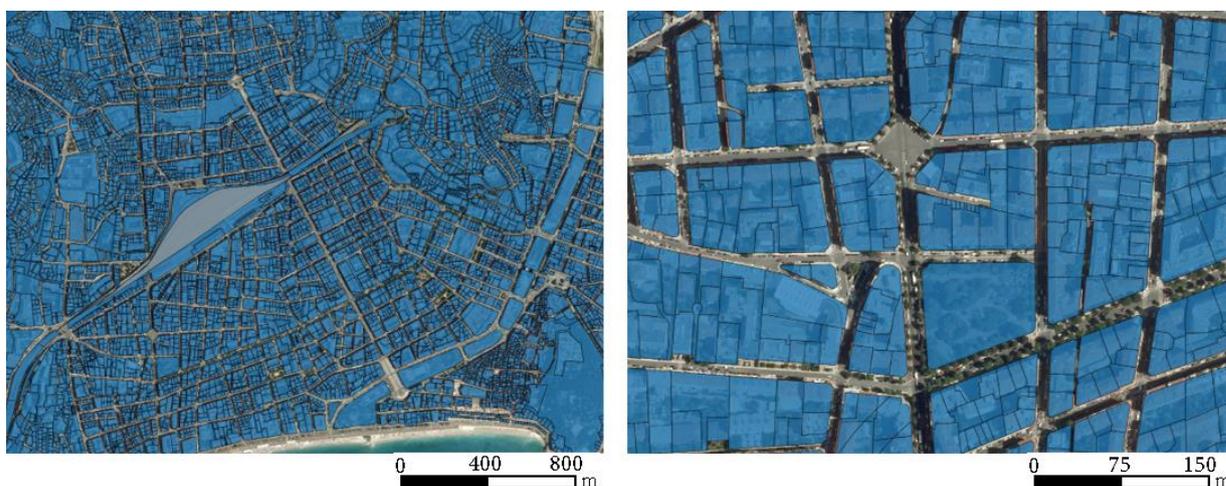


Figure 76. Cartographie des parcelles cadastrales (en bleu) sur la ville de Nice :
L'absence d'information représente l'espace public de la ville

Tout d'abord, la ST_{3/4-1} permet d'établir la cartographie différentielle des parcelles cadastrales afin d'en dériver la cartographie de la voirie publique. Ensuite, la ST_{3/4-1} permet d'effectuer une sélection des tronçons routiers les plus significatifs selon un seuil de largeur fixé par l'utilisateur. Cette sélection est intersectée avec le masque urbain élaboré par la FT₄₁. Enfin, la ST_{3/4-1} vient combiner ce squelette polygonal complémentaire avec le squelette polygonal établi à partir de la BD TOPO® en dehors du masque urbain (Figure 77).

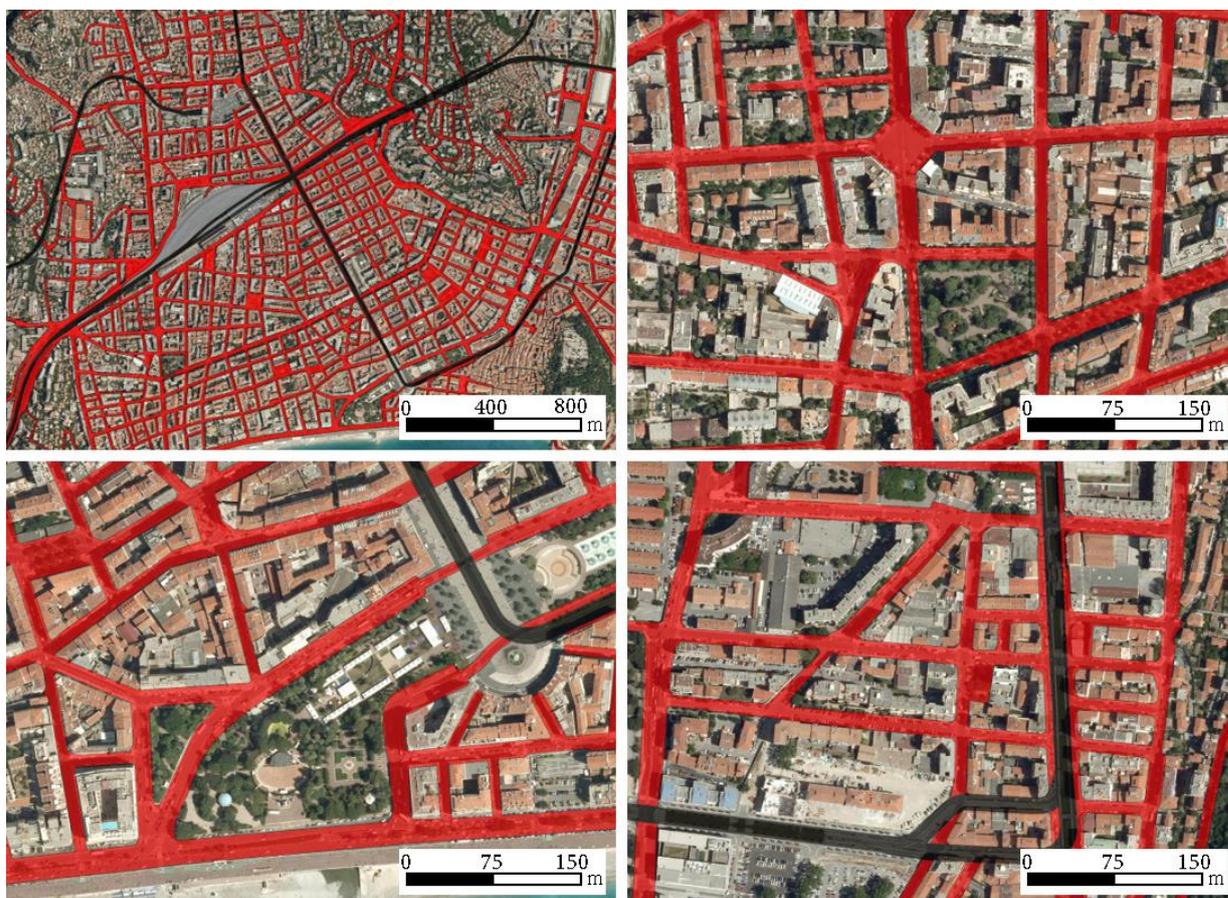


Figure 77. Exemples d'optimisation du squelette polygonal des infrastructures linéaires (BD TOPO® IGN) à l'aide des parcelles cadastrales (BD PARCELLAIRE® IGN) dans le centre-ville de Nice

5.4 Module 2 : élaboration du squelette polygonal des infrastructures linéaires

Les solutions techniques ST₃₁₁ et ST₃₁₂ sont traduites dans le **module 2 : élaboration du squelette polygonal des infrastructures linéaires**. La structuration du dossier du module est présentée sur la Figure 78. Le dossier racine est composé d'un dossier comprenant les données d'entrée et d'un dossier comprenant les données de sortie. Un fichier de paramètres et d'exécution est associé au module.

Les scripts d'exécution du module 2 sont détaillés en annexe ([Annexe D](#)). Pour des raisons de secret d'affaires, il est possible que le présent document ne soit pas délivré avec cette annexe.

Pour le fonctionnement du module, l'utilisateur doit incorporer, à minima, les données de la BD TOPO®. Malgré tout, il n'est pas nécessaire de renseigner l'ensemble des cinq classes de la BD TOPO® (*section 5.3.2.1*) pour faire fonctionner le module. Par exemple, il est possible d'utiliser le module pour générer un squelette polygonal uniquement basé sur les tronçons routiers. Le dossier des données d'entrée permet également d'inclure des données SIG complémentaires pour alimenter la construction de l'ossature (tronçons ou infrastructures supplémentaires). Enfin, le module permet de recevoir un masque urbain dans l'optique d'élaborer un squelette polygonal adapté aux espaces urbains denses et structurés (ST_{3/4-1}).

Le dossier de sortie contient deux sous-dossiers. Le premier recueille le squelette polygonal des infrastructures linéaires élaboré uniquement à partir des données de la BD TOPO® de l'IGN. Le second est dédié à recevoir ce même squelette adapté aux espaces urbains denses et structurés.

Pour les mêmes raisons que pour le module 1, le fichier de paramétrage et d'exécution n'est pas décrit ici. Il s'agit d'un fichier SQL (PostGIS) pour la lecture et la manipulation des informations spatialisées (points, lignes, polygones).

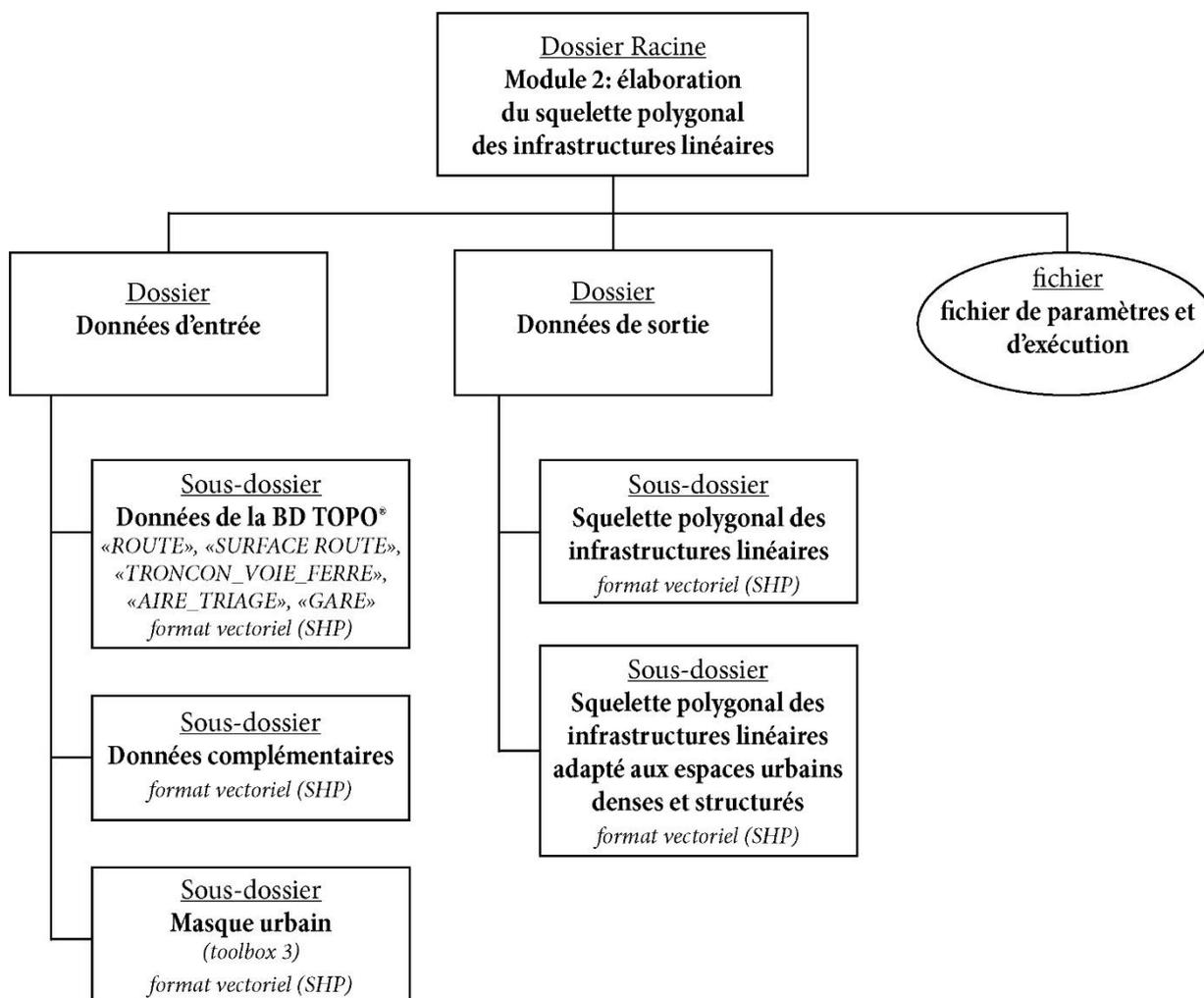


Figure 78. Structuration du module 2 consacré à l'élaboration du squelette polygonal des infrastructures linéaires

5.5 Module 3 : élaboration du masque urbain

Le **module 3** est la traduction des solutions techniques **ST₄₁₁**, **ST₄₁₂** et **ST₄₁₃** visant l'**élaboration du masque urbain** (Figure 79). Le développement du module 3 aurait pu intégrer le module 2 car elle utilise également un fichier de paramétrage et d'exécution PostgreSQL utilisant l'extension PostGIS. Nous avons fait le choix de séparer les tâches pour une raison de compréhension lors de leur application. Le dossier racine du module 3 inclut deux dossiers.

Les scripts d'exécution du module 3 sont détaillés en annexe ([Annexe E](#)). Pour des raisons de secret d'affaires, il est possible que le présent document ne soit pas délivré avec cette annexe.

Le premier est dédié aux données d'entrée. Celui-ci permet d'accueillir les bâtiments vectorisés issus de la BD TOPO® et/ou de la DGFIP et le plan cadastral vectorisé disponible avec la BD PARCELLAIRE® et/ou la DGFIP. De la même manière que pour le module 2, le module 3 donne la possibilité d'intégrer des données SIG complémentaires pour la construction du masque urbain. Enfin il est possible de renseigner le squelette polygonal des infrastructures linéaires créé à partir du module 2 pour procéder à un assemblage de celui-ci avec le masque urbain.

Le dossier des données de sortie propose de récupérer le masque urbain et/ou le masque urbain assemblé avec le squelette polygonal des infrastructures linéaires.

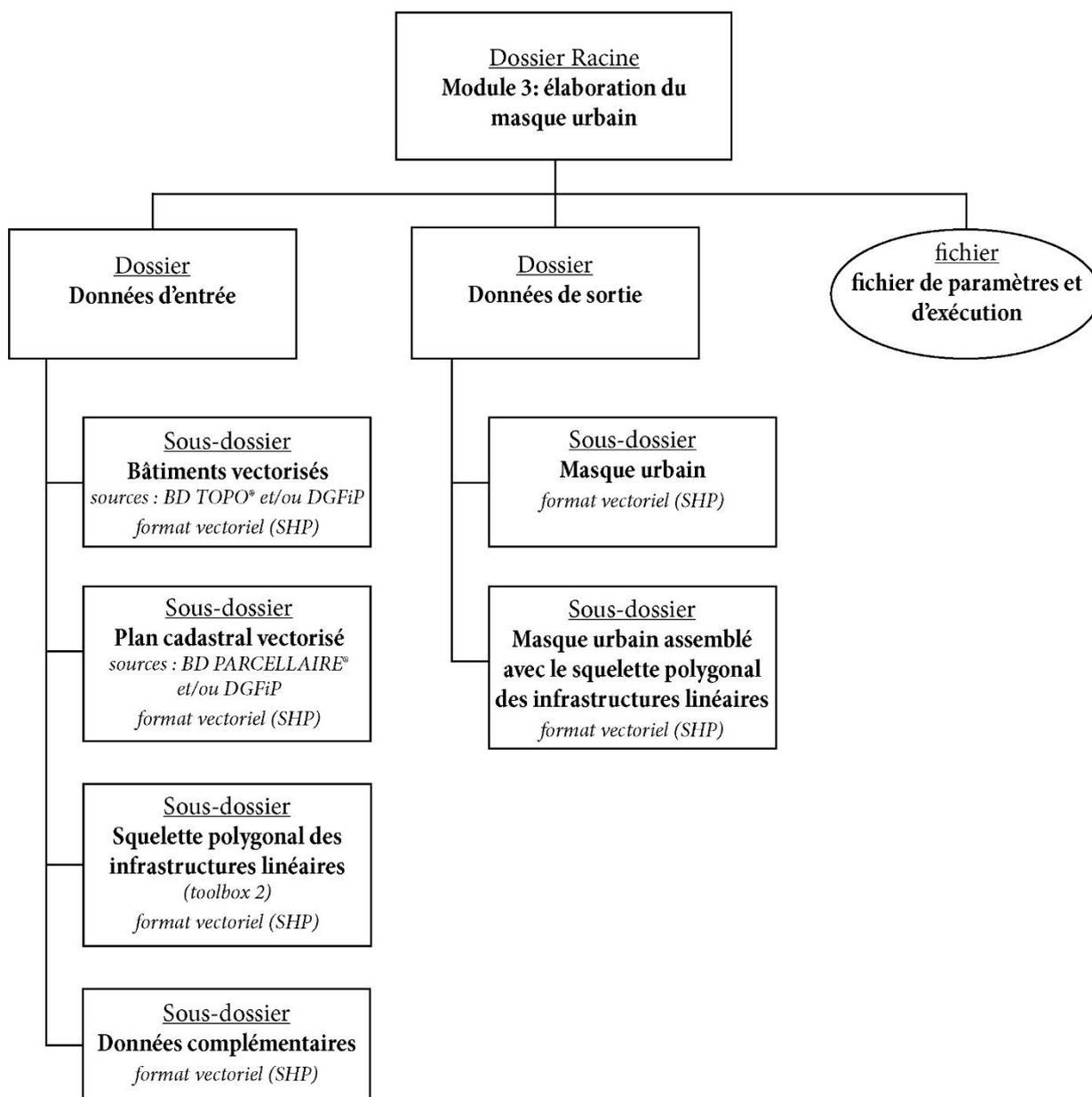


Figure 79. Structuration du module 3 consacré à l'élaboration du masque urbain

5.6 Conclusion sur les prétraitements des données

Les prétraitements évoqués dans ce chapitre sont des préalables à l'implémentation d'une segmentation d'image pour la construction d'une BD Ocsol GE. Toutefois, le recours à ces prétraitements est dépendant de la situation de production. Il convient au concepteur de l'assistance à la digitalisation d'appeler ou non, un prétraitement en fonction des données à sa disposition et des objectifs cartographiques à atteindre. L'exécution de l'ensemble des prétraitements exposé ici, n'est pas obligatoire. Par exemple, l'élaboration d'une enveloppe urbaine n'a pas été menée pour le projet de PNR de l'Aubrac car nous avons jugé la résolution spatiale de l'imagerie RapidEye® comme trop faible pour distinguer le découpage cadastral des espaces urbains (*section 5.3.3.4*). Un autre exemple : nous n'avons pas exercé de tuilage de l'imagerie à segmenter pour les études sur le territoire de la DLVA ou celui de l'Aubrac car nous avons jugé que la volumétrie de la donnée était raisonnable vis-à-vis de la segmentation d'image à réaliser (*section 5.1.1*).

De plus, il existe, dans l'étape de prétraitements des données, une nécessité d'expertise sur la qualité des résultats escomptés. Par exemple, l'élaboration du socle polygonal des infrastructures routières et ferroviaires ou de l'enveloppe urbaine exige, souvent, un certain nombre de tests avant sa validation avec le commanditaire de la donnée.

Les prétraitements regroupés au sein des modules 1, 2 et 3 doivent être perçus comme une gamme d'outils adaptables au besoin cartographique et à la donnée pour alimenter et contraindre la segmentation d'image que nous présentons dans le chapitre suivant. Cette gamme d'outils fournit des solutions automatisées aux besoins récurrents identifiés. Pour le producteur, il s'agit de ne pas développer, une nouvelle fois, une solution pour des tâches, à faible valeur ajoutée, déjà résolue dans une prestation antérieure.

Sommaire

6.1	Bref état de l'art de la segmentation d'image.....	172
6.1.1	Définition et principes	172
6.1.2	Types d'approches pour la segmentation	173
6.1.2.1	<i>Les méthodes basées sur une approche pixel.....</i>	<i>174</i>
6.1.2.2	<i>Les méthodes basées sur une approche par région.....</i>	<i>175</i>
6.1.2.3	<i>Les méthodes basées sur une approche frontière.....</i>	<i>179</i>
6.1.3	Choix de l'approche de segmentation.....	180
6.1.4	Choix de l'outil : eCognition®.....	181
6.2	Services rendus par la segmentation d'image.....	183
6.2.1	Ordonnancement des fonctions techniques.....	183
6.2.2	Le « ruleset » d'eCognition®.....	184
6.2.3	FT ₃₂ et FT ₄₂ : intégrer le ou les vecteur(s) de référence géométrique dans le processus de segmentation	185
6.2.3.1	<i>Le ou les vecteur(s) de référence.....</i>	<i>186</i>
6.2.3.2	<i>Le ou les vecteur(s) complémentaire(s).....</i>	<i>186</i>
6.2.3.3	<i>Récupération de la géométrie initiale du ou des vecteur(s) de référence</i> <i>187</i>	
6.2.4	FT ₅₁ et FT ₅₂ : paramétrage de la segmentation	189
6.2.4.1	<i>Les paramètres de segmentation « multi-résolution ».....</i>	<i>189</i>
6.2.4.2	<i>Estimation du paramètre d'échelle de segmentation : ESP Tool.....</i>	<i>190</i>
6.2.4.3	<i>Sélection et application d'une valeur d'échelle.....</i>	<i>192</i>
6.2.5	FT ₆₁ : supprimer les petits objets	195
6.2.6	FT ₇₁ : optimiser la compacité des objets générés par la segmentation	196
6.2.6.1	<i>Les objets « fins ».....</i>	<i>196</i>
6.2.6.2	<i>Les objets « tentaculaires ».....</i>	<i>197</i>
6.2.7	Exportation de la segmentation d'image	199
6.3	Module 4 : réalisation de la segmentation d'image adaptée à un exercice de photo- interprétation pour la constitution d'une BD Ocsol GE.....	199
6.4	Conclusion sur la segmentation d'image	201

La segmentation numérique d'une image de télédétection poursuit un des mêmes objectifs que ceux de la photo-interprétation. Il s'agit de partitionner l'espace en vue d'individualiser des classes d'occupation du sol avec le souci de respecter autant que possible la géométrie des contours (Caloz et Collet 2001). La valeur du pixel est l'information de base d'une image. Le zonage d'une image est donc la traduction d'une information spectrale contenue dans un pixel en une information thématique (ou classe thématique). Le photo-interprète recourt à sa capacité d'association entre les couleurs, les textures, les formes visibles sur une image et son expérience sur un phénomène caractérisant une portion d'un territoire (Provencher et Dubois 2007). Dans quelle mesure, une segmentation numérique d'image peut reproduire cette performance ? Il s'agit d'une des problématiques phares du traitement d'images, relatée par des chercheurs scientifiques depuis l'avènement de l'image numérique. Les auteurs sont conscients que ce problème est très mal posé (Hay et Castilla 2008). Il n'est pas possible de définir une segmentation idéale tout comme deux photo-interprètes n'auront jamais la même manière de digitaliser une image. L'idée retenue par les recherches est bien de se rapprocher de l'humain dans sa démarche logique de déduction et sa capacité d'abstraction (Chevalier 1966; Provencher et Dubois 2007). Du moins, si cela semble compliqué, il s'agit de faciliter la tâche du photo-interprète dans son travail d'analyse. Il existe de nombreuses méthodes de segmentation d'image (Pal et Pal 1993). Dans ce chapitre, nous tentons d'apporter un bref état de l'art de la segmentation numérique. Nous justifions notre choix de méthode pour répondre aux fonctions de contrainte identifiées par l'analyse fonctionnelle dans le chapitre 4 (FC3(2), FC4(2), FC5, FC6 et FC7). Nous présentons et détaillons l'ordonnement des fonctions mis au point pour apporter des solutions techniques à notre besoin. Comme pour les prétraitements, la segmentation est appliquée aux trois cas d'étude menés par l'entreprise (Projet de PNR de l'Aubrac, DLVA, Métropole Nice Côte d'Azur).

6.1 Bref état de l'art de la segmentation d'image

6.1.1 Définition et principes

La segmentation d'image consiste à regrouper spatialement les pixels selon leur ressemblance spectrale ou à déterminer les contours d'un groupe de pixels pour former des unités spatiales interprétables en termes de classes thématiques (Caloz et Collet 2001; Maître 2003; Castilla et Hay 2008). De manière plus précise, la segmentation se définit comme un partitionnement de l'image I en régions R_i (ou objets) disjointes et connexes afin que chaque région soit homogène (Équation 2) et que l'union de deux régions adjacentes ne le soit pas (Équation 3) (Lefebvre 2011).

$$H(R_i) = \text{VRAI}, i = 1, 2, \dots, S \quad 2$$

$$H(R_i \cup R_j) = \text{FAUX}, i \neq j, R_i \text{ et } R_j \text{ sont adjacents} \quad 3$$

Où S est le nombre total de régions dans l'image et $H(R_i)$ une évaluation booléenne de l'homogénéité de la région $H(R_i)$. Il existe des centaines de méthodes de segmentation mais aucune ne peut prétendre être meilleure qu'une autre pour tous les types d'images (Pal et Pal 1993).

En théorie, un objet n'a pas de sens thématique. Il s'agit juste d'une entité discrète (ou unique) avec une cohérence interne et un contraste externe avec les objets voisins basés sur des caractéristiques de couleur, de texture, de teinte, de forme ou de taille. En pratique, l'utilisateur (ou l'expert) a sa propre idée (implicite ou non) de l'objet qu'il veut distinguer. En effet, l'objet est le résultat d'un choix de paramétrages basés sur la connaissance et l'expérience de l'utilisateur. Ainsi, l'objet est un concept subjectif. Une unique solution de découpage n'existe pas et les méthodes de segmentation d'image sont rarement transférables (Arvor et al. 2013). Pour autant, la segmentation a une influence certaine sur la qualité des mesures des caractéristiques de l'image et par conséquent sur la qualité du résultat (Y. J. Zhang 1995; Dorren, Maier, et Seijmonsbergen 2003; Meinel et Neubert 2004; M. Kim, Madden, et Warner 2008).

Dans leur précis de télédétection, Caloz et Collet (2001) décrivent plusieurs points sensibles dans la démarche de segmentation, notamment quand celle-ci est exercée dans le cadre de la cartographie de l'occupation du sol. La difficulté est de prendre en compte dans le processus de segmentation la composante fortement aléatoire caractérisant les phénomènes naturels ou anthropiques d'un territoire donné. La signature spectrale ou pixellaire d'une classe d'occupation du sol dans une image n'est pas invariante. La nature des sols, les pratiques humaines, les effets climatiques induisent des modifications spectrales d'une région à l'autre. Il est alors compliqué d'ajuster une distribution paramétrique à cette problématique. Les algorithmes de segmentation sont basés sur des hypothèses statistiques et des principes mathématiques souvent malmenés par la réalité du terrain. L'utilisateur doit donc prendre en compte et accepter cette incertitude dans la mesure de ses résultats tout en essayant de la minimiser.

6.1.2 Types d'approches pour la segmentation

De nombreux auteurs, d'horizons et de disciplines différents ont tenté de décrire une typologie des méthodes de segmentation (Haralick et Shapiro 1985; Cocquerez et Philipp-Foliguet 1995; Y. J. Zhang 1997; Caloz et Collet 2001; Nikolaidis et Pitas 2001; Maître 2003; Y. J. Zhang 2006; Lefebvre 2011). Dès lors il est difficile d'avoir une vision claire de la segmentation. Le vocabulaire, l'orientation et les applications utilisés pour parler des méthodes de segmentation sont souvent différents. Un mathématicien, un spécialiste du traitement d'image en général ou un télédécteur n'utilise pas le même niveau de langage et les mêmes référentiels sur le sujet. Néanmoins il est possible de distinguer les méthodes de segmentation exploitant la notion de ressemblance entre les pixels et celles qui exploitent les différences. Le premier groupe consiste à regrouper des pixels ou régions adjacent(e)s selon des mesures d'homogénéités ou des propriétés similaires. Le second groupe recherche à exploiter les variations rapides et les discontinuités pixellaires contenues dans une image. Les méthodes de segmentation peuvent également être catégorisées selon trois approches : l'approche pixel, l'approche par région et l'approche frontière (*Figure 80*). Nous tentons d'apporter une brève présentation des différentes approches de segmentation les plus répandues selon cette typologie.

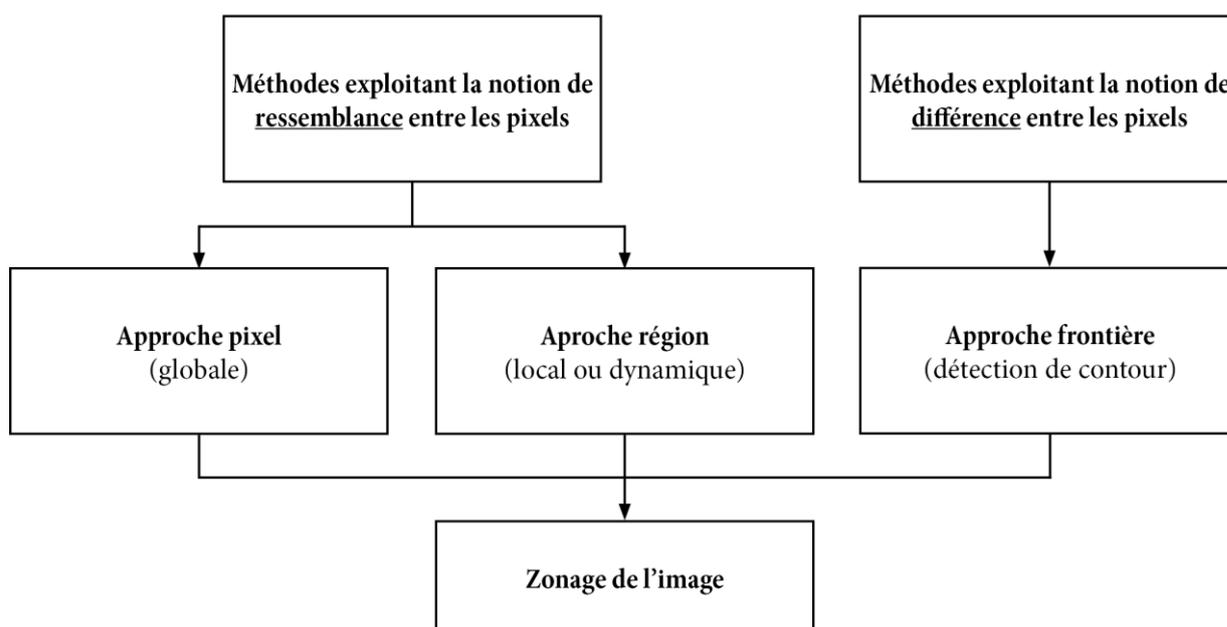


Figure 80. Stratégies pour la segmentation (ou zonage) d'une image

6.1.2.1 Les méthodes basées sur une approche pixel

La définition de ces méthodes ne répond pas totalement à la définition de segmentation présentée dans la section 6.1.1. Elles regroupent les pixels de l'image sous l'unique critère de ressemblance spectrale et n'exploitent pas le critère d'adjacence (ou le contexte spatial) des pixels. Autrement dit, le zonage spatial pratiqué par une approche pixel n'est que le résultat d'un classement des pixels en catégories (Caloz et Collet 2001). Les méthodes selon une approche pixel sont souvent qualifiées de méthodes globales au sens où l'appartenance d'un pixel à une région dépend toujours de l'image entière. Ces méthodes ont longtemps prédominé les applications de télédétection numérique avant l'hégémonie des images THRS. Elles restent cependant très répandues pour l'analyse des images de basse et moyenne résolution spatiale où la dimension spatiale des pixels joue un rôle moins important que sur une image THRS. Les utilisateurs apprécient surtout la simplicité et la rapidité de calcul de ces méthodes.

Il existe deux démarches d'application de ces méthodes selon la position de l'utilisateur vis-à-vis de son objectif d'étude. Soit l'utilisateur ne dispose pas de connaissance préalable sur le ou les phénomène(s) qu'il souhaite cartographier. Alors il est possible de procéder à une méthode d'analyse sans initialisation de l'algorithme, on parle de « classification non-supervisée ». À l'inverse l'utilisateur dispose d'une connaissance des éléments qu'il souhaite cartographier. À l'aide d'un jeu d'échantillons des classes recherchées, l'utilisateur réalise un apprentissage de l'algorithme de classification. On parle ici de classification « supervisée ».

Il est facile d'imaginer que de nombreuses méthodes de classification ont été développées depuis le début de la télédétection numérique. Les manuels de traitement d'image ont coutume de répertorier ces méthodes selon deux catégories : les classifieurs paramétriques et les classifieurs non paramétriques. Dans le premier cas, les classifieurs associent la signature spectrale du pixel à une distribution statistique paramétrique connue. Il est alors possible d'attribuer à chaque pixel une probabilité d'appartenance à une classe donnée. Le classifieur par maximum de vraisemblance fait partie des plus connus en télédétection. À l'inverse, les

classifieurs non paramétriques exploitent seulement la distance spectrale. Parmi les méthodes les plus connues, on retrouve la segmentation par nuées dynamiques (k-means) souvent utilisée ou encore les réseaux neuronaux.

Nous ne souhaitons pas développer l'ensemble des méthodes utilisant une approche pixel. Leur intérêt pour notre application est limité. La cartographie de l'occupation du sol à grande échelle nécessite une imagerie THRS. Hors, l'absence de prise en compte de l'information spatiale de ces méthodes semble rédhibitoire.

6.1.2.2 Les méthodes basées sur une approche par région

Les méthodes basées sur une approche par région ne sont pas nouvelles (Haralick et Shapiro 1985). Il s'agit d'une procédure itérative basée sur l'agrégation progressive de pixels ou groupes de pixel selon le critère de similarité d'un paramètre et l'adjacence des pixels (Caloz et Collet 2001). Ces méthodes sont qualifiées de locale ou de dynamique car l'étiquetage d'un pixel à une région dépend uniquement, ou essentiellement, de son voisinage. Elles sont particulièrement intéressantes pour le traitement de l'imagerie THRS car elles proposent une démarche en deux niveaux d'agrégation des pixels :

Le premier est nommé l'agrégation de bas niveau. La région est le résultat de la croissance d'un pixel ou d'un groupe de pixels, appelé germe. L'algorithme calcule la distance spectrale entre le germe (pixel de référence) et les pixels adjacents selon un voisinage restreint ou étendu. L'agrégation des pixels est satisfaite s'ils répondent aux conditions d'un prédicat fixé par l'analyste. Par itération, les nouveaux pixels voisins sont agrégés à la région nouvellement créée jusqu'à atteindre une limite de croissance induite par le prédicat. Très souvent, les résultats obtenus sont insuffisants ou inadaptés aux attentes escomptées sur la segmentation.

Le second niveau d'agrégation est qualifié de haut niveau. Les régions produites par l'agrégation de bas niveau permettent à l'analyste de dériver des informations statistiques supplémentaires (indice de texture, variance locale, forme, taille, voisinage, corrélation d'histogramme) sur ces régions. L'analyste peut, dès lors, affiner et réorienter sa stratégie de regroupement en fonction de ses objectifs d'études. Par exemple, si le thème d'étude porte sur les espaces urbains, l'analyste pourra appuyer l'agrégation sur des régions de relatives petites tailles avec une forme plutôt compacte dont la texture ne présente pas de caractère orienté et où la variance locale est forte. A l'inverse, pour une cartographie des cultures viticoles, l'analyste orientera son agrégation vers des régions de formes rectangulaires dont l'indice de texture est fortement anisotrope.

Les méthodes utilisant une approche par région se sont logiquement imposées face aux méthodes basées sur une approche pixel (Blaschke 2010). L'avènement des images à THRS (< 5 m) est la principale raison à cela. Elles offrent une grande qualité visuelle et un niveau de détails important des éléments du paysage. Inévitablement, la variance locale des images augmente. Dans une image de moyenne ou de faible résolution, des entités spatiales entières comme un bâtiment ou une parcelle agricole peuvent être contenues dans un seul ou un faible nombre de pixels. Avec une image THRS, ces mêmes entités sont décrites par un grand nombre de pixels (*Figure 81*). L'approche uniquement basée sur l'information du pixel s'avère

logiquement insuffisante pour prendre en compte cette complexité pixellaire (Blaschke et Strobl 2001).

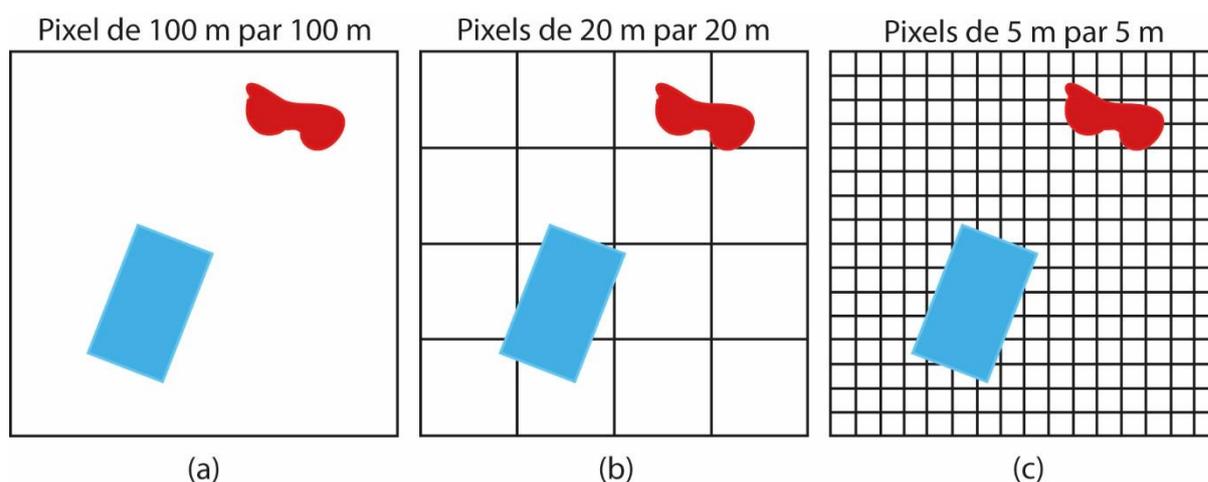


Figure 81. Relation entre les éléments du paysage et la résolution spatiale d'une image : (a) faible résolution, (b) moyenne résolution, (c) haute et très haute résolution (adapté de (Rapinel 2012))

Aujourd'hui, il existe un grand nombre d'algorithmes de segmentation basés sur une approche par région. Cette diversité est accentuée par les nombreux paramètres d'ajustement que ces algorithmes proposent aux utilisateurs. Néanmoins certains de ces paramètres ont plus d'influence que d'autres sur le résultat final. La sélection des germes en fait partie. Le choix du nombre et le positionnement des germes est un paramètre sensible pour l'agrégation de bas niveau. On distingue deux stratégies pour créer les germes.

- L'approche descendante considère l'image entière comme point de départ pour la segmenter en région considérée homogène. Il existe une première méthode qui utilise le principe du diagramme de Voronoï pour partitionner l'image en polygone (Figure 82). À l'initialisation des germes sont sélectionnés de façon aléatoire sur l'image à partir d'un processus Poisson (Chassery et Melkemi 1991; Cocquerez et Philipp-Foliguet 1995). S'en suit une phase itérative de division des germes tant qu'il existe des polygones non homogènes (Capri 2007).

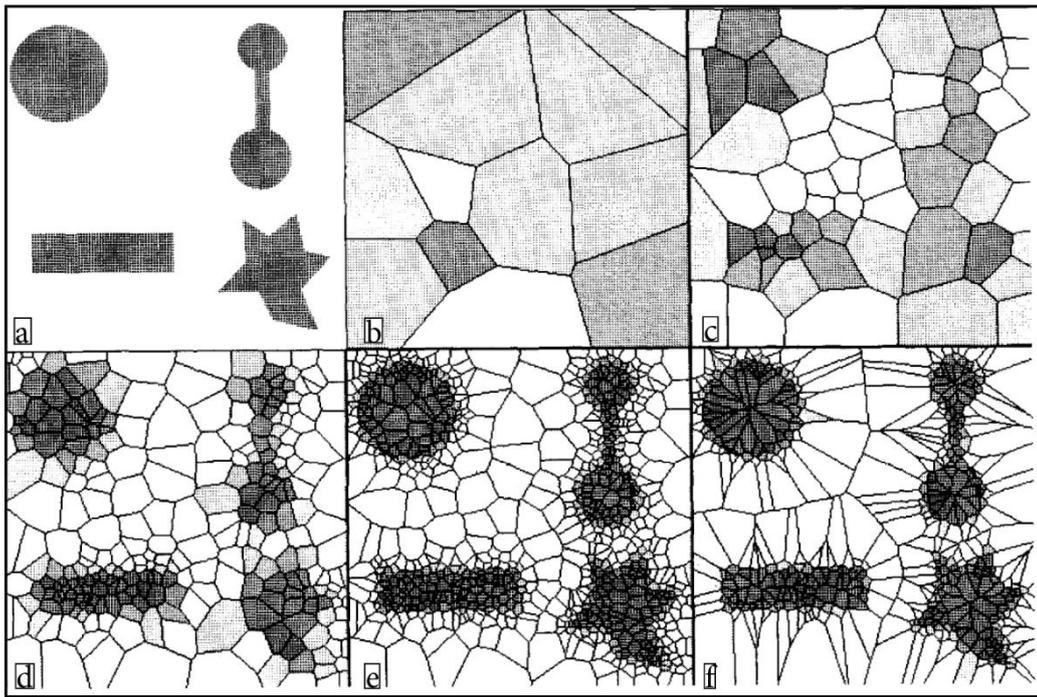
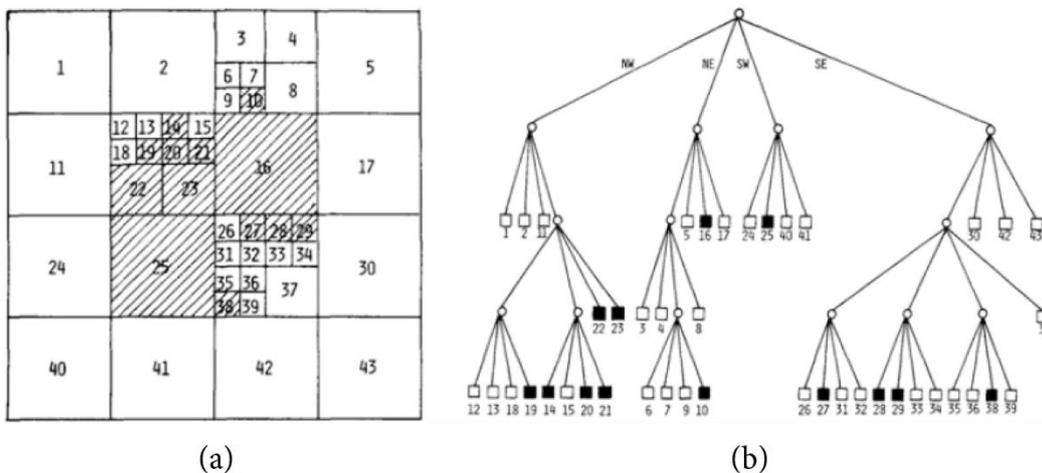


Figure 82. Principe du processus de segmentation selon le diagramme de Voronoï sur une image élémentaire : (a) phase d'initialisation des germes, (b) phases itératives, (c, d, e) post-traitements de fusion des régions (f) pour limiter la sur-segmentation. (adapté de (Chassery et Melkemi 1991))

Une seconde méthode itérative est construite sur la division de l'image en blocs rectangulaires selon un critère d'homogénéité (arbre quaternaire « *quadtree* »). Au fur et à mesure des itérations, les blocs considérés comme non homogènes sont divisés en n sous-bloc d'une taille inférieure (Dyer, Rosenfeld, et Samet 1980; Burt, Hong, et Rosenfeld 1981) (Figure 83).



Les deux méthodes descendantes présentées sont rapides à calculer mais manquent de précision dans la délimitation des contours. Dans le premier cas, avec le diagramme de Voronoï, les régions sont trop irrégulières. À l'inverse le recours à un arbre quaternaire (quadtree) forme des portions de l'image trop régulières. Dans les deux cas, ces méthodes ne réalisent pas une réelle analyse des contours de l'image. Par conséquent, les zones à proximité des contours sont sur-segmentées. L'utilisation de ces méthodes incite à recourir à une chaîne de traitements intégrant une fusion des régions sur-segmentées dont les caractéristiques sont proches (Wuest et Zhang 2009).

- L'approche ascendante considère cette fois-ci les pixels comme point de départ de la segmentation de l'image. Il existe alors plusieurs solutions pour la sélection des germes.

Une première solution consiste à choisir les germes selon une fenêtre glissante et d'un filtre moyen (Nagao et Matsuyama 1979). La répétition d'un tel filtre permet de mettre en évidence les régions homogènes. L'image est ensuite segmentée en fenêtres de taille fixe puis le germe est défini au sein de chacune des fenêtres selon un critère spécifique. Enfin l'agrégation des pixels est menée selon le principe de la croissance de région de bas niveau.

Une seconde solution est basée sur un semis de points tirés de manière aléatoire ou régulière. L'agrégation est menée à partir de ces germes jusqu'à ce que chaque pixel soit attribué à une région selon le double critère de la similarité et de l'adjacence. Il est possible que tous les pixels ne soient pas classés à la fin du processus. Un nouveau tirage de germes est procédé pour ces zones afin de finaliser le partitionnement (Figure 84). Certains algorithmes de segmentation ajoutent aux critères d'agrégation un « coût de fusion » qui permet de limiter l'expansion de la région dans l'espace (Batz et Schape 2000). Cette subtilité permet de pratiquer une segmentation selon une approche « multi-résolution » appréciée pour la cartographie de l'occupation du sol.

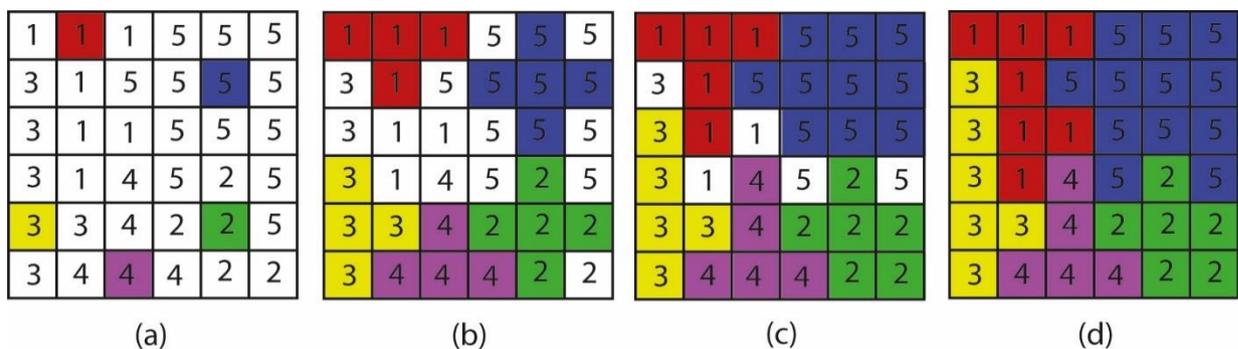


Figure 84. Processus de segmentation selon une croissance de région : (a) phase d'initialisation des germes par un semis de points, (b et c) phases itératives, (d) partitionnement totale de l'image

Une troisième solution vise à considérer l'image comme un modèle numérique d'altitude (Vincent et Soille 1991). Chaque pixel est alors vu comme une mesure d'élévation. L'objectif est d'identifier les crêtes des bassins versants observables sur le modèle comme délimitation des régions de l'image. Ces crêtes ou Ligne de Partage des Eaux (LPE) sont extraites selon un processus itératif pouvant s'assimiler à une inondation progressive des bassins versants. Souvent cette pratique est exécutée sur une image de contours présentant les fortes intensités aux crêtes

et les faibles intensités aux fonds de bassins. Les germes sont identifiés à l'exutoire des bassins versants. Ils correspondent aux minima locaux de l'image. Puis les germes sont agrégés progressivement aux pixels dont la pente produit un écoulement dans leur direction (*Figure 85*). Cette solution se rapproche des méthodes basées sur une approche frontière. De ce fait la LPE est sensible au bruit de l'image. Souvent, l'utilisation de cette méthode provoque une sur-segmentation liée à ce bruit (mini bassins versants). Des méthodes LPE adaptatives tentent de pallier ce problème (Soares et Muge 2004; Sun et He 2008). D'autres préfèrent intégrer la LPE dans une chaîne de traitements pour diminuer le bruit de l'image et fusionner les régions sur-segmentée (J. B. Kim et Kim 2003; Chen et al. 2006; Jung 2007; Lefebvre, Corpetti, et Hubert Moy 2010).

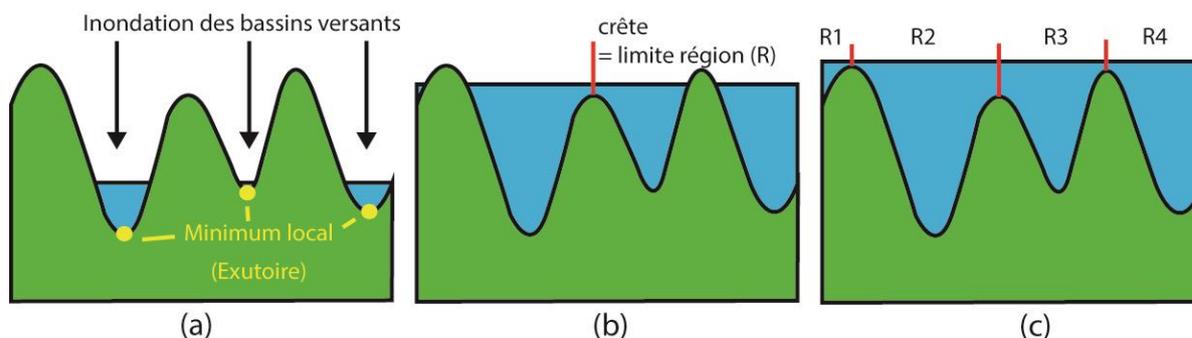


Figure 85. Processus de segmentation selon le principe de la Ligne de Partage des Eaux (LPE) : (a) phase d'initialisation des germes par détection des minima locaux, (b et c) phase itérative (adapté de (Lefebvre 2011))

6.1.2.3 Les méthodes basées sur une approche frontière

À l'instar d'une approche région, les méthodes basées sur une approche frontière recherchent à identifier directement les frontières ou contours des régions. Ces méthodes exploitent les discontinuités locales observables dans une image (Cocquerez et Philipp-Foliguet 1995). Elles recherchent les variations rapides pouvant se traduire par une transition entre deux zones de moyenne constante ou un pic (ou toit) correspondant à un maximum ou à un minimum local.

Le plus souvent, les fortes variations sont mises en évidence par le calcul des dérivées première et seconde (directionnelles ou non). De manière générale, la détection de contours passe par l'application d'opérateur de gradient simple ou dérivé de fonctions gaussiennes sur l'image (Maître 2003). Il existe de nombreux filtres plus ou moins performants et sensibles au bruit contenu dans l'image. Certains sont rapides à implémenter (Sobel, Prewitt, Roberts, Kirsch, Laplacien) mais trop sensibles au bruit contenu dans l'image. D'autres (Canny, Deriche, Bao) fournissent des résultats satisfaisants dans le cas d'une extraction d'éléments non texturés et fortement contrastés.

Cependant le résultat cartographique de ces filtres ne se traduit pas par des formes fermées et/ou continues. Il est alors souvent nécessaire d'associer à ces méthodes, des post traitements morphologiques pour aboutir à un découpage de l'image en régions (Pratt 2001). D'une certaine manière, une méthode basée sur la ligne de partage des eaux (approche par région) semble être une solution plus efficace pour extraire les discontinuités locales d'une image. Les méthodes basées sur une approche frontière sont au final peu utilisées pour la cartographie de l'occupation

du sol. Elles sont privilégiées pour les problématiques de suivi de contours (imagerie médicale, séquence vidéo) pour obtenir un résultat rapide et efficace.

6.1.3 Choix de l'approche de segmentation

Notre objectif est d'apporter un prédécoupage semi-automatique du paysage à partir d'une image THRS d'une manière proche de celle qu'un photo-interprète pourrait pratiquer. Les méthodes de segmentation basées sur une approche pixel nous semblent inconsistantes et éloignées des attentes placées dans l'extraction précise d'éléments paysagers (Blaschke et Strobl 2001). Le recours simultané aux critères spectraux et spatiaux est incontournable lorsque l'on analyse une image THRS pour la cartographie d'occupation du sol. Les méthodes de segmentation basées sur une approche frontière nous paraissent également limitées pour apporter un prédécoupage efficace de l'occupation du sol. Les classes d'occupation du sol recherchées ne sont pas toujours caractérisées par un contour marqué.

L'approche région couplant le critère de similarité et d'adjacence nous paraît la plus en phase avec notre besoin. Elle regroupe cependant un grand nombre de méthodes. Il est difficile d'apprécier la sensibilité de chacune de ces méthodes pour notre étude. Toutefois, les méthodes quadtree ou exploitant le diagramme de Voronoï pratiquent un partitionnement trop rigide et par conséquent trop imprécis pour la cartographie de l'occupation du sol. Les méthodes basées sur la Ligne de Partage des Eaux (LPE) pourraient être une solution envisageable pour notre besoin. Malgré tout, celles-ci sont plus efficaces sur une image de contours. Cette caractéristique semble limiter la portée de leur utilisation. De plus, c'est une méthode sensible au bruit contenu dans une image. Il devient alors difficile d'en contrôler les effets de sur-segmentation de l'image.

Enfin, les méthodes basées sur une croissance de région présentent plusieurs intérêts pour notre besoin cartographique. D'une part, elles exploitent non seulement les informations spectrales d'une image mais aussi l'information spatiale induite par l'agencement des pixels dans l'image. Les régions générées par ces méthodes possèdent un contenu homogène (valeur spectrale, texture, taille, forme, etc.). D'autre part, grâce au développement récent de la segmentation dite « *multi-résolution* » basée sur le principe de la croissance de région, il semble plus facile de contrôler le niveau d'agrégation des pixels lors du processus itératif.

La segmentation « *multi-résolution* » est fortement plébiscitée depuis une quinzaine d'années en télédétection. Elle permet d'apporter une réponse au besoin de segmenter une image selon différents niveaux de régions (ou objets) tout en conservant un lien de hiérarchie entre les niveaux (Figure 86) (Batz et al. 2004). L'étude de l'occupation du sol nécessite souvent de cartographier des éléments du paysage dont les tailles moyennes sont différentes. Par exemple, la délimitation des parcelles d'habitation sont en moyenne plus petites que les parcelles agricoles ou forestières. Il est alors nécessaire de réaliser des segmentations partielles nécessitant des fusions ou des divisions d'objets selon la diversité des dimensions des objets à cartographier.

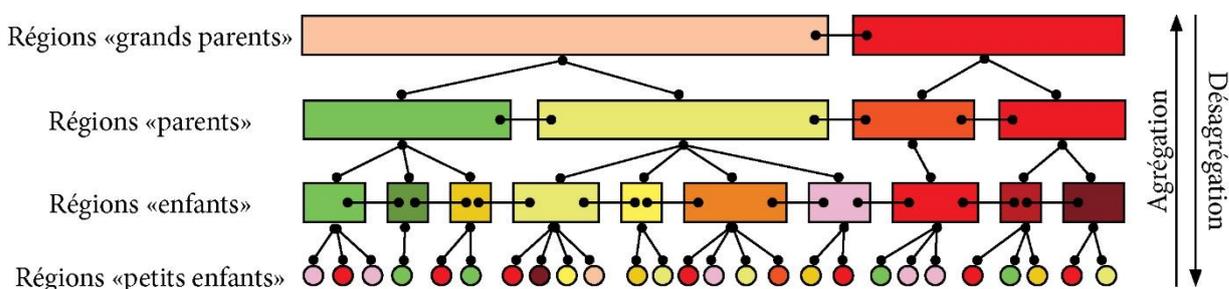


Figure 86. Liens de hiérarchie entre les niveaux de segmentation et les objets qui les composent (adaptée de (Baatz et al. 2004))

Le choix d'utiliser un algorithme de segmentation « *multi-résolution* » semble donc, à l'heure actuelle, le meilleur compromis d'adaptabilité pour notre besoin de développement. Le compromis signifie qu'il est tout de même nécessaire de pallier les lacunes de cette méthode de segmentation à l'aide de prétraitements et/ou de post traitements complémentaires pouvant être qualifiés de « *ad-hoc* ».

6.1.4 Choix de l'outil : eCognition®

Depuis 2000, la segmentation d'image s'est inscrite comme une problématique majeure dans l'approche GEOBIA (Geospatial Object-Based Image Analysis). L'approche GEOBIA a acquis une place importante dans la télédétection numérique. Elle prend son essor avec l'avènement des images à Haute et Très Haute Résolution Spatiale (HRS/THRS). Cet essor est accompagné par la commercialisation et la diffusion de puissants logiciels (eCognition, ENVI, Erdas, Idrisi) qui relient des traitements d'image et des fonctionnalités SIG (Benz et al. 2004). Il existe également de nombreuses bibliothèques « *open source* » pour réaliser des traitements d'image dédiés à l'approche GEOBIA et à la segmentation d'image en particulier (Orfeo toolbox, SAGA, GRASS, GDAL/OGR). Il devient alors facile pour un utilisateur non spécialiste de se lancer dans une démarche de traitements d'image.

La multiplication enthousiaste des outils permettant de manipuler et de traiter des images de télédétection à des fins cartographiques s'est transformée en véritable bulle économique pour de nombreux éditeurs de solutions. Le revers de cette expansion est la mutation de l'approche GEOBIA vers une discipline confuse. A l'heure actuelle, il existe un trop grand nombre de méthodes, de logiciels, de règles ou de vocabulaire qui provoque des amalgames et nuit à sa visibilité. Comme l'écrivent ses concepteurs, l'approche GEOBIA manque de conceptualisation et a besoin d'une officialisation de ses fonctionnalités pour tendre vers une discipline mature et reconnue (Blaschke et al. 2014).

Le logiciel eCognition® éditée aujourd'hui par Trimble a pris une avance importante dans le domaine. Cette solution logicielle est très répandue dans la communauté des géomaticiens et télédéTECTEURS. De nombreuses auteurs utilisent eCognition® pour leur application (Benz et al. 2004; Blaschke 2010). Ce logiciel est d'abord un logiciel puissant spécialisé dans les traitements d'image et plus particulièrement dans la segmentation. La stratégie eCognition® s'oriente vers une solution passerelle entre le traitement d'image, jusqu'ici cantonnée aux spécialistes, et les SIG, touchant un public beaucoup plus large. L'environnement de travail se présente sous la forme d'une interface graphique détaillée et relativement simple à utiliser (Baatz et al. 2004).

Malgré le coût onéreux de sa licence, le logiciel eCognition® offre une solution adaptée pour contribuer efficacement à la cartographie de l'occupation du sol à partir d'imagerie THRS selon une approche orientée-objet (GEOBIA). Il privilégie une approche cognitive de l'orientée-objets comme exposée dans la *section 6.1.2.2 (Figure 87)* (O'Neil-Dunne, MacFaden, et Pelletier 2011). Il donne la possibilité de réaliser des agrégations de pixels de bas niveau à l'aide de nombreux algorithmes de segmentation dont celui dit « *multi-résolution* ». Puis, il permet de manipuler la segmentation ainsi créée selon le principe d'agrégation de haut niveau. Les fonctions du logiciel donnent les pleins pouvoirs à l'analyste pour mesurer, fusionner, diviser, transformer et classer les régions pour satisfaire son besoin cartographique. Ainsi, l'utilisateur dispose d'innombrables possibilités pour développer une solution cartographique de type « *ad hoc* ». De plus, le logiciel permet de préparer le processus de segmentation à travers des prétraitements spécifiques. Il est possible d'intervenir préalablement sur la qualité de l'image à segmenter (lissage, calcul d'indice, etc.) ou d'imposer des contraintes spatiales à l'algorithme de segmentation.

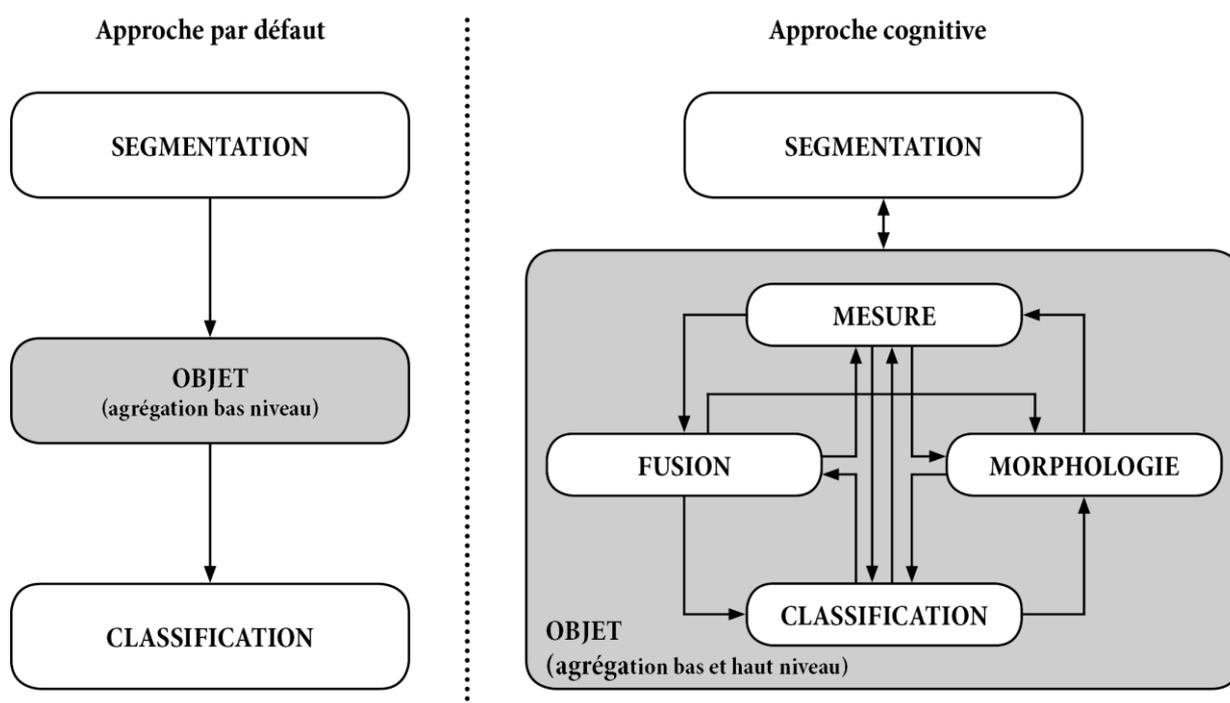


Figure 87. Les approches de cartographie orientée-objets (adapté de O'Neil-Dunne, 2009)

Nous choisissons donc eCognition® comme solution pour implémenter la segmentation d'image nécessaire à l'élaboration de l'assistance à la digitalisation. Nous motivons ce choix car il offre une solution de segmentation puissante avec de nombreuses fonctionnalités pré et post segmentation. Cette qualité nous permet de nous libérer d'un grand nombre de contraintes techniques et de stimuler notre recherche de solution pour notre application. Toutefois nous nous rendons volontairement dépendant de ce logiciel. L'inconvénient d'eCognition® est qu'il reste un logiciel assez fermé (ou boîte noire). Il est alors difficile d'expliquer en détail son fonctionnement. De plus, la stratégie commerciale de Trimble divise l'utilisation d'eCognition selon deux niveaux de licences nommées « *Developer* » et « *Server* ». Les deux niveaux donnent un accès à toutes les fonctionnalités du logiciel. Seul le niveau de licence « *Server* » permet d'accéder aux fonctionnalités de parallélisation des traitements pour faciliter les calculs sur des

gros volumes de données. L'utilisation d'eCognition a un coût de fonctionnement important. Il convient de le mesurer en perspective des applications attendues et des autres offres de solutions présentes sur le marché.

6.2 Services rendus par la segmentation d'image

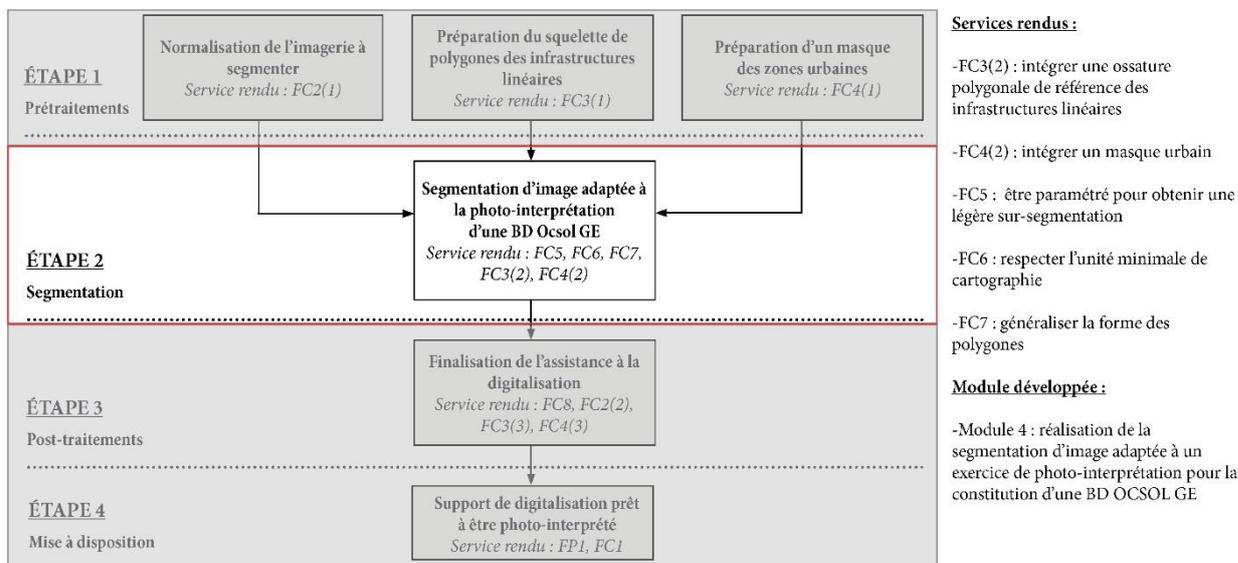


Figure 88. Description de l'étape 2 de segmentation dans la méthodologie générale

L'étape 2 de la méthodologie générale dédiée à la segmentation d'image (SI) (Figure 88) comprend 5 Fonctions de Contraintes (FC) :

la **FC5 existe pour aider au paramétrage de l'algorithme de segmentation multi-résolution**. Lors de la consultation des experts sur les contraintes liées à l'utilisation d'une SI pour la photo-interprétation (chapitre 5), ceux-ci se sont accordés sur le fait qu'une légère sur-segmentation numérique, vis-à-vis du résultat que l'on souhaite obtenir, est le meilleur compromis à attendre de l'utilisation d'une SI ;

la **FC6 doit permettre de contrôler les objets générés par la segmentation selon leur superficie**, en lien avec l'unité minimale de cartographie déterminée ;

la **FC7 a pour intérêt d'apporter un arrangement morphologique des objets créés** afin de répondre aux exigences de généralisation des polygones nécessaires pour le travail de photo-interprétation ;

enfin, l'étape de segmentation apporte également des services complémentaires pour les fonctions de contraintes **FC3** et **FC4**. Il s'agit, ici, de **l'intégration du squelette polygonal des infrastructures linéaires (FC3(2)) et du masque urbain (FC4(2))** dans la procédure de segmentation.

6.2.1 Ordonnement des fonctions techniques

La phase de segmentation ordonne cinq fonctions de contraintes déclinées dans le diagramme FAST associé (Figure 89). Elles trouvent toutes une solution technique à travers l'utilisation du logiciel eCognition® et des fonctionnalités qu'il propose. L'ensemble des solutions techniques

décrites dans ce chapitre a été appliqué aux trois cas d'études (Projet de PNR de l'Aubrac, Communauté d'agglomération de Manosque (DLVA) et la Métropole Nice Côte-d'Azur) sauf pour la fonction complémentaire FC4(2) (intégrer un masque urbain) non appliquée pour le projet de PNR.

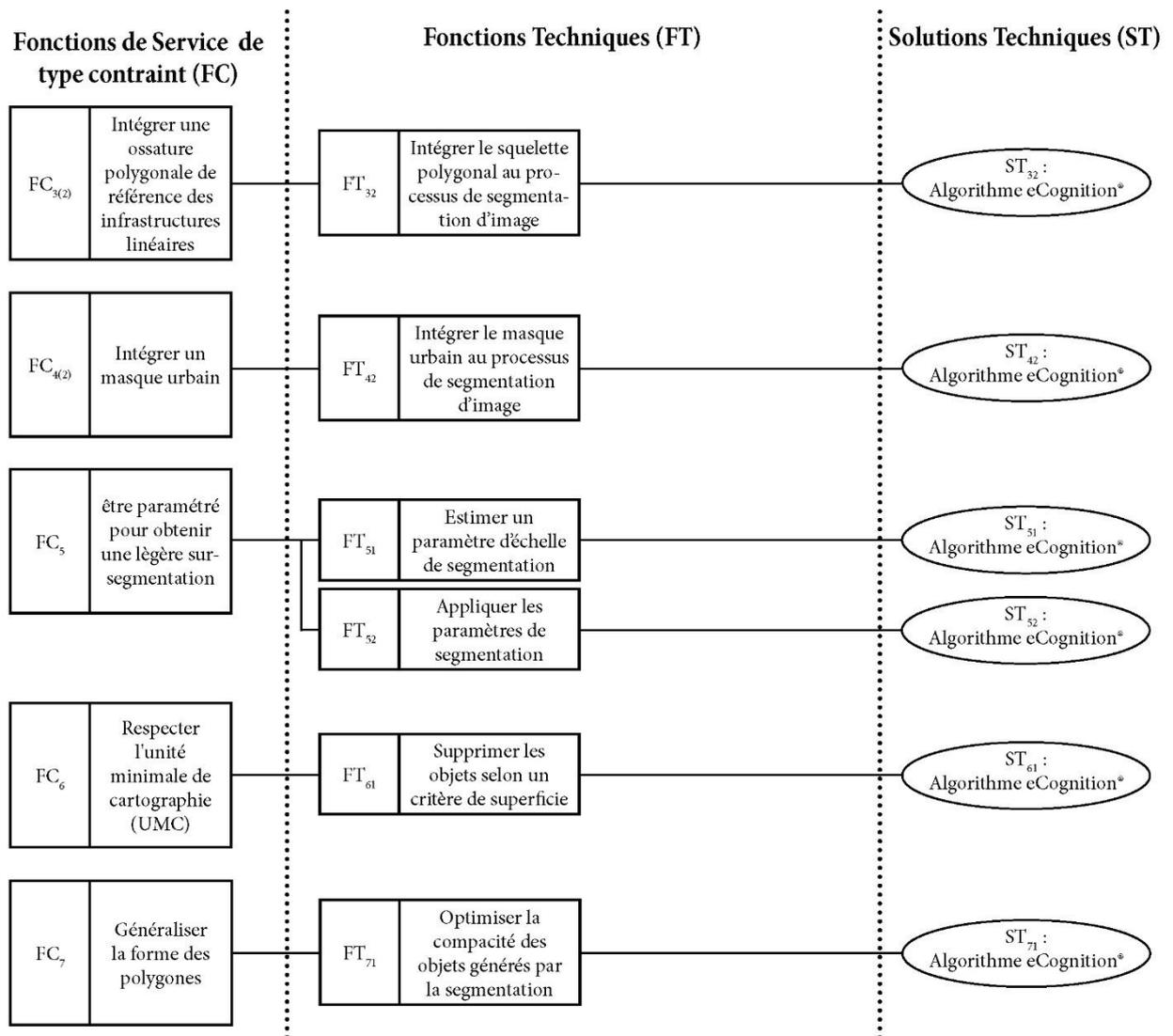


Figure 89. Ordonnancement (FAST) des fonctions techniques liées aux fonctions de service FC3(2), FC4(2), FC5, FC6 et FC7 associées à la segmentation

6.2.2 Le « ruleset » d'eCognition®

eCognition® s'utilise à travers une interface graphique relativement simple que nous ne détaillons pas dans ce document (Baatz et al. 2004). Toutefois, le cœur de cette interface est la fenêtre de création du « ruleset » (ou l'arbre des processus). Le « ruleset » contient les processus à exécuter sur l'image ou les objets de la segmentation. Le « ruleset » peut être organisé en groupes ou en sous-groupes de processus selon une hiérarchie d'exécution. La création d'un processus s'effectue à l'aide d'une console de configuration appelée « eCognundrum » (Figure 90). Elle est structurée d'une manière toujours identique quelque soit l'algorithme ou la fonction appelée. Le « ruleset » est contenu dans un fichier .dcp (definiens cognition program). Ce fichier permet de conserver l'organisation et la configuration de chacun des processus composant le «

ruleset ». Ainsi, il est possible d'importer un « *ruleset* » déjà créé pour un nouveau projet de segmentation.

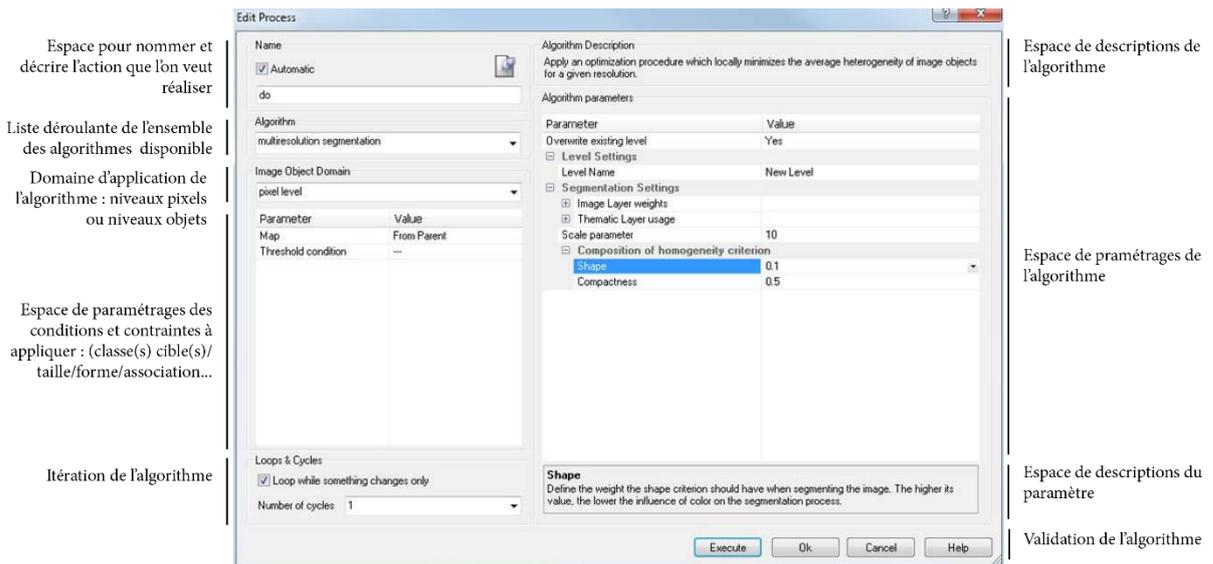


Figure 90. Structuration de « l'eCognitum » permettant la création et la configuration des processus du « *ruleset* »

Les solutions techniques élaborées pour les cinq fonctions de contraintes identifiées pour cette phase de développement utilisent un seul et même « *ruleset* ». Celui-ci est transposable et éditable d'un projet à l'autre. Il est construit pour répondre à toutes les exigences liées aux fonctions de contraintes. Cependant, l'utilisateur est libre d'activer ou de désactiver certains processus du « *ruleset* » qu'il juge non nécessaires. Il peut également apporter des ajustements sur la configuration des processus pour répondre à une exigence spécifique.

6.2.3 FT₃₂ et FT₄₂ : intégrer le ou les vecteur(s) de référence géométrique dans le processus de segmentation

La FT₃₂ et la FT₄₂ interviennent en amont du processus de segmentation « *multi-résolution* ». L'objectif est de contraindre la segmentation avec la géométrie d'un ou plusieurs vecteur(s) exogène(s) (Figure 91). Ces vecteurs sont soit de référence ou complémentaire.

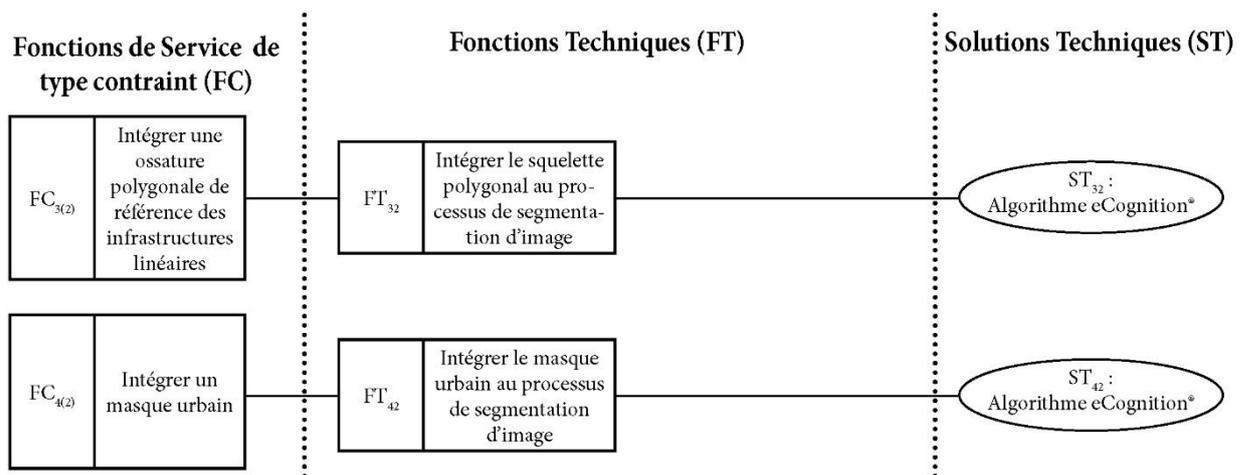


Figure 91. Rappel de l'ordonnancement des fonctions techniques FT₃₂ et FT₄₂

6.2.3.1 Le ou les vecteur(s) de référence

Pour certains cas de production d'une BD Ocsol GE, il convient de contraindre obligatoirement la segmentation avec un ou plusieurs vecteur(s) de référence géométrique (infrastructures linéaires, masque urbain, etc.). La FT₃₂ et la FT₄₂ sont traduites à travers un même processus en début de « *ruleset* ». L'identification thématique de ces vecteurs en tant que réseau routier, réseau ferroviaire ou masque urbain n'a, ici, pas d'importance. Seule leur emprise spatiale compte. Le processus identifie ces objets dans une même classe générique nommée « ossature polygonale » afin de les dissocier du reste des éléments paysagers de l'image (Figure 92). Il est alors possible d'implémenter l'algorithme de segmentation « *multi-résolution* » uniquement sur les zones extérieures à ce masque polygonal.



Figure 92. Intégration de « l'ossature polygonale » composée des espaces urbains et du réseau routier (en rouge) avant la procédure de segmentation. Délimitation « dentelée » (en vert) de l'ossature causée par la rasterisation d'eCognition®

6.2.3.2 Le ou les vecteur(s) complémentaire(s)

L'ajout d'informations vectorielles complémentaires, dont la géométrie est jugée pertinente par l'analyste, est possible pour contraindre l'algorithme de segmentation. Cette capacité a été utilisée pour le cas d'études sur la communauté d'agglomération de Manosque (DLVA). Pour ce territoire nous avons observé que les espaces agricoles sont structurés par un maillage important de chemins ou de routes secondaires, non intégrés dans les vecteurs de référence. Ce maillage est cartographié de façon exhaustive dans la BD TOPO® de l'IGN (Figure 93). Nous avons pris la décision de contraindre l'algorithme de segmentation par cette information linéaire complémentaire afin d'apporter un prédécoupage efficace des espaces agricoles. Cette décision requière toutefois, un prétraitement de l'information linéaire en information surfacique pour pouvoir l'importer dans eCognition®. Nous avons donc préparé cette information vectorielle complémentaire en appliquant une petite zone tampon autour du linéaire de 3 m de large.



Figure 93. Extraits des chemins et routes secondaires sur le territoire de la communauté d'agglomération de Manosque (DLVA)

6.2.3.3 Récupération de la géométrie initiale du ou des vecteur(s) de référence

Le ou les vecteur(s) ont un rôle de référence géométrique. Or la géométrie initiale de ces vecteurs est perdue par la rastérisation obligatoire des vecteurs entrants dans le logiciel eCognition®. Les limites d'objets prennent alors un effet dentelé (ou « *marche d'escalier* ») de la taille du pixel de l'image segmentée (Figure 92). Ce constat nécessite de prévoir deux post-traitements de la segmentation pour récupérer la géométrie initiale de ces vecteurs :

Le premier post-traitement, qualifié de préparatoire, intervient juste avant l'exportation de la segmentation en sortie d'eCognition®. Le « *ruleset* » prévoit un processus complémentaire qui applique une opération morphologique d'érosion totale de l'ossature polygonale (vecteur(s) de référence et/ou complémentaire(s)). Cette opération morphologique vient grignoter l'ossature de l'extérieur vers l'intérieur jusqu'à ce que son emprise spatiale disparaisse (Figure 94).

Notons que l'érosion morphologique appliquée à l'ossature polygonale complémentaire sur le territoire de la DLVA suffit. La ligne médiane résultante devient une portion de la délimitation des parcelles.

Le second post-traitement est appliqué uniquement pour l'ossature polygonale de référence. Il intervient durant l'étape 3 de la méthodologie dédiée à la finalisation de l'assistance à la digitalisation (chapitre 7). Le post-traitement consiste à croiser la segmentation et l'ossature polygonale dont la géométrie n'a pas été modifiée par la rastérisation. De cette manière, nous assurons le tracé de référence de l'ossature polygonale en évitant de nombreux problèmes topologiques.



Figure 94. Post-traitement morphologique sur les ossatures polygonales de référence et complémentaires : (a) emprise spatiale des ossatures polygonale, (b) érosion morphologique des ossatures jusqu'à la disparition totale de celles-ci.

6.2.4 FT_{51} et FT_{52} : paramétrage de la segmentation

6.2.4.1 Les paramètres de segmentation « multi-résolution »

Le processus de segmentation « multi-résolution » (MS) proposé par le logiciel eCognition® requière le paramétrage de plusieurs critères qu'il convient de définir le plus précisément possible (Baatz et al. 2004) (Figure 95).

- **Échelle** (scale) : ce paramètre est défini comme l'hétérogénéité maximale autorisée au sein des régions (ou objets). Par conséquent, ce paramètre influence directement la taille moyenne des régions. Plus le facteur d'échelle est grand, plus les régions créées sont grandes ; inversement, plus le facteur d'échelle est petit, plus la taille des régions est petite.
- **Forme** (shape) : ce paramètre permet d'ajuster à partir d'un curseur, l'influence des valeurs spectrales (couleur) face à celles de la forme dans la création des régions. Plus le critère de forme est élevé, moins l'homogénéité spectrale est prise en compte dans le processus de segmentation.
- **Compacité** (compactness) : ce paramètre ajuste la compacité ou, à l'inverse, l'irrégularité des régions générée à la condition que le paramètre de forme soit supérieur à zéro.

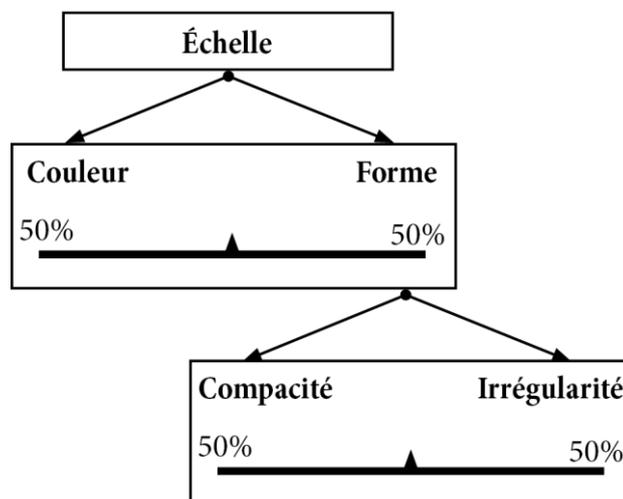


Figure 95. Nature du paramétrage nécessaire pour le processus de segmentation « multi-résolution » (adapté de (Vannier 2011))

Grâce au paramétrage de ces trois critères, il est possible d'orienter la création d'objets sur l'image. De cette manière, l'analyste peut se lancer dans un processus de segmentation MS en réalisant une série de segmentations compatibles selon un paramétrage différent. Il peut, dès lors, tenter d'extraire des objets qui présentent des caractéristiques de taille, d'homogénéité ou de morphologie différente.

Dans notre étude, nous recherchons seulement à orienter la création d'un seul niveau de segmentation vers un léger sur-découpage du paysage dans le cadre de la production d'une BD Ocsol GE par photo-interprétation (Figure 96). Il n'est pas envisagé de procéder à l'implémentation d'une série de segmentation pour extraire des objets selon une typologie d'éléments paysagers définis selon leur taille, leur homogénéité ou leur morphologie. Nous ne

réalisons donc pas plusieurs segmentations emboîtées pour cartographier les petits, les moyens et les grands éléments paysagers. Cette démarche impliquerait une complexification méthodologique ne garantissant pas la reproductibilité. Il est donc important de signaler que l'algorithme de segmentation « *multi-résolution* » que nous utilisons, n'en porte que le nom.

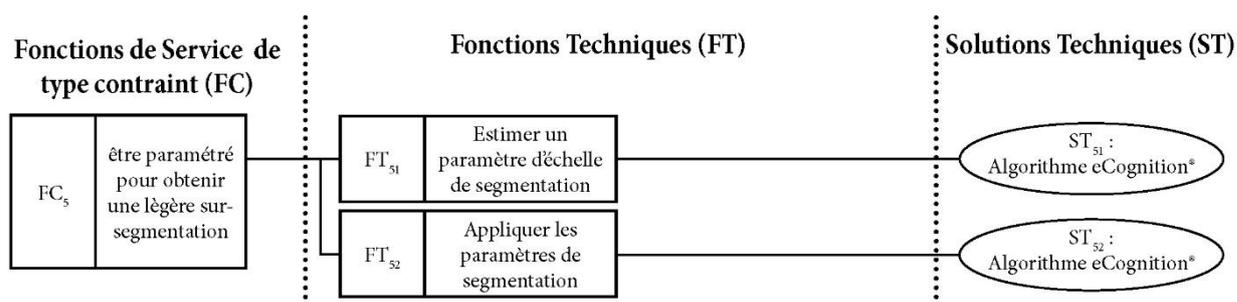


Figure 96. Rappel de l'ordonnancement des fonctions techniques FT51 et FT52

6.2.4.2 Estimation du paramètre d'échelle de segmentation : ESP Tool

Parmi les trois critères de paramétrage de la segmentation, le **paramètre d'échelle de segmentation** conditionne le plus fortement le résultat. Il correspond au niveau d'agrégation des pixels. Les critères de forme et de compacité sont difficiles à évaluer et restent secondaires dans la démarche.

Le paramétrage optimal de l'échelle de segmentation reste problématique. Dans la littérature, il n'existe pas de méthodes efficaces pour déterminer une valeur d'échelle adaptée à un objectif d'étude (M. Kim, Madden, et Warner 2008; Dragut, Tiede, et Levick 2010). Très souvent, la validation d'une valeur d'échelle est réalisée par expérience de celle-ci sur l'image. Habituellement, environ dix segmentations sont nécessaires avant d'en confirmer une (Meinel et Neubert 2004; Thomas 2005; M. Kim, Madden, et Warner 2008). La validation d'une segmentation plutôt qu'une autre est une décision empirique (qualité visuelle des objets et cohérence avec les objectifs d'étude).

Cependant, il existe plusieurs méthodes d'évaluation semi-automatique de segmentation d'image. Tout d'abord les méthodes dites supervisées comparent la segmentation d'image avec une segmentation de référence couramment produite par digitalisation manuelle par un photo-interprète (Hoover et al. 1996; Neubert, Herold, et Meinel 2008; Marpu et al. 2010). Récemment, beaucoup d'efforts ont été engagés sur les méthodes dites non-supervisées pour ajuster de façon semi-automatique les paramètres de segmentation (X. Zhang, Xiao, et Feng 2012). La majorité d'entre-elles sont basées sur la mesure de la variance pour chaque objet de la segmentation. Ces valeurs sont moyennées à travers une mesure globale qui fournit une indication sur l'adaptabilité de la segmentation d'image (Woodcock et Strahler 1987; M. Kim, Madden, et Warner 2008; Dragut, Tiede, et Levick 2010; X. Zhang, Xiao, et Feng 2012; Dragut et al. 2014).

Pour notre étude, nous utilisons l'outil ESP (Estimation Scale Parameter) pour évaluer des valeurs d'échelle de segmentation avec le logiciel eCognition®. L'outil ESP est une méthode non-supervisée développé par Drăgut (Dragut, Tiede, et Levick 2010) basé sur la mesure de la variance locale (VL) de l'image. Cet outil s'appuie sur les travaux de Kim (M. Kim, Madden, et Warner 2008) et s'intègre comme une extension dans eCognition®.

Celui-ci simule une série de segmentations paramétrées avec des valeurs d'échelle croissantes à intervalles réguliers. L'hypothèse formulée par Drăgut est la suivante : lors de la croissance de l'objet avec l'augmentation de la valeur d'échelle, son écart-type augmente de façon continue jusqu'à atteindre une correspondance avec un élément dans le monde réel. À ce moment et en supposant qu'il existe un contraste marqué entre cet objet et les objets adjacents, les limites de l'objet seront préservées durant les quelques valeurs d'échelle supérieures suivantes où l'écart-type de cet objet reste le même. De la même manière, les objets de taille et de valeurs spectrales proches contenus dans l'image doivent trouver leur correspondance dans le monde réel plus ou moins autour de la même valeur d'échelle. Leurs limites et implicitement leurs écart-types seront conservés avec les valeurs d'échelle légèrement plus grandes. Si ce type d'objet est bien représenté dans l'image, l'effet cumulatif de leurs écart-types proches provoquera une stagnation temporaire de la variance locale de l'image et marquera un palier significatif dans les valeurs d'échelle. En supposant maintenant que ce type d'objet appartient à un autre type d'objet plus grand dans l'image. Par exemple, l'objet « *arbre* » appartient à l'objet « *peuplement forestier* ». L'augmentation de la valeur d'échelle continuera à faire croître l'écart type des objets jusqu'à atteindre un nouveau seuil de stagnation temporaire de la VL. Celui-ci a de grande chance de correspondre à la délimitation des « *peuplements forestiers* » sur l'image. Ce phénomène répétitif traduit à la fois la complexité de l'image et le nombre de niveaux dans lesquels les objets sont organisés.

Pour résumer, la mise en relation de la VL avec les valeurs d'échelle doit mettre en évidence une courbe de progression ascendante ponctuée de paliers indiquant les valeurs d'échelles optimales auxquelles la segmentation produit des niveaux significatifs. Toutefois, le tracé ascendant de la VL ne permet pas visuellement, à lui seul, de mettre en évidence les valeurs d'échelles où émergent les objets significatifs. Drăgut (2010) associe une mesure de taux de change (ROC pour Rate Of Change) pour repérer plus facilement les variations de la VL dans l'image (Équation 4).

$$ROC = \left[\frac{L - (L - 1)}{L - 1} \right] \times 100 \quad 4$$

Où $L = VL$ à la valeur d'échelle et $L-1 = VL$ à la valeur d'échelle inférieure. L'auteur préfère utiliser le terme de ROC-VL pour enlever toute confusion dans l'utilisation de cet indicateur d'abord élaboré en économie. Le ROC-VL mesure la somme des changements dans la VL d'une valeur d'échelle à l'autre. Selon l'auteur, les pics de la mesure ROC-VL indique la valeur d'échelle où l'image peut être segmentée de la manière la plus appropriée.

L'ESP tool est exécutée pour nos trois applications (projet de PNR de l'Aubrac, DLVA et la Métropole NCA) (Figure 98). L'ESP tool est intégrée en tant que premier processus dans notre « *ruleset* ». Ce processus est indépendant et n'impacte pas les autres processus du « *ruleset* ». Il existe uniquement pour apporter une aide à l'analyste pour le paramétrage de la segmentation « *multi-résolution* ». De cette manière, l'analyste peut utiliser l'ESP tool une ou plusieurs fois sur l'image entière ou sur des portions d'image spécifiques afin d'affiner la mesure et la recherche d'une valeur d'échelle optimale. L'ESP tool peut engendrer un temps de calcul important en fonction de la taille de l'image et du nombre de valeurs d'échelles à simuler. Son exécution n'est donc pas obligatoire pour un analyste expérimenté.

6.2.4.3 Sélection et application d'une valeur d'échelle

L'ESP tool permet de dégager plusieurs valeurs d'échelle significatives. Nous voulons retenir celle qui produira un léger sur-découpage du paysage pour assister le photo-interprète dans sa tâche de digitalisation. Nous formulons l'hypothèse suivante : la variance locale (VL) augmente de manière continue avec les valeurs d'échelle jusqu'à atteindre une saturation globale (nettement visible sur la BD ORTHO®) (*Figure 98*). En supposant que ce changement de comportement de la VL traduit une relative stabilité dans la création d'objets, la légère sur-segmentation de l'image interviendrait au début de la phase de saturation globale. Les objets commencent à présenter un contraste trop fort pour pouvoir croître malgré l'augmentation des valeurs d'échelles. Nous retenons la valeur d'échelle identifiée au début de la saturation globale par l'ESP tool comme la plus favorable à produire une légère sur-segmentation. Le profil de la VL sur l'imagerie RapidEye® (*Figure 98*) ne présente pas de saturation globale marquée, malgré le grand nombre de valeurs d'échelles simulées. Par contre, on observe une certaine instabilité de la VL à partir de l'échelle 500. La résolution spatiale du capteur RapidEye® (5 m) rend difficile la stabilisation des limites des objets paysagers. Toutefois nous privilégions la valeur d'échelle identifiée par l'ESP tool intervenant avant cette instabilité de la VL. L'ensemble des paramètres fixés pour la segmentation MS sur les trois territoires d'études sont présentés dans le Tableau 18. Un extrait du résultat cartographique de la segmentation MS contrainte par des ossatures polygonales de référence géométrique est illustré sur la *Figure 97*.

Tableau 18. Paramétrage de la segmentation « multi-résolution » sur les trois zones d'étude

	Projet de PNR de l'Aubrac	Métropole Nice Côte-d'Azur	Durance Luberon Agglomération
Imagerie	RapidEye®	BD ORTHO®	BD ORTHO®
Échelle (ESP tool)	500	140	160
Forme	0.3	0.5	0.5
Compacité	0.5	0.8	0.8

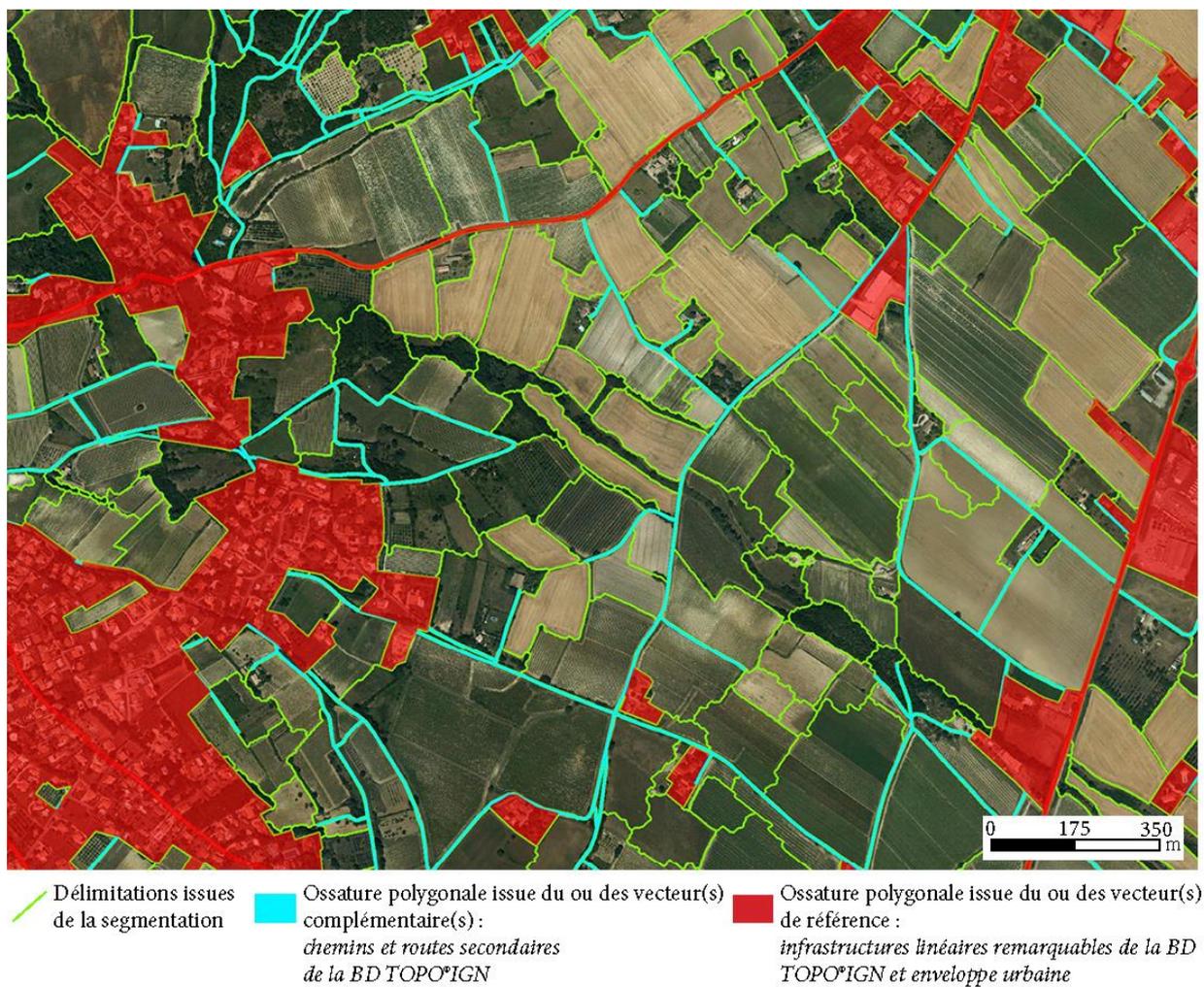


Figure 97. Extrait cartographique de la segmentation « multi-résolution » contrainte par des ossatures polygonales de référence et complémentaires sur la communauté d'agglomération de Manosque (DLVA)

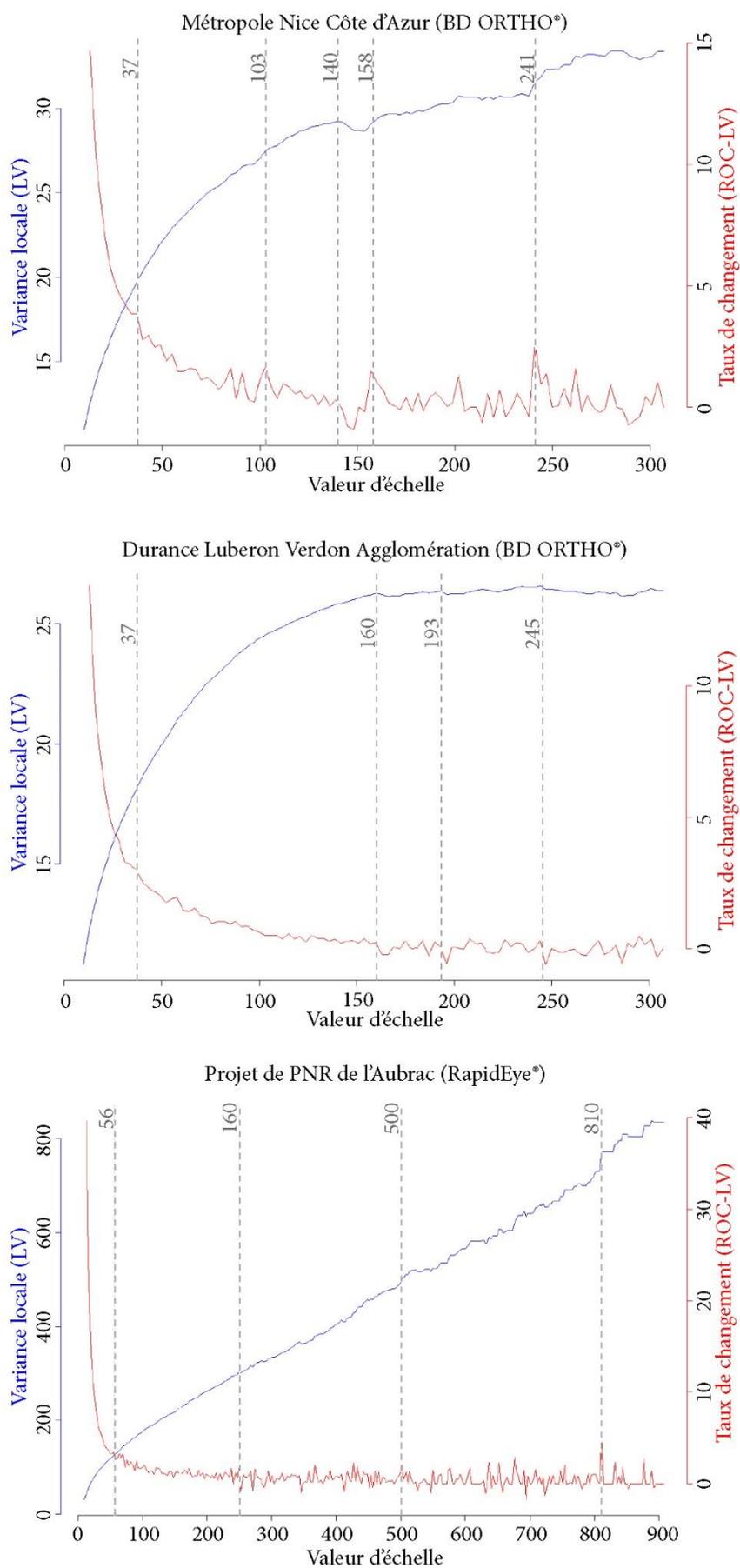


Figure 98. Résultats de l'ESP tool pour les trois zones d'étude

6.2.5 FT61 : supprimer les petits objets

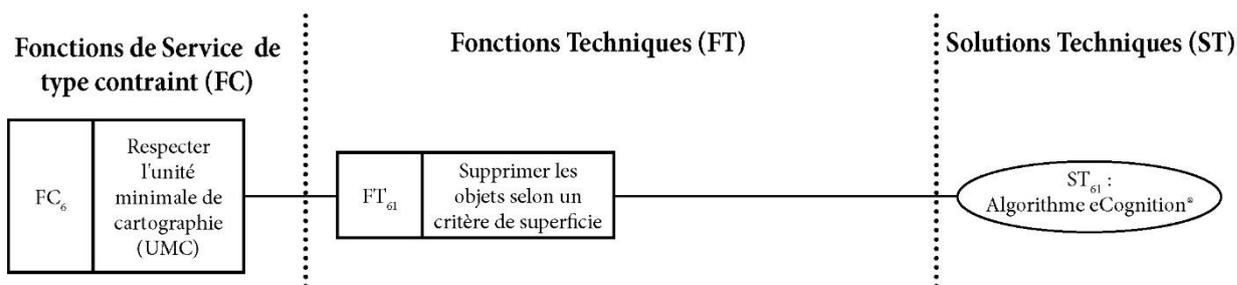


Figure 99. Rappel de l'ordonnancement des fonctions techniques FT61

La **FT₆₁** (Figure 99) est traduite à travers un processus couramment utilisé dans eCognition®. Il consiste à **éliminer une ou plusieurs régions (ou objets) par fusion de celles-ci avec une région voisine partageant le maximum de contacts avec elles**. Les régions contraintes de disparaître peuvent être identifiées selon un ou plusieurs critères spécifiques. Pour notre étude, ce critère retenu est la surface de l'objet. L'analyste doit alors spécifier un seuil de surface en deçà duquel l'objet sera agrégé à un objet voisin. Ce processus d'agrégation d'objets est appliqué uniquement sur les objets issus de la segmentation « *multi-résolution* » (MS) et exclut les objets appartenant à une ossature polygonale de référence. Par contre, l'agrégation de l'objet peut se réaliser avec des objets issus de la segmentation MS ou appartenant à une ossature polygonale (Figure 100).

L'intérêt principal de ce processus est de limiter les « *petits* » objets pour l'exercice de photo-interprétation. Souvent, ils apparaissent coincés par la combinaison de plusieurs ossatures polygonales de référence comme pour le territoire de la DLVA. Ce cas de figure engendre une multiplication d'objets « *artefacts* » nuisibles à la BD OCSOL GE. Ils sont difficiles à corriger par photo-interprétation. La détermination du seuil de superficie est empirique et n'est pas forcément liée à l'Unité Minimale de Cartographie (UMC) définie dans le cahier des charges. Le processus garantit une homogénéité de la superficie minimale des régions générées par la segmentation MS.



Figure 100. (a) Identification des objets « artefacts » (en rouge) issus de la segmentation selon un critère de superficie ($\leq 500 \text{ m}^2$). (b) Agrégation de ces objets avec un objet voisin partageant le maximum de contact

6.2.6 FT71 : optimiser la compacité des objets générés par la segmentation

La FT₇₁ est formulée pour optimiser la forme générale des objets jugés par le groupe d'experts comme trop irrégulière et trop éloignée d'une digitalisation menée couramment par un photo-interprète (Figure 101). Deux aspects de ces irrégularités morphologiques des objets sont mis en évidence par le groupe de travail.

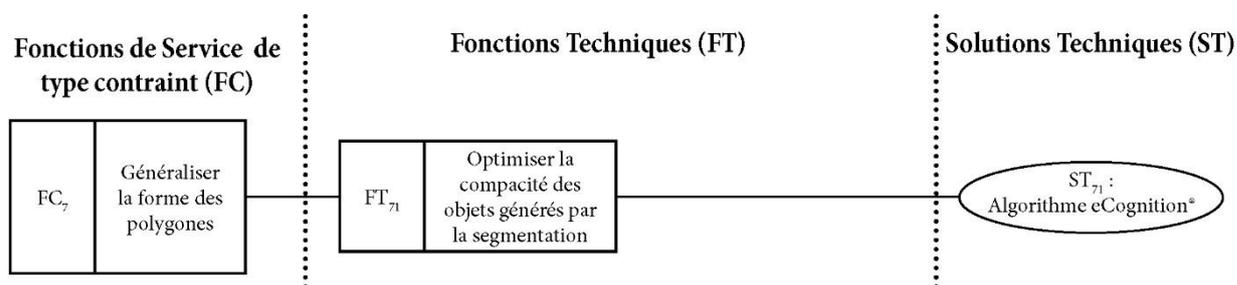


Figure 101. Rappel de l'ordonnancement des fonctions techniques FT₇₁

6.2.6.1 Les objets « fins »

Les objets « fins » décrivent, souvent, des portions de chemin en terre-battue, des accotements routiers, des talus, des linaires de plantation (vignes, vergers) ou encore des traces d'engins au milieu des parcelles agricoles. Ils sont générés par la segmentation MS car ils possèdent un fort contraste avec les objets adjacents. Même si ce type d'objet a un sens thématique dans le monde réel, ils n'ont pas raison d'être cartographiés dans une BD Ocsol GE. Tout d'abord, ce type d'objet est rarement conforme à la Largeur Minimale de Cartographie (LMC) exprimée dans le cahier des charges. De plus, ce sont souvent des portions d'éléments paysagers qui ne sont pas cartographiées de façon exhaustive sur l'ensemble de l'image. La correction de ce type d'objet par un photo-interprète peut rapidement devenir longue et fastidieuse. Elle nécessite, de sa part, un travail de digitalisation à des échelles très grandes (1/500^e ou 1/1 000^e). L'identification et l'élimination de ce type d'objet sont donc préconisées pour faciliter l'exercice de photo-interprétation.

Pour identifier les objets « fins », le processus permet de calculer une « largeur estimée » (l_{est}) des objets de la segmentation MS. L'hypothèse se base sur la comparaison de la forme de l'objet avec une forme standard. Dès lors, les objets que nous recherchons se rapprochent davantage d'une forme rectangulaire de faible largeur. Si nous considérons la largeur l du rectangle proche de 0, le périmètre de l'objet étudié noté P est exprimé par :

$$P \approx 2L \quad 5$$

Où L correspond à la longueur du rectangle. Il est alors possible de dériver l_{est} à partir du calcul de la surface A du rectangle de la manière suivante :

$$l_{est} = \frac{2A}{P} \quad 6$$

De cette manière, l'analyste peut exécuter un processus d'élimination des objets « fins » selon le critère de la « largeur estimée » (Figure 102).



Figure 102. (a) Identification des objets « fins » (en rouge) issues de la segmentation à partir de la « largeur estimée » l_{est} (≤ 15 m). (b) Opération morphologique (érosion) jusqu'à disparition totale de ces objets « fins »

6.2.6.2 Les objets « tentaculaires »

Les objets « tentaculaires » (en forme de casserole ou de sablier) sont un type d'objets couramment observé à la suite d'une segmentation d'image (Figure 103). Tout comme les objets « fins » (section 6.2.6.1), ce sont des objets présentant des resserrements rarement conformes à la Largeur Minimale de Cartographie (LMC) exprimée dans le cahier des charges. Le contour de ces objets « complexes » n'est pas compatible avec la saisie d'un photo-interprète opérant au 1/5 000^e. Pour ce dernier, la correction de ces objets représente une forte contrainte qui va exiger des zooms importants et une perte de temps non négligeable. La fonction technique a donc pour but de limiter la génération de ce type d'objet à la forme complexe.

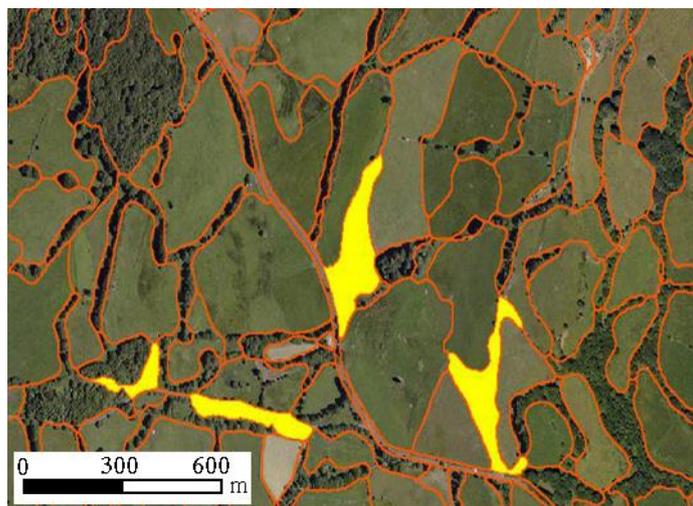


Figure 103. Exemple d'objets « tentaculaires » ou complexes (en jaune) couramment observés à la suite d'une segmentation MS

Le processus développé dans le « ruleset » se base sur deux opérations morphologiques sur les objets issus de la segmentation MS. La première opération est une contraction (ou érosion) de l'objet sur lui-même permettant de circonscrire les décrochés dans le tracé de l'objet. Puis, une opération de dilatation est appliquée sur chaque objet jusqu'à ce que l'espace « vide » généré

par la contraction soit comblé (Figure 104). La compacité générale des objets est augmentée et la présence d'objets « tentaculaires » est limitée. Ainsi, l'intervention du photo-interprète sur la délimitation des objets sera limitée et/ou facilitée.

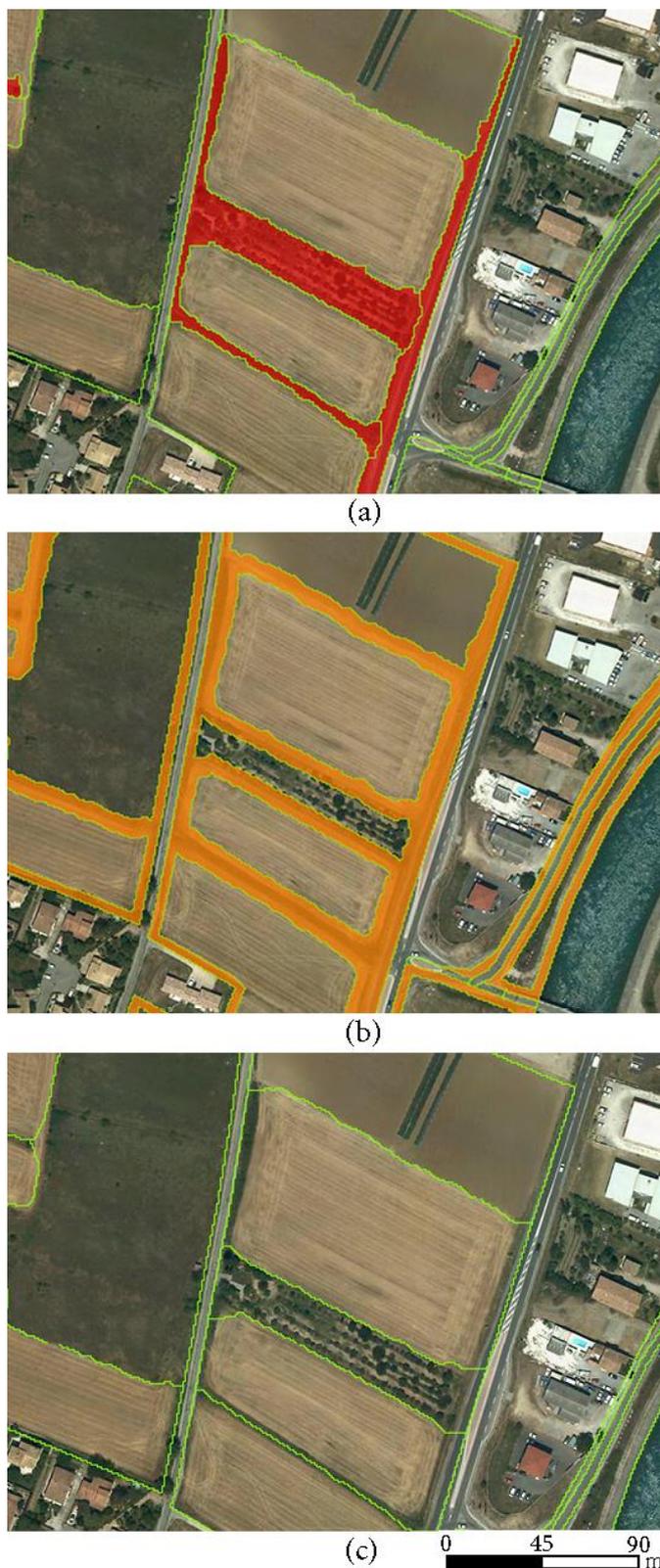


Figure 104. (a) Observation d'objets « tentaculaires » générés par la segmentation (en rouge) ; (b) érosion sur l'ensemble des objets générant des espaces « vides » (en orange). (c) les tentacules sont gommées par dilatation complète des objets vers les espaces « vides »

6.2.7 Exportation de la segmentation d'image

L'exportation de la segmentation en fichier SIG depuis eCognition® constitue l'ultime processus du « *ruleset* ». L'exportation est effectuée à la suite des opérations morphologiques d'érosion de « l'ossature polygonale » (*section 6.2.3.2*) visant à préparer la récupération de la géométrie originale de l'ossature.

La segmentation est exportée en format shapefile. Pour la zone d'étude du projet de PNR de l'Aubrac et celle de la DLVA, la segmentation est exportée dans un seul et même fichier shapefile. Pour la zone d'étude de la Métropole NCA, le « *ruleset* » a été implémenté sur l'ensemble des 50 tuiles d'images de manière indépendante. Toutefois, la configuration du « *ruleset* » est strictement identique d'une tuile à l'autre. De plus, eCognition® server permet d'exécuter le « *ruleset* » à la chaîne sur les cinquante tuiles d'images. Pour ce cas d'étude, nous disposons alors de cinquante fichiers SIG à assembler dans l'étape 3 de finalisation de l'assistance de digitalisation.

6.3 Module 4 : réalisation de la segmentation d'image adaptée à un exercice de photo-interprétation pour la constitution d'une BD Ocsol GE

Le module 4 est structuré autour d'un projet eCognition® (*Figure 105*). Le dossier racine du module comprend le fichier eCognition® (.dpj) permettant d'accéder au projet de segmentation avec le « *ruleset* » associé. Le dossier des données d'entrées regroupe l'image ou les tuiles d'image à segmenter, les données vectorielles thématiques nécessaires pour contraindre la segmentation, le « *ruleset* » ainsi que l'ESP tool. Le dossier de sortie réceptionne la segmentation résultante en format shapefile.

Le ruleset eCognition pour l'exécution du module 4 est détaillé en annexe ([Annexe F](#)). Pour des raisons de secret d'affaires, il est possible que le présent document ne soit pas délivré avec cette annexe.

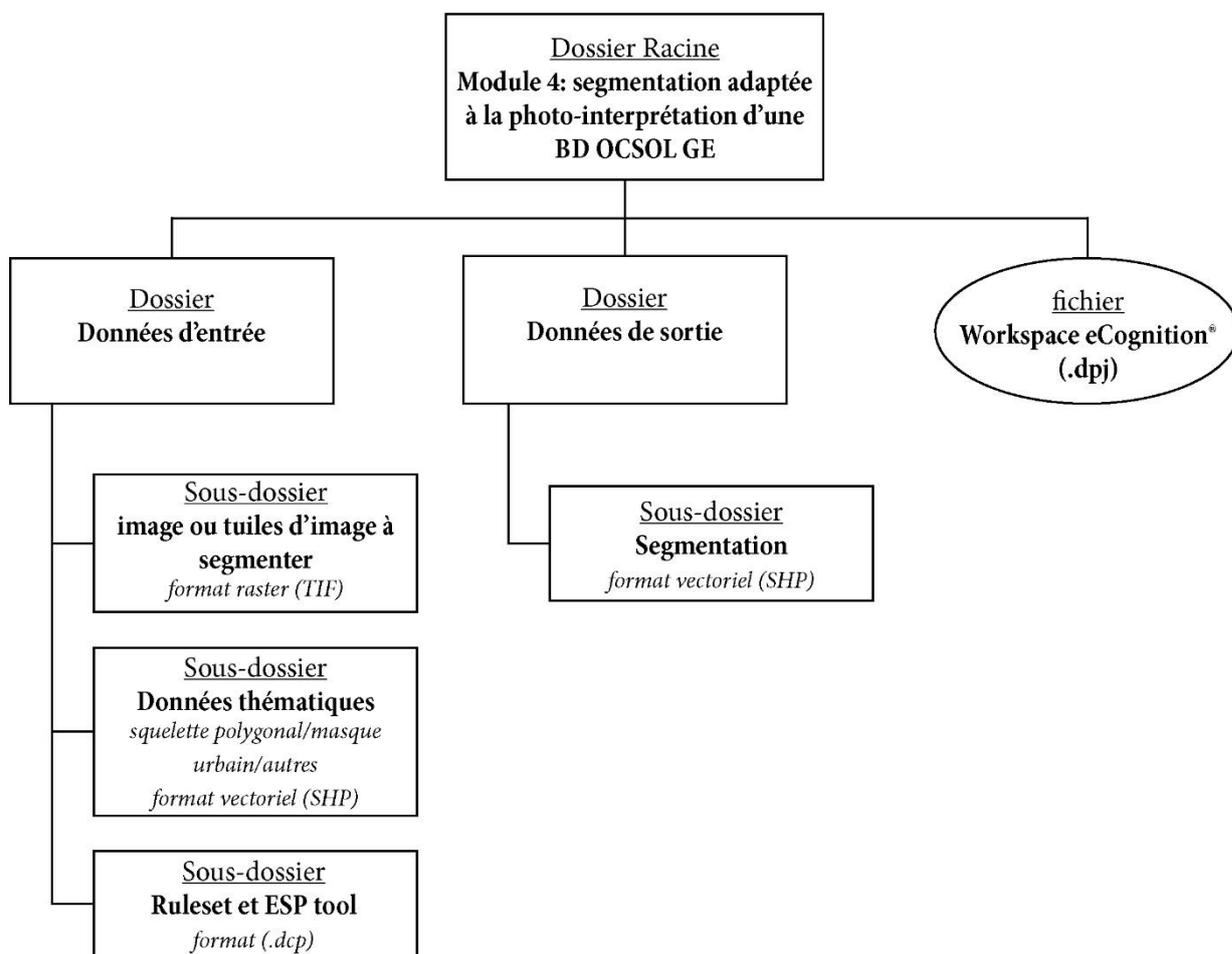


Figure 105. Structuration du dossier du module 4 consacré la réalisation d'une segmentation adaptée à la photo-interprétation d'une BD OCSOL GE

6.4 Conclusion sur la segmentation d'image

Dans ce chapitre, nous avons réalisé un choix d'algorithme de segmentation (multi-resolution) (*section 6.1.3*) et un choix d'outil de segmentation (eCognition®) (*section 6.1.4*) parmi les nombreuses solutions existantes. À l'aide de l'outil ESP, nous avons pu orienter la segmentation de l'image vers un léger sur-découpage du paysage pour une réalisation cartographique à grande échelle (*section 6.2.4*). Nous avons ensuite apporté au résultat de la segmentation brute, un certain nombre de post-traitements s'inscrivant dans une démarche ad-hoc dont l'objectif est de se rapprocher d'un socle polygonal en cohérence avec la vision d'un photo-interprète de BD Ocsol GE (*sections 6.2.5 et 6.2.6*).

Pourtant, il est important de préciser que la segmentation d'image est un exercice conservant une part importante de subjectivité et est soumis à de nombreuses variables. Dès lors, la manipulation du module 4 exige une forte expertise. Le paramétrage de l'algorithme et de ses post-traitements doit être réfléchi en fonction des sources d'images utilisées (BD Ortho®, Pléiades®, RapidEye®, etc.), de leur résolution spatiale et du niveau de précision attendu dans le découpage des objets. De plus, les temps de calcul induits par l'implémentation d'une segmentation sont difficiles à estimer et peuvent devenir conséquents si l'ensemble des variables est mal maîtrisé.

Le module 4 fournit à l'utilisateur une aide pour mener à bien une segmentation d'image facilement utilisable dans le cadre d'une photo-interprétation. Néanmoins, la segmentation résultante de ce module doit encore subir quelques post-traitements, pour fournir au photo-interprète une véritable assistance à la digitalisation. Ces derniers ne peuvent pas être réalisés directement dans le logiciel eCognition®. Nous sommes donc contraints d'élaborer un dernier module dédié à ces post-traitements de finalisation et que nous détaillons dans le chapitre suivant.

Post-traitements de la segmentation d'image

Sommaire

7.1	FC2(2) : s'adapter au volume et au format de l'imagerie à segmenter : assemblage des segmentations tuilées	204
7.1.1	Ordonnancement des fonctions techniques liées à la FC2(2)	204
7.1.2	ST ₂₄₁ : découper les segmentations par les dalles d'assemblage	205
7.1.3	ST ₂₄₂ : assembler les dalles segmentées	206
7.1.4	ST ₂₄₃ : supprimer les contours de dalle	206
7.2	FC8 : Obtenir une géométrie polygonale cohérente avec l'échelle de photo- interprétation.....	207
7.2.1	FT ₈₁ : diminuer le nombre de vertex des polygones	207
7.2.2	Pourquoi simplifier la géométrie des objets issus de la segmentation d'image ?	207
7.2.3	La simplification de ligne.....	208
7.2.4	Le choix d'un algorithme de simplification de ligne	209
	7.2.4.1 L'algorithme de Douglas-Peucker.....	210
	7.2.4.2 L'algorithme de Visvalinghan-Wyatt.....	211
7.2.5	Le choix d'un outil : MapShaper	212
7.3	FC3(3) et FC4(3) : intégration du ou des vecteur(s) de référence géométrique...	216
7.3.1	Ordonnancement des fonctions	216
7.3.2	FT33 et FT43 : mise à jour de la segmentation	216
7.4	Module 5 : finalisation de l'assistance à la digitalisation	218
7.5	Conclusion sur les post-traitements	219
7.6	Illustrations des apports de l'assistance à la digitalisation sur les 3 cas d'étude .	219

Dans ce chapitre, nous présentons les post-traitements de la segmentation nécessaire pour finaliser l'assistance à la digitalisation (*Figure 106*). Nous avons identifié trois actions dans l'étape de post-traitements. La première est liée à la fonction de contrainte **FC2(2)** dédiée à l'adaptation des traitements aux gros volumes de données. Plus précisément, le post-traitement s'attache à **rassembler les segmentations pratiquées sur des tuiles d'image afin de composer un seul et unique fichier SIG de segmentation**. Le second post-traitement vise à **simplifier la géométrie « rastérisée » des polygones issus de la segmentation (FC8)** afin d'approcher le tracé que pourrait exercer un photo-interprète. Enfin le dernier post-traitement porte **sur l'intégration du ou des vecteur(s) de référence géométrique dans le fichier SIG de segmentation (FC3(3) et FC4(3))**.

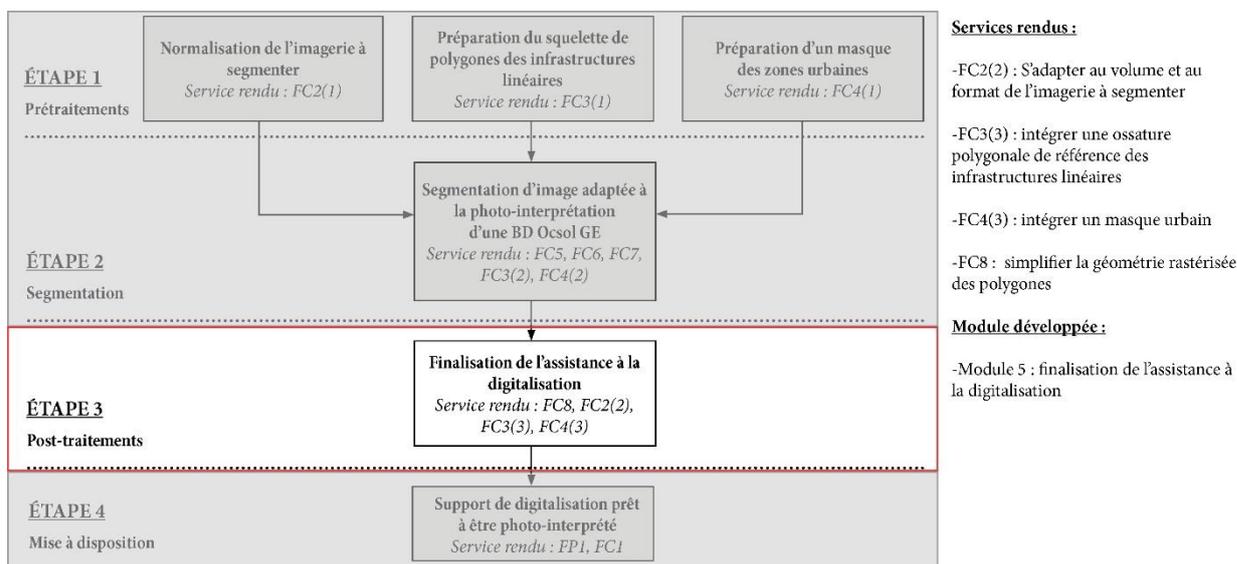


Figure 106. Rappel de la méthodologie générale et de l'étape de finalisation de l'assistance à la digitalisation

7.1 FC2(2) : s'adapter au volume et au format de l'imagerie à segmenter : assemblage des segmentations tuilées

La finalisation de l'assistance à la digitalisation fait intervenir une nouvelle fois la fonction de contrainte FC2 (FC2(2)). Elle décline une fonction technique (FT₂₄) nécessaire pour opérer au réassemblage des tuiles de segmentation pour former un seul et unique fichier SIG de segmentation. La fonction technique est appelée uniquement dans le cadre d'un traitement sur un gros volume de données (> 4 Go). Pour notre étude, la solution technique développée est appliquée seulement pour le territoire de la Métropole Nice Côte d'Azur.

7.1.1 Ordonnancement des fonctions techniques liées à la FC2(2)

Le diagramme FAST dédié à l'assemblage des segmentations tuilées exprime la FT₂₄ elle-même déclinée selon trois FT (FT₂₄₁, FT₂₄₂ et FT₂₄₃). Elles sont toutes traduites par une solution technique basée sur le langage SQL (PostGIS) (*Figure 107*).

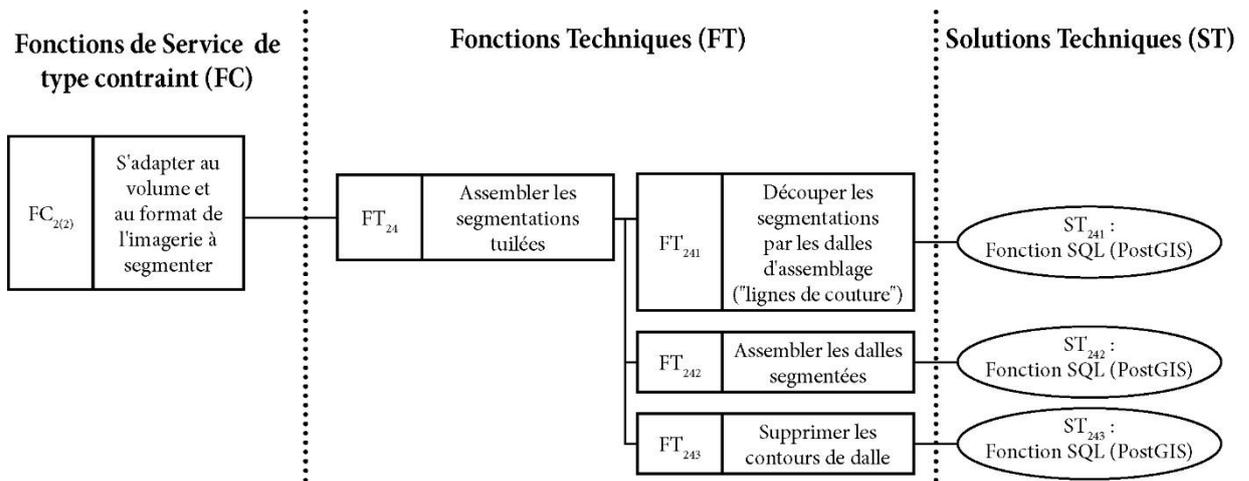


Figure 107. Ordonnancement (FAST) des fonctions techniques liées à la fonction de service FC₂₍₂₎ associées une segmentation menée sur un gros volume de données

7.1.2 ST₂₄₁ : découper les segmentations par les dalles d'assemblage

La solution technique associée à la FT₂₄₁ exerce un découpage de chaque tuile segmentée selon une ligne passant par le milieu de la zone de chevauchement des tuiles (Figure 108). La justification de cette première action technique est introduite dans la section 5.1.5 dédiée à la FT₂₃ : tuiler l'image. Le résultat obtenu permet de supprimer l'effet de bord lié à la création d'objet « instable » en bordure d'image. En sortie de la solution technique, il existe autant de fichiers de segmentation qu'en entrée. Ces nouveaux fichiers SIG ne se chevauchent plus et sont seulement contigus.

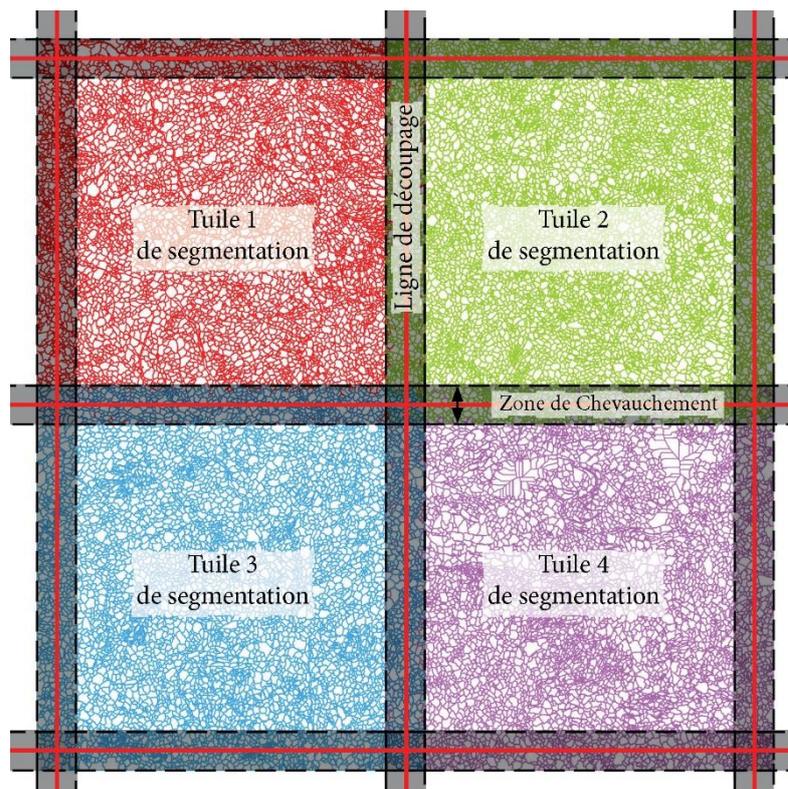


Figure 108. Découpage des tuiles segmentées par la ligne médiane de la zone de chevauchement entre les tuiles

7.1.3 ST_{242} : assembler les dalles segmentées

La seconde action traduite par la ST_{242} consiste à assembler l'ensemble des fichiers de segmentation résultants de la ST_{241} en un seul et même fichier SIG (*Figure 109*).

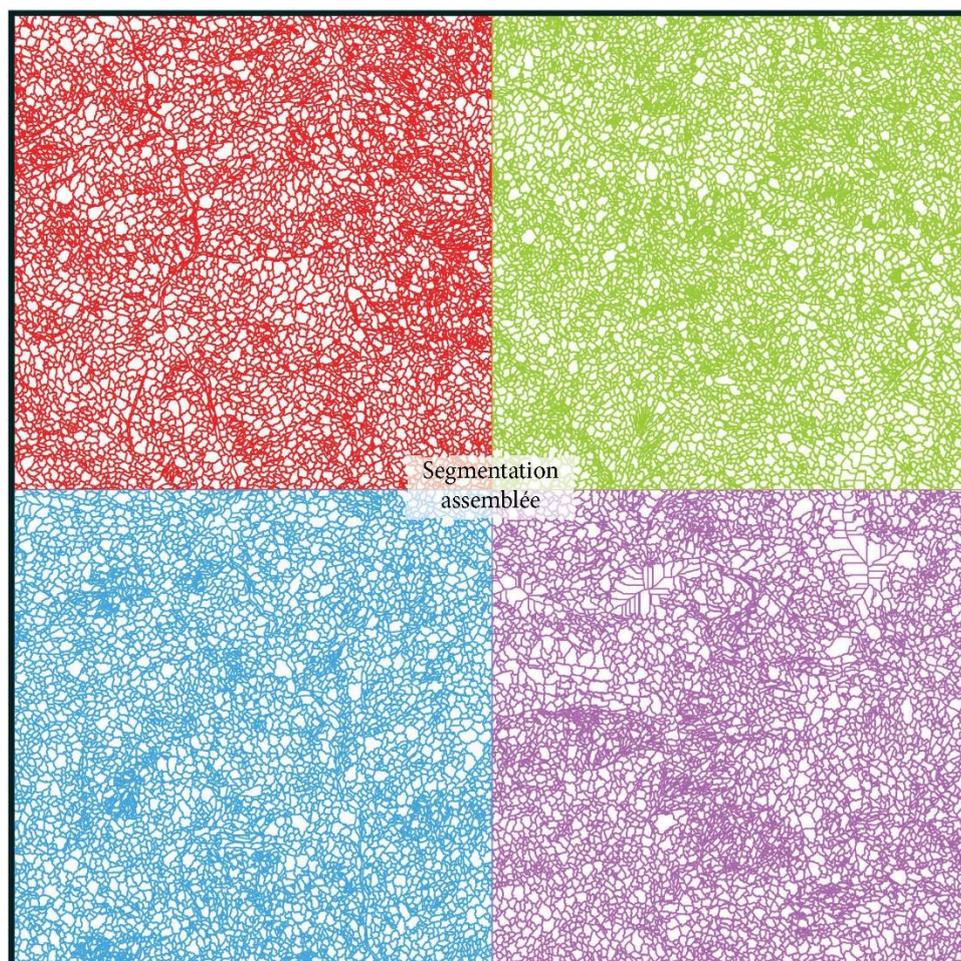


Figure 109. Assemblage des fichiers de segmentation en un seul et même fichier

7.1.4 ST_{243} : supprimer les contours de dalle

L'assemblage des segmentations procédé par la ST_{242} introduit inévitablement un « effet de dalle » à leur jonction. Cet « effet de dalle » est provoqué par les lignes de bord de chaque tuile découpée. Même si les objets de part et d'autre de ces lignes trouvent une bonne correspondance géométrique, cet effet induit, pour le photo-interprète, un travail supplémentaire pour fusionner les objets divisés par la ligne de bord. Même si la fusion manuelle entre les objets divisés par une ligne de bord peut paraître facile et évidente, l'opération peut s'avérer longue et chronophage.

La ST_{243} permet d'identifier tous les objets possédant, dans leur délimitation, une portion construite par la ligne de bord d'une dalle. Ensuite, pour chaque objet identifié, une relation est recherchée avec un objet contigu possédant également une portion de sa délimitation régie par une ligne de bord. Si plusieurs possibilités de fusion sont identifiées pour un même objet, la fusion est opérée avec l'objet partageant le maximum de contacts (*Figure 110*).

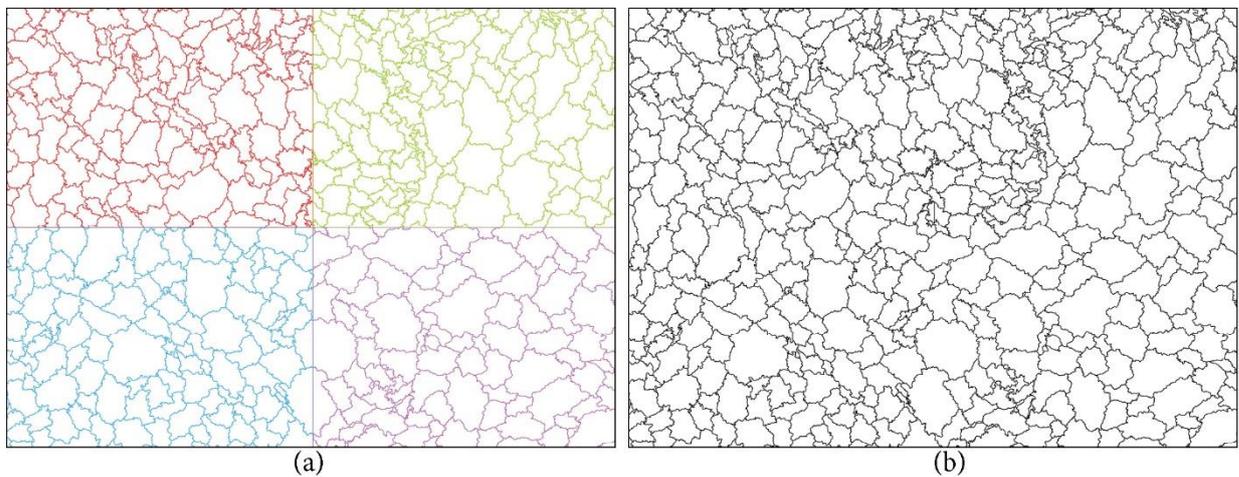


Figure 110. Élimination des contours de dalle (a) par identification et fusion des objets divisés par une ligne de bord (b)

7.2 FC8 : Obtenir une géométrie polygonale cohérente avec l'échelle de photo-interprétation

L'élimination de l'effet pixélisé (ou « *marche d'escalier* ») des polygones issus de la segmentation est essentielle pour finaliser l'assistance à la digitalisation. La délimitation (ou le tracé) des polygones issus de la segmentation d'image doit pouvoir se confondre avec celle éditée manuellement lors de l'exercice de digitalisation.

7.2.1 FT₈₁ : diminuer le nombre de vertex des polygones

L'ordonnancement (FAST) de la FC8 formule une fonction technique nommée FT₈₁ dont l'objectif est de diminuer le nombre de vertex (ou nœuds) des polygones issus de la segmentation (Figure 111). Pour la FT₈₁, nous avons testé plusieurs solutions techniques (algorithmes, outils) que nous présentons brièvement dans cette partie. Nous avons retenu le « *web service* » MapShaper (Harrower et Bloch 2006) comme solution technique (ST₈₁).

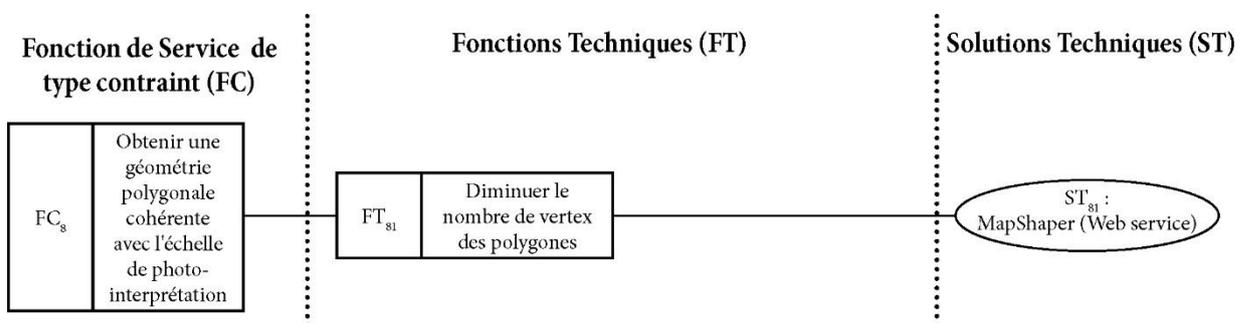


Figure 111. Ordonnancement (FAST) de la fonction de service FC8 associées à l'adaptation de la géométrie des objets avec l'échelle de photo-interprétation

7.2.2 Pourquoi simplifier la géométrie des objets issus de la segmentation d'image ?

Durant le processus de digitalisation sur une image THRS, le photo-interprète applique des règles de saisie régies par une unité minimale de collecte (UMC) qui exprime la superficie

minimale des éléments paysagers à cartographier. De plus, une échelle de saisie est fixée et doit garantir une homogénéité dans le découpage du paysage. De cette manière, on souhaite se prémunir des distances trop courtes entre les vertex d'un polygone. En règle générale, la résolution cartographique d'une digitalisation manuelle d'une image THRS pour la description de l'occupation du sol à grande échelle est métrique (entre 5 m et 10 m). L'objectif est d'atteindre le meilleur compromis pour simplifier la lecture de l'information géographique et conserver un niveau de précision suffisant pour l'utilisateur de la donnée.

À l'inverse, dans une approche de segmentation d'image semi-automatique, la délimitation des objets est totalement liée à la résolution du pixel de l'image. Par conséquent, la forme géographique des objets extraite d'une image THRS est extrêmement complexe (résolution sub-métrique). La segmentation génère un effet de « marches d'escalier » dans la délimitation des objets (Figure 112).

Pour notre cas d'étude, la résolution cartographique produite par un photo-interprète lors d'un exercice de photo-interprétation est inévitablement différente de la résolution de sortie produite par un algorithme de segmentation d'image. Il apparaît donc que le recours à une simplification géométrique de la segmentation d'image est nécessaire pour les faire se ressembler. De plus, la simplification doit permettre de faciliter les échanges et d'améliorer le rendu graphique de la segmentation en diminuant considérablement le nombre de vertex dans le fichier SIG.



Figure 112. Exemple de délimitation des objets dans un procédé de segmentation (a) et lors d'une digitalisation manuelle (b)

7.2.3 La simplification de ligne

La simplification géométrique que nous souhaitons appliquer fait intervenir un algorithme de simplification de ligne. Les algorithmes de simplification de ligne ne sont pas récents (Douglas et Peucker 1973; McMaster 1987). Toutefois ils sont de plus en plus plébiscités, en cartographie, pour adapter l'information géographique issue des données à Très Haute Résolution Spatiale (THRS) vers un rendu cartographique approprié.

Les algorithmes dédiés à cette application peuvent s'appliquer aussi bien sur des polygones que sur des lignes. La simplification de ligne se définit comme une technique de généralisation des formes géométriques. Elle consiste à sélectionner et éliminer les vertex d'une

ligne jugés comme superflus afin de simplifier l'information géographique sans altérer sa forme générale et en conservant un niveau de détail suffisant pour une application donnée.

La simplification de ligne ne doit pas être confondue avec le lissage de ligne. Le lissage de ligne intervient sur l'ensemble des vertex constituant la ligne et calcule des nouveaux sommets selon une tolérance de lissage comme la méthode PAEK, (Polynomial Approximation with Exponential Kernel) ou selon une interpolation (courbe de Bézier). L'objectif du lissage est d'atténuer les angles vifs et d'apporter une qualité esthétique ou cartographique à la forme géométrique (*Figure 113*).

Dans notre cas d'étude, le lissage de ligne ne nous intéresse pas. La cartographie de l'occupation du sol comporte souvent des délimitations cadastrées qui nécessitent un découpage rugueux du paysage. Les changements de direction se font souvent de manière franche ou tranchante. L'application d'un lissage de ligne ferait apparaître un découpage plus flou de l'occupation du sol.

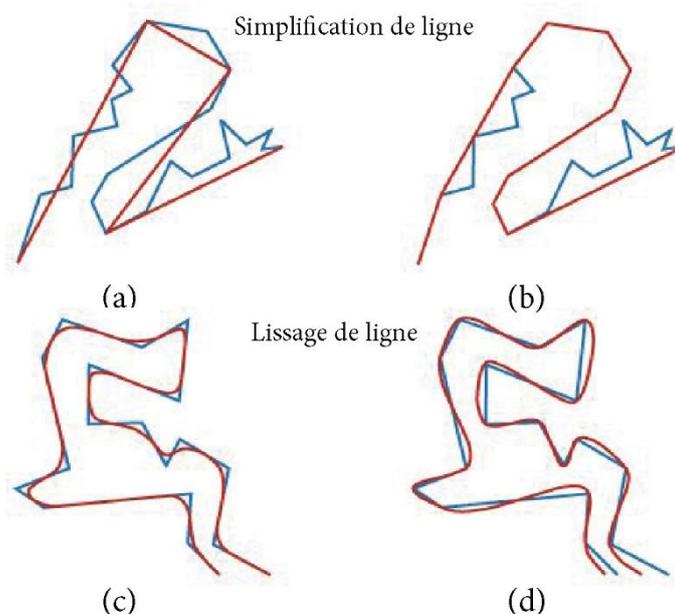


Figure 113. Différence entre la simplification de ligne et le lissage de ligne. (a) simplification selon l'algorithme de Douglas et Peucker (Douglas et Peucker, 1973), (b) simplification à partir d'une analyse des caractéristiques de forme (Wang, 1996), (c) lissage à partir de la méthode PAEK et (d) lissage selon une interpolation de Bézier (illustrations extraites de l'aide en ligne du logiciel ArcGIS®)

7.2.4 Le choix d'un algorithme de simplification de ligne

Depuis 40 ans, la généralisation cartographique occupe une place non négligeable dans les travaux de recherche. Il existe un grand nombre d'algorithmes pour la simplification de ligne (McMaster 1986, 1987; Ormsby et Mackaness 1999; Gökgöz et al. 2015). Nous ne souhaitons pas développer un commentaire sur l'ensemble des algorithmes dans cette partie. Dans le cadre de cette recherche, nous avons testé deux algorithmes de simplification : l'algorithme de Douglas-Peucker et l'algorithme de Visvalinghan-Wyatt. Les performances de ces algorithmes

sont appréciées par une simple implémentation de l'algorithme sur un jeu d'échantillon. Nous relevons la tendance de simplification en fonction du paramétrage de l'algorithme.

7.2.4.1 L'algorithme de Douglas-Peucker

L'algorithme de Douglas-Peucker (DP) (Douglas et Peucker 1973) est le plus répandu chez les cartographes. La raison de son succès repose principalement sur sa rapidité d'exécution. Son fonctionnement est récursif. À l'initialisation, les vertex extrêmes de la ligne sont connectés et forment le segment de tendance. Ensuite, la distance de chaque vertex est mesurée perpendiculairement à la ligne de tendance. Le vertex le plus éloigné du segment de tendance est retenu et devient potentiellement un vertex incontournable de la ligne. Trois cas de figure sont possibles : (1) il n'existe aucun vertex entre les bornes, alors l'algorithme s'arrête ; (2) la distance entre ce vertex et le segment de tendance est inférieure à un seuil spécifique, alors l'ensemble des vertex compris entre les bornes extrêmes est supprimé ; (3) la distance entre ce vertex et le segment de référence est supérieure à un seuil spécifique, cela signifie que la polyligne n'est pas directement simplifiable, par conséquent deux segments de tendance sont créés. Les vertex restants sont mesurés à ces nouveaux segments et le processus itératif se poursuit jusqu'à ce que l'ensemble des vertex inférieur au seuil de tolérance soit éliminé (Figure 114).

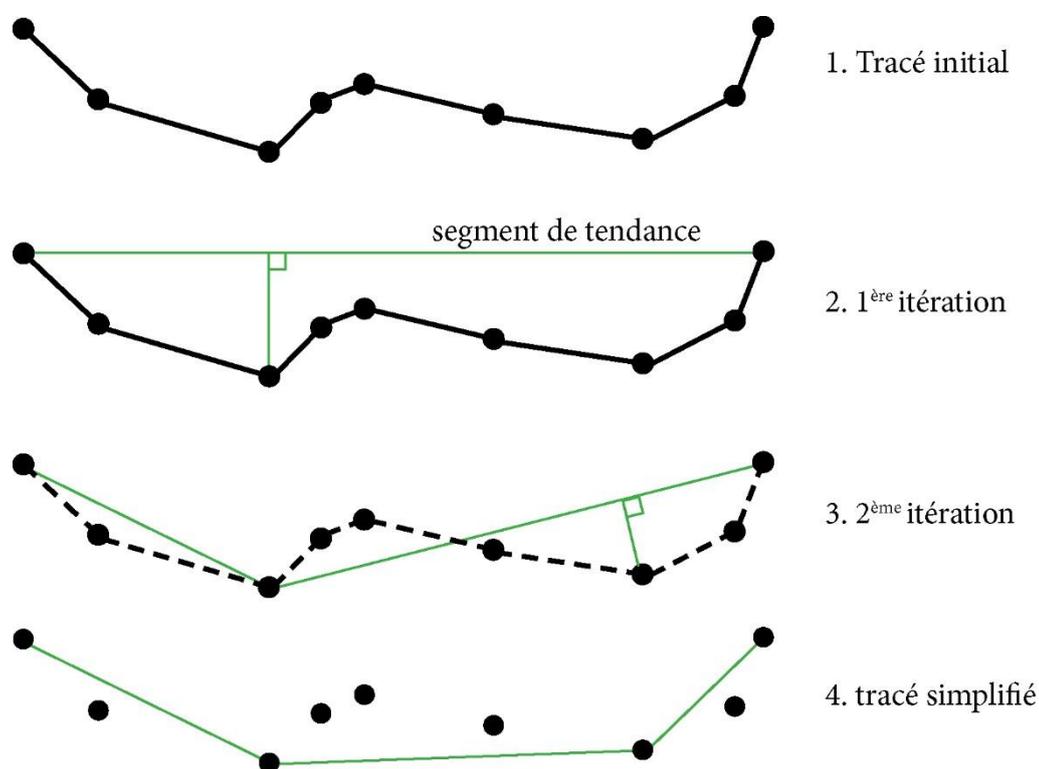


Figure 114. Simplification de ligne à partir de l'algorithme Douglas-Peucker ((Douglas et Peucker 1973))

L'algorithme DP utilise donc le déplacement maximal entre le segment de tendance (ou ligne simplifiée) et la polyligne initiale comme métrique d'erreur. L'élimination des faibles déplacements a pour conséquence de conserver les changements de direction les plus brutaux. Ce phénomène a tendance à provoquer un effet « hérissé » caractérisé par des décrochés inesthétique dans le tracé de la ligne simplifiée. De plus, l'algorithme DP est enclin aux erreurs

topologiques de type auto-intersection (Dutton 1999). Cet inconvénient majeur pour les sorties cartographiques entraîne inévitablement le recours à un post-traitement de correction adapté.

7.2.4.2 L'algorithme de Visvalinghan-Wyatt

L'algorithme Visvalinghan-Wyatt (VW) est moins répandu que l'algorithme de Douglas Peucker. Au lieu d'utiliser le déplacement de ligne comme métrique d'erreur, l'algorithme VW donne pour chaque vertex composant la polyligne une importance pondérée. Ainsi, les vertex qui présentent une faible importance sont éliminés en premier de la polyligne. Dans la première version de l'algorithme VW, l'importance du vertex est uniquement dérivée de la surface du triangle formé avec les deux vertex du voisinage immédiat sur la polyligne. Les vertex extrêmes sont ignorés par l'algorithme mais ils sont conservés pour la construction de la ligne simplifiée. Après chaque élimination de vertex, la surface des triangles est recalculée et le processus est répété jusqu'à atteindre le niveau de simplification désiré (Visvalingam et Whyatt 1993) (Figure 115).

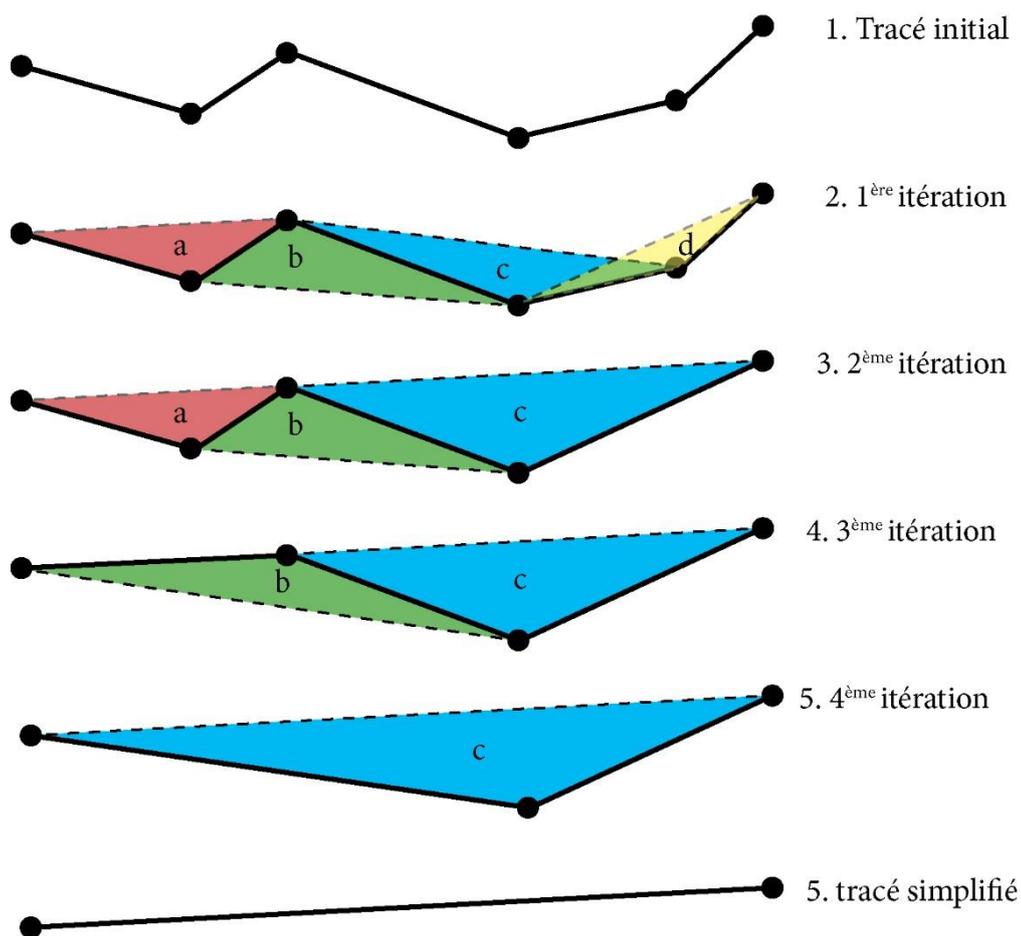


Figure 115. Simplification de ligne à partir de l'algorithme Visvalinghan-Wyatt ((Visvalingam et Whyatt 1993))

Il existe une version modifiée de l'algorithme Visvalinghan-Wyatt (Zhou et Jones 2005). Celle-ci permet d'affiner la pondération des vertex grâce à la combinaison de la surface avec d'autres propriétés des triangles comme la « *platitude* », la « *dissymétrie* » ou la « *convexité* ». Ces nouveaux critères sont facilement dérivables à partir de l'angle formé par les deux segments qui sont adjacents à chaque vertex en dehors des vertex extrêmes. De cette manière, si deux

triangles présentent une même surface, l'élimination pourra s'exercer de préférence en premier sur le triangle avec l'angle le plus aigu. Cette amélioration de l'algorithme VW a pour avantage d'apporter un tracé plus « lisse » à la polyligne comparée à celle produite avec l'algorithme VW standard. Cet effet moins « hérissé » est encore plus remarquable à côté d'une simplification de ligne appliquée avec l'algorithme DP.

Pour les raisons évoquées précédemment, notre choix s'oriente, dans un premier temps, vers l'algorithme Visvalinghan-Wyatt modifié pour notre cas d'étude. L'algorithme VW modifié semble apporter un rendu cartographique plus proche d'une digitalisation manuelle comparé aux autres algorithmes étudiés. Il permet d'éviter les décrochés disgracieux dans la délimitation des polygones. De plus, certains retours d'expérience mettent en avant la capacité remarquable de l'algorithme VW modifié à éliminer un très grand nombre de vertex tout en préservant un niveau de détails suffisants pour une bonne visualisation (Bloch 2014). Cet avantage s'avère d'autant plus intéressant lorsque que l'on traite des fichiers SIG constitués d'un très grand nombre de vertex.

Le choix de l'algorithme VW modifié reste subjectif et ne fait pas l'objet de validation statistique. Toutefois, la décision est fortement liée au choix et à l'expérimentation des outils disponibles et capables d'implémenter des algorithmes de simplification de ligne.

7.2.5 Le choix d'un outil : MapShaper

Il existe de nombreux outils (logiciels SIG, librairies) permettant l'implémentation d'algorithmes de simplification de ligne. La majorité de ces outils utilise l'algorithme Douglas-Peucker comme méthode de simplification (outil « *Simplifier des lignes* » dans le logiciel ArcGIS® ; outil « *Simplifier la géométrie* » dans le logiciel QGIS ; fonction « *ST_Simplify* » dans le langage PostGIS). Malgré une offre importante de solutions techniques, la généralisation cartographique reste, pour de nombreux producteurs de cartes, un processus extrêmement gourmand en temps de calcul et nécessite d'y associer une chaîne de traitements complexes pour corriger les problèmes topologiques (Harrower et Bloch 2006).

La simplification de ligne est d'abord une question topologique. La plupart des producteurs de cartes utilise le format shapefile comme unique format de fichier vectoriel pour la représentation cartographique. Or le format shapefile n'est pas un format de données topologiques. Les relations spatiales entre les polygones et les polygones ne sont pas encodées par le format shapefile. Ce constat est également vrai pour le format GeoJSON couramment utilisé pour les applications cartographiques sur internet. Par conséquent, l'application d'un algorithme de simplification de ligne sur un fichier SIG encodé en shapefile entraîne inévitablement un grand nombre de problèmes topologiques (*Figure 116*).

L'information topologique de la couche SIG à simplifier est donc impérative pour effectuer une simplification de ligne cohérente. Cependant, avec cette information, le temps de calcul de la simplification de ligne peut être considérablement alourdi lors du traitement d'un fichier vectoriel volumineux (polygones ou polygones). Il s'agit d'une contrainte technique importante pour notre développement. Souvent, nous sommes confrontés à devoir traiter des couches SIG composées d'un très grand nombre de vertex (*Tableau 19*).

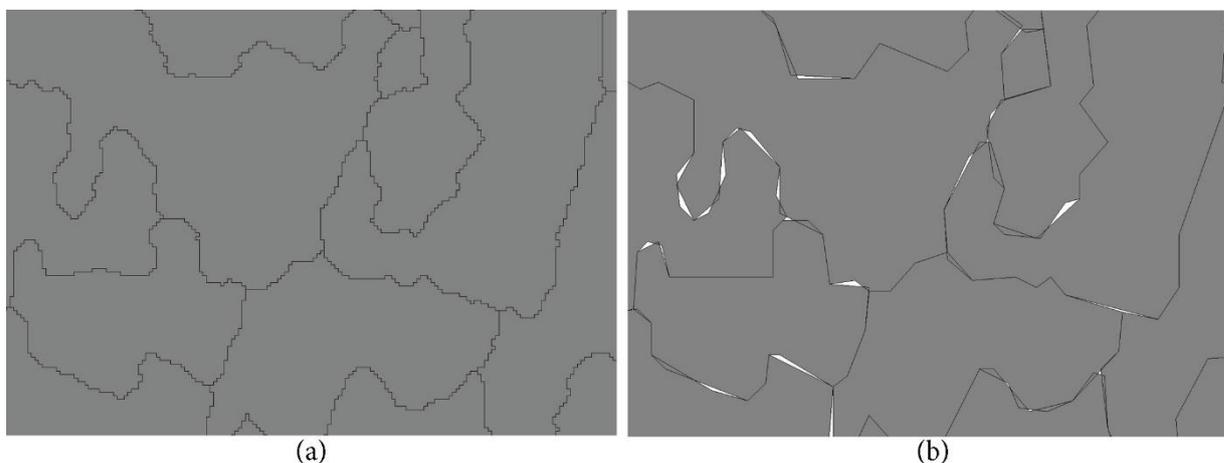


Figure 116. Impact d'un algorithme de simplification de ligne sur un fichier SIG non topologique : (a) fichier SIG de polygones à simplifier en format shapefile, (b) erreurs topologiques (trous, superpositions) liées à l'application de l'algorithme de simplification de ligne (ici, Douglas-Peucker)

Tableau 19. Nombre de vertex composant les fichiers SIG de segmentation devant subir une simplification de ligne pour les trois cas d'étude

	Projet de PNR de l'Aubrac	Métropole Nice Côte d'Azur	Durance, Luberon, Verdon Agglomération
Nombre de vertex	16 960 475	55 364 832	19 930 895

Lors de la recherche d'une solution technique, nous avons écarté les solutions issues des logiciels commerciaux comme ArcGIS®, MapInfo®, ERDAS® ou encore eCognition®. Nous voulons éviter une nouvelle contrainte de licence d'utilisation pour notre développement. De plus, les solutions techniques, apportées par ces logiciels, ne nous paraît pas convaincante pour notre besoin de simplification géométrique. L'application de post-traitements topologiques complexe et/ou le traitement de gros volume de données nous incite à rechercher une solution technique alternative.

Nous avons expérimenté une première solution technique basée sur la fonction « *ST_Simplify* » intégrée dans le langage PostGIS. Cette fonction utilise l'algorithme Douglas-Peucker. Elle permet d'exercer une simplification de ligne topologiquement cohérente et relativement rapide si elle est appliquée sur une donnée d'entrée dont l'information topologique est renseignée. Il est donc nécessaire d'associer la fonction « *toTopoGeom* » pour convertir la géométrie de la donnée en « *TopoGeometry* » (Santilli 2012). Cependant, nous avons constaté que cette étape de conversion pouvait s'avérer extrêmement longue sur une donnée d'entrée volumineuse. Pour le moment, cet inconvénient nous semble rédhibitoire pour répondre à notre besoin. Nous ne disposons pas des ressources informatiques nécessaires pour utiliser cette solution de façon efficace.

Les contraintes liées à la rapidité d'exécution des algorithmes et à la conformité topologique des données SIG en sortie font l'objet d'un effort de recherche important pour le développement de la cartographie en ligne. Les services web à la demande tel que Google Maps®, Bing Maps® ou encore Open Street Maps® ont pour exigence d'assurer un affichage fluide des cartes

(Burghardt, Neun, et Weibel 2005). Pour cette raison, nous avons décidé d'exploiter un service web nommé MapShaper comme solution technique.

MapShaper est un service web libre relativement peu connu des cartographes. Les producteurs de cartes peuvent y trouver un moyen facile de généraliser leurs données cartographiques (Harrower et Bloch 2006). MapShaper propose les trois algorithmes de simplification de ligne que nous avons étudiés précédemment : Douglas-Peucker (DP), Visvalingham-Wyatt (VW) et Visvalingham-Wyatt modifié (VWm). De plus, Mapshaper propose un certain nombre d'avantages par rapport aux logiciels commerciaux courants : il propose une interface graphique. De cette manière, il est possible d'ajuster le niveau de généralisation et de voir les changements presque instantanément ; Mapshaper construit automatiquement la topologie des polygones avant l'implémentation de l'algorithme ; enfin, il permet à l'utilisateur de revenir à un niveau de généralisation précédemment testé à l'aide d'un curseur d'ajustement.

L'atout de Mapshaper est en grande partie lié à la puissance de calcul qu'il fournit. Il utilise des technologies web avancées lui permettant d'assurer le transfert, le stockage et le calcul sur des données SIG même volumineuses. Le principe de fonctionnement de MapShaper implique plusieurs tâches de calcul intensif. L'une d'elles consiste à convertir le fichier d'entrée vers un modèle de données topologiques. Mapshaper détecte les limites partagées des polygones et convertit cette information en lignes vectorielles simples. Les détails de l'algorithme de conversion sont disponibles sur demande auprès des développeurs du service web. Cette tâche est habituellement longue lorsqu'elle est exécutée sur un poste informatique aux caractéristiques techniques courantes (client léger). Avec Mapshaper, la conversion est réalisée en quelques secondes même sur des données shapefile volumineuses.

De plus Mapshaper nous permet de comparer facilement les performances des trois algorithmes de simplification qu'elle propose. L'ajustement du niveau de généralisation est synthétisé par un pourcentage de vertex à retenir pour simplifier les polygones. La *Figure 117* illustre un test de comparaison entre les algorithmes DP et VWm. Ces deux algorithmes doivent théoriquement fournir des rendus cartographiques plus éloignés que s'ils avaient été comparés avec l'algorithme VW standard. Trois niveaux de simplification ont été testés. La simplification est expérimentée en retenant successivement 30%, 10% et 5% de vertex dans la construction du fichier de polygones. Les résultats montrent que la différence entre les rendus cartographiques n'est pas extraordinairement importante. Toutefois, pour les niveaux de simplification à 5% et 10% cette différence est plus marquée. L'algorithme DP produit un découpage plus saillant contrairement à l'algorithme VWm. Ce dernier permet d'obtenir un rendu cartographique plus lisse. Ce test de comparaison confirme le choix de l'algorithme VWm pour notre application.

Le choix d'un niveau de généralisation reste subjectif. Nous n'avons pas réalisé de test comparatif entre un découpage polygonal réalisé par une digitalisation manuelle et plusieurs niveaux de simplification produits par l'algorithme VWm. Le choix d'un pourcentage de vertex à retenir plus qu'un autre n'est pas figé. Toutefois nous nous accordons à préconiser une simplification qui éliminerait entre 90 et 95% des vertex du fichier de segmentation initial. Ce niveau nous paraît correct et permet de conserver un niveau de détail suffisant pour la pratique de la photo-interprétation.

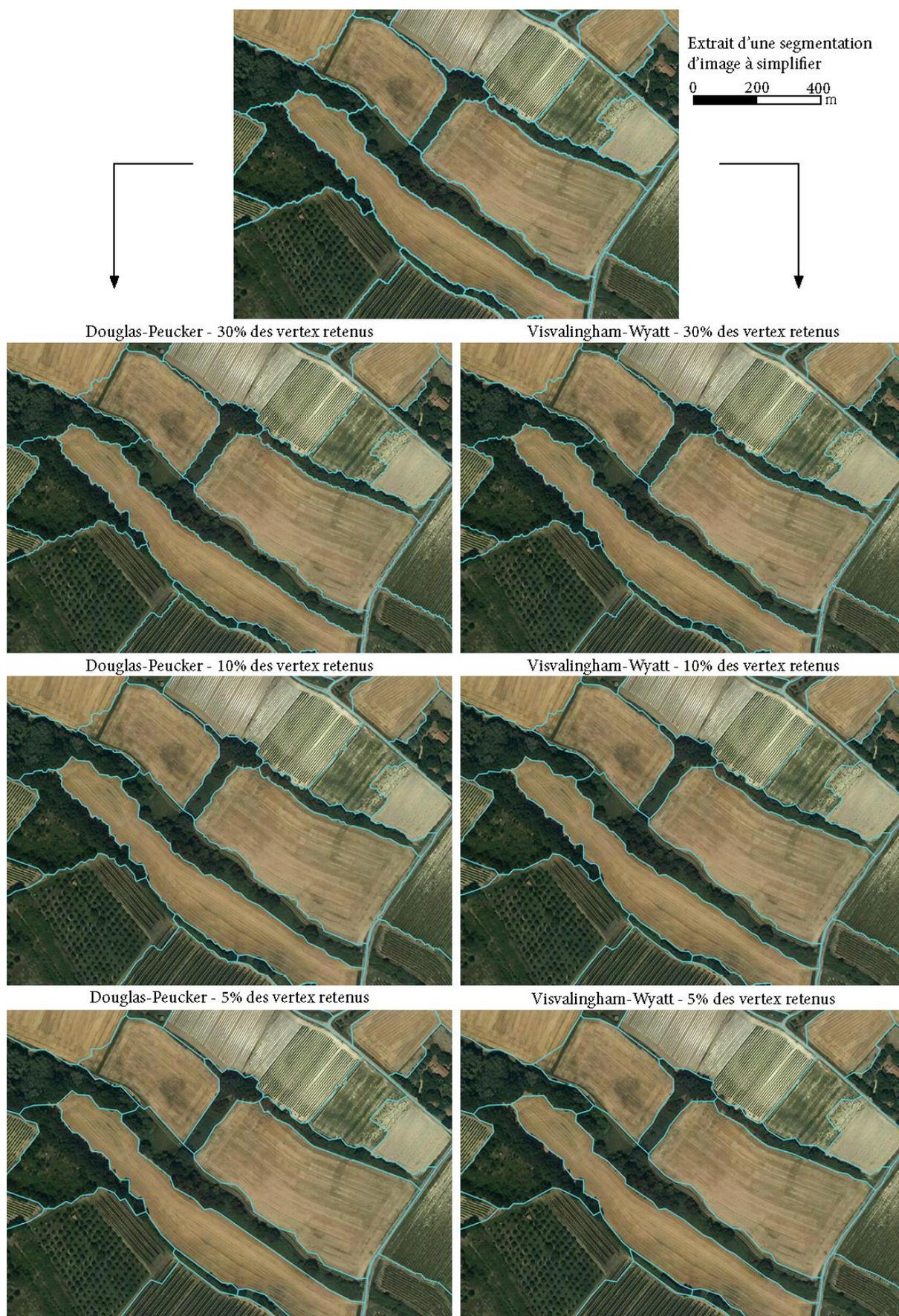


Figure 117. Test comparatif des performances de deux algorithmes de simplification de ligne (Douglas-Peucker et Visvalingham-Wyatt modifié) mené avec MapShaper selon trois niveaux de généralisation.

7.3 FC3(3) et FC4(3) : intégration du ou des vecteur(s) de référence géométrique

Les fonctions de contraintes FC3 et FC4 interviennent dans la phase de finalisation de l'assistance à la digitalisation. Il s'agit de l'ultime étape dans l'élaboration de l'assistance à la digitalisation. Dans cette phase, la segmentation est mise à jour par le ou les vecteur(s) de référence géométrique. L'objectif est de garantir la délimitation originale de ce ou ces vecteur(s) perdue durant la phase de segmentation (*section 6.2.3.2*).

7.3.1 Ordonnancement des fonctions

L'ordonnancement des fonctions (FAST) dédié à l'intégration du ou des vecteur(s) de référence géométrique associe la FC3(3) et la FC4(3) (*Figure 118*). Elles sont traduites selon une fonction technique similaire visant à conserver la géométrie de ces vecteurs. Les solutions techniques associées sont développées de la même manière à partir d'une fonction SQL (PostGIS).

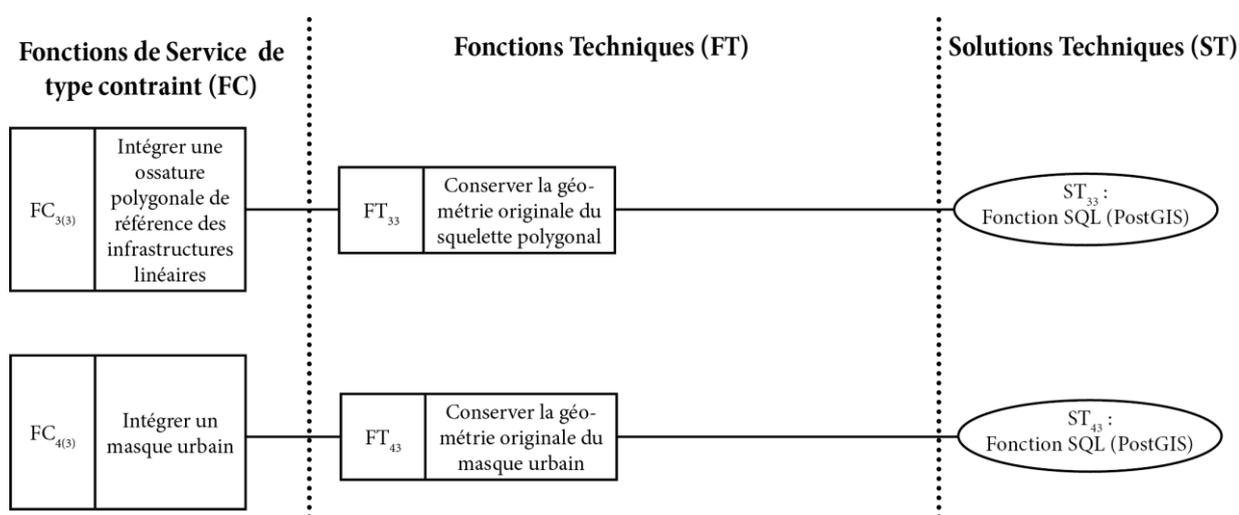


Figure 118. Diagramme FAST des fonctions de service FC3(3) et FC4(3)

7.3.2 FT33 et FT43 : mise à jour de la segmentation

Pour rappel, lors de l'étape 2 de segmentation à l'aide du logiciel eCognition®, nous avons procédé à un premier post-traitement morphologique (érosion) sur les objets de la segmentation appartenant à l'ossature polygonale de référence (réseaux routiers et ferroviaires, enveloppe urbaine, etc.) (*section 6.2.3.2*). Cette opération morphologique vise à préparer la réintégration du ou des vecteur(s) de référence composant cette ossature polygonale dans la construction de la BD ocsol GE afin de garantir leur rôle de référence géométrique.

À la suite de la simplification géométrique de la segmentation menée avec MapShaper (ST₈₁), les ST₃₃ et ST₄₃ opèrent une mise à jour de la segmentation par l'ossature polygonale de référence constituée, dans nos cas d'étude, des infrastructures linéaires (routes, voies ferrées, canaux) et/ou de l'enveloppe urbaine (*Figure 119*).

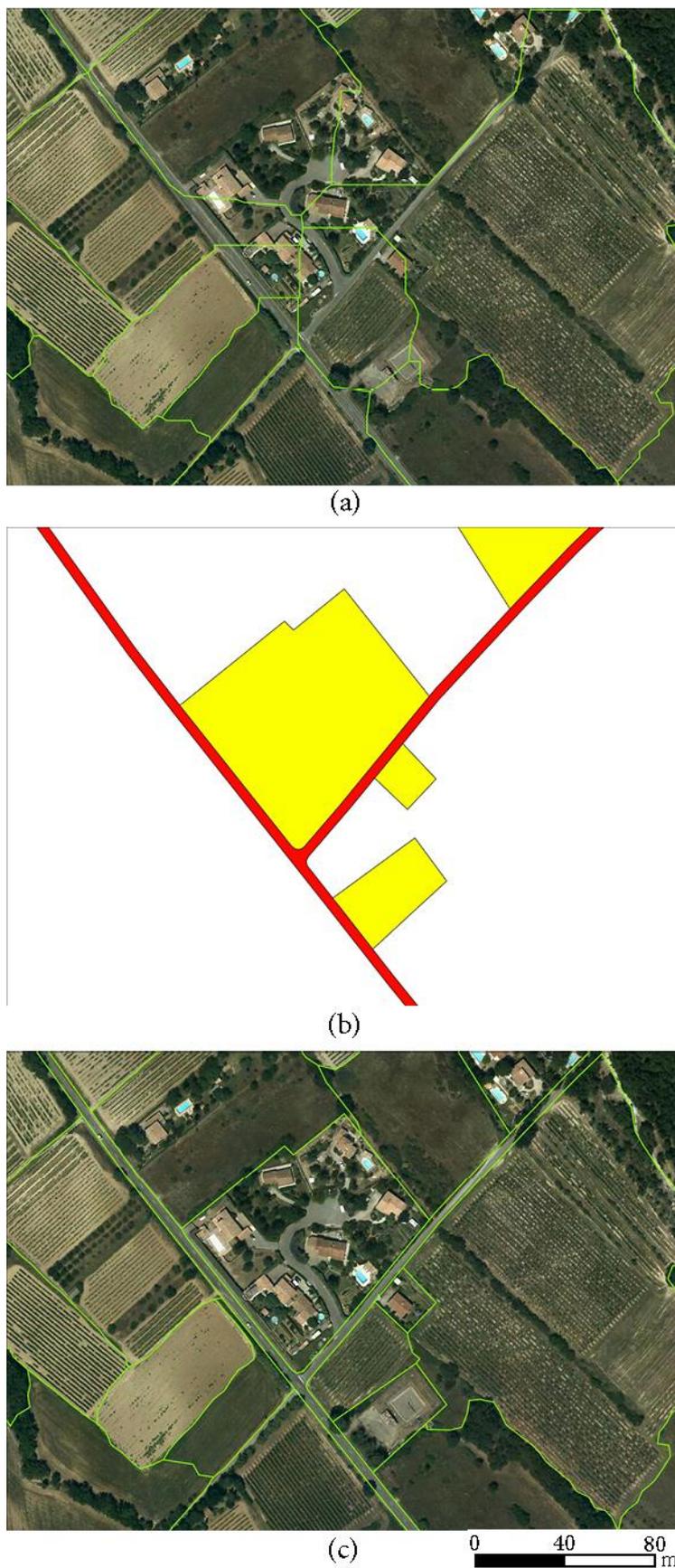


Figure 119. Mise à jour (c) de la segmentation (a) par l'ossature polygonale de référence (b)

7.4 Module 5 : finalisation de l'assistance à la digitalisation

Parmi les trois opérations nécessaires à la finalisation de l'assistance à la segmentation, seulement deux sont intégrées au **module 5**. Il s'agit de **l'assemblage des segmentations tuilées** dans le cadre d'un traitement sur un gros volume de données (ST₂₄₁, ST₂₄₂, ST₂₄₃) et de **la mise à jour de la segmentation à partir du ou des vecteur(s) de référence** (ST₃₃ et ST₄₃). **La diminution du nombre de vertex** structurant les objets de la segmentation (FT₈₁) est appliquée avec la solution technique extérieure MapShaper.

Les scripts d'exécution du module 5 sont détaillés en annexe ([Annexe G](#)). Pour des raisons de secret d'affaires, il est possible que le présent document ne soit pas délivré avec cette annexe.

Le dossier racine du module 5 inclut deux dossiers (*Figure 120*). Le premier est dédié aux données d'entrée. Le second réceptionne les données de sortie. Le module 5 se paramètre et s'exécute à partir d'un même fichier SQL.

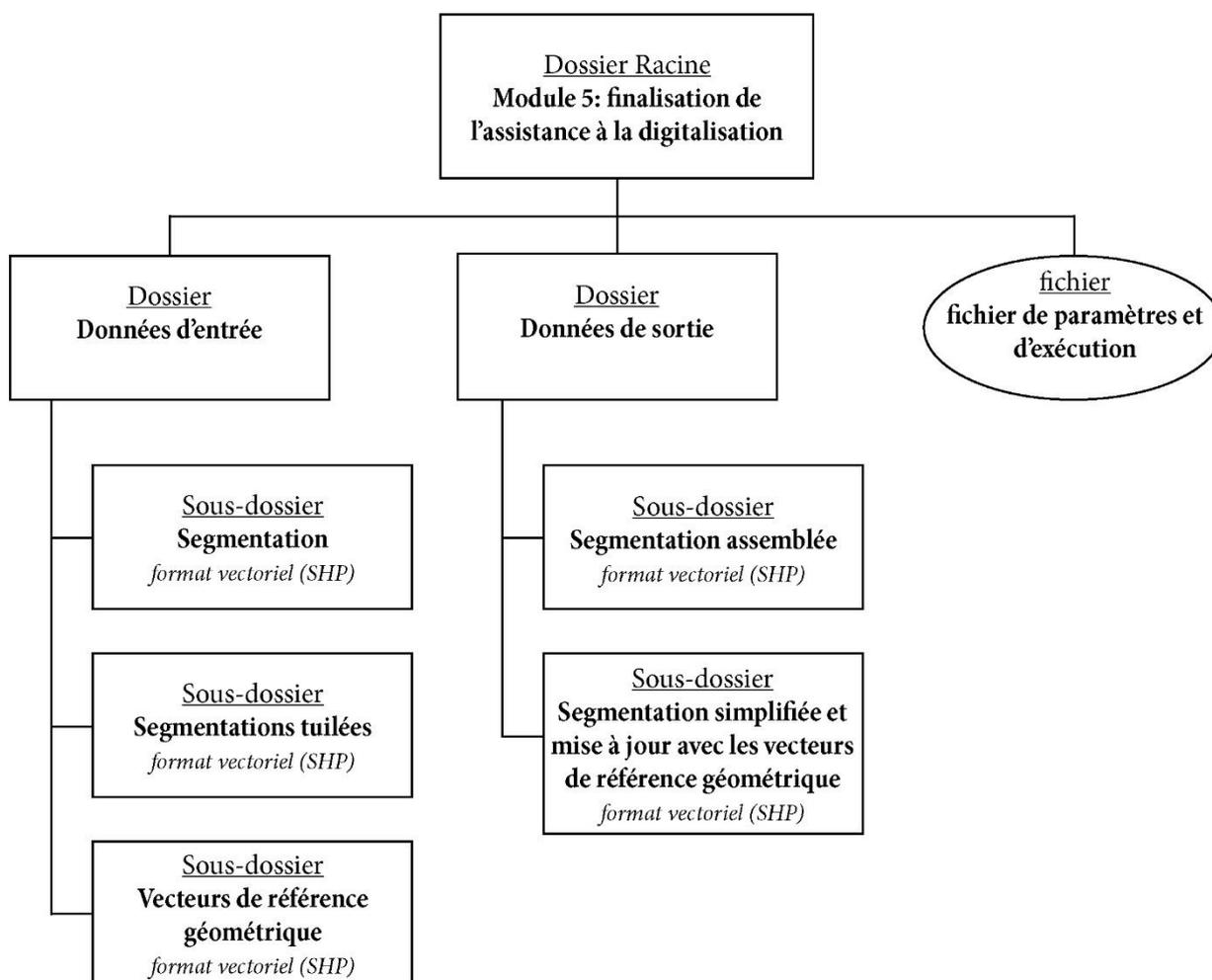


Figure 120. Structuration du module 5 consacré à la finalisation de l'assistance à la digitalisation

7.5 Conclusion sur les post-traitements

Le module 5 apporte les derniers post-traitements à la segmentation d'image et permet ainsi de finaliser l'assistance à la digitalisation. Trois tâches sont appliquées ici : l'assemblage des segmentations tuilées ; la mise à jour de la segmentation à partir du ou des vecteur(s) de référence ; et l'adaptation de la géométrie des objets segmentés avec l'échelle de photo-interprétation.

Les deux premières nécessitent un faible niveau d'expertise. Elles n'exigent pas de paramétrage engageant la subjectivité de l'utilisateur. Par contre, la troisième tâche intervient sur le nombre de nœuds (vertex) contenus dans la segmentation. Elle implique une démarche « *trial-and-error* » pour déterminer le meilleur seuil d'élimination des nœuds en fonction des objectifs cartographiques. Cette étape engage inévitablement la responsabilité de l'utilisateur. De plus, la simplification est réalisée à l'aide de la solution MapShaper, extérieure au module. Le choix de cet outil est lié à sa performance inégale pour notre besoin spécifique. Nous regrettons de ne pas pouvoir l'incorporer, pour le moment, dans le module 5.

7.6 Illustrations des apports de l'assistance à la digitalisation sur les 3 cas d'étude

Le module 5 conclut l'achèvement de l'assistance à la digitalisation. À ce stade, le photo-interprète dispose d'un prédécoupage du paysage sur la zone d'étude traitée qu'il peut utiliser comme support de photo-interprétation. Nous analysons l'apport de la segmentation à travers différentes étapes : la qualité du découpage issu de l'assistance, l'éventuel redécoupage du photo-interprète et l'identification des objets (*Figures 121 à 124*). Cette analyse rend compte des principales difficultés et/ou lacunes de la segmentation observées en fonction du territoire traité. Malheureusement, en l'absence de référentiel du découpage et de l'identification des différentes BD Ocsol GE, nous ne pouvons procéder pour chaque cas d'étude, à une validation chiffrée de la qualité du prédécoupage, comme on procède traditionnellement en télédétection à l'aide de parcelles de réalité terrain. Pour pallier à ce manque, le chapitre suivant est justement dédié à une analyse comparative avancée entre cette nouvelle façon de produire par photo-interprétation à l'aide d'une assistance à la digitalisation et une production par photo-interprétation sans cette assistance sur des secteurs test.

Le projet de PNR de l'Aubrac fut le premier territoire à faire l'objet des premiers travaux applicatifs de l'assistance à la digitalisation. Le territoire rural de l'Aubrac imagé par le capteur RapidEye® se caractérise par un paysage fortement contrasté. Le résultat du prédécoupage montre une réaction prononcée de la segmentation aux changements d'humidité des sols et aux effets de la gestion prairiale et forestière de la zone d'étude (fauches, coupes, agroforesterie...) (*Figure 121 (a)*). Le photo-interprète a été confronté à l'interprétation d'objets tentaculaires de grandes superficies surdécoupant le paysage. Dans ce cas, son action s'est essentiellement cantonnée à la fusion d'objets. Cependant, le prédécoupage apporte en grande partie les délimitations des objets d'intérêt pour la nomenclature. Ceux-ci ont été conservés par le photo-interprète (*Figure 121 (b)*). L'interprétation du paysage aubracien s'est révélée compliquée. Les forts contrastes de celui-ci et la faible résolution de l'imagerie RapidEye (5 m) ont fortement engagé la subjectivité du photo-interprète. De fait, le prédécoupage a été d'une aide certaine pour

tendre à diminuer les partis pris du photo-interprète dans le découpage du paysage (Figure 121 (c)).

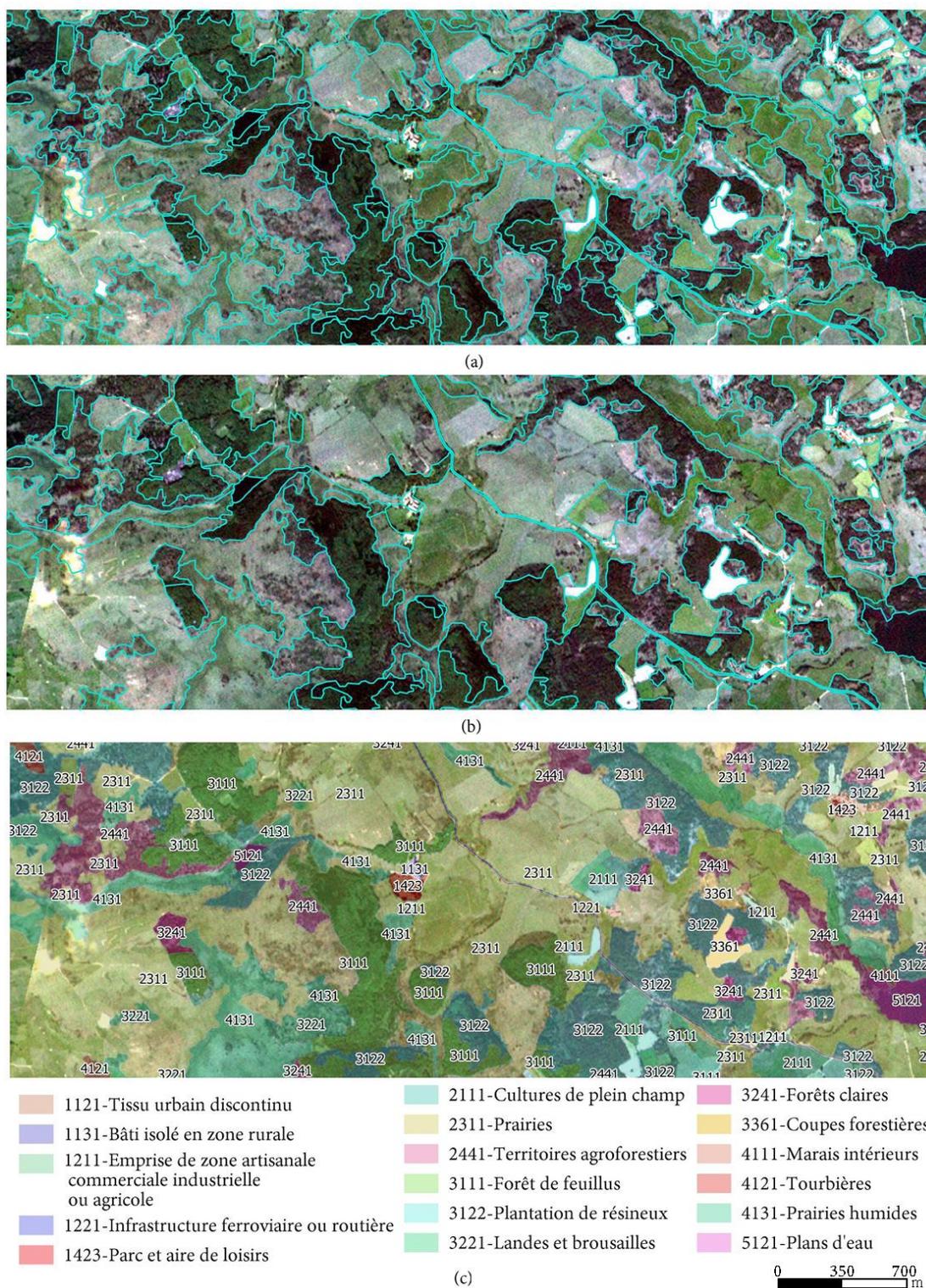


Figure 121. Exemple extrait du PNR de l'Aubrac : (a) Prédécoupage issu de l'assistance, (b) reprises manuelles du prédécoupage opérées par le photo-interprète et (c) identification de l'occupation du sol

La cartographie du territoire de la Métropole Nice Côte d'Azur, composé de paysages très différents, nous a permis de développer l'outil dans des contextes paysagiques variés, allant des espaces fortement urbanisés à la haute montagne.

Les paysages de haute-montagne de la Métropole se caractérisent par des versants recouverts d'importants massifs forestiers et de larges étendues herbacées et rocailleuses, où s'intercalent des fonds de vallée étroits occupés par un parcellaire plus petit et complexe. Le résultat du prédécoupage de ces profils paysagers montre logiquement une sursegmentation des grandes étendues homogènes de la haute montagne et une difficulté à discriminer les entités de petite taille des fonds de vallée (*Figure 122 (a)*). Le photo-interprète a alors appliqué une action simple et rapide de fusion des espaces homogènes. Cependant celui-ci a dépensé plus de temps pour préciser les délimitations parcellaires des fonds de vallée. De plus, le photo-interprète a procédé à une numérisation coûteuse en temps des bâtis isolés sur les versants (*Figure 122 (b et c)*). Ces bâtiments de très faible emprise n'ont pas été inclus dans l'élaboration de l'enveloppe urbaine. Ils n'auraient, dans tous les cas, pas été détectés par la segmentation telle qu'elle a été paramétrée globalement pour ce paysage. Cette limite constitue un retour d'expérience à considérer pour les futures applications du prédécoupage.

L'efficacité de la photo-interprétation des espaces fortement urbanisés de la Métropole est conditionnée par la performance de l'élaboration de l'enveloppe urbaine et du squelette des infrastructures linéaires (*Figure 123 (a)*). Le photo-interprète se repose largement sur la délimitation de ces zones pour réaliser sa tâche. Toutefois, malgré cette aide, il lui reste encore un travail important à mener pour extraire les éléments paysagers naturels ou semi-naturels de taille conséquente compris dans l'enveloppe urbaine, en particulier dans les espaces péri-urbains (*Figure 123 (b)*). L'interprétation des secteurs urbanisés est cependant fortement simplifiée par l'apport du prédécoupage (*Figure 123 (c)*).

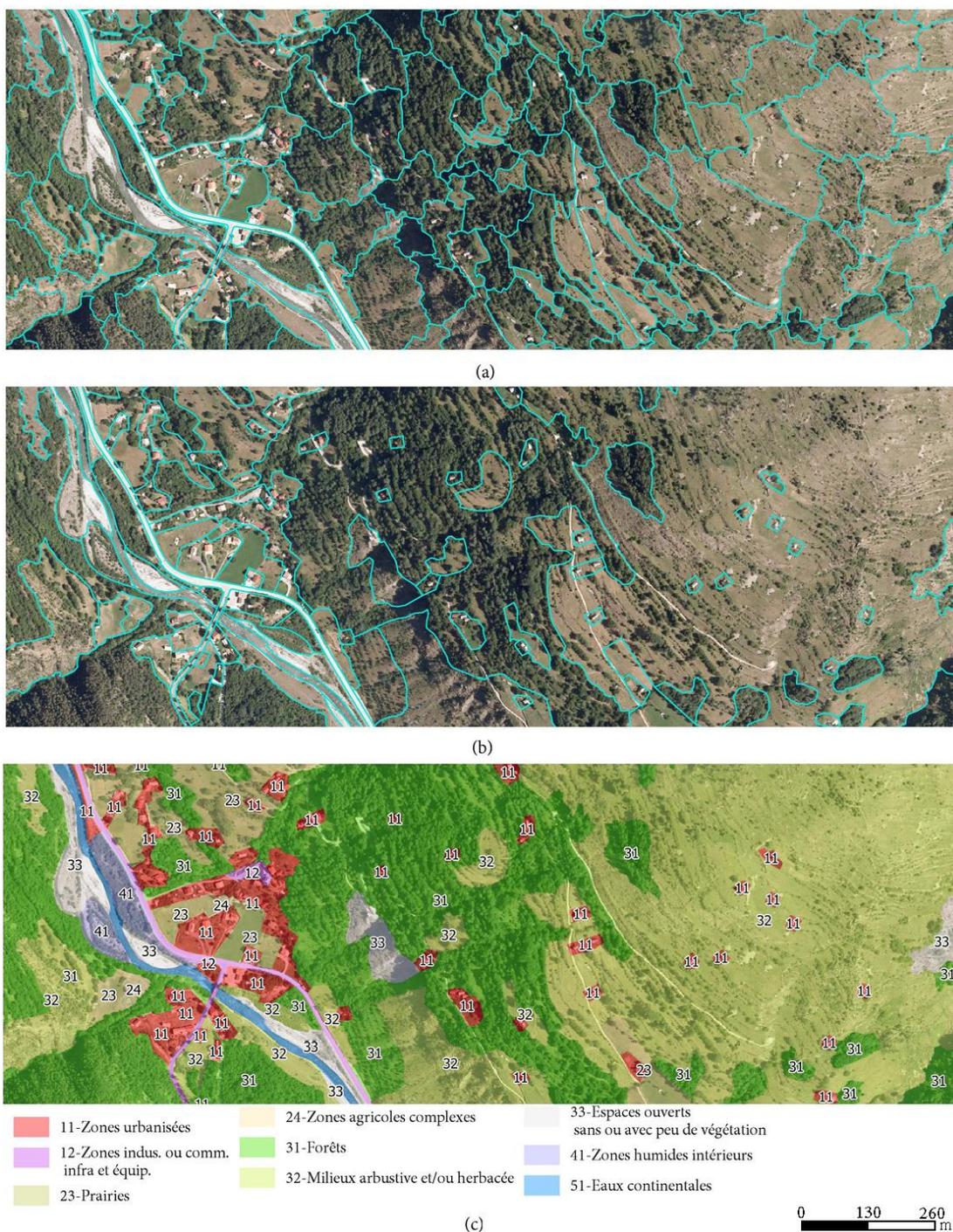


Figure 122. Extrait des Résultats (a) du prédécoupage obtenue avec l'assistance, (b) des reprises manuelles opérées par le photo-interprète et (c) l'identification de l'occupation du sol sur une zone de haute montagne du territoire de la Métropole Nice Côte d'Azur

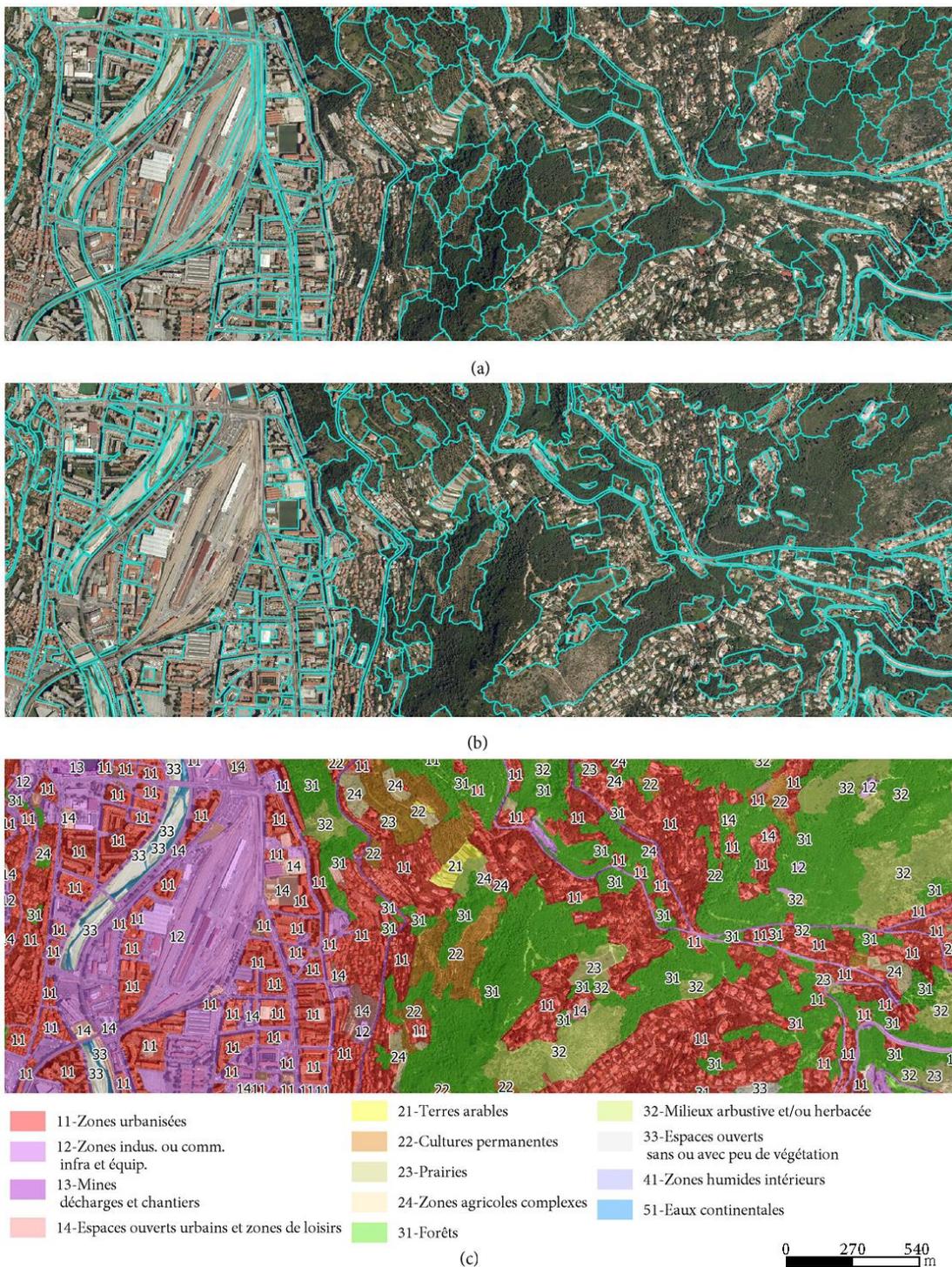


Figure 123. Extrait des Résultats (a) du prédécoupage obtenue avec l'assistance, (b) des reprises manuelles opérées par le photo-interprète et (c) l'identification de l'occupation du sol sur une zone urbanisée de l'agglomération nîçoise

La dernière application de l'assistance sur le territoire de la communauté d'agglomération de Manosque (DLVA) a permis de consolider les acquis obtenus par l'expérience de la Métropole Nice Côte d'Azur, en particulier sur les secteurs urbanisés et les grands espaces forestiers. Cependant le territoire de la DLVA se caractérise également par une activité agricole intensive qui occupe une grande superficie du territoire. L'orthophotographie mise à disposition pour la prestation date de juillet 2010. Ce paramètre est important pour l'aide à la photo-interprétation des paysages agricoles. Sur le territoire d'étude, les cultures présentent, à ce moment de l'année, un faible contraste. Même si l'œil humain distingue facilement les changements de cultures et la logique parcellaire de ces espaces, le prédécoupage apporte un résultat inégal (*Figure 124 (a)*). De plus, la performance de l'algorithme de segmentation est perturbée par les nuances intra-parcellaires, ce qui ne lui permet pas de restituer les limites des parcelles agricoles avec fiabilité. Afin d'améliorer le résultat du prédécoupage, nous avons incorporé les limites des chemins agricoles représentés dans la BD TOPO® de l'IGN (section 6.2.3.2). Ces chemins sont généralement des frontières entre les parcelles agricoles. Malgré tout, le photo-interprète est confronté à un travail de correction conséquent nécessitant parfois de reprendre totalement la délimitation d'une parcelle (*Figure 124 (b)*). Cette difficulté est également accentuée par le fait que deux parcelles contigües aux caractéristiques de teinte et de texture différentes peuvent être parfois une même culture à des stades de croissance différents (*Figure 124 (c)*). Cela s'observe en particulier pour les parcelles de lavandins sur le secteur de la DLVA. Nous notons ici la difficulté d'obtenir un prédécoupage satisfaisant du parcellaire agricole imputable à la fois, à la qualité de l'image et aux caractéristiques du système agricole étudié.

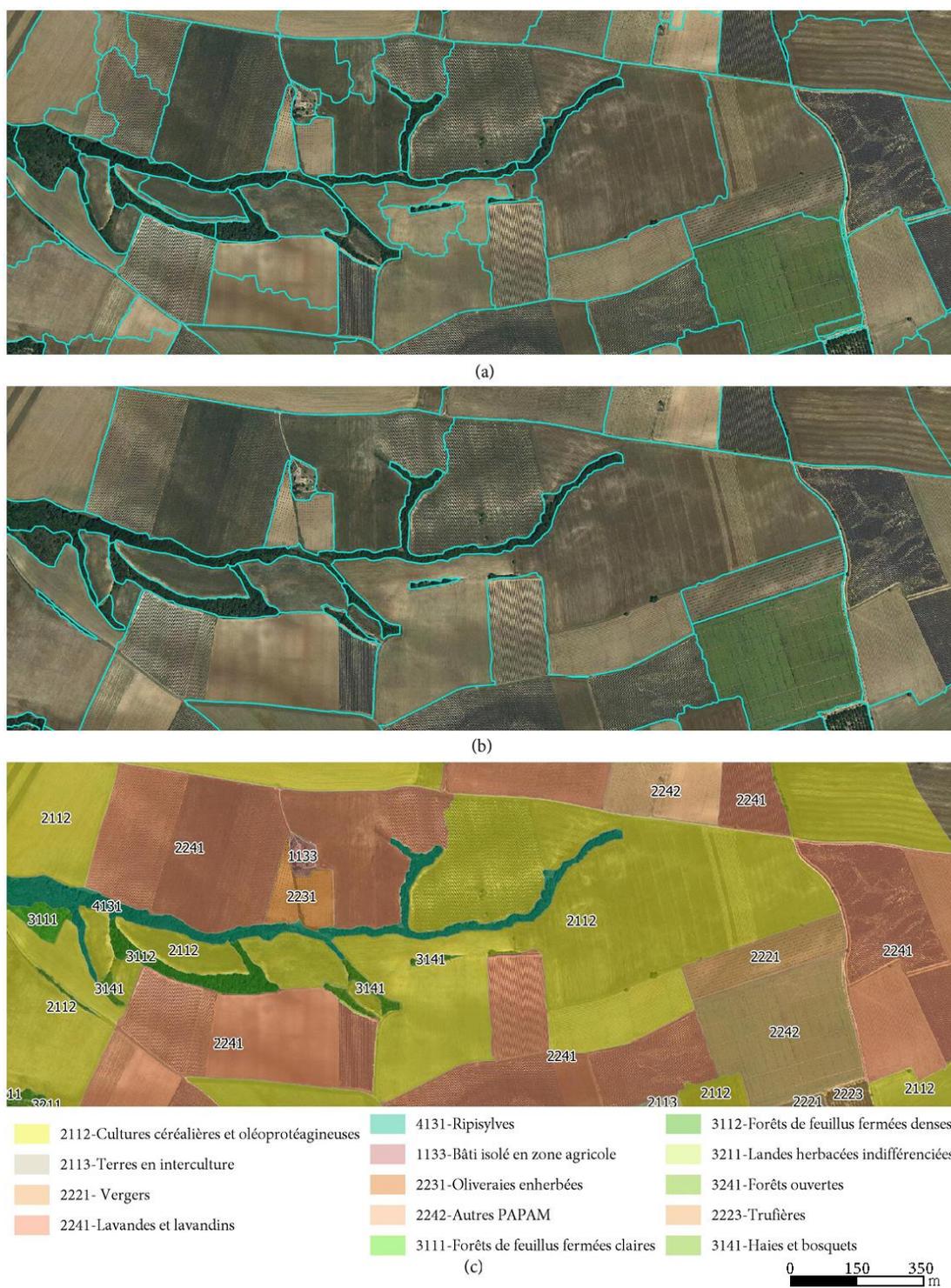


Figure 124. Extrait des Résultats (a) du prédécoupage obtenue avec l'assistance, (b) des reprises manuelles opérées par le photo-interprète et (c) l'identification de l'occupation du sol sur un secteur d'agriculture intense sur la communauté d'agglomération de Manosque (DLVA)

Conclusion de la deuxième partie

Cette deuxième partie, méthodologique, décrit l'approche développée pour l'élaboration d'une assistance à la digitalisation à partir d'une segmentation d'image. Cette assistance se traduit par un prédécoupage du paysage visant à alléger l'exercice de photo-interprétation. L'analyse fonctionnelle du besoin, réalisée dans le chapitre 4, a permis de mettre en évidence l'ensemble des fonctions qu'une assistance de ce type devait apporter à la production régulière de BD Ocsol GE. Le prédécoupage doit alors :

- faciliter la production de la BD Ocsol GE ;
- être ergonomique et simple à utiliser par le photo-interprète
- s'adapter au volume et au format de l'imagerie à segmenter ;
- intégrer une ossature polygonale de référence (infrastructures linéaires) ;
- intégrer un masque urbain (ou autres) ;
- être paramétré pour obtenir une légère sur-segmentation ;
- respecter l'unité minimale de cartographie ;
- généraliser la forme des polygones ;
- obtenir une géométrie polygonale cohérente avec l'échelle de photo-interprétation.

La méthodologie générale mise en place est construite à partir de ce diagnostic et s'articule en quatre grandes étapes : les prétraitements nécessaires aux données sur lesquelles porte la segmentation ; le processus de segmentation de l'image ; les post-traitements de la segmentation pour finaliser la construction de l'assistance à la digitalisation. ; et la mise à disposition du support de digitalisation au photo-interprète.

Les solutions techniques développées répondent à la volonté de construire un outil adapté aux exigences et variables diverses des productions régulières de BD Ocsol GE. Il s'agit de proposer des solutions techniques spécifiques et indépendantes. Pour y répondre, le processus est articulé sur cinq modules emboîtés et indépendants (*Tableau 20*).

La segmentation d'image développée dans cette partie, doit maintenant être validé et discuté. Nous tenterons également, d'évaluer les gains de productivité qu'elle génère sur la pratique de la photo-interprétation.

Tableau 20. Tableau de synthèse des tâches accomplies dans la méthodologie générale et des modules associés

	Tâches	Modules associés
Les Prétraitements des données nécessaires à la réalisation d'une segmentation d'image	<ol style="list-style-type: none"> 1. Formatage de l'imagerie à segmenter 2. Élaboration d'un squelette polygonal des infrastructures linéaires (routes, voies ferrées) 3. Élaboration d'une enveloppe urbaine 	<p>Module 1 Module 2 Module 3</p>
La segmentation d'image	<ol style="list-style-type: none"> 1. l'intégration du ou des vecteur(s) de référence géométrique devant servir à contraindre la segmentation 2. paramétrage de l'algorithme de segmentation « <i>multi-resolution</i> » 3. correction des objets de superficie inférieure à une consigne cartographique 4. ajustement de la compacité des objets générés par la segmentation. 5. l'exportation du résultat de la segmentation en format vectoriel de type polygone 	<p>Module 4</p>
Les Post-traitements nécessaires à la segmentation	<ol style="list-style-type: none"> 1. assemblage des segmentations effectuées sur des tuiles d'images dans le cadre du traitement d'un gros volume de données 2. la diminution du nombre de nœuds (ou vertex) structurant la segmentation afin de la rendre cohérente avec l'échelle de photo-interprétation ; 3. mise à jour de la segmentation par le ou les vecteur(s) de référence géométrique 	<p>Module 5 + Webservice : Mapshaper</p>

Troisième partie :
**Productivité de la photo-interprétation
assistée par segmentation d'image**

Introduction

Cette troisième partie est consacrée à la validation et au bilan de la méthode de production proposée. Nous analysons les points forts et les limites d'une assistance par segmentation d'image pour l'exercice de photo-interprétation d'une BD Ocsol GE.

Dans un premier temps, une analyse comparative de deux méthodes de cartographie de l'occupation du sol : l'une basée sur une démarche de photo-interprétation entièrement manuelle et la seconde basée sur une photo-interprétation assistée en amont par une segmentation numérique est commentée au chapitre 8. Les gains apportés par la segmentation d'image, en termes de temps et de qualité de production, sont analysés de manière qualitative et quantitative.

Le chapitre 9 apporte une discussion approfondie sur cette nouvelle manière de numériser l'occupation du sol par photo-interprétation. Nous abordons les limites techniques de l'assistance à la digitalisation et ses conséquences sur la production régulière de BD Ocsol GE. Cette discussion est étayée par le témoignage de divers utilisateurs de BD Ocsol GE.

Photo-interprétation avec et sans assistance à la digitalisation, comparaison de deux approches de production d'une BD Ocsol GE

Sommaire

8.1	Le protocole de l'expérimentation	234
8.2	Préparation de la photo-interprétation.....	238
	8.2.1 Photo-interprétation sans assistance.....	238
	8.2.2 Photo-interprétation avec assistance.....	240
8.3	Critères d'évaluation.....	245
	8.3.1 Appréciation visuelle de la qualité de production	245
	8.3.2 Test du Kappa	245
	8.3.3 Métriques de Hoover.....	245
	8.3.4 Nombre d'objets cartographiés.....	246
	8.3.5 Temps de production.....	246
8.4	Résultats.....	246
	8.4.1 Analyse visuelle des productions cartographiques.....	246
	8.4.2 Ressenti des photo-interprètes.....	248
	8.4.3 Test du Kappa	248
	8.4.4 Métriques de Hoover.....	249
	8.4.5 Nombre d'objets cartographiés.....	250
	8.4.6 Analyse comparative des temps de production.....	251
8.5	Discussion sur l'expérimentation.....	253

L'étape 4 de la méthodologie générale pour la réalisation d'une assistance à la digitalisation correspond au déploiement de cette dernière pour l'exercice de photo-interprétation. Deux fonctions de service sont alors attendues : FP1 : faciliter la production d'une BD Ocsol GE ; FC1 : être ergonomique et simple à utiliser (*Figure 125*). Seul le photo-interprète peut rendre compte de ces services. Par conséquent, ce chapitre s'attache à comparer deux approches de production d'une base de données sur l'occupation du sol à grande échelle par photo-interprétation : l'une basée sur une démarche de photo-interprétation entièrement manuelle et la seconde basée sur une photo-interprétation assistée en amont par une segmentation d'image réalisée selon le protocole décrit dans la partie 2. Ces deux méthodes de photo-interprétation sont expérimentées par quatre photo-interprètes experts, sur 4 secteurs test distincts et avec une même nomenclature. Les 4 secteurs test de plusieurs dizaines de kilomètres carrés chacun, représentent des configurations paysagères différentes du territoire de la communauté d'agglomération Durance Luberon Verdon Agglomération (DLVA) en Région PACA (France). Les gains de production potentiels apportés par la segmentation numérique d'image dans la pratique de la photo-interprétation par rapport à une photo-interprétation entièrement manuelle sont ensuite analysés de manière qualitative et à partir de plusieurs indices quantitatifs.

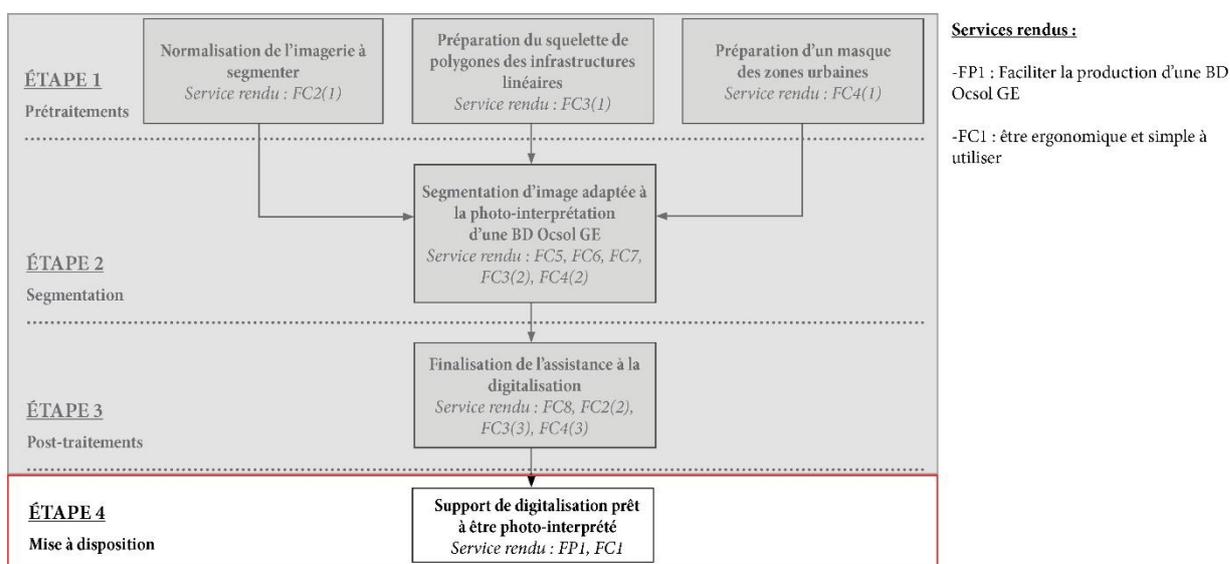


Figure 125. Rappel de la méthodologie générale et de l'ultime étape de mise à disposition de l'assistance à la digitalisation auprès du ou des photo-interprètes

8.1 Le protocole de l'expérimentation

L'expérimentation repose sur la mise en concurrence de deux méthodes pour produire une BD Ocsol GE par photo-interprétation à partir d'une photographie aérienne. La première consiste à réaliser une photo-interprétation « traditionnelle » sans découpage numérique préalable des entités géographiques ; la seconde propose une assistance à la digitalisation via un prédécoupage des entités géographiques issu d'une segmentation d'image. L'assistance à la digitalisation n'exclut pas au photo-interprète d'apporter des modifications sur le tracé des objets. Pour rendre la comparaison de ces deux options méthodologiques la plus crédible possible, le protocole d'expérimentation mobilise quatre photo-interprètes experts avec plusieurs années d'expérience (E1, E2, E3 et E4). Ces quatre spécialistes opèrent avec les deux options méthodologiques. L'expérimentation porte sur le territoire de la communauté d'agglomération Durance, Luberon,

Verdon (DLVA) en région Provence-Alpes-Côte d'Azur (PACA). Ce territoire a pour avantage de présenter des configurations paysagères variées. Quatre zones test (ZT), de même emprise spatiale (environ 10 km²) sont définies. Les ZT1 et ZT2 présentent des paysages fragmentés entre espaces urbains et agricoles. Les ZT3 et ZT4 proposent des paysages forestiers fermés (*Figure 126*).

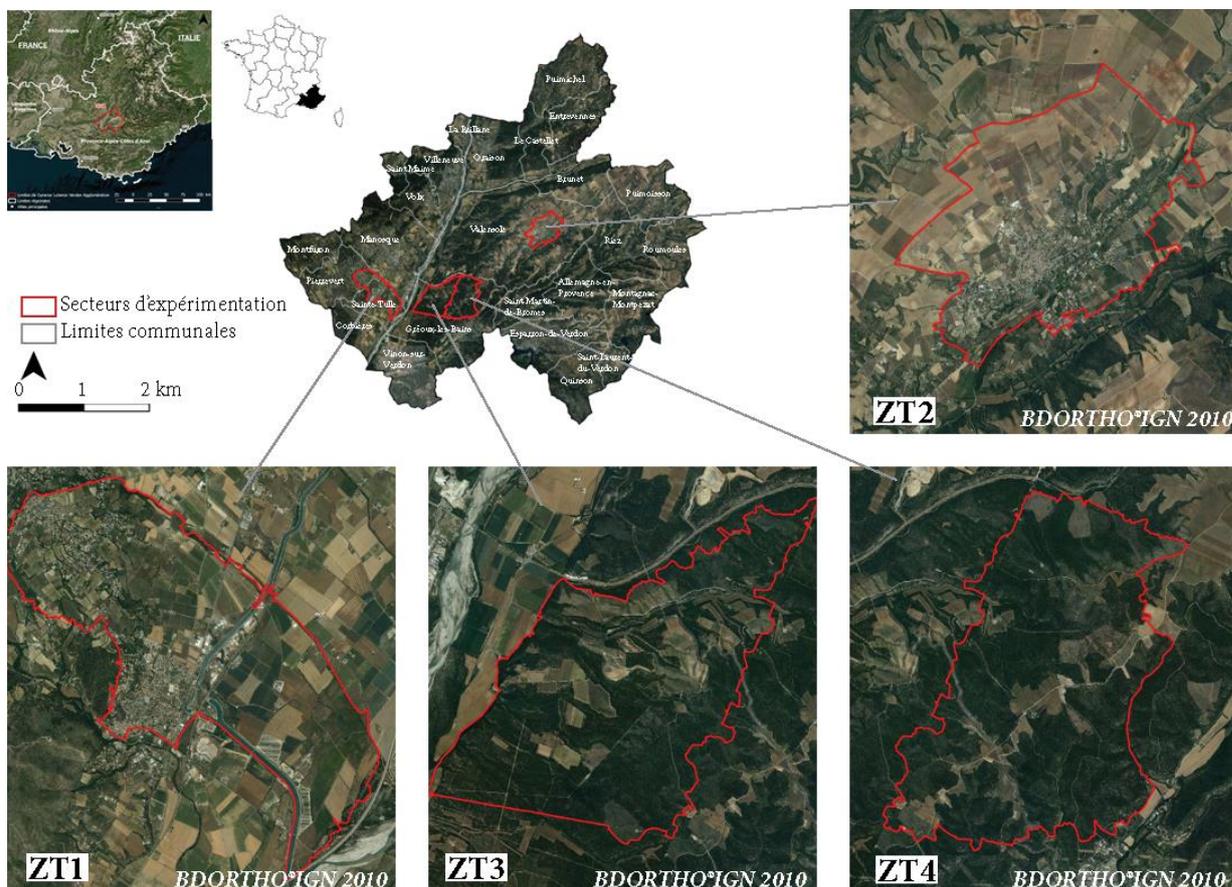


Figure 126. Localisation des 4 secteurs d'expérimentation

La donnée de référence utilisée pour la photo-interprétation est la BD ORTHO® IGN de 2010 à 20 cm de résolution spatiale (*Figure 126*). Les données exogènes mobilisées pour l'aide à l'interprétation sont présentées dans le *Tableau 21*. Les consignes de photo-interprétation portent sur les échelles de restitution de la cartographie, les échelles de numérisation et les différentes règles de saisie des polygones (*Tableau 22*). Enfin, la nomenclature retenue se base sur la nomenclature régionale OCSOL du CRIGE-PACA (Louvét et Ajouc 2014). Elle comporte 5 postes en niveau 1 déclinés en 14 postes de niveau 2, 38 postes de niveau 3 et 79 postes de niveau 4 (*Tableau 23*) L'exercice est pratiqué à l'aide du logiciel ArcGis®. Les quatre experts possèdent une connaissance et une pratique avancée de ce logiciel et de ses fonctions pour l'édition des fichiers SIG.

Tableau 21. Données exogènes mobilisées pour l'aide à la photo-interprétation

Données exogènes	Informations apportées
BD TOPO® IGN	Réseau routier, ferré et surfaces en eau et caractérisation des entités urbaines
SCAN25® IGN	Certains éléments paysagers (carrières, marais, éléments urbains...)
Registre Parcellaire Graphique (RPG)	Nature des productions agricoles
BD FORET® IGN (cartographie forestière en PACA)	Formations végétales (feuillus/conifères/mixtes)
BD OCSOL 2006 (source CRIGE PACA)	Occupation du sol à échelle moyenne
Contour des zones inondables	Ripisylves et forêts rivulaires
Les zonages de zones d'activité (source DLVA)	Secteurs d'activité
Contours des feux de forêts (source ONF-DDT)	Secteurs forestiers en repousse après un incendie
Google Earth®/Google Map® avec le module Street-View® ou Open Street Map	Images THRS complémentaires

Tableau 22. Consignes de saisie pour la photo-interprétation

	Milieu urbain	Milieu agricole et naturel
Échelle de restitution ou d'utilisation de la donnée cartographique	1/5 000 ^e	1/10 000 ^e
Échelle de numérisation des polygones d'occupation du sol	1/2 000 ^e	1/5 000 ^e
Unité Minimale de Collecte (UMC)	De 500 m ² à 2500 m ² selon la classe d'occupation du sol	De 1000 m ² à 2500 m ² selon la classe d'occupation du sol
Largeur Minimale de Cartographie (LMC)	10 m	10 m

L'exercice de cartographie par photo-interprétation selon les deux options méthodologiques est proposé aux quatre photo-interprètes experts selon l'organisation présentée par la *Figure 127*. Chaque zone-test est cartographiée selon les deux options méthodologiques et pour chacune de ces options, par deux photo-interprètes différents. Nous ne souhaitons pas qu'un même expert cartographie une même zone selon les deux méthodes, afin de ne pas influencer la seconde interprétation avec l'expérience acquise lors de la première interprétation. Nous disposons ainsi pour chaque zone-test de quatre essais de cartographie réalisés par quatre photo-interprètes différents.

Tableau 23. Nomenclature retenue pour la description de l'occupation du sol à grande échelle

Niv.1	Niv.2	Niv.3	Niv.4	Niv.1	Niv.2	Niv.3	Niv.4	
1. Espaces artificialisés	11. Zones urbanisées	111. Tissu urbain continu	1111. Tissu urbain compact (1 000 m ²)	2. Territoires agricoles	21. Terres arables	211. Terres arables autres que serres et rizières	2111. Cultures légumières, maraîchères, horticoles, de plein champ (2 500 m ²)	
			1112. Tissu urbain aéré (1 000 m ²)				2112. Cultures céréalières et oléoprotéagineuses (2 500 m ²)	
		112. Tissu urbain discontinu	1121. Bâti individuel dense (1 000 m ²)				221. Vignobles	2211. Vignes (2 500 m ²)
			1122. Bâti individuel lâche (1 000 m ²)			222. Arboriculture autre qu'oliviers	2222. Vergers (2 500 m ²)	
			1123. Bâti individuel dans parc paysager (1 000 m ²)				2223. Pépinières (2 500 m ²)	
			1124. Bâti collectif (1 000 m ²)				2224. Truffières (2 500 m ²)	
			1125. Bâti mixte (1 000 m ²)			223. Oliveraies	2231. Oliveraies (2 500 m ²)	
		113. Espaces de bâti diffus et autres bâtis	1131. Espaces de bâti diffus en zone agricole (500 m ²)				2232. Oliveraies enherbées (2 500 m ²)	
			1132. Espaces de bâti diffus en zone naturelle (500 m ²)			224. PAPAM	2241. Lavandes et lavandins (2 500 m ²)	
			1133. Bâti isolé en zone agricole (500 m ²)				2242. Autres PAPAM (2 500 m ²)	
			1134. Bâti isolé en zone naturelle (500 m ²)				23. Prairies	231. Prairies
			1135. Bâti léger ou informel (500 m ²)			2311. Prairies et jachères (2 500 m ²)		
		12. Zones industrielles ou commerciales, infrastructures et équipements	121. Zones d'activités et d'équipements			1211. Espaces industriels (1 000 m ²)	241.	2411. Cultures annuelles associées aux cultures permanentes (2 500 m ²)
						1212. Espaces commerciaux (1 000 m ²)	242.	2421. Systèmes culturaux mixtes et petits parcellaires complexes (2 500 m ²)
						1213. Espaces d'activité économique (1 000 m ²)	243.	2431. Friches agricoles et délaissés en milieu agricole (2 500 m ²)
	1214. Espaces d'équipements collectifs accueillant du public (1 000 m ²)				244.	2441. Territoires agro-forestiers (2 500 m ²)		
	1215. Espaces d'équipements collectifs n'accueillant pas du public (1 000 m ²)				31. Forêts	311. Forêts de feuillus	3111. Forêts de feuillus fermées claires (2 500 m ²)	
	1216. Équipements eau, électricité, télécom, déchets (1 000 m ²)					312. Forêts de conifères	3121. Forêts de conifères fermées claires (2 500 m ²)	
	Terrains vagues en zones d'activités (1 000 m ²)					313. Forêts mélangées	3131. Forêts mélangées fermées claires (2 500 m ²)	
	122. Réseaux routier et ferroviaire et espaces associés		1221. Réseau routier (1 000 m ²)			314.	3141. Haies et Bosquets (2 500 m ²)	
			1222. Réseau ferroviaire et bâtis associés (1 000 m ²)			32. Milieux à végétation principalement arbustive et/ou herbacé	321. Pel. et pâturages nat. et semi-nat.	3211. Pelouses et landes herbacées indifférenciées (2 500 m ²)
			1223. Gares routières et/ou ferroviaires (1 000 m ²)				322.	3221. Landes subalpines / Landes et broussailles / landes ligneuses (2 500 m ²)
			1224. Parkings (500 m ²)				323. Maquis, garrigues et landes	3231. Formations végétales sclérophylles arbustives semi-ouvertes (2 500 m ²)
	1225. Espaces associés aux réseaux routier ou ferroviaire (2 500 m ²)		324. Forêts et végétations arbustives en mutation				3232. Formations végétales sclérophylles arbustives fermées et arbor. ouv.	
	124. Aéroports				1241. Espaces bâtis aéronautiques (2 500 m ²)		3241. Forêts ouvertes (2 500 m ²)	
					1242. Piste aéronautiques (2 500 m ²)		3242. Jeunes peuplements, coupes rases (2 500 m ²)	
					1243. Espaces associés aux aéroports (2 500 m ²)		3243. Coupes associées aux lignes HT (2 500 m ²)	
	13. Mines, décharges et chantiers	131. Extraction de matériaux	1311. Extraction de matériaux (1 000 m ²)		3244. Autres coupes rases (2 500 m ²)			
		132. Décharges	1321. Décharges (2 500 m ²)		33. Espaces ouverts, sans ou avec peu de végétation			
		133. Chantiers	1331. Chantiers (1 000 m ²)					
	14. Espaces ouverts urbains et zones de loisirs	141. Espaces ouverts urbains	1411. Espaces verts urbains (1 000 m ²)		331. Plages et sables	3311. Plages et sables (2 500 m ²)		
			1412. Places (1 000 m ²)		332. Roches nues	3321. Roches nues (2 500 m ²)		
			1413. Terrains vagues en milieu urbanisé (1 000 m ²)		333.	3331. Végétation clairsemée (2 500 m ²)		
			1414. Cimetières (1 000 m ²)		334.	3341. Zones incendiées (2 500 m ²)		
		142. Équipements sportifs et de loisirs	1421. Espaces bâtis de sports et de loisirs (2 500 m ²)		4. Zones humides	41. Zones humides intérieures	411.	4111. Marais intérieurs (2 500 m ²)
	1422. Espaces ouverts de sports et de loisirs (2 500 m ²)	412.	4121. Ripisylve (2 500 m ²)					
	15. Espaces liés au canal	151. Espaces liés au canal	1511. Espaces végétalisés liés au canal (1 000 m ²)		5. Surfaces en eau	51. Eaux continentales	511.	5111. Cours et voies d'eau (2 500 m ²)
			1512. Espaces artificialisés liés au canal (1 000 m ²)				512.	5121. Plans d'eau (1 000 m ²)

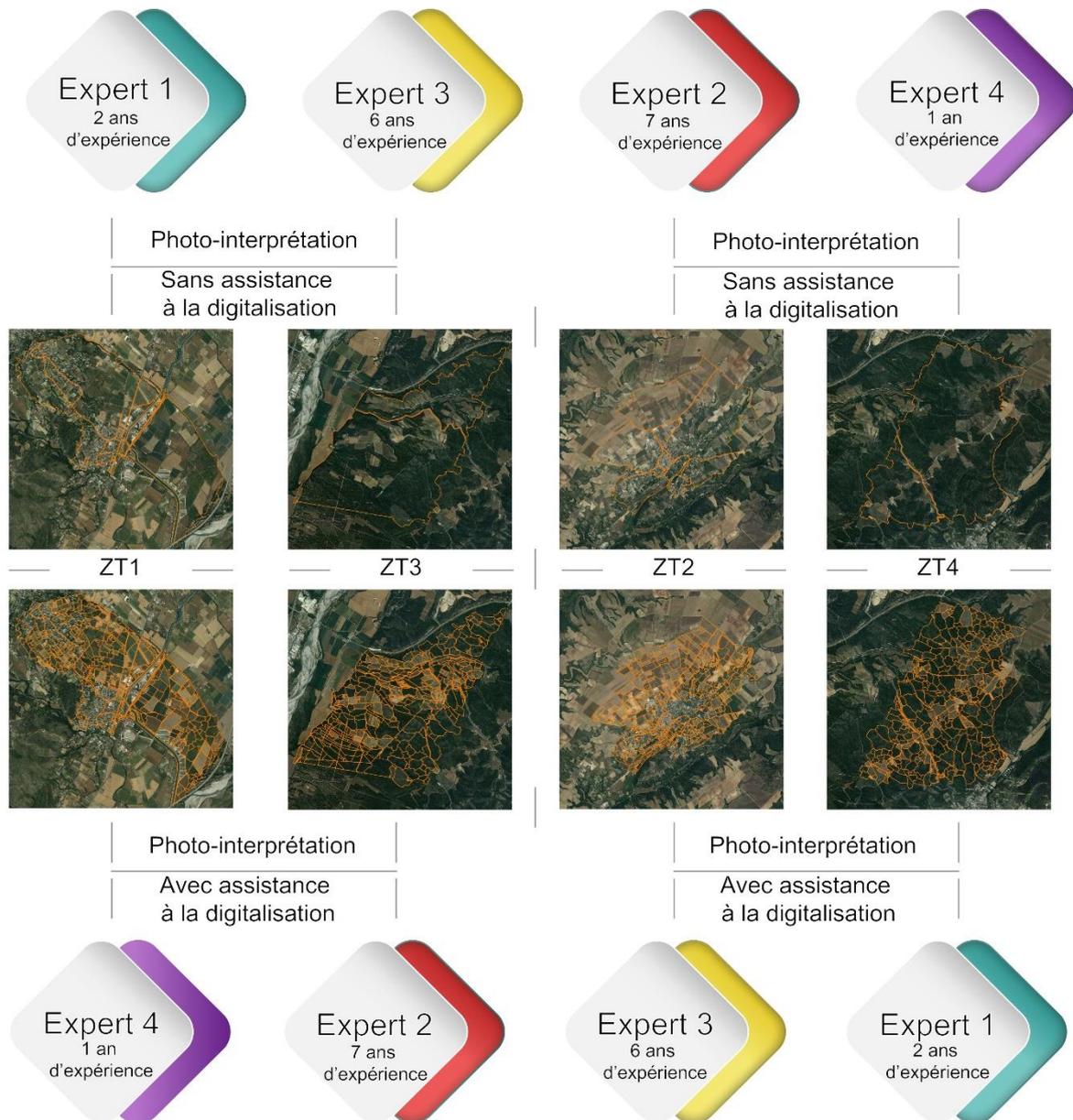


Figure 127. Organisation des productions cartographiques selon les experts et les secteurs d'expérimentation (ZT)

8.2 Préparation de la photo-interprétation

8.2.1 Photo-interprétation sans assistance

Le « *squelette* » de polygones routiers est couramment élaboré lors de la réalisation d'une BD Ocsol GE. Il apporte une structuration spatiale reconnue par tous et facilite la construction de la BD Ocsol GE. En effet, il évite, au photo-interprète, la digitalisation de ces éléments fins et linéaires souvent difficiles à appréhender. Nous considérons que son apport est quasi-systématique pour la production de BD Ocsol GE. Pour cette raison, nous choisissons de mettre à disposition le « *squelette* » des infrastructures linéaires qui reprend le réseau routier majeur des zones d'études sélectionnées pour la photo-interprétation sans assistance (Figure 128). Le « *squelette* » est réalisé à partir du module 2 : élaboration du squelette polygonal des infrastructures linéaires, détaillée dans la section 5.3.2. Son paramétrage est identique pour

l'ensemble des ZT. Il s'agit de l'unique prétraitement apporté pour l'exercice de photo-interprétation sans assistance.

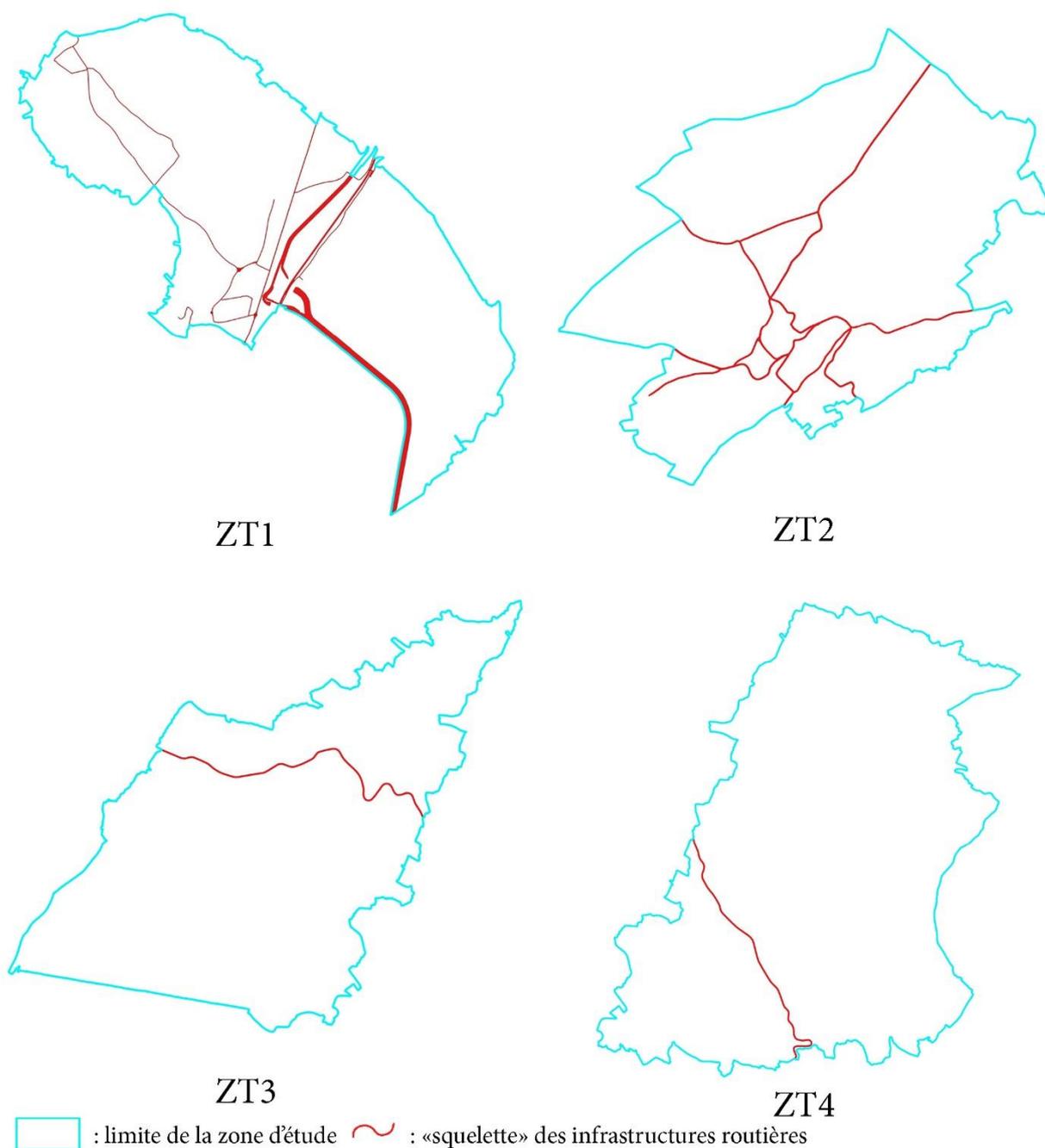


Figure 128. Support de photo-interprétation mise à disposition pour la méthodologie sans assistance pour chaque zone d'étude (ZT). La couche polygonale est composée du « squelette » des infrastructures routières croisé avec la limite de la ZT

8.2.2 Photo-interprétation avec assistance

La préparation de la photo-interprétation assistée d'une segmentation d'image est réalisée à l'aide des 5 modules décrits dans les chapitres 5, 6 et 7. Les 4 ZT sont géographiquement proches et elles sont couvertes par une image de 250 km² extraite de la BD ORTHO@IGN en format ecw (Figure 129). Afin d'optimiser le temps de préparation des couches polygonales constituant le support pour la photo-interprétation, le module 1 (formatage de l'imagerie à segmenter) est appliquée une seule fois sur l'ensemble de l'image couvrant les 4 zones d'intérêts. Les détails techniques du module 1 sont disponibles dans la section 5.1.

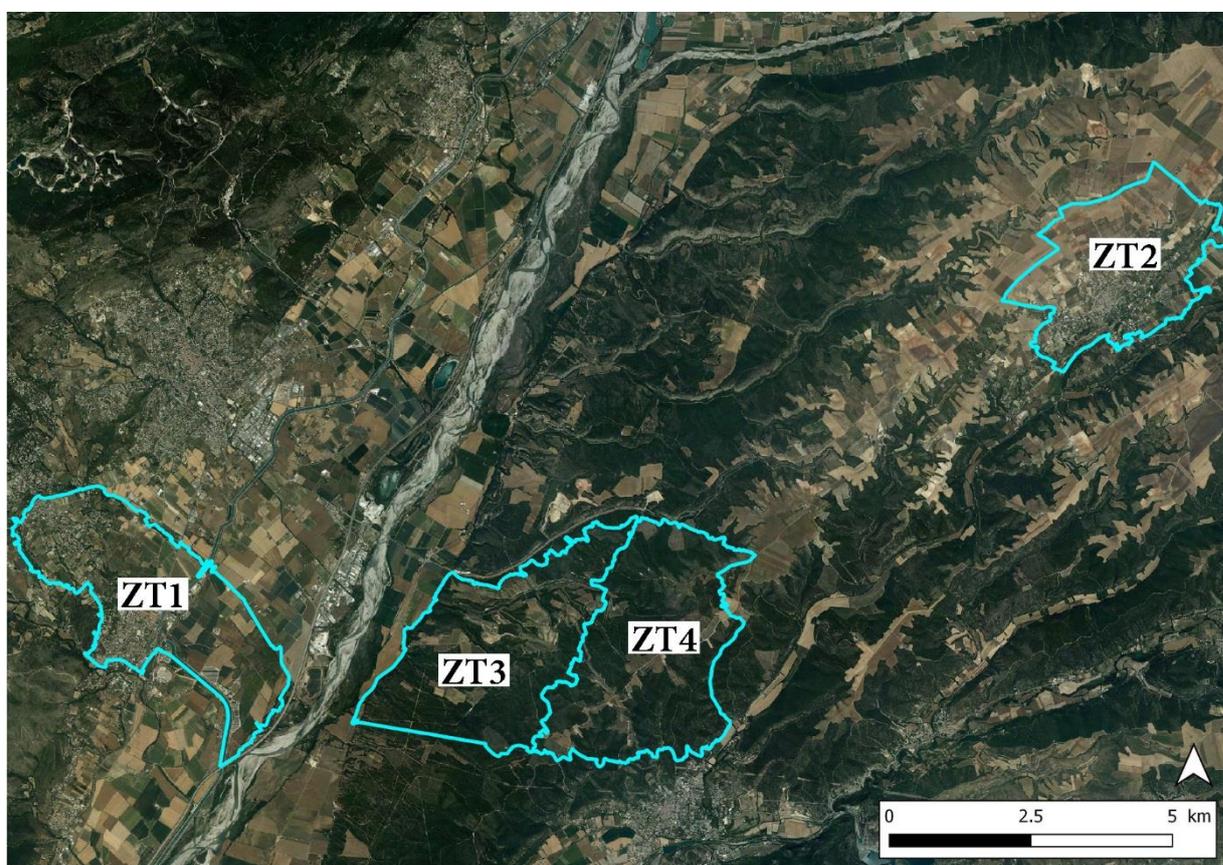


Figure 129. Localisation des zones d'études sur le territoire de la DLVA

Ensuite, pour chacune des ZT, les modules 2, 3, 4 et 5 sont respectivement appliqués pour créer une couche polygonale opérationnelle pour assister l'exercice de photo-interprétation. Le paramétrage de chacun des modules est identique pour l'ensemble des ZT (Figure 130, Figure 131, Figure 132, Figure 133). Pour rappel :

le module 2 est dédié à la mise en place d'un « squelette » polygonale des infrastructures linéaires sur la ZT (section 5.3.2) ;

le module 3 permet de réaliser une enveloppe urbaine (ou masque urbain). Comme évoqué dans la section 4.1.1, la SI est inopérante pour le prédécoupage des entités paysagères (ou objets) urbains. Nous choisissons de ne pas implémenter l'algorithme de segmentation dans le milieu urbain. Il convient alors d'élaborer une enveloppe polygonale dont la fonction est d'apporter une limite cohérente entre les espaces urbains et les espaces non urbains pour minimiser les reprises manuelles. La construction de cette enveloppe est détaillée dans la section 5.3.3 ;

le module 4 réalise la Segmentation d'Image (SI) à l'aide du logiciel eCognition®. Le détail technique du « *ruleset* » associé est abordé dans la *section 6.2*. Celui-ci intègre notamment les résultats des modules 1, 2 et 3. Le module 4 permet d'estimer et d'appliquer un paramètre d'échelle de segmentation adapté à la zone étudiée. Enfin, le « *ruleset* » propose une première série de post-traitements pour améliorer le rendu cartographique de la BD Ocsol GE ;

le module 5 finalise l'assistance par une série de traitements vectoriels sur la segmentation d'image. Parmi ces actions, elle applique une simplification de la géométrie des objets générés par la SI (*section 7.2*). Elle permet également d'assurer la géométrie originale des vecteurs de référence géométrique (réseaux routiers, enveloppe urbaine) (*section 7.3*).

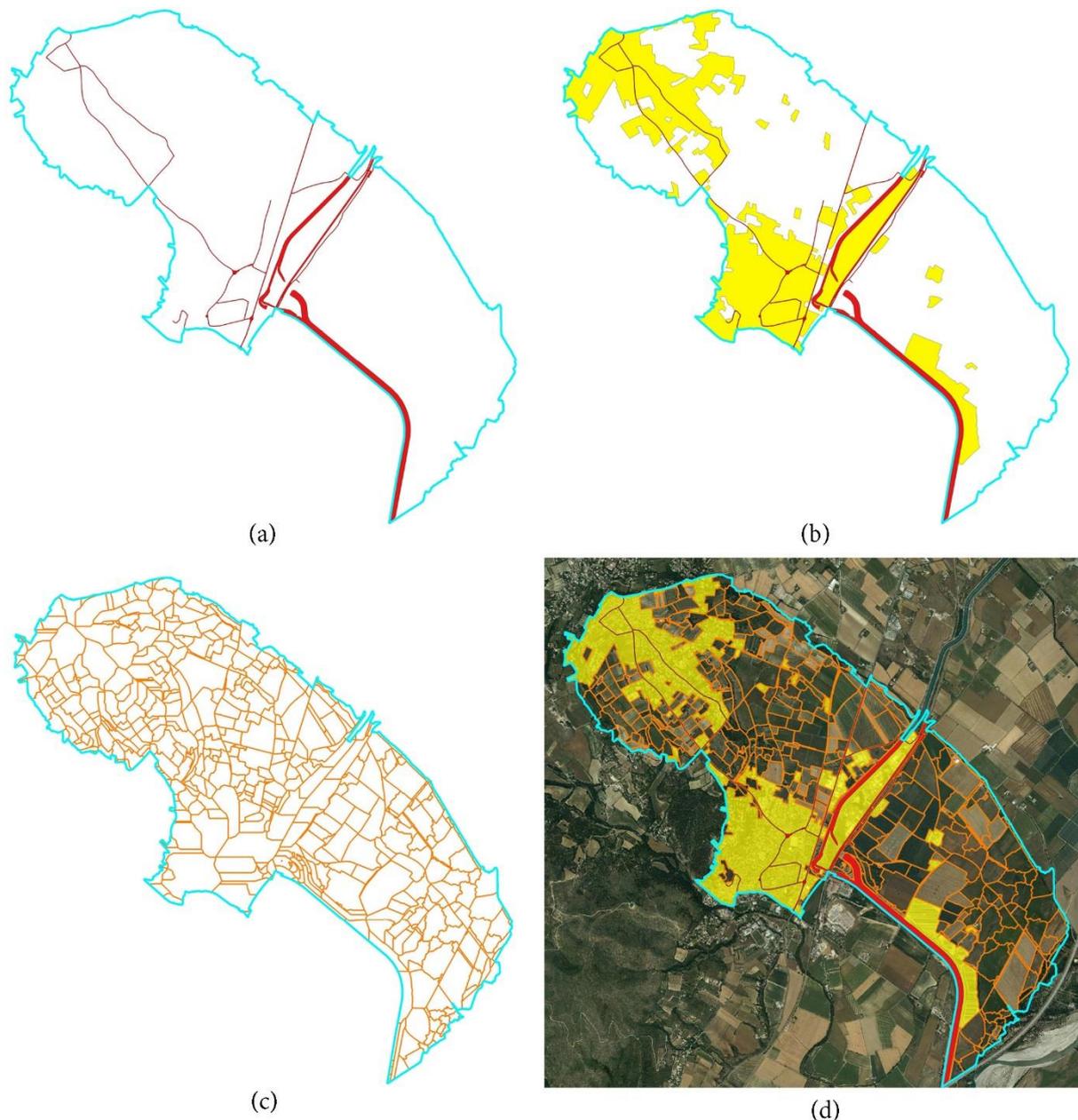


Figure 130. ZT1 : applications successives (a) du module 2 : élaboration du squelette polygonal des infrastructures linéaires ; (b) module 3 : élaboration du masque urbain ; (c) module 4 : réalisation de la segmentation d'image et (d) du module 5 : finalisation de l'assistance à la digitalisation

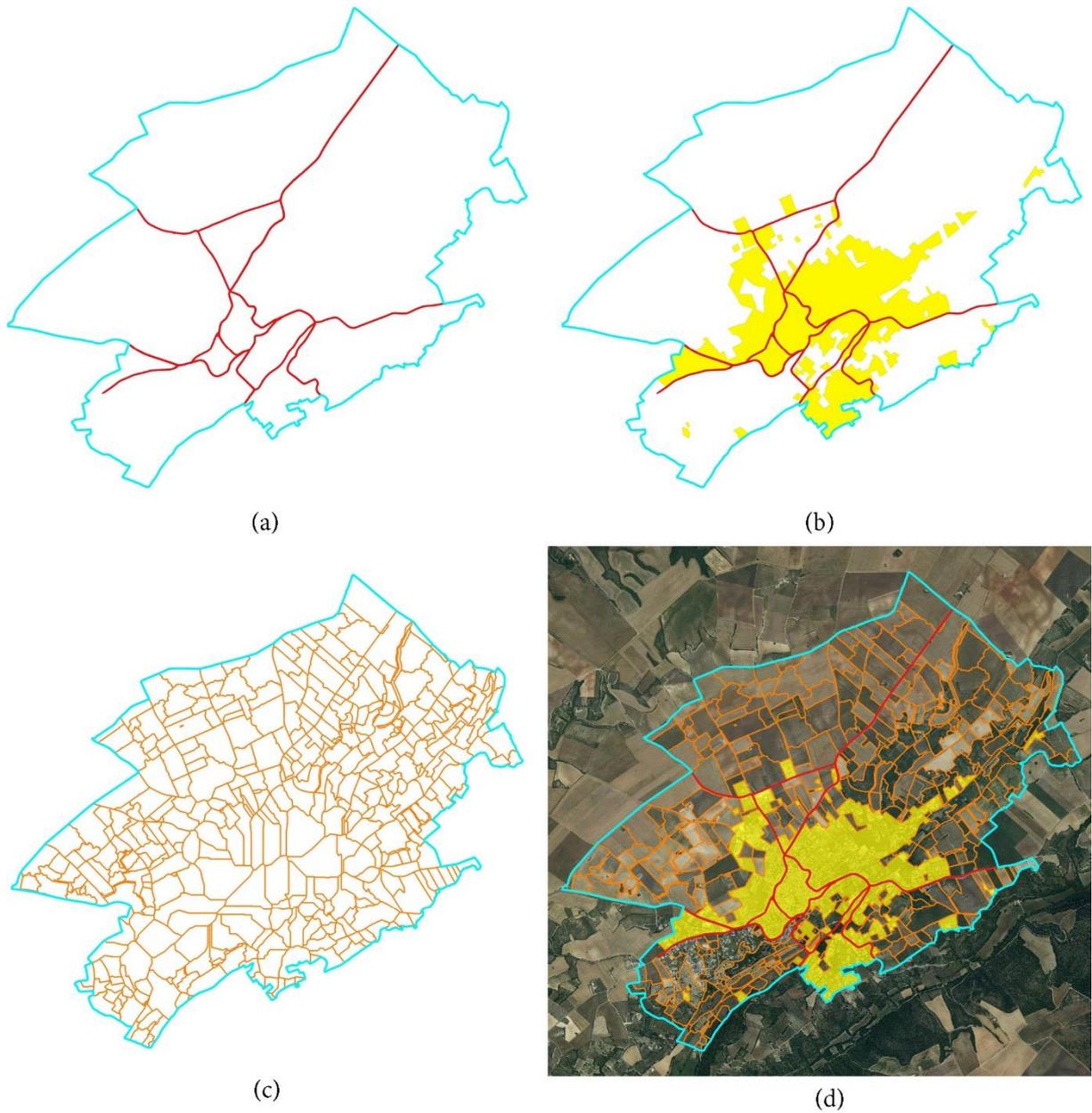


Figure 131. ZI2 : applications successives (a) du module 2 : élaboration du squelette polygonal des infrastructures linéaires ; (b) module 3 : élaboration du masque urbain ; (c) module 4 : réalisation de la segmentation d'image et (d) du module 5 : finalisation de l'assistance à la digitalisation

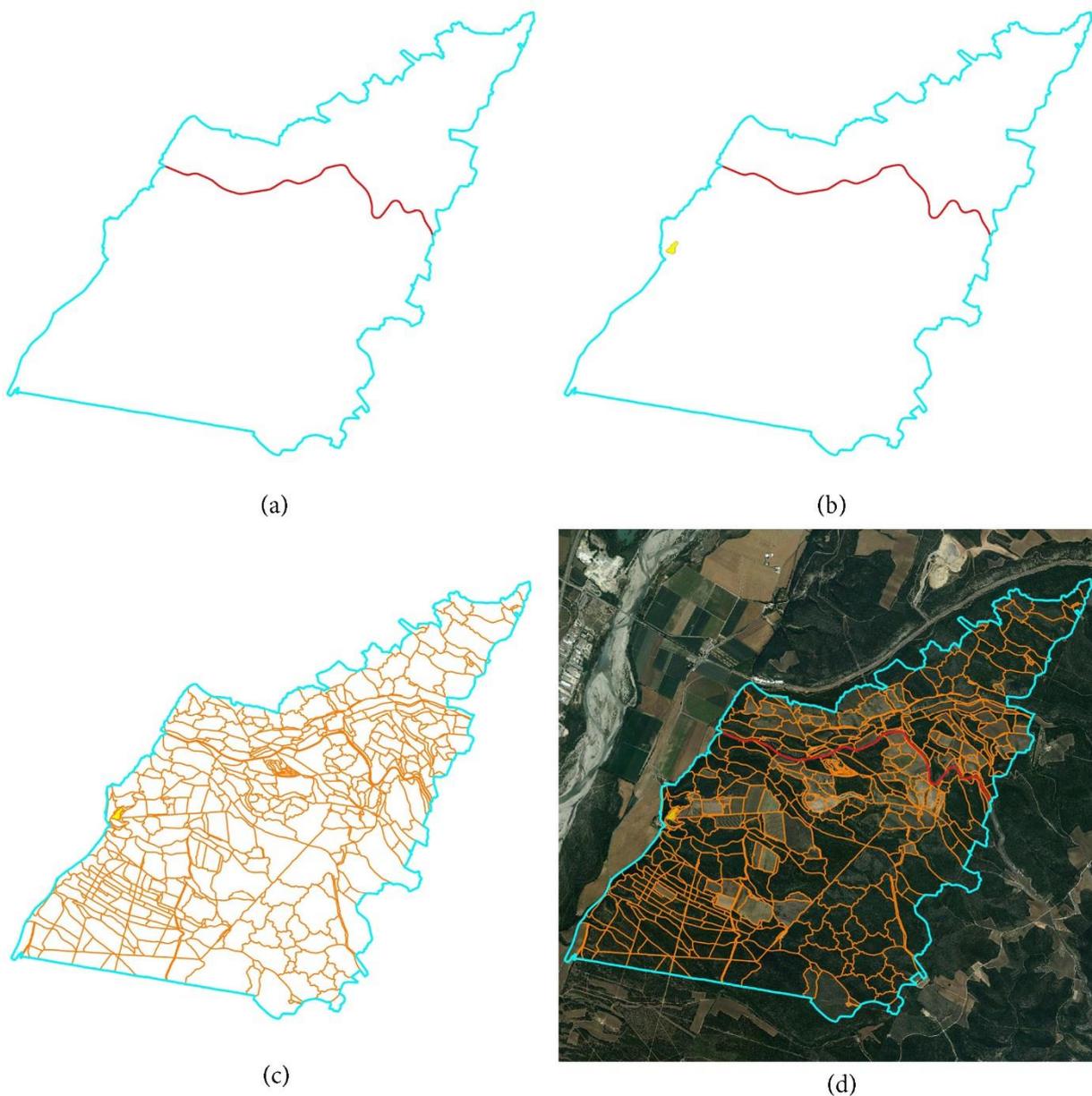


Figure 132. ZT3 : applications successives (a) du module 2 : élaboration du squelette polygonal des infrastructures linéaires ; (b) module 3 : élaboration du masque urbain ; (c) module 4 : réalisation de la segmentation d'image et (d) du module 5 : finalisation de l'assistance à la digitalisation

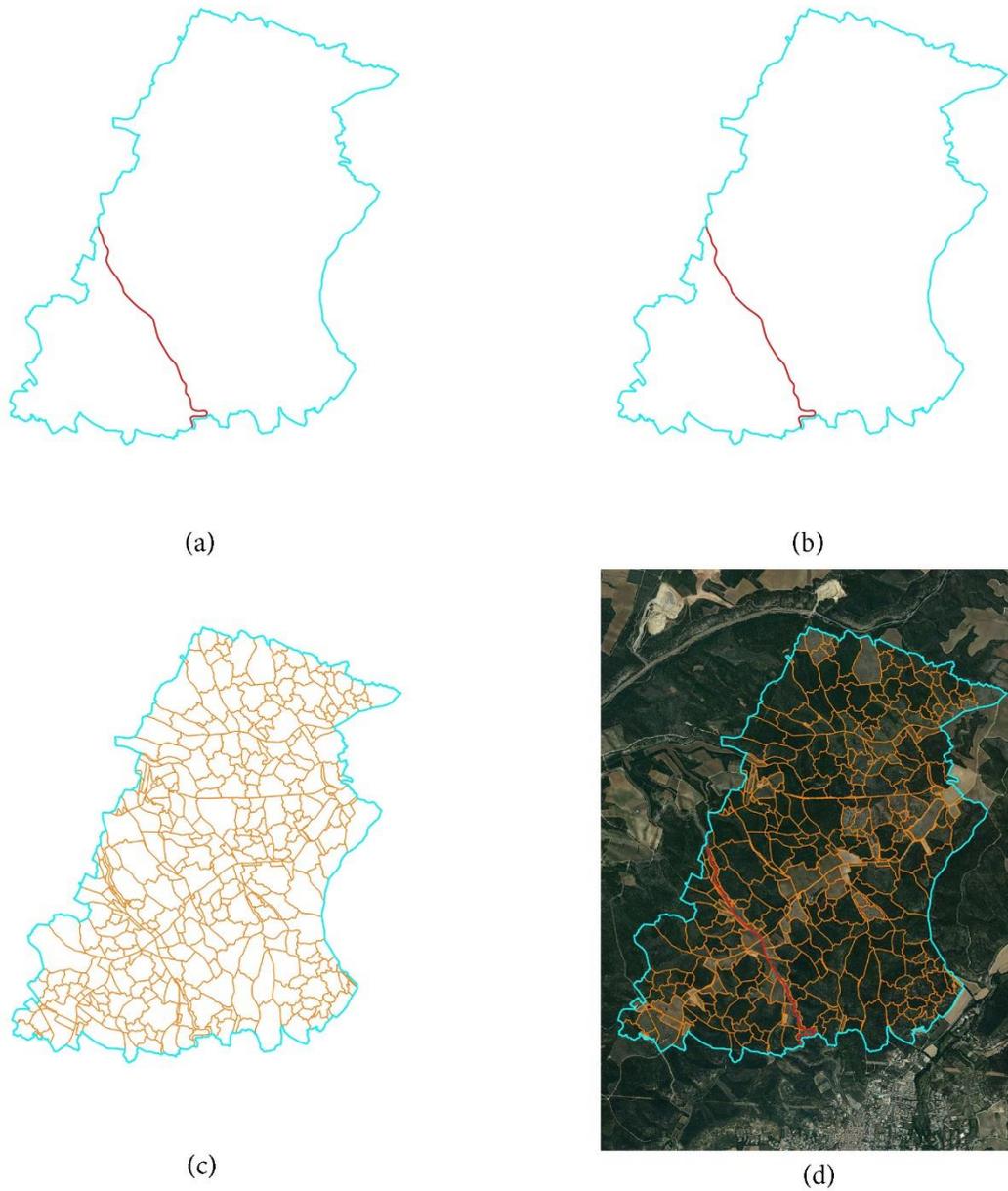


Figure 133. ZI4 : applications successives (a) du module 2 : élaboration du squelette polygonal des infrastructures linéaires ; (b) module 3 : élaboration du masque urbain (aucun objet « urbain » identifié) ; (c) module 4 : réalisation de la segmentation d'image et (d) du module 5 : finalisation de l'assistance à la digitalisation

8.3 Critères d'évaluation

La démarche d'évaluation et de validation de l'expérience consiste à analyser et à mesurer les similarités et les divergences des productions issues des deux méthodes sur chaque ZT. Elle n'a pas pour objet, ici, de savoir quelle production cartographique se rapproche le plus d'une réalité terrain car nous n'en disposons pas. Cette évaluation s'appuie sur la confrontation des productions entre elles à l'aide des métriques suivantes : similarité d'interprétation (Kappa), similarité des tracés (Hoover), nombre d'objets cartographiés et temps de production. Elle s'appuie aussi grandement sur la visualisation des productions cartographiques et le retour d'expérience fournie par les experts photo-interprètes.

8.3.1 *Appréciation visuelle de la qualité de production*

Nous souhaitons apporter une analyse qualitative à travers la visualisation des productions cartographiques et le témoignage des quatre experts sur la réalisation de cette expérience. La visualisation doit nous rendre compte des différences marquantes entre les productions. Le témoignage des experts doit exprimer le ressenti sur la pratique de la photo-interprétation avec les deux options méthodologiques. Ils évoquent les avantages et les inconvénients d'une assistance à la digitalisation et les perspectives pour la discipline.

8.3.2 *Test du Kappa*

Le coefficient Kappa (k) de Cohen est souvent utilisé pour évaluer la qualité de réalisation d'une BD OCSOL à partir d'un jeu de données de référence acquis sur le terrain (vérité terrain) ou considéré comme fiable (Congalton 1991; Girard et Girard 2010). Nous l'utilisons ici pour comparer entre elles, les quatre productions réalisées sur chaque zone-test. Le k de Cohen est destiné à mesurer la concordance (ou accord) corrigée de l'effet du hasard entre deux observations possédant les mêmes modalités. Le coefficient k est compris entre -1 et 1. Habituellement, on qualifie le score de satisfaisant lorsqu'il est supérieur à 0.80 voire d'excellent à partir de 0.90. En deçà, la concordance entre les productions est plus difficile à valider. Le k de Cohen est calculé sur la base d'image raster des productions à 1 m de résolution spatiale. Nous utilisons le test du Kappa pour comparer les cartographies réalisées selon les deux options méthodologiques par les différents photo-interprètes.

8.3.3 *Métriques de Hoover*

Les métriques de Hoover permettent de comparer un résultat de segmentation à une segmentation de référence. Hoover propose 5 métriques (Hoover et al. 1996). En nous appuyant sur les travaux de (Jiang et al. 2006), nous retenons une seule métrique de Hoover, la métrique « *correct detection* » dont les valeurs varient de 0 à 1. Selon le même auteur, le seuil permettant de définir si une détection est correcte ou non est fixé à 0.8. Cette métrique s'est montrée sensible aux distorsions des régions. La métrique de Hoover doit nous apporter un critère quantitatif de la forme des objets cartographiés selon l'option méthodologique employée.

8.3.4 Nombre d'objets cartographiés

L'analyse du nombre d'objets d'occupation du sol par niveau de nomenclature est également un indicateur statistique intéressant pour comparer les productions entre-elles. Nous souhaitons savoir s'il existe un lien entre le nombre d'objet digitalisé et l'option méthodologique employée.

8.3.5 Temps de production

La mesure des temps de production est réalisée à partir d'un marqueur de temps intégré au fichier SIG généré lors de la photo-interprétation. Ce marqueur indique la date et l'heure précises de l'attribution d'une classe d'occupation du sol à un polygone. Grâce à ce marqueur de temps, il est possible de calculer le temps effectif passé par le photo-interprète sur l'exercice. Les creux de production de plus de 10 minutes entre deux affectations de polygone ne sont pas pris en compte dans le calcul du temps de production. De cette façon, nous excluons les temps de pause et les changements de journée.

8.4 Résultats

8.4.1 Analyse visuelle des productions cartographiques

Les réalisations cartographiques sont présentées sur la *Figure 134* et la *Figure 135* au 1/5 000^e. Pour chaque zone test, nous avons sélectionné deux productions sur quatre en choisissant les productions aux caractères graphiques les plus éloignés. Malgré cela, les tracés de l'occupation du sol sur une même zone, à un premier niveau d'analyse visuelle, apparaissent relativement proches. Il est difficile de déceler de quelle option méthodologique sont issues ces productions cartographiques.

Toutefois, quand on analyse à une échelle plus grande, pour chaque zone, chacune des productions, les différences liées aux deux options méthodologiques sont perceptibles : de légers artefacts persistent dans les tracés assistés. Ceux-ci sont particulièrement visibles sur l'extrait de la ZT1 cartographiée par l'expert 4 (*Figure 134*) et sur les extraits des ZT3 et 4 à dominante forestière issus des productions assistées (*Figure 135*). L'expert 3 a visiblement réalisé un effort de gommage de ces artefacts pour sa production assistée sur la ZT2 (*Figure 134*). Cet effet de décrochage apparaît plus disgracieux et plus perturbant dans les espaces agricoles où un tracé rectiligne est préféré pour délimiter les parcelles agricoles. En revanche dans les espaces forestiers, les effets de décrochage apparaissent moins aberrants. Dans ces espaces, la délimitation suit une logique floue et non bornée. Les changements de peuplements forestiers, les coupes forestières et les espaces en mutation sont des éléments plus difficiles à digitaliser manuellement. L'assistance permet à l'expert de se dédouaner, en partie, de la délimitation des objets sans avoir à réaliser trop de corrections sur le tracé. Enfin dans les espaces urbains, l'assistance par une SI ayant été écartée, les différences observées sur les tracés et les interprétations entre les productions sont uniquement dues à l'expérience et à la rigueur du photo-interprète. Par contre, il est possible de faire une comparaison entre les enveloppes des espaces urbains digitalisées manuellement et celles issues du masque urbain pour les productions avec assistance. On constate que ces enveloppes sont fortement semblables. Ces deux procédés de production de l'enveloppe urbaine offrent un détournement « *cadastré* » et en adéquation avec les attentes des utilisateurs pour ce type de milieu.

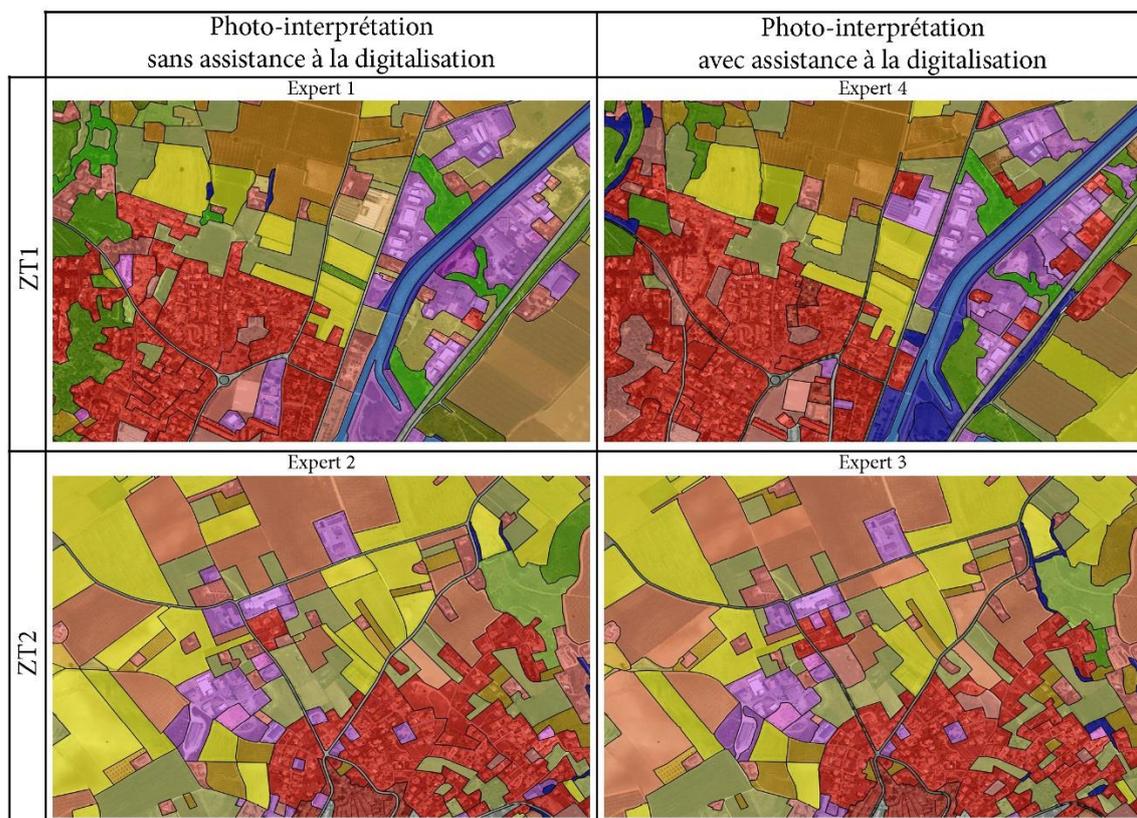


Figure 134. Extraits cartographiques au 1/5 000^e des ZT1 et ZT2 réalisés avec et sans assistance

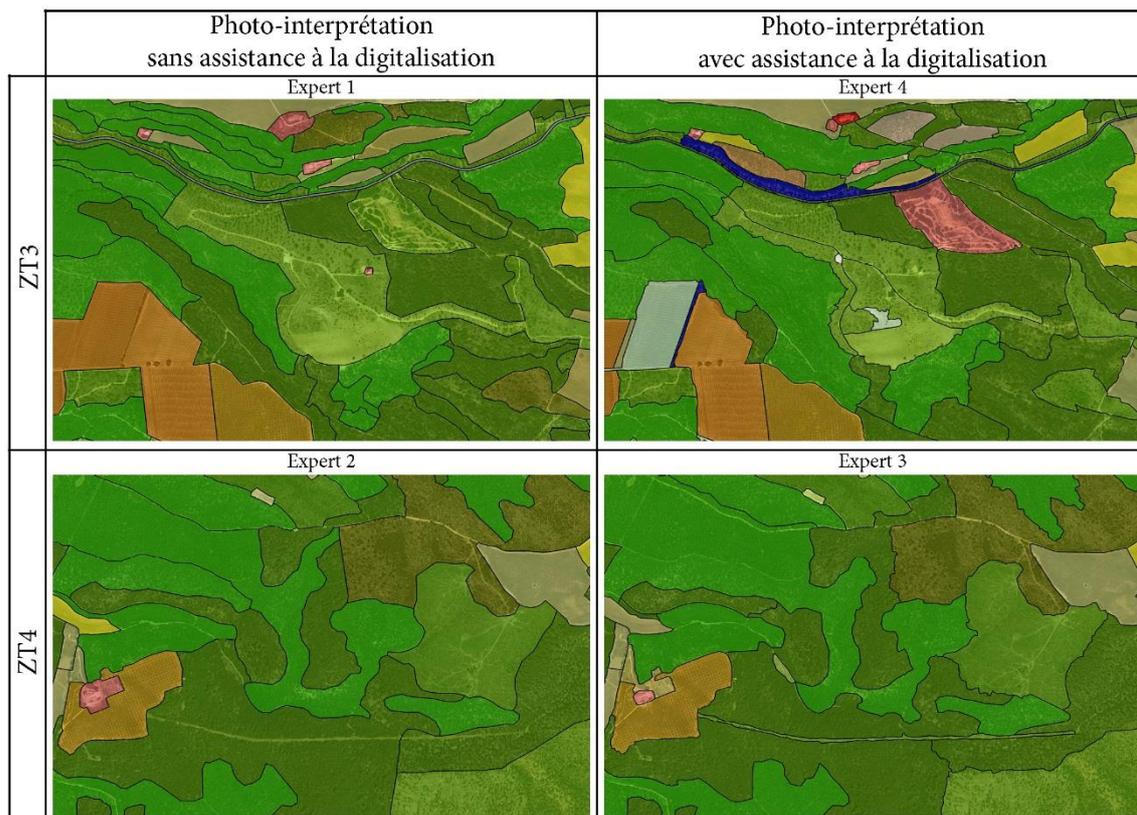


Figure 135. Extraits cartographiques au 1/5 000^e des ZT3 et ZT4 réalisés avec et sans assistance

8.4.2 Ressenti des photo-interprètes

Les témoignages des quatre experts photo-interprètes convergent vers les mêmes constats. Les experts 2 et 3, plus expérimentés considèrent l'assistance à la digitalisation comme un confort indéniable pour l'édition des polygones. La réflexion intellectuelle nécessaire pour les choix de découpage du paysage est allégée et facilitée par cette assistance. Le prédécoupage des polygones génère moins de fatigue. Les experts 1 et 4 ont moins de recul sur la discipline mais expriment également une préférence pour une production assistée. Ils expliquent qu'ils ont parfois l'impression de couvrir plus rapidement certains secteurs et que cela leur donne du « *courage* » ou de la motivation pour poursuivre la production. Au contraire, lors d'une production non assistée, ils font face à des périodes de stagnation de la production sur certains secteurs car il y a beaucoup de découpages à faire ou ils ne savent pas comment s'y prendre pour placer les limites dans le paysage. Ils décrivent ces périodes comme difficiles et démotivantes, pouvant les inciter à négliger le tracé pour passer au secteur suivant.

Le masque urbain est qualifié par les experts comme une aide précieuse pour la digitalisation des espaces urbains. Tout d'abord, parce qu'il évite au photo-interprète de se questionner trop longtemps sur les délimitations entre l'espace urbain et l'espace naturel ou semi-naturel. De plus cette enveloppe urbaine permet au photo-interprète de disposer d'un support de lecture clair et rapide de ces espaces à interpréter. Ce constat est étayé par le relevé des vitesses moyennes de production dans ces espaces (Figure 136) qui sont globalement plus rapides.

Cependant, avec l'utilisation de l'assistance à la digitalisation, l'ensemble des experts témoigne d'un agacement pour des découpages non cohérents ou des artefacts du tracé inesthétiques. Cet agacement intervient surtout dans les espaces agricoles où le contour d'une parcelle est parfois dévié dans la parcelle voisine. Dans les espaces forestiers, cet agacement est moindre car la délimitation interne de ces espaces apparaît de façon moins nette par rapport à celle des parcelles agricoles aux couleurs et textures contrastées. Malgré tout, aucun d'entre eux n'évoquent la volonté ou le recours à l'effacement complet du tracé proposé par l'assistance sur une zone importante pour le reprendre manuellement. Leurs retouches sont ponctuelles.

Du point de vue de l'interprétation des objets, les experts 1 et 3 pensent que l'assistance à la digitalisation guide, dans certains cas, de façon importante leur interprétation de certains éléments du paysage. Ils estiment, parfois, qu'ils s'attardent sur des détails mis en exergue par l'assistance, qui n'ont que peu d'intérêt pour la base de données, soit parce qu'ils sont trop petits ou parce que leur distinction avec les objets voisins est négligeable. Par exemple, il peut s'agir d'un petit espace enherbé entre deux cultures, d'un accotement routier, d'un petit bosquet, d'une petite haie ou encore d'un léger éclaircissement dans un boisement. Dans ces mêmes cas de figure, sans assistance, ce questionnement n'aurait pas eu lieu d'être et ils auraient privilégié un découpage plus simple et généralisé.

8.4.3 Test du Kappa

L'indice de Kappa est mesuré en confrontant pour chaque ZT, les productions deux à deux et à chaque niveau de nomenclature (Tableau 24). Le premier constat est qu'à chaque niveau de nomenclature, les valeurs des productions assistées et non assistées sont proches et, que du niveau 1 au niveau 3 de la nomenclature, les valeurs de k diminuent systématiquement, quelque

soit la méthode de production employée. Au niveau 1, parmi les 4 comparaisons, 9 tests ont une valeur supérieure à 0.90, les 15 autres ont des valeurs comprises entre 0.77 et 0.89. Aux niveaux 2 et 3, les valeurs s'échelonnent entre 0.64 et 0.87. La comparaison de productions issues d'une même méthodologie montre des valeurs de k légèrement plus élevée pour les productions assistées pour trois cas sur quatre. Ce résultat est cohérent car les différentes productions assistées d'une même ZT s'exercent sur la même segmentation d'image.

Tableau 24. Valeurs de Kappa entre productions (SA : Sans Assistance ; AA : Avec Assistance) par ZT aux trois premiers niveaux de nomenclature. (vert : ≥ 0.90 ; jaune : ≥ 0.80 ; orange : ≥ 0.70 ; rouge : < 0.70)

	ZT1			ZT2			ZT3			ZT4		
	Niv.1	Niv.2	Niv.3									
E1 SA - E2 AA	0.87	0.79	0.77	0.79	0.76	0.72	0.92	0.73	0.70	0.91	0.80	0.73
E2 AA - E3 SA	0.87	0.77	0.74	0.88	0.85	0.81	0.92	0.82	0.67	0.92	0.84	0.83
E4 AA - E1 SA	0.84	0.74	0.71	0.77	0.70	0.66	0.86	0.76	0.73	0.91	0.84	0.77
E4 AA - E3 SA	0.84	0.73	0.69	0.79	0.74	0.71	0.86	0.73	0.62	0.93	0.86	0.86
E2 AA - E4 AA	0.89	0.81	0.79				0.89	0.75	0.73			
E1 SA - E3 SA	0.86	0.75	0.71				0.91	0.76	0.64			
E2 SA - E4 SA				0.82	0.74	0.69				0.92	0.85	0.86
E1 AA - E3 AA				0.84	0.82	0.77				0.94	0.87	0.77

8.4.4 Métriques de Hoover

La métrique de Hoover « *correct detection* » est calculée entre les productions d'une même zone et déclinées par niveau de nomenclature (Tableau 25). Très logiquement, plus le niveau de nomenclature est détaillé plus le score diminue. Toutefois la métrique donne des résultats supérieurs à 0.90 pour le niveau 1 et compris entre 0.67 et 0.92 pour le niveau 2. Les scores mesurés sur les ZT présentant des paysages fragmentés sont globalement moins bons que ceux mesurés sur les ZT forestières. Parce qu'on utilise le même prédécoupage pour les productions assistées, les valeurs des tests de comparaison de ces productions sont globalement plus élevées.

Tableau 25. Scores de la métrique de Hoover « correct detection » entre les productions (SA : Sans Assistance ; AA : Avec Assistance) par zone d'étude pour le niveau 4 de nomenclature (vert : ≥ 0.80 ; orange : ≥ 0.60 ; rouge : < 0.60)

	ZT1				ZT2			
	Niv.1	Niv.2	Niv.3	Niv.4	Niv.1	Niv.2	Niv.3	Niv.4
E1 SA - E2 AA	0.913	0.773	0.689	0.609	0.908	0.725	0.708	0.628
E2 AA - E3 SA	0.919	0.734	0.661	0.589	0.940	0.855	0.823	0.762
E4 AA - E1 SA	0.891	0.673	0.637	0.465	0.895	0.682	0.652	0.583
E4 AA - E3 SA	0.902	0.681	0.601	0.464	0.897	0.731	0.678	0.525
E2 AA - E4 AA	0.932	0.794	0.739	0.619				
E1 SA - E3 SA	0.910	0.710	0.652	0.567				
E2 SA - E4 SA					0.916	0.759	0.681	0.56
E1 AA - E3 AA					0.922	0.825	0.765	0.634
	ZT3				ZT4			
	Niv.1	Niv.2	Niv.3	Niv.4	Niv.1	Niv.2	Niv.3	Niv.4
E1 SA - E2 AA	0.973	0.790	0.688	0.469	0.975	0.844	0.743	0.513
E2 AA - E3 SA	0.963	0.884	0.659	0.578	0.981	0.894	0.854	0.706
E4 AA - E1 SA	0.953	0.826	0.725	0.489	0.971	0.883	0.795	0.546
E4 AA - E3 SA	0.937	0.762	0.518	0.426	0.984	0.924	0.881	0.677
E2 AA - E4 AA	0.959	0.748	0.706	0.509				
E1 SA - E3 SA	0.953	0.827	0.658	0.5021				
E2 SA - E4 SA					0.982	0.904	0.872	0.683
E1 AA - E3 AA					0.980	0.917	0.819	0.473

8.4.5 Nombre d'objets cartographiés

Au résultat (Tableau 26), on ne constate pas une production d'objets plus élevée, associée à l'une ou l'autre des deux méthodes. Le paramètre qui influe sur cet indice est avant tout l'exigence de photo-interprétation de chacun des experts.

Tableau 26. Nombre de polygones par ZT et par niveau de nomenclature mesuré selon la méthode de cartographie et l'opérateur

	ZT1				ZT3			
	Niv.1	Niv.2	Niv.3	Niv.4	Niv.1	Niv.2	Niv.3	Niv.4
Sans Assistance (Expert 1)	186	410	468	519	48	110	140	231
Sans Assistance (Expert 3)	148	383	432	490	40	98	156	200
Avec Assistance (Expert 2)	224	491	548	608	45	96	143	178
Avec Assistance (Expert 4)	195	424	492	563	57	116	168	243
	ZT2				ZT4			
	Niv.1	Niv.2	Niv.3	Niv.4	Niv.1	Niv.2	Niv.3	Niv.4
Sans Assistance (Expert 2)	172	530	615	663	28	93	145	183
Sans Assistance (Expert 4)	134	382	461	488	31	97	143	227
Avec Assistance (Expert 1)	210	449	495	528	34	93	147	254
Avec Assistance (Expert 3)	209	504	579	624	30	100	157	192

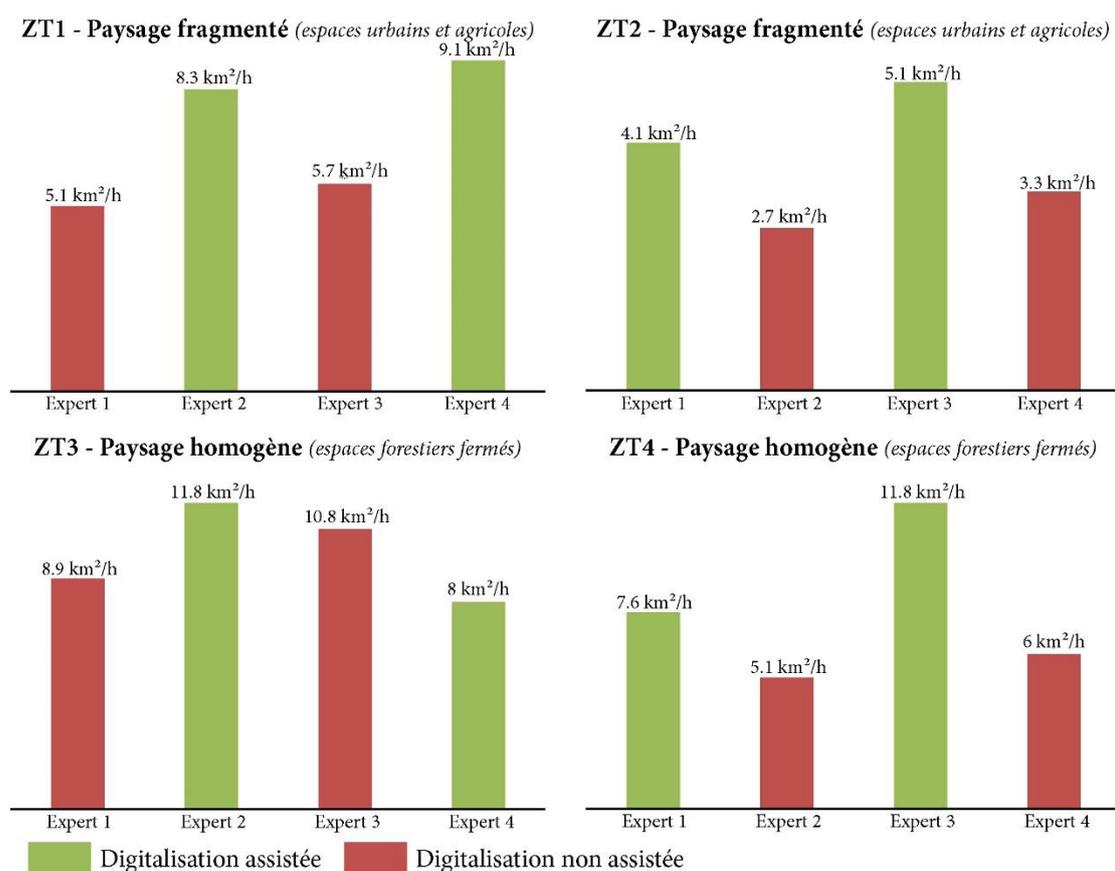
8.4.6 Analyse comparative des temps de production

Les temps consacrés à la photo-interprétation, avec ou sans SI sont présentés sur le *Tableau 27*. Le premier constat montre que les zones ZT1 et ZT2, aux caractères paysagers hétérogènes ont nécessité plus de temps pour leur photo-interprétation que les zones ZT3 et ZT4 composées d'un paysage forestier homogène. L'ensemble des productions utilisant une assistance à la digitalisation a été réalisé en moins de temps que les productions n'en utilisant pas. Cependant ces écarts de temps de production sont variables. En effet, il est possible d'observer un écart de temps plus important dans la production des ZT de paysage hétérogène (ZT1 et ZT2) que sur les ZT forestières plus homogènes (ZT3 et ZT4). Pour les secteurs hétérogènes (ZT1 et ZT2), le gain moyen de temps, lié à l'utilisation d'une méthode assistée est de 40%. Pour les secteurs forestiers (ZT3 et ZT4), le gain de temps est légèrement plus faible, soit de 30 %. Les temps mesurés doivent être considérés avec prudence, car l'exercice de la photo-interprétation est dépendant de l'opérateur et reste toujours un exercice très subjectif aussi bien dans la délimitation géométrique que dans la reconnaissance thématique des objets.

Tableau 27. Temps de photo-interprétation effectif par expert et par zone d'étude selon la méthode de cartographie

	Avec assistance		Sans assistance	
	Expert 2	Expert 4	Expert 1	Expert 3
ZT1	3h48	4h13	6h04	8h33
ZT3	1h33	2h33	2h52	2h48
	Expert 1	Expert 3	Expert 2	Expert 4
ZT2	3h42	3h48	6h54	5h21
ZT4	2h54	1h34	3h54	3h10

Les vitesses moyennes de production par expert et par zone, mesurées au premier niveau de nomenclature sont recensées sur la *Figure 136*. Une « vitesse instantanée » par polygone est calculée à partir des polygones édités 5 minutes avant ce polygone et 5 minutes après lui et pondérée par sa surface. De manière générale, le calcul des vitesses moyennes de l'ensemble des productions d'une même ZT montre que, la saisie des objets est plus rapide avec une assistance à la digitalisation que sans assistance. Seules, les productions réalisées sur la ZT3 forestière dérogent à ce constat, entre l'expert 4 et les experts 1 et 3 plus rapides sans assistance. Les experts 1 et 3 ont une expérience plus importante que l'expert 4, ce qui peut jouer un rôle dans ce type de paysage où les limites sont plus difficiles à cerner.

Figure 136. Vitesse moyenne de cartographie (km²/heure) enregistrée par expert selon les méthodes de production et la zone d'étude (ZT)

8.5 Discussion sur l'expérimentation

La réalisation de cette expérimentation a nécessité la mise en place d'un protocole assez conséquent avec la mobilisation de quatre experts en dehors de leurs activités professionnelles. Chaque expert a passé environ 16 heures sur cet exercice. Il s'agit d'un faible nombre d'heures comparé au temps passé par ces mêmes professionnels lors de prestations réelles sur plusieurs centaines de kilomètres carré. Malgré tout, cette expérience recrée de façon fidèle les conditions de production telles qu'elles peuvent être observées chez un producteur de données. Elle mobilise le photo-interprète suffisamment longtemps pour pouvoir prendre en compte les effets de fatigue et de lassitude dans l'exercice de photo-interprétation.

Les zones d'études sélectionnées pour l'expérience ne sont pas représentatives de l'ensemble des paysages français mais elles sont suffisamment diversifiées pour mesurer l'impact d'une assistance à la digitalisation pour la pratique de la PIAO. Cette expérience gagnerait à être menée dans des espaces complémentaires tel un secteur urbain dense ou un paysage bocager.

L'assistance à la digitalisation à partir d'une segmentation d'image a été conçu et calibré pour une pratique de la photo-interprétation à grande échelle (entre le 1/2 000^e et le 1/10 000^e) à partir d'une imagerie THRS. La robustesse de l'assistance est assurée pour cette plage d'échelle. Le choix de l'algorithme de segmentation « *multi-resolution* » couplé à l'outil ESP permet de conserver une relative maîtrise du résultat de la segmentation d'image. Un seuil de généralisation cartographique est appliqué de manière uniforme au résultat de la SI. Le choix du seuil reste subjectif et s'appuie sur notre expérience de production de BD Ocsol GE.

L'analyse visuelle des résultats montre que les productions par photo-interprétation assistée sont visuellement très proches des productions non-assistées. On déplore la présence d'artefacts dans le tracé des polygones qui, malgré les post-traitements, persistent. Ces artefacts semblent particulièrement gênants dans les parcellaires agricoles où la majorité des experts réalise un gommage de ces imperfections. Dans les espaces forestiers, ces artefacts dans le tracé sont mieux tolérés.

Le calcul comparatif des temps de production de la méthode assistée et de la méthode non-assistée révèle des écarts significatifs. De façon générale, l'utilisation d'une assistance à la digitalisation entraîne un gain de temps et une meilleure productivité quelle que soit la configuration paysagère photo-interprétée. Cet écart est plus important lorsque la zone cartographiée présente un paysage hétérogène.

L'analyse des vitesses instantanées par niveau de nomenclature est également révélatrice du gain de productivité d'une méthode par rapport à l'autre. Le développement et l'application d'un masque urbain fournissent à l'expert une enveloppe urbaine efficace qui lui facilite la digitalisation interne de ces espaces. C'est dans l'espace agricole, que les vitesses moyennes de production sont les plus élevées, en raison de l'existence de parcelles de grande superficie dont les détourages rectilignes sont simples et rapides à exécuter. Il est intéressant de noter que malgré le temps imparti à la correction des artefacts inesthétiques de tracé issus de la SI, les vitesses moyennes de production sont majoritairement supérieures pour les productions assistées. Dans les espaces forestiers, les écarts de temps de production liés au choix de la méthode de photo-interprétation, sont moins nets. La difficulté d'identifier les peuplements forestiers sur image

aérienne, contraint le photo-interprète à s'appuyer quasi exclusivement sur l'inventaire forestier national. Dans ce contexte, l'apport de l'assistance à la digitalisation trouve sa limite et ne permet pas à son utilisateur un gain de temps substantiel. Enfin, les ZT étudiées ne comportaient pas de surfaces en eau en nombre suffisant pour pouvoir mener des évaluations significatives sur cette thématique.

La discussion avec les experts s'est avérée être un complément précieux aux mesures de comparaison. Elle permet de se rendre compte de l'impact de l'assistance à la digitalisation sur le confort de travail des photo-interprètes. L'assistance est perçue comme un véritable progrès par les photo-interprètes. Elle leur apporte une meilleure ergonomie et limite leur fatigue lors de longue session de photo-interprétation. La discussion a permis aussi de mettre en évidence des points d'amélioration potentiels à apporter à l'assistance. Cela concerne principalement la limitation des artefacts disgracieux des tracés issus de la segmentation d'image. Les experts mentionnent l'apport limité de l'assistance à la digitalisation dans les espaces forestiers. Ils n'ont pas ressenti un réel gain de productivité dans ces milieux par rapport à une approche non assistée, bien que les temps de saisie soient a priori optimisés par la SI. Le calcul des vitesses moyennes de production par expert, le montre. Il faudrait plus de ZT pour confirmer ce constat.

Afin de compléter cette discussion, nous consacrons le chapitre suivant à une discussion approfondie sur l'assistance à la digitalisation à partir d'une segmentation que nous avons développée dans cette thèse.

Chapitre 9 :
Discussions sur la méthode proposée

Sommaire

9.1	Un ensemble de modules comme environnement de développement : avantages et limites	256
9.2	La sensibilité des paramétrages	258
9.3	Quand doit-on recourir à l'assistance à la digitalisation ?	261
9.4	La qualité du prédécoupage : une notion subjective	265
9.5	Une nouvelle manière de numériser l'occupation du sol par photo-interprétation	265
	9.5.1 La diminution des manipulations d'édition	266
	9.5.2 Une première lecture du paysage	266
	9.5.3 La photo-interprétation en équipe	268
	9.5.4 L'endurance du photo-interprète	271
9.6	L'évolution des compétences requises pour photo-interpréter	271
9.7	Les besoins spécifiques de l'analyse diachronique	275
9.8	Les utilisateurs de BD Ocsol GE : qu'en pensent-ils ?	275
	9.8.1 Une automatisation sous contrôle	276
	9.8.2 Une qualité de production non remise en cause	278
	9.8.2.1 <i>La qualité interne</i>	278
	9.8.2.2 <i>La qualité externe</i>	279
9.9	Synthèse du produit : assistance à la digitalisation	279

Le chapitre précédent apporte des mesures de quantification et de qualification du gain de productivité qu'un prédécoupage du paysage par segmentation d'image peut apporter à la pratique de la photo-interprétation. Maintenant, il convient de mener une discussion sur l'ensemble des développements décrits dans la partie 2 et qui ont permis de proposer une méthode de production optimisée de cartes d'occupation du sol à grande échelle par photo-interprétation. Nous avons bénéficié d'une opportunité intéressante de pouvoir inscrire les développements dans le cadre de trois prestations opérationnelles pour des gestionnaires de territoire (projet de PNR de l'Aubrac, Durance Luberon Verdon Agglomération et la Métropole Nice Côte d'Azur). Nous avons également eu l'occasion de mener une série d'entretiens auprès d'utilisateurs de BD Ocsol GE. Dès lors, nous disposons d'un recul suffisant pour entreprendre une analyse globale des forces et des faiblesses de l'assistance à la digitalisation. Aussi, nous souhaitons revenir sur certaines limites techniques qui nous semblent importantes afin de formuler des précautions d'utilisation et des perspectives d'amélioration. Nous positionnons l'apport de l'assistance à la digitalisation comme une nouvelle manière de numériser l'occupation du sol. Nous nous interrogeons également sur l'évolution des compétences requises pour la photo-interprétation. Enfin nous recueillons l'avis des utilisateurs de BD Ocsol GE sur l'automatisation partielle de la production. Ce chapitre doit servir à alimenter les réflexions sur les potentialités de développement et d'application de la méthode proposée. Nous les mènerons dans la conclusion finale, en lien avec le contexte et les enjeux globaux qui régissent la production et l'utilisation des BD Ocsol GE.

9.1 Un ensemble de modules comme environnement de développement : avantages et limites

Les modules développés procurent une agilité de production face aux exigences et variables diverses des productions régulières de BD Ocsol GE. Les modules peuvent être assimilés à un jeu de puzzle à 5 pièces. Chaque pièce du puzzle est un module. Les 5 pièces sont modélées de manière à pouvoir être emboîtées les unes aux autres et à produire une assistance « *complète* » à la digitalisation (*Figure 137*).

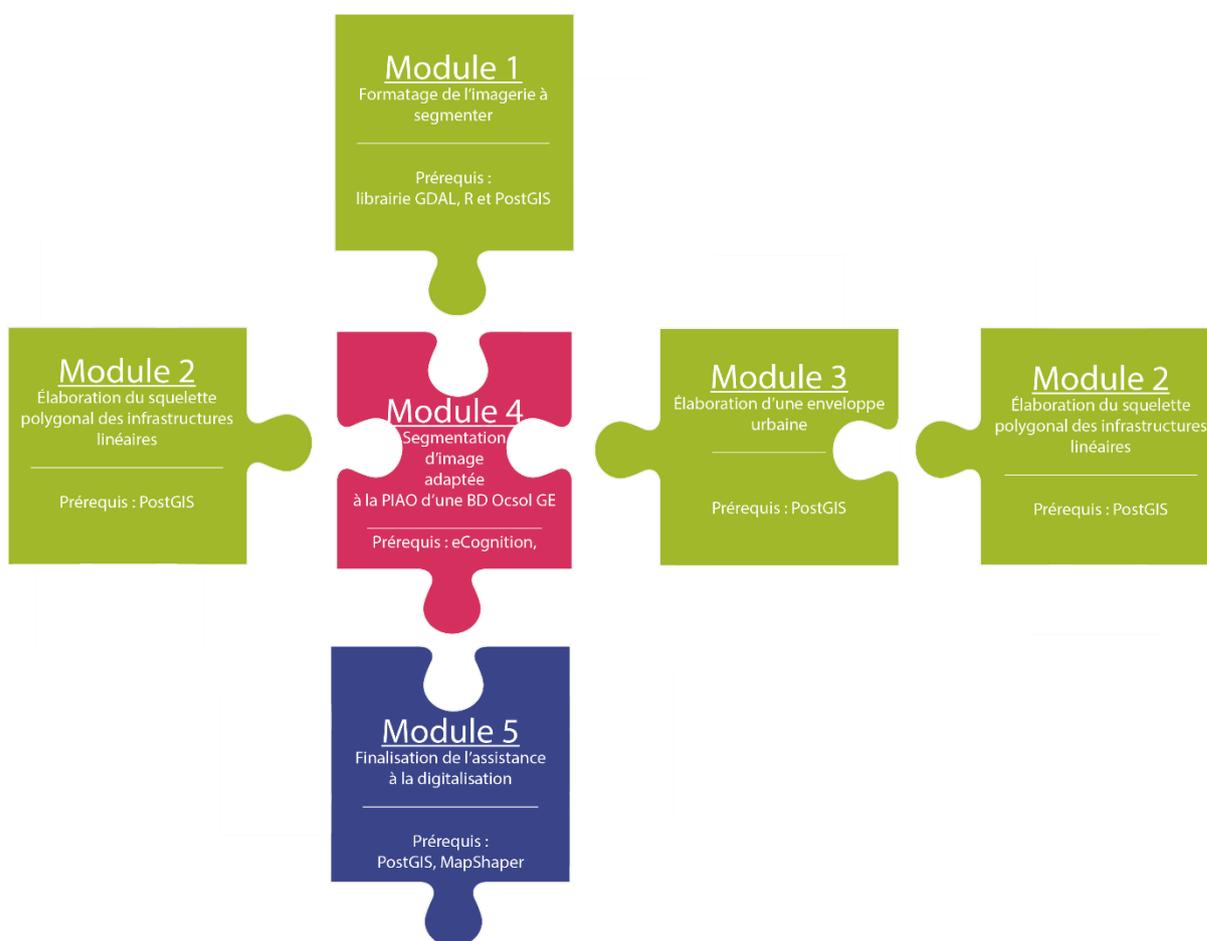


Figure 137. Imbrication des 5 modules contribuant à la réalisation d'une assistance à la digitalisation à partir d'une segmentation

Toutefois, chacune des pièces peut être considérée comme totalement indépendante par rapport aux autres. Ainsi, il est possible de construire un puzzle « *partiel* » n'utilisant pas la totalité des pièces. Par exemple, un utilisateur peut entreprendre de construire une assistance à la digitalisation sans recourir aux modules 2 et 3 dédiés à l'élaboration du squelette polygonale des infrastructures linéaires et d'une enveloppe urbaine. En aucun cas, cela nuira au fonctionnement des autres modules. Les sorties de chacun des modules ne sont pas contraignant pour les autres.

De plus, les modules peuvent être utilisés pour des usages différents. Par exemple, un utilisateur peut envisager de recourir au module 5 pour appliquer un niveau de généralisation cartographique à un fichier polygonal lambda. Un autre peut utiliser le module 3 pour élaborer une enveloppe urbaine d'un territoire et alimenter ainsi une modélisation géographique quelconque. Un dernier exemple pourrait considérer la segmentation résultante du module 4 comme un point de départ intéressant pour une démarche de classification semi-automatique de l'occupation du sol.

Par conséquent, la recherche de solutions techniques organisées à partir de plusieurs blocs de développement combinable (les modules) permet d'espérer une souplesse et une diversité d'utilisation accrues. Elle améliore l'anticipation de nombreux cas de figure lors d'une production et ouvre des perspectives techniques pour des applications différentes.

Le choix de développer des modules est également lié à nos capacités limitées en termes de développement informatique. Nous voulions apporter une solution technique pour chaque verrou technique identifié à l'aide du ou des outils (ou langages) que nous connaissions le mieux. Dès lors, les réponses techniques recourent à des technologies parfois différentes (PostGIS/R/eCognition®/MapShaper) (*Figure 137*). Nous avons essayé, autant que possible, de rendre compatibles les sorties de chaque module avec l'entrée d'un module associé en privilégiant des formats de fichier répandus (tif, shapefile).

Néanmoins, la multiplication des technologies (langages, logiciels, webservice) pour la conception de l'assistance à la digitalisation est un inconvénient pour le praticien. Cela exige de lui une bonne connaissance dans le fonctionnement de toutes ces technologies. Il doit maîtriser la lecture des différents langages de programmation utilisés afin d'identifier clairement les tâches accomplies par le module. Malgré une tentative pour minimiser l'intervention du praticien dans l'utilisation du module, elle exige une expérience (ou formation) avancée. Hormis pour le logiciel eCognition® et le webservice MapShaper, il n'existe pas d'Interface Homme-Machine (IHM) pour l'application des modules. En effet, l'absence d'une interface graphique complique l'utilisation des modules. Le lancement de ces modules s'effectue par des lignes de commande loin d'être accessible pour un personnel non formé. En dépit d'une volonté de commenter les lignes de code de façon précise, le paramétrage de certaines fonctions doit intervenir dans le code lui-même. Cette intervention peut entraîner des modifications involontaires du script et entraîner des erreurs de fonctionnement ou des résultats erronés.

Parmi les perspectives importantes formulées sur cet ensemble de modules, le développement d'une solution technique intégrée pourrait être envisagé. Il s'agit de conserver le principe de modules encapsulés par une même technologie contrôlé par une IHM. Celle-ci doit contenir toutes les fonctionnalités pour choisir d'appliquer et de paramétrer les différents modules. Grâce à cette IHM, le praticien pourrait disposer d'une interface conviviale et facile à utiliser. L'objectif est de permettre à un personnel débutant d'implémenter les modules. Malgré tout, le praticien sera toujours confronté à une tâche importante et sensible de paramétrage des processus induite par les modules.

9.2 La sensibilité des paramétrages

L'utilisation des modules exige de leurs praticiens une réflexion importante sur la tâche qu'il souhaite accomplir avec les données dont il dispose. Il revient au praticien (ou l'expert) de savoir ce qu'il est possible de faire ou de ne pas faire avec le module. Pour chaque module, un certain nombre de paramétrages sont possibles. Certains de ces paramétrages sont plus sensibles que d'autres. La sensibilité est perceptible par l'impact du paramétrage sur le résultat en sortie du module. Il est important de préciser que cette sensibilité est exprimée à dire d'expert dans le cadre de la production d'une BD Ocsol GE. La sensibilité du paramètre pourra être différente si le module est utilisé pour une application différente. Le *Tableau 28* résume l'ensemble des paramètres modifiables sur les modules par le praticien.

Tableau 28. Paramètres de configuration (sensibilités et enjeux) pour la mise en œuvre d'une assistance à la digitalisation dans la production d'une BD Ocsol GE

Module M	Paramétrage	Sensibilité	Enjeux
M1 : formatage de l'imagerie à segmenter	Superficie (m ²) de tuiles de découpage de l'image dans le cadre d'un traitement sur un grand volume de donnée (<i>section 5.1.5</i>).	Faible	Limiter la durée des temps de traitements
M1 : formatage de l'imagerie à segmenter	Superficie (m ²) du chevauchement entre les tuiles de découpage de l'image dans le cadre d'un traitement sur un grand volume de donnée (<i>section 5.1.5</i>).	Faible	Limiter les reprises manuelles importantes aux jonctions des tuiles
M2 : élaboration du squelette polygonal des infrastructures linéaires	Sélection des infrastructures routières et ferroviaires (critères qualitatifs et quantitatifs) (<i>section 5.3.2.2</i>).	Moyenne	Choisir les infrastructures devant intégrer la BD Ocsol GE
M2 : élaboration du squelette polygonal des infrastructures linéaires	Largeur minimale (m) pour la transformation de l'information linéaire des réseaux routiers et ferroviaires en information surfacique (<i>section 5.3.2.3</i>).	Moyenne	Fournir une emprise spatiale minimale des infrastructures linéaires, si non renseigné
M2 : élaboration du squelette polygonal des infrastructures linéaires	Superficie (m ²) et largeur (m) minimale pour la fermeture des espaces découpés par l'ossature polygonale (<i>section 5.3.2.4</i>).	Faible	Éliminer les petits espaces de faible intérêt thématique coincés par l'ossature polygonale
M3 : élaboration d'une enveloppe urbaine	Pourcentage d'emprise spatiale des bâtiments dans la parcelle cadastrale au-delà duquel la parcelle est considérée comme « urbaine » (<i>section 5.3.3.2</i>).	Moyenne	Fixer le niveau d'exhaustivité de l'enveloppe urbaine
M3 : élaboration d'une enveloppe urbaine	Superficie (m ²) et largeur (m) minimale pour la fermeture des espaces découpés par l'enveloppe urbaine (<i>section 5.3.3.2</i>).	Faible	Éliminer les petits espaces de faible intérêt thématique compris dans l'enveloppe urbaine
M3 : élaboration d'une enveloppe urbaine	Largeur (m) minimale des tronçons routiers complémentaires obtenus par la cartographie différentielle des parcelles cadastrales. Opération réalisée dans le cadre de la récupération du réseau viaire d'un espace urbain dense et structuré (<i>section 5.3.4</i>).	Faible	Fournir une emprise spatiale minimale des infrastructures linéaires complémentaires
M4 : segmentation d'image	Intégration (ou non) du ou des vecteur(s) de référence géométrique dans le processus de segmentation (<i>section 6.2.3</i>).	Faible	Contraindre l'algorithme de segmentation par un ou plusieurs vecteurs de référence
M4 : segmentation d'image	Échelle de segmentation d'image (facteur d'hétérogénéité maximale autorisée au sein des objets générés) (<i>section 6.2.4</i>).	Forte	Maitriser la sur- ou sous-segmentation de l'image par rapport à l'objectif d'étude
M4 : segmentation d'image	Paramètre de forme exigé par l'algorithme de segmentation (<i>section 6.2.4</i>).	Faible	Maitriser l'influence de la valeur spectrale ou de la forme dans la création d'objets
M4 : segmentation d'image	Paramètre de compacité exigé par l'algorithme de segmentation (facteur d'ajustement de la compacité ou de l'irrégularité des objets générés) (<i>section 6.2.4</i>).	Faible	Ajuster la compacité ou l'irrégularité des objets générés
M4 : segmentation d'image	Superficie minimale (pixel) des objets générés par la segmentation d'image (<i>section 6.2.5</i>).	Moyenne	Fixer une unité minimale de cartographie pour le pré-découpage

M4 : segmentation d'image	Largeur estimée (l_{est}) minimale des objets générés par la segmentation d'image (<i>section 6.2.6.1</i>)	Moyenne	Limiter la formation d'objets « fins » par la segmentation
M5 : finalisation de l'assistance à la digitalisation	Assemblage des dalles segmentées dans le cadre d'un traitement sur un grand volume de donnée (fonction activée ou non) (<i>section 7.1</i>).	Moyenne	Former un seul fichier vectoriel de pré-découpage
M5 : finalisation de l'assistance à la digitalisation	Pourcentage d'élimination du nombre de vertex constituant la segmentation d'image dans le cadre d'une généralisation cartographique (<i>section 7.2</i>).	Forte	Maîtriser la simplification du tracé des polygones
M5 : finalisation de l'assistance à la digitalisation	réintégration (ou non) du ou des vecteur(s) de référence géométrique structurant la BD Ocsol GE (<i>section 7.3</i>).	Forte	Respecter la géométrie d'un ou plusieurs vecteurs de référence dans le pré-découpage

Dix-sept types de paramétrage sont recensés. Huit d'entre eux présentent une « faible » sensibilité. Cela signifie que la valeur par défaut attribué à ces paramètres est établie pour fournir un résultat correct (ou satisfaisant) pour la production d'une BD Ocsol GE. Dans ce contexte, la modification de ce paramètre n'aura que peu d'impact sur le résultat global du module. Cinq paramètres sont qualifiés par une sensibilité « moyenne ». Ces paramètres exigent du praticien une attention plus spécifique. Ils font intervenir des choix méthodologiques souvent liés au cahier des charges fixés pour l'élaboration de la BD Ocsol GE. Enfin deux paramètres sont qualifiés par une sensibilité « forte » :

- l'échelle de segmentation d'image (module 4),
- la généralisation cartographique (module 5).

L'assistance à la digitalisation à partir d'une segmentation d'image a été conçue et calibrée pour une pratique de la photo-interprétation à grande échelle (entre le 1/2 000^e et le 1/10 000^e) à partir d'une imagerie THRS. La robustesse de l'assistance est assurée pour cette plage d'échelle. Le choix de l'algorithme de segmentation « multi-resolution » couplé à l'outil ESP permet de conserver une relative maîtrise du résultat de la segmentation d'image (*section 6.2.4.2*). Néanmoins, le praticien reste maître du paramétrage de l'échelle de segmentation. Par conséquent, son action aura ici un impact certain sur la qualité de l'assistance à la digitalisation (sur-segmentation ou sous-segmentation). Même si l'outil ESP aide le praticien à fixer une valeur d'échelle, la maîtrise de ce paramètre d'échelle reste difficile. Celle-ci fait appel à une bonne connaissance et expérience de la segmentation d'image.

Le seuil de généralisation cartographique est également un paramètre sensible. Il est appliqué de manière uniforme au résultat de la segmentation. Fixer ce seuil reste un choix subjectif et s'appuie fortement sur l'expérience de production des BD Ocsol GE par photo-interprétation. Ici, notre expérience préconise une simplification des tracés qui éliminerait entre 90 et 95% des vertex du fichier de segmentation initial. Toutefois, nous ne voulons pas prétendre à fournir au praticien un seuil optimal de généralisation cartographique plutôt qu'un autre. Pour y parvenir une analyse comparative des niveaux de simplification cartographique pratiqués par des photo-interprètes pourrait être menée. Celle-ci pourrait mettre en relation la surface (ou le périmètre) des polygones digitalisés avec leur nombre de vertex en fonction des paysages photo-interprétés. Cependant, la pratique de la photo-interprétation ne produit pas forcément une généralisation cartographique identique sur l'ensemble d'un site d'étude aux caractéristiques paysagères

hétérogènes. Dès lors, il conviendrait d'appliquer un seuil différent de généralisation selon le paysage à digitaliser. Cette hypothèse pourrait compliquer la réalisation de l'assistance.

La sensibilité accrue de ces deux derniers paramètres requière une expertise avancée du praticien. Cet aspect peut être considéré comme un inconvénient ou une limite à l'utilisation d'une assistance à la digitalisation. À l'inverse, il peut être perçu comme un avantage pour l'expert qui va conserver la possibilité d'intervenir sur des paramètres sensibles comme l'échelle de segmentation ou le niveau de généralisation cartographique. De cette manière, l'assistance pourrait s'adapter à un territoire d'étude spécifique, à différentes imageries ou à une pratique de la photo-interprétation à une échelle différente.

9.3 Quand doit-on recourir à l'assistance à la digitalisation ?

Jusqu'ici, nous n'avons pas évoqué le temps nécessaire à l'élaboration de l'assistance à la digitalisation. Il est vrai que la recherche des solutions techniques et leur mise au point pour satisfaire l'ensemble des fonctions de service rendues par le produit a pris un temps non négligeable. Il s'agit du fruit d'un grand nombre d'expérimentations menées à travers trois prestations de production en condition réelle (Métropole Nice Côte d'Azur, Durance Luberon, Verdon Agglomération et le projet de PNR de l'Aubrac). Malgré tout, ces prestations ne nous permettent pas d'apprécier précisément le temps nécessaire à l'élaboration de l'assistance à la digitalisation. En effet, nous ne pouvons proposer qu'une estimation de temps exprimé en jour de production en bureau d'études (7 heures). À l'heure actuelle, nous évaluons à six jours de production, à la mise en place de l'assistance à la digitalisation. Nous y incluons les temps dédiés à la gestion de projet (collecte de données, réunions, etc.). Cette estimation comprend :

- l'élaboration du squelette polygonal des infrastructures linéaires,
- l'élaboration de l'enveloppe urbaine,
- la segmentation adaptée à l'exercice de la photo-interprétation.

À terme, l'assistance à la digitalisation a pour objectif de devenir une routine standardisée. Son recours est prévu pour être rapidement exécuté de façon générique en minimisant les adaptations, quelle que soit la zone d'étude. Le temps nécessaire à la mise en place de l'assistance relèverait plus d'un temps de calcul « *machine* » pouvant toujours être optimisé contrairement au temps de PIAO difficilement compressible.

Les six journées nécessaires à l'élaboration de l'assistance à la digitalisation pourraient être perçues comme du temps non productif. Ce sont des journées qui ne sont pas dédiées au travail effectif de PIAO. Le non recours à l'assistance permettrait de débiter plus tôt l'exercice de PIAO. Il serait alors possible d'espérer une fin de prestation plus rapide. Cependant la mise à disposition d'un prédécoupage du paysage permet d'augmenter la productivité de la photo-interprétation (Chapitre 8). La question est donc : **Pour quelle étude est-il opportun de recourir à une assistance à la digitalisation ?**

Évaluer l'opportunité de recourir à une assistance à la digitalisation est difficile car elle renvoie à de nombreux facteurs. Pour aider à la réflexion, nous avons construit un abaque qui fournit une comparaison des vitesses minimale et maximale de production (km²/h) par photo-interprétation assistée et par photo-interprétation non assistée (Figure 138). Ces vitesses sont

quantifiées lors de notre analyse comparative des deux méthodologies de production (chapitre 8). L'abaque est représentatif pour une photo-interprétation appliquée à une configuration paysagère hétérogène composée d'espaces agricoles et d'espaces urbains entrecoupés par quelques espaces forestiers.

Les plages de vitesse de production par photo-interprétation (assistée ou non) référencées sur l'abaque ne démarrent pas dès la première heure de production. La raison repose sur la prise en compte du temps de préparation nécessaire avant l'exercice de photo-interprétation. Ce temps existe aussi bien pour un exercice de PIAO assistée que pour une PIAO non assistée. Ce temps de préparation se compose de trois tâches communes aux deux méthodologies de production :

- l'élaboration de l'interface d'édition sous le logiciel SIG ;
- la mise en forme des données exogènes (sélection, symbologie, étiquetage, etc.) ;
- l'élaboration du squelette polygonal de référence des infrastructures linéaires.
- la photo-interprétation assistée nécessite en plus deux autres tâches de préparation :
- l'élaboration de l'enveloppe urbaine comme masque urbain pour l'implémentation de l'algorithme de segmentation ;
- la segmentation d'image.

Les estimations des temps nécessaires aux tâches de préparation de la PIAO sont présentées dans le *Tableau 29*. Elles sont établies par retours d'expérience des différentes prestations cartographiques menées dans le cadre de cette thèse.

Tableau 29. Estimation du temps de réalisation des tâches de préparation de la photo-interprétation

Tâche de préparation de la PIAO	Estimation du temps de réalisation
Élaboration de l'interface d'édition sous le logiciel SIG	1 jour (7 h)
Mise en forme des données exogènes	1 jour (7 h)
Élaboration du squelette polygonal de référence des infrastructures linéaires	2 jours (14 h)
Élaboration de l'enveloppe urbaine	2 jours (14 h)
Segmentation d'image	2 jours (14 h)

Pour les deux options méthodologiques, il existe une période d'adaptation pendant laquelle le photo-interprète se rode à l'exercice de la photo-interprétation demandée : il se familiarise avec l'outil d'édition et les données exogènes disponibles; il s'approprie la nomenclature à partir de laquelle il doit décrire le paysage ; il affine sa lecture du paysage à travers l'imagerie utilisée. En d'autres termes, le photo-interprète prend ses marques pendant cette période. On estime, toujours par retours d'expérience, que 2 jours (14h) sont nécessaires avant d'atteindre un rythme de croisière dans l'exercice de la photo-interprétation.

Le rythme de croisière de photo-interprétation est loin d'être constant ou identique d'un photo-interprète à l'autre. L'expérience du photo-interprète peut influencer sur sa performance à photo-interpréter plus ou moins vite même si ce postulat n'est pas totalement vérifié dans notre

analyse comparative au chapitre 8. De plus, le photo-interprète est confronté à une multitude de facteurs pouvant faire varier sa vitesse de production, parmi eux :

- le changement de configuration paysagère à photo-interpréter ;
- la fatigue ;
- une mauvaise compréhension des clés d'interprétation ou inversement ;
- des difficultés d'affichage des données sur un poste informatique.

Pour ces raisons, nous avons préféré représenté la vitesse de production par photo-interprétation (assistée ou non) par une plage de vitesse. Elle correspond à l'amplitude maximale des vitesses observées sur 4 exercices de photo-interprétation.

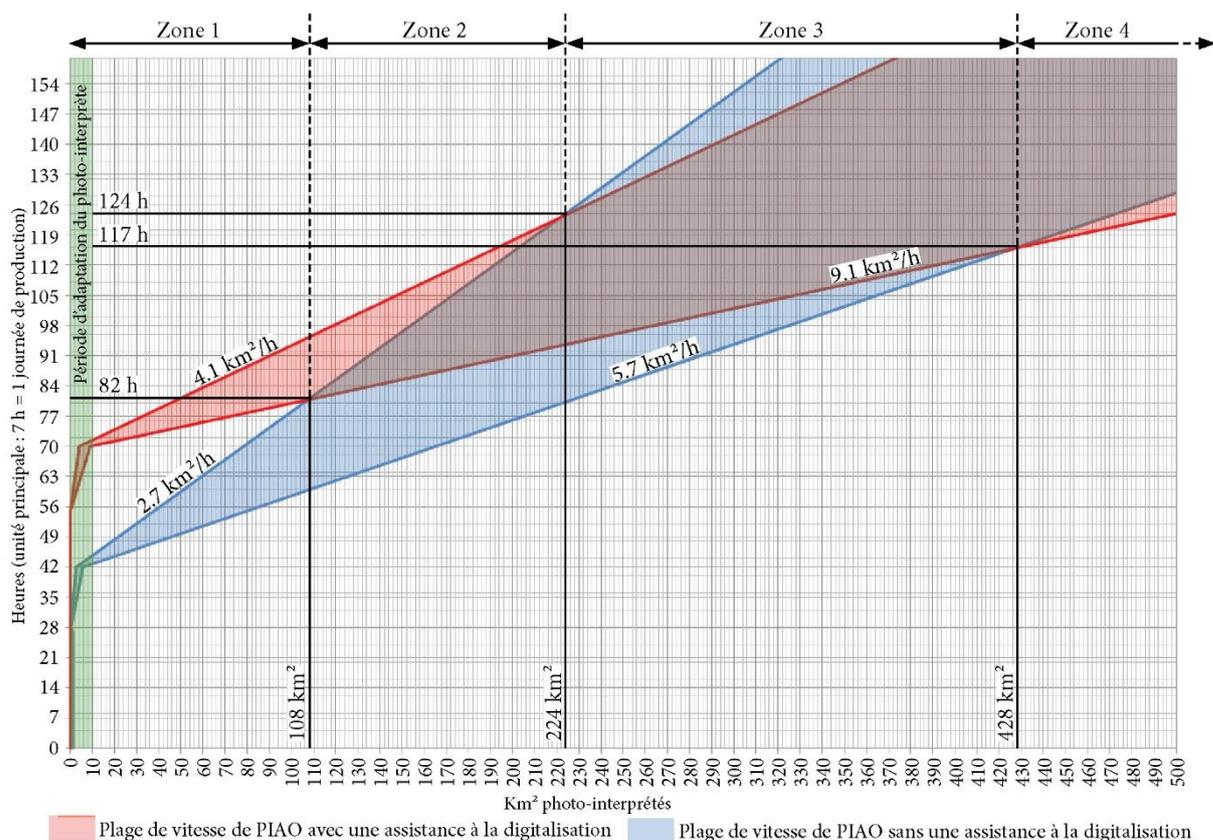


Figure 138. Comparaison des vitesses minimales et maximales de PIAO assistée et non-assistée sur un secteur paysager hétérogène

La lecture de l'abaque distingue 4 zones significatives (Figure 138) :

La première zone correspond à la période où la pratique d'une photo-interprétation non assistée permet de couvrir une certaine superficie du territoire dans une durée de production plus courte que si nous avons recouru à l'élaboration d'une assistance à la digitalisation. Cette période est comprise entre 1 et 82 h de production (soit 11 ou 12 jours) pour une surface couverte de 108 km². Cela signifie que pour une zone d'étude inférieure à 108 km², il est plus rentable (coût/jour) d'entreprendre une photo-interprétation sans assistance à la digitalisation.

La seconde zone est enclenchée par le rattrapage d'une PIAO assistée menée à la vitesse maximale observée sur la pratique d'une PIAO non assistée menée à la vitesse minimale

observée. Ici, le rattrapage intervient à 108 km² couvert après 82 h de production lorsque la photo-interprétation assistée plafonne à 9.1 km²/h et la photo-interprétation non assistée s'exerce à 2.7 km²/h. Cette nouvelle zone, couvrant 116 km² supplémentaires, entame une période où la rentabilité d'une photo-interprétation non assistée diminue. Progressivement, il devient de plus en plus intéressant de réfléchir à l'utilisation d'une assistance à la digitalisation.

La troisième zone est entamée après 124 h de production et 224 km² couvert. Il s'agit du point de rencontre entre une PIAO assistée menée à la vitesse minimale observée (4.1 km²/h) et une PIAO non assistée à la vitesse minimale observée (2.7 km²/h). Cette troisième période signifie que les deux options méthodologiques de production offre une rentabilité économique (coût jour) similaire. Le choix d'une méthodologie de production plutôt qu'une autre devra se décider sur d'autres critères d'évaluation.

La quatrième zone démarre lorsque la PIAO assistée menée à la vitesse maximale relevée rattrapage un exercice de PIAO non assistée menée également à la vitesse maximale observée. Il intervient après 117 h de production soit 428 km² couvert. Progressivement, l'utilisation de l'assistance à la digitalisation devient de plus en plus rentable. La superficie couverte est plus important pour un temps de production moins long par rapport à une PIAO qui n'utiliserait pas l'assistance. Cet argument devient de plus en plus rédhibitoire pour le choix méthodologique.

La situation où les deux plages de vitesses se détachent complètement n'intervient jamais. La vitesse minimale observée pour la PIAO assistée est toujours plus faible que la vitesse maximale observée pour la PIAO non assistée. Autrement dit, il existe toujours une situation de production où la PIAO non assistée conserve une potentialité de fournir un meilleur rapport km²/h au producteur.

De plus, l'abaque est construit à partir de relevés de vitesse de photo-interprétation sur un seul type de configuration paysagère. Même si celle-ci est hétérogène et se compose d'éléments urbains, agricoles et naturels, il serait utile de compléter cette analyse par la construction d'abaques représentatifs de paysages types : urbain dense, agricole ouvert et bocager, naturel ou semi-naturel homogène et fragmenté... Malheureusement faute de temps, nous ne disposons pas de données suffisamment représentatives pour effectuer cette démarche.

Les zones 3 et 4 de l'abaque portent le plus d'intérêt pour le producteur. Pour ces zones, l'assistance à la digitalisation permet de couvrir autant ou voire plus de superficie dans un délai de production similaire ou plus court comparé à une PIAO non assistée. Cependant l'abaque ne donnera pas de réponse franche (oui ou non) au producteur pour savoir s'il doit recourir à une assistance ou non. Il convient au producteur d'associer son positionnement de production sur l'abaque avec des critères complémentaires et que nous examinons plus loin :

- la qualité du prédécoupage du paysage espéré par l'assistance à la digitalisation ;
- le confort de photo-interprétation ;
- l'équipe mise en place pour l'exercice de photo-interprétation (profils, effectifs, compétences et expériences)

9.4 La qualité du prédécoupage : une notion subjective

Il existe autant de prédécoupage possible qu'il existe de praticien capable de mettre en place l'assistance à la digitalisation. La recherche de la meilleure segmentation d'image est un faux problème. La qualité est appréciée à partir d'un compromis d'acceptabilité du prédécoupage à satisfaire la première Fonction Principale (FP) recensé lors de l'Analyse Fonctionnelle (Chapitre 4) à savoir « *faciliter la production de la BD Ocsol GE* ».

Quelque soit la situation de production, l'assistance à la digitalisation fournit un prédécoupage du paysage adapté à un exercice de PIAO. Cela signifie que la forme des polygones se rapproche de la forme de ceux pouvant être digitalisés manuellement par un photo-interprète. Par contre, cela ne signifie pas que la topologie des polygones créés par l'assistance est systématiquement en adéquation avec la logique du photo-interprète et le besoin cartographique attendu. Par exemple, l'assistance peut proposer un prédécoupage du paysage jugé trop détaillé ou inversement par le photo-interprète. Le jugement de la qualité du prédécoupage reste subjectif.

Nous avons identifié le paramètre d'échelle de segmentation d'image (SI) et le paramètre de généralisation cartographique comme les plus sensibles pour la qualité du résultat de l'assistance à la digitalisation (*Section 9.2*). Pourtant, il nous semble difficile de mesurer précisément leurs influences. En effet, cette mesure est dépendante d'un trop grand nombre de facteurs internes et externes à l'assistance :

- la sensibilité de l'ensemble des paramètres nécessaires à la réalisation de l'assistance ;
- les configurations paysagères rencontrées ;
- les consignes cartographiques ;
- l'interprétation parfois subjective des photo-interprètes.

Nous n'avons pas pu tester plusieurs SI avec plusieurs niveaux de généralisation sur des configurations paysagères différentes et selon des consignes cartographiques différentes, faute de moyens et de temps. Toutefois, ces mesures de qualité auraient souffert d'un manque de représentativité et de robustesse. D'une part à cause du caractère sur-mesure des demandes cartographiques. En effet, il est difficile de prévoir l'intégralité des cas de figure de production qui peuvent se présenter. D'autre part, la photo-interprétation reste une discipline très subjective.

Il convient alors de préciser que l'assistance doit toujours être pensée en lien avec la situation de production (territoire d'étude, objectifs et consignes cartographiques) souvent variable. Dans ces conditions, l'assistance peut être performante pour un type de paysage, un peu moins pour un autre type mais reste une aide pour celui qui l'utilise.

9.5 Une nouvelle manière de numériser l'occupation du sol par photo-interprétation

À la suite de l'expérimentation menée dans le chapitre 8, la discussion avec les experts photo-interprètes s'est avérée être un complément précieux aux mesures de comparaison. Elle permet de se rendre compte de l'impact de l'assistance à la digitalisation sur le confort de travail des photo-interprètes. Avec l'assistance à la digitalisation, nous nous autorisons à parler d'une

nouvelle manière de numériser l'occupation du sol par photo-interprétation pour les aspects examinés ici :

- les manipulations d'édition ;
- la lecture du paysage ;
- l'homogénéité des tracés entre un même ou plusieurs photo-interprètes ;
- l'endurance dans l'exercice de photo-interprétation.

9.5.1 La diminution des manipulations d'édition

Cette nouvelle manière de photo-interpréter se traduit d'abord par une diminution des tâches techniques qui incombent au photo-interprète : digitaliser un élément paysager et lui attribuer une classe d'occupation du sol. En théorie, l'assistance à la digitalisation doit diviser par deux les manipulations d'édition menées par le photo-interprète. Le photo-interprète est dédouané de la digitalisation. Il lui reste seulement l'attribution de la classe. La diminution des manipulations d'édition est avérée (Chapitre 8) même s'il convient de la nuancer en pratique. Nous n'apportons rien d'autre qu'une aide au photo-interprète dans sa tâche de digitalisation. Ce dernier est libre de l'accepter ou de la refuser et de modifier les contours.

Néanmoins, les différents retours d'expérience recueillis font état d'une bonne satisfaction de l'assistance (*section 8.4.2*). Aucun des photo-interprètes ayant recouru à l'assistance pendant les différentes prestations cartographiques (Métropole Nice Côte d'Azur, Duranc Luberon Verdon Agglomération, Projet de PNR de l'Aubrac), n'a évoqué la révocation de l'assistance pour la photo-interprétation. Tous considèrent que le prédécoupage apporte une meilleure ergonomie technique à l'exercice. En effet le prédécoupage induit une utilisation limitée des outils d'édition proposés par les logiciels de SIG. Le photo-interprète possède seulement deux outils d'édition pour intervenir sur le prédécoupage : l'outil de découpage d'un polygone et l'outil de fusion de deux (ou plus) polygones contigus. Il n'est pas nécessaire pour lui de recourir à des outils de création ou de remodelage de polygone. De ce point de vue, l'assistance permet d'améliorer, pour une part, la maîtrise de la numérisation de l'occupation du sol.

De plus, la digitalisation d'éléments paysagers de grande superficie est facilitée par l'apport du prédécoupage. En effet, il est fréquent que la taille de l'élément paysager à détourner soit plus grande que l'emprise spatiale visible sur l'écran d'ordinateur imposé par l'échelle de numérisation (entre le 1/2 000^e et le 1/5 000^e pour la production d'une BD Ocsol GE). Le photo-interprète doit alors alterner entre les outils d'édition et de navigation sur l'écran pour délimiter ces objets imposants. Il s'agit d'une contrainte importante exigeant une forte concentration de la part du photo-interprète. Celui-ci est alors en proie à un essoufflement rapide dans son exercice. Le prédécoupage limite fortement les actions nécessaires à la numérisation des grands polygones.

9.5.2 Une première lecture du paysage

Les tâches de digitalisation et d'interprétation sont conditionnées par la lecture du paysage effectuée par le photo-interprète. La lecture d'un paysage sur une image exige de la patience et de la rigueur de la part de celui qui la mène. Comment placer les limites de la parcelle que je dois détourner ? Où dois-je positionner la limite qui symbolise un changement de peuplement forestier ? Dois-je faire passer le tracé du polygone par le centre de la haie où dois-je dissocier

la haie du reste de la parcelle ? Cet échantillon de questions est systématique dans la démarche du photo-interprète. Leur prise en compte est très fastidieuse sur des longues périodes de PIAO en particulier pour un photo-interprète débutant.

Le prédécoupage apporté par l'assistance se positionne comme une première lecture du paysage. Sans le prédécoupage, le photo-interprète est livré à ses propres choix de digitalisation. Même si le photo-interprète possède une bonne expérience, il peut se sentir mal à l'aise avec l'exercice de numérisation. Le prédécoupage du paysage tend à diminuer sa responsabilité dans la décision de délimitation de l'occupation du sol.

Cet outil est particulièrement intéressant pour les espaces paysagers fortement homogènes. En effet, La subjectivité du détournage d'éléments paysagers spécifiques à l'intérieur de ces espaces est plus forte. Par exemple, les transitions entre les différents éléments qui composent les espaces forestiers sont souvent flous. Il est parfois difficile d'identifier une ligne de démarcation entre certains types de peuplements forestiers ou des milieux arbustifs. De ce point de vue, le prédécoupage apporte clairement une aide au photo-interprète. Il permet de soulager le photo-interprète d'une décision de découpage subjectif (*Figure 139*).

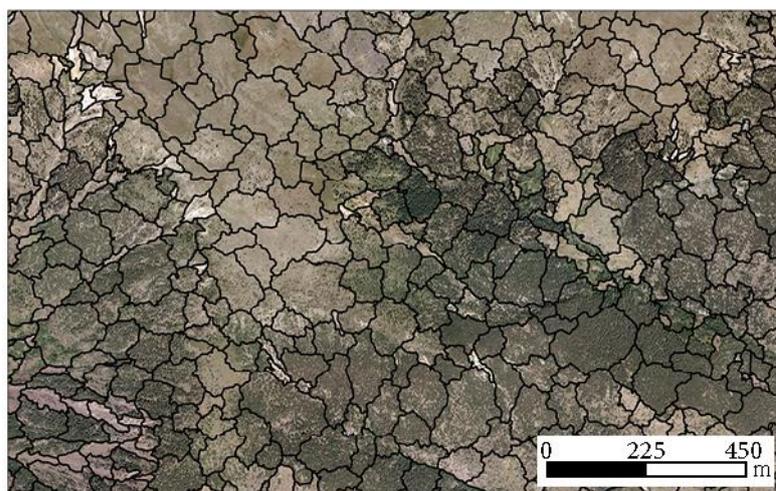


Figure 139. Prédécoupage d'un paysage fortement homogène

La lecture des espaces artificialisés est également facilitée par le prédécoupage. Pour rappel, l'algorithme de segmentation n'intervient pas dans les espaces urbanisés pour les raisons évoqués dans la *section 4.1.1.1*. L'enveloppe urbaine générée pour protéger ces espaces de la segmentation constitue en soi un prédécoupage du paysage urbain. Dans de nombreuses situations, l'enveloppe urbaine permet de détourner efficacement (avec peu ou pas de reprises manuelle) des éléments artificialisés prêts à être identifiés. Cela s'observe surtout dans les espaces péri-urbains ou de mitage urbain. Par exemple, dans certains contextes paysagers comme celui de l'arrière-pays niçois, la délimitation entre l'espace urbain et l'espace non urbain est complexe. Celle-ci n'est pas franche et est confondue par l'effet de relief et le mode de gestion des jardins particuliers souvent très arborés dans cette région. Dans ce contexte, l'utilisation de l'information cadastrale dans la construction de l'enveloppe urbaine est pertinente (*Figure 140*). De plus, la performance de l'enveloppe urbaine est perçue dans les vitesses de photo-

interprétation observée (*Figure 136*). Elles sont globalement plus importantes lorsque l'enveloppe urbaine est disponible.

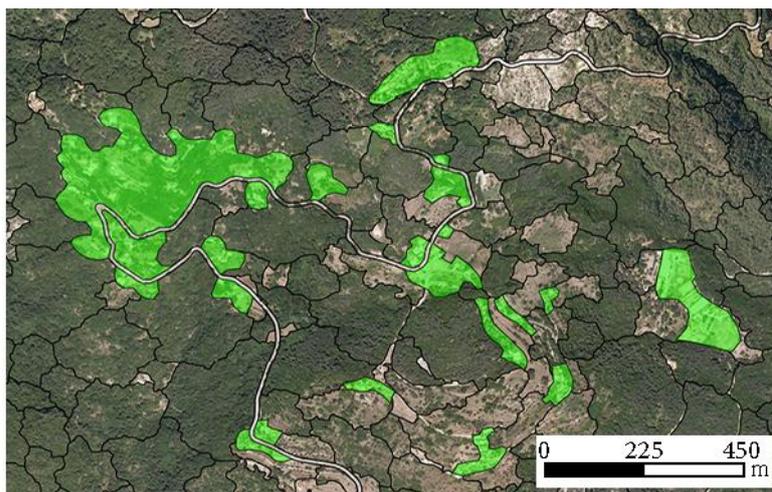


Figure 140. Apport de l'enveloppe urbaine (en vert) en zone rural

9.5.3 La photo-interprétation en équipe

La photo-interprétation reste une activité fortement consommatrice de temps. Dans le cadre d'une production de BD Ocsol GE dans lequel nous nous inscrivons, la photo-interprétation est souvent menée par une équipe de photo-interprètes. L'objectif est de tenir des délais de production raisonnables pour le commanditaire. La photo-interprétation en équipe rajoute des contraintes liées à la gestion de projet et l'harmonisation des productions cartographiques menées par les différents photo-interprètes. Au sein de l'équipe de photo-interprètes, les profils des photo-interprètes sont variables. Certains possèdent une bonne maîtrise des outils de saisies mais sont encore mal à l'aise avec la lecture du paysage. Inversement, certains possèdent une bonne capacité à identifier les éléments paysagers mais peinent à se familiariser avec les outils d'édition. Les expériences et les sensibilités à l'exercice de photo-interprétation sont difficiles à évaluer. La nécessité d'un contrôle qualité accru après la photo-interprétation est d'autant plus nécessaire que l'effectif de photo-interprètes est important.

L'assistance à la digitalisation permet d'assurer une relative homogénéité dans le détourage des éléments paysagers entre un même ou plusieurs photo-interprètes. La possibilité offerte aux photo-interprètes de se reposer sur un prédécoupage du paysage permet de diminuer la subjectivité de chacun dans la manière de numériser l'occupation du sol.

Pour étayer ce propos, nous avons mené une expérimentation auprès d'une promotion de dix-huit étudiants en deuxième année de licence de géographie et aménagement de l'Université de Saint-Étienne. Neuf d'entre eux ont du se prêter à un exercice de photo-interprétation non assistée. Les neuf autres s'attachent au même exercice mais à l'aide d'une assistance à la digitalisation. Aucun de ces étudiants n'a pratiqué la photo-interprétation dans le cadre de son cursus ou son parcours professionnel. Il s'agit d'un exercice totalement inconnu pour eux. Durant deux séances d'introduction, nous avons fourni à l'ensemble des étudiants une définition d'une BD Ocsol GE. À l'aide de plusieurs exemples, nous avons précisé les objectifs de ces bases et leurs méthodes de production, en particulier la photo-interprétation. Puis nous avons consacré

du temps à la prise en main et la familiarisation avec les outils d'éditeurs sous le logiciel ArcGIS® 10 avant de débiter l'exercice de photo-interprétation.

L'expérience veut mettre en évidence l'impact du prédécoupage sur la tâche de numérisation de l'occupation du sol. La *Figure 141* et la *Figure 142* montrent respectivement les 9 découpages superposés de l'occupation du sol selon une digitalisation non assistée et une digitalisation assistée.

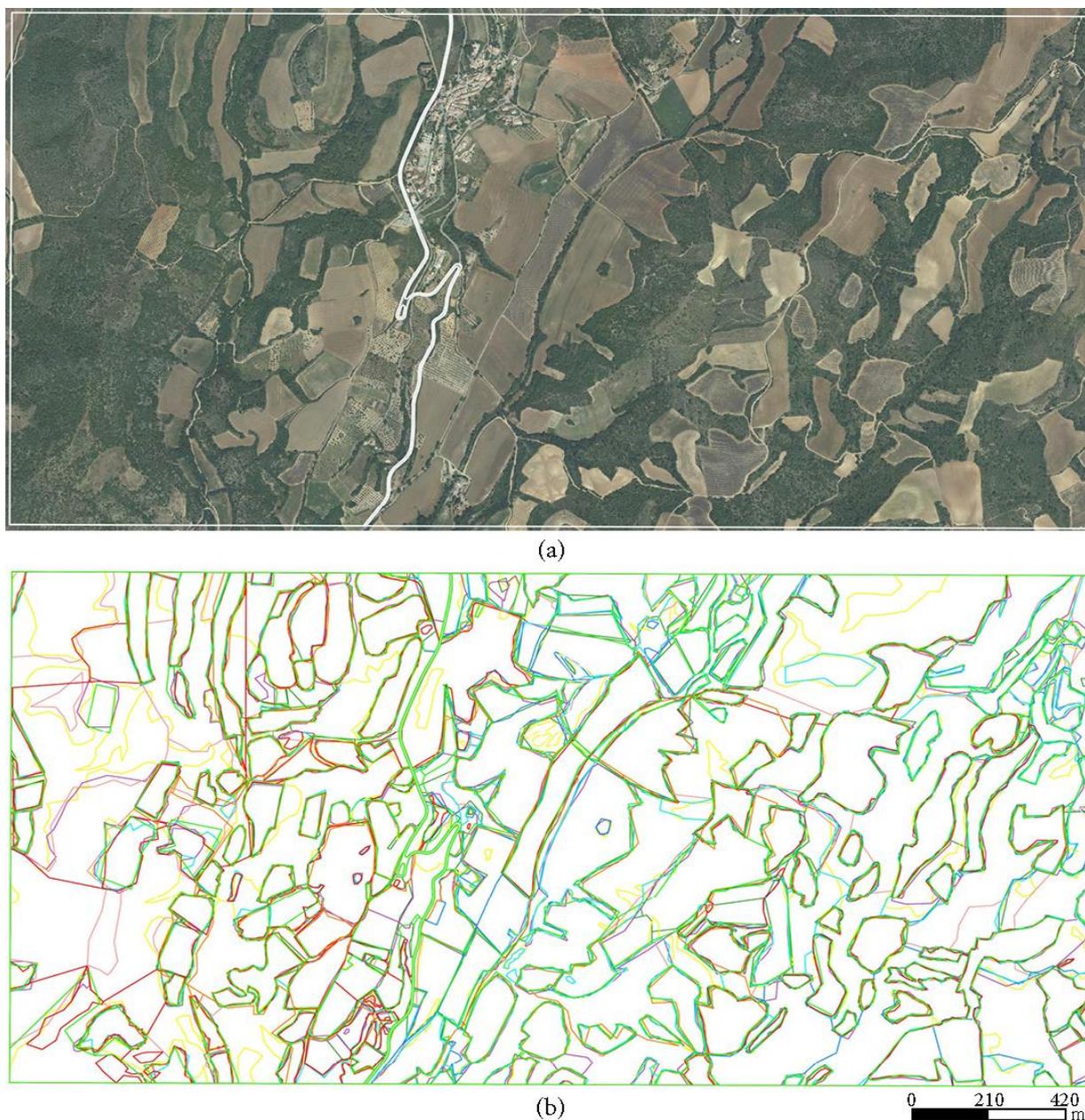


Figure 141. (a) Support de digitalisation pour la photo-interprétation non assistée, (b) superposition des 9 découpages non assistés de l'occupation du sol réalisée par les étudiants

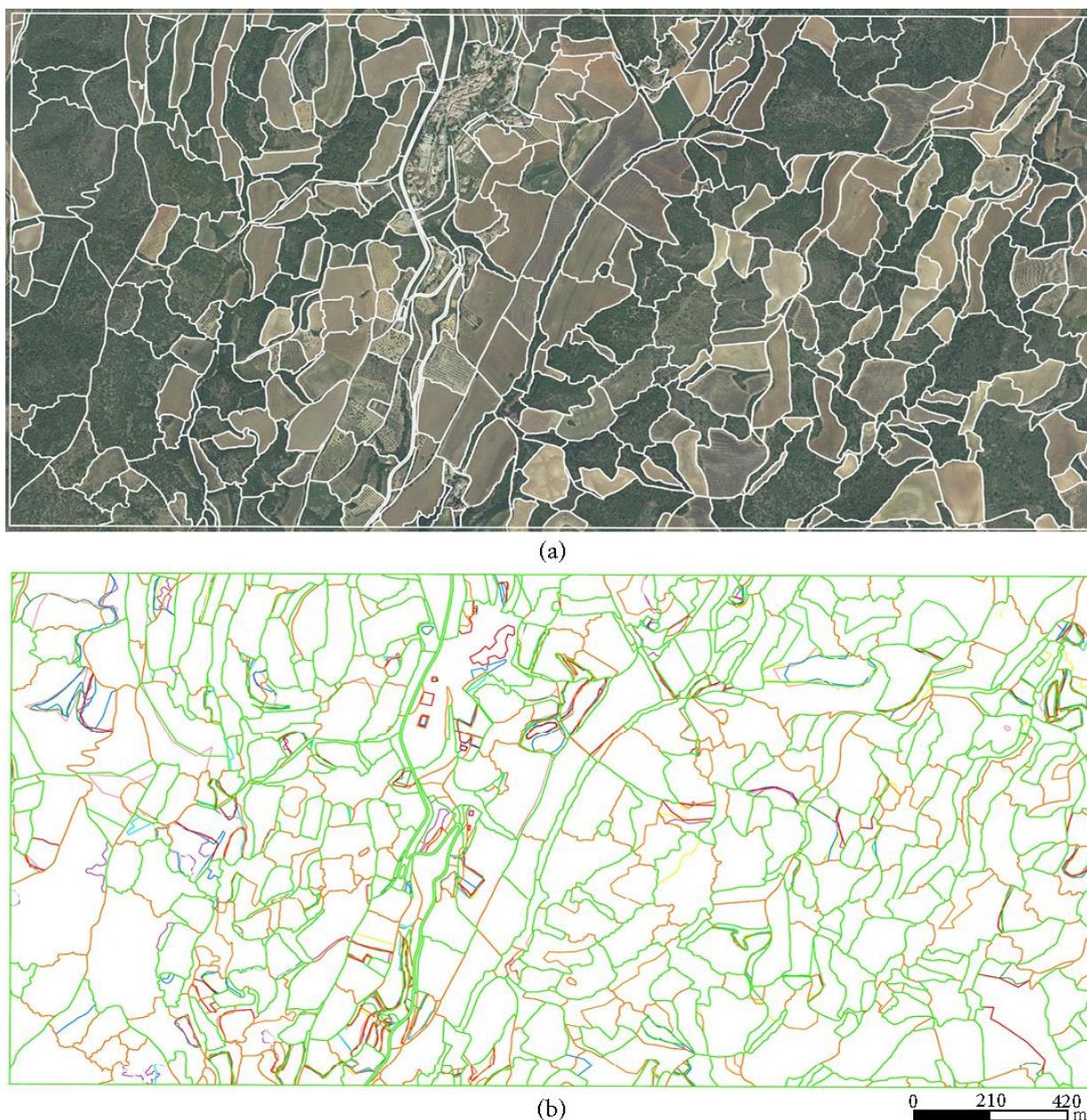


Figure 142. (a) Support de digitalisation pour la photo-interprétation assistée, (b) superposition des 9 découpages assistés de l'occupation du sol réalisée par les étudiants

L'impact du prédécoupage du paysage sur l'exercice de numérisation de l'occupation du sol est nettement visible. La variabilité des tracés des polygones est largement supérieure lorsque les photo-interprètes ne disposent pas de prédécoupage. Hormis le polygone appartenant au squelette routier, aucun des polygones édités dans les neuf productions non assistées ne possède la même géométrie. A l'inverse, les productions assistées montrent une relative homogénéité dans les tracés. Les différences observées sont principalement dues à la fusion des polygones fournis par le prédécoupage. Peu d'entre eux sont tentés de réaliser des nouveaux découpages.

Cette expérimentation laisse à penser que le prédécoupage va favoriser une numérisation assez uniforme de l'occupation du sol sur l'ensemble d'un territoire cartographié par plusieurs photo-interprètes. Le prédécoupage induit implicitement le gabarit des polygones à cartographier

et incite les photo-interprètes à numériser l'occupation du sol d'une manière comparativement proche.

9.5.4 L'endurance du photo-interprète

La numérisation de l'occupation du sol est un exercice exigeant nécessitant une concentration intense. L'endurance des photo-interprètes est rapidement mise à contribution. S'assurer d'une bonne endurance de photo-interprétation est primordiale pour le producteur. Le calcul des délais de production est en grande partie lié à cette endurance. Il est difficile de mesurer la fatigue des photo-interprètes. Par définition, la fatigue peut être causée par de multiples facteurs internes ou externes à l'exercice de photo-interprétation (conditions physiques et mentales, conditions matérielles, conditions méthodologiques). Cependant ces facteurs doivent être pris en considération par le producteur afin d'assurer la motivation du photo-interprète pour l'exercice de photo-interprétation.

L'impact de l'assistance à la digitalisation sur l'endurance du photo-interprète n'a pas été quantifié. Toutefois, nous avons recueilli le ressenti des photo-interprètes sur l'utilisation d'un prédécoupage du paysage dans leur travail de photo-interprétation (*section 8.4.2*). L'absence de prédécoupage tend à provoquer un essoufflement rapide du photo-interprète en particulier quand le paysage est complexe et morcelé. Cette lassitude entraîne irrémédiablement une baisse de concentration et de rigueur. L'introduction d'erreur de digitalisation et d'interprétation est plus fréquente. À l'inverse, les photo-interprètes insistent sur l'apport d'un confort de numérisation du paysage avec l'assistance. Ils font mention d'une impression de rapidité dans l'exécution de la photo-interprétation. La rapidité n'est pas mesurée mais cette impression suffit à apporter une motivation supplémentaire pour poursuivre l'exercice. L'assistance permet alors de pratiquer une photo-interprétation sur une durée plus longue, impactant moins rapidement la fatigue du photo-interprète. L'endurance du photo-interprète est, de cette façon, améliorée.

9.6 L'évolution des compétences requises pour photo-interpréter

Nous nous accordons dans la section précédente sur une nouvelle manière de numériser l'occupation du sol avec l'assistance à la digitalisation. Peut-on associer ce constat à une évolution des compétences requises pour photo-interpréter ? Dans leur précis de télédétection, Provencher et Dubois (2007) présentent les qualités requises pour un photo-interprète. Nous nous appuyons sur ces travaux pour établir un diagramme comparatif de Kiviat (ou en toile d'araignée ou radar) afin d'apprécier l'impact du prédécoupage sur les compétences demandées au photo-interprète (*Figure 143*). Nous avons listé les compétences suivantes :

- la faculté d'observation,
- le jugement,
- la capacité d'association,
- la distinction des tonalités et des textures,
- la mémoire visuelle,
- la discipline et la patience,
- la capacité de travail en équipe,
- la maîtrise des outils d'édition.

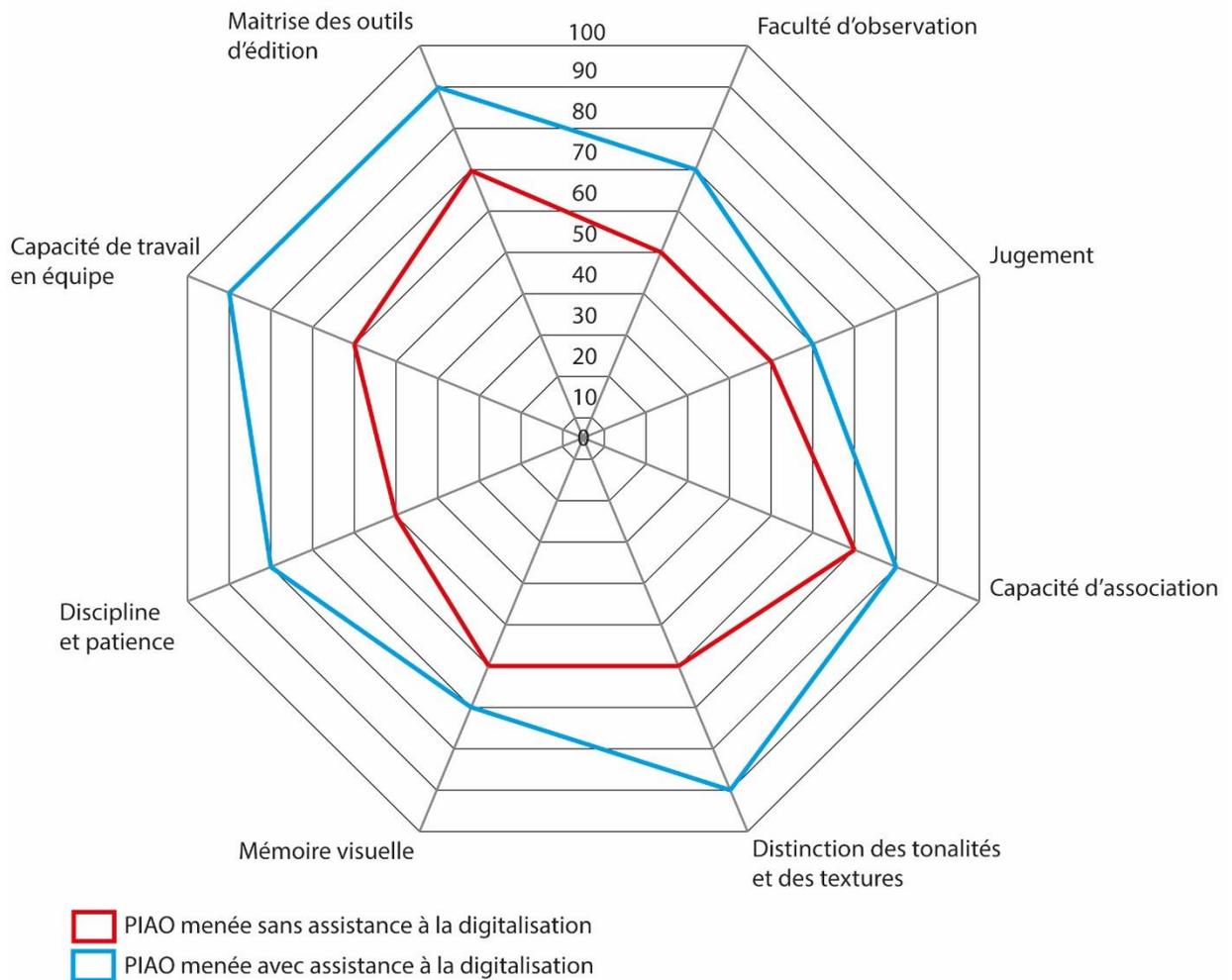


Figure 143. Diagramme de Kiviat de la performance de l'assistance à la digitalisation sur les compétences requises pour l'exercice de PIAO

La faculté d'observation correspond à la capacité du photo-interprète à percevoir et reconnaître des éléments paysagers particuliers au travers de l'ensemble des éléments paysagers qui l'entourent. Il s'agit d'une capacité propre à chaque individu mais qui peut s'améliorer avec l'expérience. Néanmoins, la faculté d'observation est stimulée par le prédécoupage du paysage apporté par l'assistance. Celui-ci permet déjà de mettre en évidence les limites de certains éléments paysagers dans leur environnement. De ce point de vue, le diagramme de Kiviat souligne un avantage certain pour le photo-interprète utilisant une assistance à la digitalisation.

Le jugement du photo-interprète correspond au fondement sur lequel il se base pour identifier des classes d'occupation du sol. Comme pour la faculté d'observation, il s'agit d'une capacité propre à chaque photo-interprète. Il ne peut s'affiner qu'avec l'expérience. Il est difficile d'apprécier l'impact de l'assistance à la digitalisation sur le jugement du photo-interprète. Le diagramme de Kiviat admet une performance légèrement supérieure pour le photo-interprète utilisant l'assistance. Nous postulons sur un effet de simplification du jugement. Le prédécoupage appelle davantage plus à une acceptation du tracé proposé qu'à une réflexion sur la manière de délimiter l'objet. Le jugement porte alors sur un choix binaire plus facilement pris par les photo-interprètes. De cette manière, l'assistance apporte une certaine uniformisation dans le jugement du photo-interprète pour numériser l'occupation du sol.

La capacité d'association permet de relier les propriétés des éléments paysagers observés. L'analyse de ces propriétés porte sur les éléments paysagers eux-mêmes ou les éléments paysagers et leurs environnements proches ou lointains. Par exemple, l'observation d'un objet de forme allongée et de largeur étroite, avec une teinte verte, dans un contexte paysager agricole peut être associée facilement à une haie. Cette capacité se développe par l'expérience. Le diagramme de Kiviat donne encore une fois l'avantage à un photo-interprète utilisant une assistance. En effet, le prédécoupage offre à ce dernier une première lecture du paysage lui permettant de réaliser des associations plus rapides.

La distinction des tonalités et des textures est une capacité incontournable pour le photo-interprète. Nous sommes tous capables de distinguer un certain nombre de tonalités ou de textures de base. Cependant certains possèdent une habilité supérieure dans cette tâche. La gamme de tonalités et de textures comprise dans une image est extrêmement étendue. Le photo-interprète ne pourra jamais tous les distinguer malgré une amélioration possible de son aptitude par la pratique. Le prédécoupage du paysage ne permet pas non plus de tous les distinguer. Toutefois, le photo-interprète part avec un avantage certain en utilisant le prédécoupage. La rigueur de l'algorithme de segmentation d'images permet d'assurer une distinction performante et régulière des tonalités et des textures sur l'ensemble de l'image dans la limite de son paramétrage. L'effet de légère sur-segmentation recherché par l'assistance à la digitalisation permet de mettre en évidence des changements de tonalités et de textures plus sensibles. Le photo-interprète porte alors moins d'effort de concentration pour distinguer les contrastes dans l'image.

La mémoire visuelle du photo-interprète se réfère directement à la capacité d'association ou le pouvoir analogique de relier des caractéristiques propres à un pour plusieurs éléments paysagers (formes, tailles, teintes, textures, voisinage, etc.) et la capacité à les mémoriser. Le photo-interprète se constitue progressivement au fil de son expérience un catalogue de données qu'il est capable de mobiliser face à une nouvelle situation d'identification. La performance de l'assistance à la digitalisation sur la mémoire visuelle du photo-interprète est difficile à évaluer. Toutefois pour construire efficacement cette mémoire, le photo-interprète a besoin de libérer de l'espace dans son cerveau. L'utilisation de l'assistance à la digitalisation permet de diminuer l'intensité intellectuelle produite par la numérisation de l'occupation du sol. Cette mise en condition semble favoriser la capacité du photo-interprète à mémoriser plus sereinement les relations entre les éléments paysagers.

La discipline et la patience sont deux capacités fortement exigées pour la pratique de la photo-interprétation. Le photo-interprète doit faire preuve d'une rigueur d'exécution de manière à appliquer une méthode d'interprétation uniforme sur l'ensemble de l'image. La patience est rapidement mise à contribution dans un exercice de précision qui peut parfois prendre des heures. L'assistance à la digitalisation se place comme un garde-fou de ces deux capacités. Le prédécoupage ne permet pas d'éviter l'inévitable à savoir la fatigue et la lassitude pour l'exercice. Cependant le prédécoupage est un retardateur de fatigue et par conséquent un garant d'une discipline plus ou moins bien maintenue sur une plus longue durée de pratique.

La photo-interprétation en équipe est courante pour la production d'une BD Ocsol GE. Le travail en équipe est une capacité largement appréciée. Elle permet d'exploiter et de s'appuyer sur les compétences de chacun dans le cas d'une photo-interprétation sur un territoire complexe. Elle

permet également d'assurer des délais plus courts de production. La gestion du travail en équipe est souvent plus contraignante. Il faut assurer une uniformité de production entre tous les intervenants sur le projet de photo-interprétation. Le prédécoupage permet de limiter les initiatives de numérisation. L'homogénéité du découpage du paysage est alors relativement préservée entre les secteurs photo-interprétés par des personnes différentes. Le diagramme de Kiviat montre que l'assistance à la digitalisation facilite grandement le travail photo-interprétation en équipe.

La maîtrise des outils d'édition est la dernière capacité évoquée dans le diagramme de Kiviat. Cette capacité fait référence à la performance du photo-interprète dans l'utilisation des outils informatiques (logiciels et matériels) nécessaire à la numérisation de l'occupation du sol et plus largement à la photo-interprétation assistée par ordinateur. L'assistance à la digitalisation permet de faciliter la prise en main des outils d'édition. Elle réduit la complexité de la tâche de numérisation grâce à des manipulations simples d'édition (*section 9.5.1*). L'exercice de photo-interprétation devient plus abordable pour un néophyte de la discipline.

Les conclusions du diagramme de Kiviat montrent qu'il est possible d'espérer un niveau de performance plus important chez le photo-interprète qui utilise l'assistance à la digitalisation. Ces conditions favorables permettent de repenser le profil des photo-interprètes à mobiliser pour la production d'une BD Ocsol GE. De manière générale, la polyvalence du photo-interprète est recherchée. Il s'agit d'un compromis entre sa technicité dans l'exercice de PIAO et sa capacité d'interprétation d'une image. La première capacité fait référence à son aptitude à se familiariser avec l'outil informatique, les différents systèmes mis en place pour la PIAO (logiciels, interface de saisie) et les consignes cartographiques à appliquer dans l'exercice de PIAO. Cette capacité conditionne en grande partie la rapidité d'exécution de la tâche et l'endurance de photo-interprétation qu'il va procurer. Un photo-interprète plus à l'aise avec les outils sera moins victime de la fatigue et de la lassitude de l'exercice. La deuxième capacité relaye les compétences thématiques que le photo-interprète va pouvoir apporter dans l'interprétation de l'image. Le profil d'un géographe est alors privilégié pour sa capacité généraliste à l'analyse de tout type de paysage. Toutefois, il est parfois nécessaire de recourir à des profils plus spécialisés (urbanistes, écologues, agronomes, etc.) pour interpréter des secteurs spécifiques d'un territoire.

Un bon technicien n'est pas forcément un bon thématicien et inversement. Les thématiciens spécialisés (urbanistes, écologues, agronomes, etc.) sont souvent moins à l'aise avec la tâche de numérisation de l'occupation du sol. Il s'agit d'un exercice souvent éloigné de leur discipline de prédilection. Pourtant leur capacité à comprendre le territoire même à travers une photographie aérienne ou une image satellite est incontournable. Ils créent la plus grande plus-value de la BD Ocsol GE. Il est dommage de sacrifier leur savoir et leur apport à cause d'un risque d'erreur de saisie ou de numérisation lié à leur faible expérience dans l'exercice de PIAO. L'assistance à la digitalisation permet alors d'entrevoir un recentrage des compétences du photo-interprète vers ses capacités thématiques. Le prédécoupage donne au photo-interprète, dont le profil est avant tout thématique, une opportunité d'exercer sa compétence dominante plus facilement. Le travail de photo-interprétation est alors requalifié. Même pour un photo-interprète dont le profil est surtout technicien, le prédécoupage est une opportunité pour lui de développer plus rapidement ses compétences thématiques grâce à la lecture facilitée du paysage.

9.7 Les besoins spécifiques de l'analyse diachronique

La mise à jour d'un référentiel cartographique existant pour une ou plusieurs années antérieures ou supérieures est un besoin récurrent des utilisateurs. Dès lors, se pose la question de l'utilité de l'assistance à la digitalisation pour ce besoin. L'assistance à la digitalisation est pertinente lorsque qu'il n'existe pas de référentiel cartographique sur le territoire d'étude. Lorsque ce référentiel existe, il constitue lui-même le prédécoupage du paysage qu'il faudra modifier et adapter à partir de l'image acquise pour l'année complémentaire.

La réalisation d'un nouveau prédécoupage reposant sur le découpage existant pour détecter les potentiels changements d'occupation du sol à une date différente n'a pas été expérimentée. La raison est une faible valeur ajoutée espérée avec cette manipulation. L'algorithme de segmentation est en mesure de détecter les changements francs comme une nouvelle parcelle agricole, l'apparition d'une zone urbaine ou une coupe forestière. Toutefois, ces changements remarquables ne sont pas problématiques pour le photo-interprète. Celui-ci est en capacité de les détecter et de les identifier rapidement. Le gain de temps est négligeable voir déficitaire dans certains cas où le tracé est considéré comme erroné et doit être repris. L'algorithme de segmentation peut également détecter des changements marginaux de l'occupation du sol. En fonction de son paramétrage et de l'application d'une légère sur-segmentation, le prédécoupage risque de mettre en évidence trop de changements qui n'ont pas lieu d'être : soit ils sont trop petits soit ils appartiennent à un ensemble décrit par une seule et même classe d'occupation du sol. Enfin, la mise à jour ne doit pas modifier la géométrie et la topologie de la BD Ocsol GE existante. La réalisation d'un nouveau prédécoupage prenant compte le socle polygonal complet d'une BD Ocsol GE existante pourrait engager une capacité de calcul important.

Le non intérêt de l'assistance à la digitalisation pour une mise à jour de BD Ocsol GE peut être considéré comme un inconvénient majeur. En effet, il existe de nombreuses situations de production où un référentiel d'occupation du sol existe déjà. Cela limite la portée de l'assistance à un besoin précis de constitution d'un premier référentiel cartographique pour le territoire étudié. Ce besoin est loin de se tarir, même en France. Il existe encore de nombreux territoires dépourvus de BD Ocsol GE sur-mesure. Qui plus est, l'amélioration des conditions de photo-interprétation avec l'apport d'un prédécoupage du paysage pourrait inciter des territoires à se lancer dans la production de leur premier référentiel d'occupation du sol notamment à grande échelle.

9.8 Les utilisateurs de BD Ocsol GE : qu'en pensent-ils ?

Dans cette section, nous tentons d'apporter la vision des utilisateurs finaux sur cette nouvelle manière de produire une BD Ocsol GE. Nous souhaitons connaître leur ressenti vis-à-vis de l'automatisation de tâches dans leurs besoins de cartographie sur-mesure et de forte précision. Nous voulons également savoir si la qualité de production est à la hauteur de leurs attentes. Enfin, nous sollicitons leurs recommandations pour améliorer la démarche et établir des perspectives d'application. Pour cela, nous exploitons une enquête menée auprès des commanditaires des études supports aux travaux de thèse (la Métropole Nice Côte-d'Azur, Durance, Luberon, Verdon Agglomération) et d'une sphère plus large d'utilisateurs potentiels de BD Ocsol GE. L'enquête se caractérise par une série d'entretiens semi-directifs (entrevue physique ou par

téléphone). Malheureusement, nous n'avons pas pu interroger les acteurs du projet de PNR de l'Aubrac (étude support aux travaux de thèse) par manque de temps et de disponibilité. Parmi les sujets abordés lors des entretiens, nous retenons ici trois questions ouvertes en relation avec l'automatisation recherchée (partielle ou complète) du processus de production des BD Ocsol GE :

- Comment vous positionnez-vous sur l'apport de méthodes automatiques ou semi-automatiques pour la production de BD Ocsol GE ?
- Comment jugez-vous de la qualité d'une BD Ocsol GE ?
- Quelles sont vos recommandations vis-à-vis de la méthode de production proposée ?

9.8.1 Une automatisation sous contrôle

L'automatisation reste un terme abstrait et mal défini pour la plupart des interrogés. Chaque individu possède sa vision sur le sujet. Elle se construit par sa formation, son métier, ou sa sensibilité. Par conséquent, l'automatisation inspire dans un premier temps une méfiance en particulier pour la production d'une BD Ocsol GE. Toutefois, cela ne signifie pas que les utilisateurs soient totalement réfractaires à l'idée d'automatisation. Au contraire, ils sont tous sensibles aux enjeux et aux problématiques de production auxquels font face les producteurs et aux gains financiers qu'elle peut générer. La demande en matière d'information spatialisée et de BD Ocsol GE en particulier est forte. Les offres se multiplient. Cette concurrence appelle inévitablement les producteurs à innover en recourant à des techniques d'automatisation de tâches.

Cependant, pour la majorité de personnes interrogées, l'automatisation doit rester une complémentarité à l'expertise humaine et non la substituer. L'automatisation de tâche, même partielle, est toujours perçue comme un risque de perte de contrôle dans le processus de production. Certains interrogés affirment être totalement opposés à une automatisation totale de la production d'une BD Ocsol GE même si le coût financier est extrêmement bas. « *La réalisation d'une BD Ocsol GE est avant tout un travail d'expertise du territoire qu'une machine ne peut réaliser seule* ». L'automatisation partielle de la production est alors acceptable pour l'ensemble des utilisateurs abordés.

Certains portent une vision détachée sur les méthodes de production. « *Peu importe la façon de produire même si vous utilisez des processus semi-automatiques, pour nous, c'est transparent* ». Ces utilisateurs ne cherchent pas à comprendre la part d'automatisation dans le processus de production, ce n'est pas leur rôle. Il suffit pour eux de connaître les limites et les performances de la donnée produite et surtout d'avoir confiance dans cette donnée pour l'utiliser. « *Si l'automatisation de tâches permet d'aider le producteur et assure une bonne qualité de la donnée cartographique, je ne vois pas le problème* ». « *Les critiques sont toujours possibles, mais dans le contexte actuel où les données précises sur l'occupation du sol manquent, c'est mieux que rien* ».

La majorité des utilisateurs a un avis plus précis sur l'apport d'automatisation de tâches dans le processus de production d'une BD Ocsol GE. « *Même si les territoires ne sont pas uniformes, l'automatisation permet d'apporter un caractère « neutre » à la production qui est appréciable* ». « *Les paramètres sont souvent issus de plusieurs discussions avec des gens de métier. Ce*

collège d'experts réalise des tests de seuillage ou de paramétrage. Ils reviennent dessus pour les affiner avant de les valider. Il s'agit d'une démarche réfléchie et concertée ». L'automatisation est décrite également par sa capacité à réduire la production à une échelle de travail humaine et réalisable. « *La machine ne peut pas mettre en évidence ce que l'Homme peut faire dans l'intérêt de l'étude mais l'Homme ne pourra pas couvrir de façon aussi neutre un grand territoire, il finira par fatiguer* ». Il est donc accepté que la machine ne répondra pas à tous les besoins et introduira des erreurs tout comme l'Homme peut en introduire. Cependant, à la différence de l'Homme, la machine introduit un biais uniforme sur l'ensemble de la zone d'étude. Il est alors plus facile d'exprimer une limite au produit cartographique. La traçabilité des traitements semi-automatiques est aussi fortement appréciée car elle permet d'assurer le suivi de la production et sa reproductibilité.

« *L'intérêt de la digitalisation assistée est d'éviter le biais de la subjectivité du photo-interprète difficilement maîtrisable. Même si le photo-interprète contrôle les tracés de l'assistance, cela permet de standardiser les choses* ». Ce commentaire souligne la capacité de la segmentation à fournir un compromis satisfaisant dans la délimitation des éléments paysagers. Ce même utilisateur évoque que son parti pris dans le découpage de l'occupation du sol n'est pas forcément le même que celui proposé par l'assistance. Malgré tout, cela ne le perturbe pas dans la mesure où l'assemblage des éléments paysagers dans la base de données ont une certaine cohérence. L'interrogé aborde ensuite les attentes implicites des utilisateurs pour un tracé « *généralisé* » des polygones d'occupation du sol. Il prend pour exemple les tracés observés dans les espaces agricoles où le prédécoupage propose parfois un détournement étonnant. Là où l'utilisateur attend une délimitation simplifiée d'une parcelle agricole, la segmentation semi-automatique réagit au moindre changement de teinte ou de texture observable sur les abords d'une parcelle (un rocher, un chemin, une haie, etc.). Ce biais pour les espaces agricoles devient un avantage dans les espaces forestiers où la délimitation entre les éléments paysagers reste floue. « *L'irrégularité des tracés observés sur une production par PIAO assistée correspond à une certaine réalité. La production assistée n'est pas plus fautive que la production entièrement manuelle* ». De plus l'interviewé ajoute que l'utilisation cartographique des BD Ocsol GE est comprise entre le 1 : 5 000^e et le 1 : 10 000^e. À ces échelles les différences entre les tracés issus d'une production assistée et d'une production non assistée ne sont pas perceptibles. À ce titre l'utilisateur interrogé pense que l'utilisation de la segmentation semi-automatique va augmenter dans le processus de production en prenant en compte de plus en plus les bases de données spatialisées de référence comme le cadastre. La question sera alors, comment dans le cadre de la segmentation, on prend en compte leurs géométries, et quelle valeur pondérée on peut leur affecter. « *Toutefois, l'automatisation totale sera écartée car le but est bien d'avoir une expertise du territoire* ».

Une autre catégorie d'utilisateur est représentée dans l'enquête. Il s'agit d'un groupe de chercheurs qui ont un rapport différent avec l'automatisation de la cartographie de l'occupation du sol. En l'absence de données sur l'occupation du sol à grande échelle, les laboratoires sont souvent eux-mêmes des producteurs. Dans cette situation, le témoignage rapporte une recherche d'automatisation totale du processus cartographique. « *Nous répondons directement à nos besoins cartographiques* ». La raison repose sur le manque de temps à consacrer pour l'exercice de PIAO. Dès lors, ils produisent des cartographies à grande échelle selon des nomenclatures

simplifiées spécialement adaptées à des applications spécifiques. Ces cartographies sont souvent lacunaires. Leurs limites sont acceptées et prises en compte dans les résultats.

L'automatisation de tâche n'est donc pas un frein à la production cartographique à grande échelle et sur mesure. Au contraire les différents témoignages apportent un encouragement dans la recherche de méthodes innovantes de production. Cependant les utilisateurs ne sont pas prêts à abandonner l'expertise humaine nécessaire à la description des territoires au travers des BD Ocsol GE. « *Il faut impérativement inclure dans l'exercice d'interprétation, du personnel qualifié dans des domaines spécifiques comme l'urbanisme, l'écologie ou l'agronomie* ». L'automatisation de tâche comme la numérisation de l'occupation du sol doivent rester sous contrôle. La technologie ne doit rester qu'une aide à la décision. Malgré ces commentaires enthousiastes, pour beaucoup des utilisateurs interrogés (hors recherche), le porté à connaissance des démarches et des techniques d'automatisation possible est encore limité.

Les témoignages font aussi des recommandations aux producteurs de BD Ocsol GE. « *L'automatisation partielle d'un processus de production doit s'accompagner d'un discours rassurant qui ne laisse rien échapper à l'expertise humaine. Le contrôle qualité doit alors être important* ». Le caractère sur-mesure de la BD Ocsol GE telle qu'elle est conçue ici, engendre inévitablement une adaptation permanente aux commanditaires, à leurs fonctionnements, à leurs sensibilités et surtout à un territoire nouveau. « *La réalisation d'une BD Ocsol GE est un exercice nécessitant une bonne transversalité, de la coordination et une bonne compréhension entre tous les acteurs du projet. La logique verticale et standardisée ne fonctionnera pas ici* ».

9.8.2 Une qualité de production non remise en cause

L'acceptation de l'automatisation de tâche dans le processus de production et inévitablement lié à la manière dont est jugée la qualité de la donnée produite. Les entretiens distinguent deux approches de la qualité : la qualité interne du produit BD Ocsol GE livré ; la qualité externe lié à l'usage de la BD Ocsol GE par les utilisateurs finaux.

9.8.2.1 La qualité interne

Parmi les personnes interviewées, certains se placent d'abord comme les commanditaires de la BD Ocsol GE. Ils nous font part de leur responsabilité vis-à-vis de la qualité interne de la donnée produite. « *Notre rôle est de sécuriser l'usager dans sa démarche d'analyse du territoire* ». La qualité interne correspond au niveau de similitude existant entre la base de données spatialisée produite et celle attendue par le cahier des charges. Le contrôle de la qualité interne est incontournable pour entreprendre la diffusion de la donnée auprès des utilisateurs finaux. « *La qualité interne du produit est importante car elle nous permet de communiquer sur les usages possible de la BD Ocsol* ».

Cette qualité peut se mesurer. Les interrogés parlent d'outils « *classiques* » de validation comme la matrice de confusion. Ils parlent également de contrôles systématiques ou aléatoires de l'interprétation sur des zones complexes du territoire ou sur des échantillons représentatifs de l'ensemble des classes d'occupation du sol cartographiées. Les consignes topologiques, géométriques et sémantiques sont également contrôlée (taille minimale des polygones, absence de trou ou de superposition polygonale, respect de l'encodage des classes d'occupation du sol, etc.).

Parmi les organismes interrogés, la Métropole Nice Côte-d'Azur (NCA) et la Communauté d'Agglomération Durance, Luberon, Verdon (DLVA) sont les seuls à pouvoir nous parler de la qualité interne de la BD Ocsol GE produite à l'aide d'une assistance à la digitalisation sur leur territoire. Cependant il est difficile pour eux de positionner cette qualité vis-à-vis d'une production cartographique « traditionnelle ». « *Nous n'avons pas beaucoup de recul pour cela, la réalisation d'une BD Ocsol GE est un exercice nouveau pour nous* ». Ils ont peu de point de comparaison. Toutefois les deux commanditaires nous expliquent que le résultat cartographique a été validé sans problème. La qualité interne correspond à l'attente. « *Nous n'avons pas relevé d'effets aberrants ou indésirables liés à l'automatisation de la tâche de digitalisation* ». Cela signifie, que les différences entre le produit cartographique issu d'une production assistée et celui issu d'une production non assistée ne sont pas significatives. Même si elles existent, il est difficile de le démontrer. « *On peut toujours trouver des différences entre les productions mais on ne pas dire qu'une d'elle est plus juste que l'autre. De plus cela n'a pas vraiment d'importance* ». Les deux commanditaires attendent avant tout une production rigoureuse et homogène sur l'ensemble du territoire et qui le représente le mieux. De ce point de vue, la réalisation cartographique utilisant l'assistance à la digitalisation n'est pas à remise en cause.

9.8.2.2 La qualité externe

La majorité des interviewés, y compris les commanditaires eux-mêmes sont des utilisateurs de BD Ocsol GE. De ce point de vue, leur rapport à la qualité de la donnée se limite uniquement à l'usage qu'ils en font. Ils parlent de qualité externe de la donnée. « *La qualité est mesurée à l'usage, du moment que c'est cohérent avec notre besoin, on ne se soucie pas de comment elle a été réalisé* ». Ils s'agit d'apprécier le niveau d'adéquation existant entre la BD Ocsol GE produite et son appropriation par les utilisateurs finaux. Les utilisateurs mettent également avant leur connaissance du territoire pour attester de la qualité de la donnée. « *Le contrôle se fait avec des gens qui connaissent bien le territoire, [...] on leur demande leur avis pour savoir si la donnée reflète bien le territoire* ». Cette vision de la qualité n'est donc pas absolue. Il est alors difficile de la mesurer ou de la documenter.

Dans la mesure où la qualité interne est validée (délimitation et interprétation) par le commanditaire de la donnée, la qualité externe se réfère avant tout aux choix de conception de la BD Ocsol GE. « *Le tracé des polygones issus de l'assistance ne nous choque pas pour notre utilisation de la carte au 1 :10 000^e. Nous serons plus attentif aux choix et à la signification des classes d'occupation du sol qui compose la base* ». De ce point de vue, la méthode de production par photo-interprétation assistée ne remet pas en cause la qualité externe espérée de la BD Ocsol GE.

9.9 Synthèse du produit : assistance à la digitalisation

La discussion menée jusqu'ici génère de nombreuses informations qu'il convient de synthétiser. Pour cela, nous conduisons un audit orienté innovation de l'assistance à la digitalisation que nous avons développée. L'objectif est de dresser une liste des points forts et des points faibles du produit (Tableau 30). Ce bilan interne nous permet de positionner le produit par rapport à la fonction principale (FP1) qu'il doit remplir : « *faciliter la production de la BD Ocsol GE* » (section 4.1). Il s'agira d'un point de départ pour un certain nombre de voies de

recherche d'idées ou d'opportunités de valorisation que nous aborderons dans la conclusion finale.

Tableau 30. Bilan des forces et des faiblesses de l'assistance à la digitalisation

	Forces	Faiblesses
Caractéristiques du produit	<p>Adaptabilité des développements aux contextes de production :</p> <ul style="list-style-type: none"> - sources multiples d'imagerie, - volume et format de l'imagerie, - intégration de données vectorielles de référence. <p>Détournement possible des modules vers des nouveaux usages.</p>	<p>Nécessité de conduire des paramétrages.</p> <p>Solution non intégrée dans un seul et même outil (plusieurs modules).</p> <p>Compétence et/ou formation avancées requises pour l'élaboration de l'assistance à la digitalisation.</p>
Productivité liée à l'utilisation de l'assistance à la digitalisation	<p>Augmentation de la vitesse de photo-interprétation de 30 à 40 % en fonction des configurations paysagères (hors espaces artificialisés).</p> <p>Légère augmentation de la vitesse de photo-interprétation des espaces artificialisés grâce à l'élaboration de l'enveloppe urbaine.</p> <p>Amélioration du confort du photo-interprète :</p> <ul style="list-style-type: none"> - diminution des manipulations de numérisation, - interface de photo-interprétation optimisée, - apport d'une première lecture du paysage, - diminution de la fatigue. <p>Optimisation du travail en équipe grâce à l'homogénéité du pré-découpage sur l'ensemble du territoire d'étude.</p> <p>Optimisation des performances du photo-interprète.</p>	<p>Durée de création de l'assistance à la digitalisation encore importante (6 jours de production)</p> <p>Pertinence de l'utilisation de l'assistance à la digitalisation à partir d'une certaine superficie de territoire (>100 km²).</p> <p>Les espaces artificialisés ne bénéficient pas de l'assistance à la digitalisation.</p> <p>L'assistance à la digitalisation n'a pas d'intérêt particulier pour la mise à jour de BD Ocsol GE existante.</p>
Qualité de la production cartographique	<p>La qualité du rendu cartographique est préservée par rapport à une production par photo-interprétation non assistée.</p> <p>Gain d'homogénéité dans la délimitation de l'occupation du sol sur des grandes superficies.</p> <p>Diminution de la subjectivité du photo-interprète pour la numérisation de l'occupation du sol.</p> <p>Mise en avant des compétences thématiques des photo-interprètes</p>	<p>Le pré-découpage guide parfois un peu trop le photo-interprète dans son interprétation. (perte de temps sur des détails).</p> <p>Le pré-découpage est plus performant sur certaines configurations paysagères.</p> <p>Reliquats de sur-segmentation et/ou de tracé incohérent à reprendre manuellement</p>
Références	<p>Quelques références d'application (Métropole NCA, DLVA, projet de PNR de l'Aubrac).</p> <p>Retours clients/utilisateurs satisfaits.</p> <p>Témoignages positifs des photo-interprètes.</p>	<p>Positionnement face aux produits cartographiques standardisés (OCS GE de l'IGN ou OSO).</p> <p>Encouragement possible pour la concurrence de développer leur propre assistance.</p> <p>Méfiance persistante envers l'automatisation.</p>

Conclusion de la troisième partie

Cette troisième partie est dédiée à la validation de la méthode. Celle-ci consiste à comparer deux méthodes de cartographie de l'occupation du sol, l'une basée sur une démarche de photo-interprétation assistée par une segmentation d'image et l'autre, sans assistance (chapitre 8). L'expérimentation mise en place, est voulue proche d'une réalité de production connue en bureau d'études. Pour cela, nous avons mobilisé des experts photo-interprètes sur une durée assez longue pour mettre à mal leur concentration et reproduire les effets de fatigue connus dans la pratique de la photo-interprétation.

Les résultats de cette expérimentation montrent des productions cartographiques visuellement très proches quelque soit l'option méthodologique adoptée. Les indices quantitatifs (tests de Kappa, métriques de Hoover) étayent ce constat : les écarts observés, à la fois dans la délimitation des objets et dans leur interprétation, ne sont pas assez significatifs pour montrer une réelle différence entre les deux options méthodologiques. Toutefois, de légers artefacts persistent dans la délimitation des objets paysagers des productions assistées sans pour autant remettre en cause la qualité générale de la cartographie à grande échelle.

Par contre, au niveau des temps de production et des vitesses instantanées de photo-interprétation, des écarts significatifs sont relevés entre les deux méthodes de production. L'assistance à la digitalisation apporte un gain de temps et de ce fait, une meilleure productivité de la photo-interprétation quelle que soit la configuration paysagère numérisée. D'après l'expérimentation, le gain moyen de temps, lié à l'utilisation d'une méthode assistée est estimé à 35%. Cependant, cette valeur doit être utilisée avec précaution. L'exercice de photo-interprétation reste toujours subjectif et dépendant de l'opérateur, aussi bien dans la délimitation géométrique que dans la reconnaissance thématique des objets.

Enfin, les photo-interprètes expriment un ressenti favorable envers l'assistance à la digitalisation. Le prédécoupage du paysage est reçu comme une aide à la photo-interprétation efficace et un confort dans l'exécution de la tâche. Cependant, ils mentionnent, parfois, ne pas ressentir un réel gain de productivité avec l'assistance dans certaines configurations paysagères comme les espaces forestiers. Ceci s'explique en partie par la difficulté d'interprétation de ces espaces à travers des nomenclatures, souvent complexes, qui appellent à étudier la morphologie des couverts forestiers (denses, ouverts, clairsemés, etc.) et/ou la composition (feuillus, conifères, mixtes à dominance feuillus, mixtes à dominance conifères, peupleraies, etc.). Par contre, du point de vue de la délimitation de ces espaces complexes, les productions assistées sont globalement plus proches entre elles que les productions non assistées car elles utilisent le même prédécoupage.

L'assistance à la digitalisation soulève plusieurs points de discussion : les aspects techniques liés à la conception et à l'utilisation de l'assistance ; les apports de cette nouvelle manière de numériser l'occupation du sol par photo-interprétation ; les conséquences sur l'évolution des compétences requises pour photo-interpréter... Elle pose également un questionnement sur les

besoins spécifiques de l'analyse diachronique de l'occupation du sol. Enfin, la discussion est complétée par les témoignages de divers utilisateurs de BD Ocsol GE.

Les discussions techniques portent tout d'abord sur le choix de modules emboîtés comme environnement de développement du produit. Chaque module apporte une réponse spécifique et indépendante à une ou plusieurs fonction(s) de service potentiellement attendue(s) par l'assistance. L'emboîtement des modules apporte le produit en entier. Ce découpage des tâches permet d'espérer une souplesse et une diversité d'utilisation accrues. Cependant, nos capacités limitées en terme de développement informatique, nous ont conduit à recourir à des technologies parfois différentes (PostGIS/R/eCognition®/MapShaper). Ce mélange peut engendrer une difficulté pour le praticien. La transposition du produit dans une solution technique intégrée est une perspective envisagée.

La sensibilité des paramétrages nécessaire à la mise œuvre de l'assistance constitue un point de discussion important. Nous avons identifié deux paramétrages dont la sensibilité implique fortement l'expertise du praticien : l'échelle de segmentation et la généralisation cartographique. Pour le premier paramètre, le praticien est accompagné dans son expertise par l'outil ESP pour choisir une échelle de segmentation. Par contre, le choix d'un seuil de généralisation cartographique de la segmentation fait appel fortement à l'expérience de production du praticien.

Le recours à l'assistance à la digitalisation n'est pas systématique. Il convient d'étudier la situation de production pour savoir s'il est opportun de réaliser un prédécoupage du paysage pour assister la photo-interprétation. Cette étude doit prendre compte principalement du temps d'élaboration de l'assistance et de la surface à couvrir par photo-interprétation. La discussion montre qu'il existe une pertinence de l'utilisation de l'assistance à la digitalisation à partir d'une superficie de territoire dépassant 100 km². Toutefois, l'évaluation de l'opportunité de recourir à une assistance à la digitalisation renvoie à de nombreux autres facteurs qu'il convient de prendre en compte dans son choix : la qualité du prédécoupage du paysage espéré par l'assistance à la digitalisation ; le confort de photo-interprétation et l'équipe mise en place pour l'exercice de photo-interprétation (profils, effectifs, compétences et expériences). De plus, la discussion évoque le besoin récurrent de mise à jour d'un référentiel cartographique existant pour une ou plusieurs année(s) antérieure(s) ou supérieure(s) pour lequel l'apport d'un prédécoupage à partir d'une segmentation à peu d'intérêt.

La qualité du prédécoupage évoqué plus haut est une notion également discutée dans cette partie. La qualité du prédécoupage est une notion qui reste subjective. Celle-ci sera appréciée à partir d'un compromis d'acceptabilité du prédécoupage à satisfaire la fonction principale du produit, à savoir « *faciliter la production de la BD Ocsol GE* ». Cette qualité est difficile à mesurer. De manière générale, elle reviendrait à mesurer précisément l'influence de paramètre d'échelle de segmentation et du paramètre de généralisation cartographique. Or ces mesures seraient dépendantes d'un trop grand nombre de facteurs difficilement maîtrisables.

Le recours à l'assistance de digitalisation implique une nouvelle manière de numériser l'occupation du sol par photo-interprétation et par conséquent une évolution probable des compétences requises pour photo-interpréter. Ces points sont discutés dans cette partie et

recensent plusieurs faits : la diminution des manipulations d'édition de polygones dans le logiciel de SIG ; l'apport d'une première lecture du paysage qui tend à diminuer la responsabilité du photo-interprète dans la décision de délimitation de l'occupation du sol ; la meilleure coordination d'une équipe de photo-interprètes grâce à l'homogénéité dans le détourage des éléments paysagers apportée par l'assistance ; et l'amélioration de l'endurance des photo-interprètes dans leur exercice. Dès lors il est possible d'espérer un niveau de performance plus important chez le photo-interprète qui utilise l'assistance à la digitalisation. Ce postulat peut impliquer de requalifier le profil des photo-interprètes à mobiliser pour la production d'une BD Ocsol GE.

Dans cette partie, nous recueillons également l'avis des utilisateurs de BD Ocsol GE sur les bénéfices de l'automatisation partielle de la numérisation. Les avis sont globalement favorables à l'apport d'automatisation dans le processus de production. Ils sont sensibles aux enjeux de production auxquels font face les producteurs et aux gains financiers espérés. Toutefois, ils expriment une méfiance à l'égard d'une automatisation qui ne serait pas contrôlée par l'expertise humaine. Selon eux, l'utilisation de l'assistance à la digitalisation ne remet pas en cause la qualité de la production cartographique attendue pour une BD Ocsol GE, dans la mesure où la part de photo-interprétation est encore importante dans le processus de production.

CONCLUSION GÉNÉRALE

L'imagerie THRS couplée aux nombreuses fonctionnalités des SIG, permet de traiter, à des échelles fines, des problématiques impactant des surfaces terrestres de taille réduite (quelques centaines de km²), telles que l'étalement urbain, le mitage urbain ou la part des terres agricoles et naturelles ou semi-naturelles.

En France, ces problématiques intéressent en tout premier lieu les gestionnaires locaux des territoires soumis à une pression réglementaire importante sur ces sujets. Les nouvelles technologies d'acquisition et de traitements d'image THRS doivent faciliter la construction des bases de données spatialisées précises sur l'occupation du sol (BD Ocsol GE) afin de fournir les informations nécessaires pour suivre et porter des actions d'aménagement sur les territoires.

La thèse présente l'élaboration et la réalisation d'un projet de Recherche et de Développement (R&D) menées par un bureau d'études (BE) en environnement visant une optimisation du procédé de fabrication d'une Base de Données sur l'Occupation du sol à Grande Échelle (BD Ocsol GE). L'entreprise d'accueil, à l'initiative du projet de thèse, a souhaité se doter d'un « produit » ou d'un « service » qui l'aide à répondre plus efficacement à ses besoins de production de cartographie de l'occupation du sol à grande échelle.

En effet, le besoin d'informations spatialisées précises et sur-mesure est souvent formulé dans l'urgence. Les prestataires de services, spécialisés dans la production cartographique, proposent alors d'exercer un travail essentiellement basé sur une photo-interprétation (PIAO) des images THRS. Même si, pour ces derniers, la photo-interprétation est une méthode de production cartographique longue et coûteuse, elle reste la seule capable d'appréhender les demandes cartographiques à grande échelle et sur-mesure. Les techniques de traitements d'image perfectionnées, existant maintenant depuis une quinzaine d'années comme l'approche GEOBIA, sont encore faiblement intégrées dans les processus de production de BD Ocsol GE chez les prestataires de services. Cependant, la recherche de solutions hybrides associant des traitements d'images avec la pratique de la PIAO est aujourd'hui largement étudiée.

Ainsi, il ne s'agit pas de substituer la cartographie automatique à la photo-interprétation, la cartographie à grande échelle est encore trop dépendante de la photo-interprétation, mais bien de rechercher des moyens techniques pour optimiser la PIAO notamment par l'apport de traitements numériques de l'image.

Pour rappel, les travaux se sont inscrits dans le contexte professionnel d'un bureau d'études. La stratégie de développement de la recherche a donc revêtu un caractère applicatif important.

L'objectif principal poursuivi dans cette thèse est le développement d'une méthode d'analyse d'images à THRS pour assister la production cartographique de BD Ocsol GE par photo-interprétation. Cette méthode doit répondre aux exigences suivantes : développer une méthode de production la plus générique possible ; apporter une réponse cartographique à grande échelle de qualité, produire une cartographie adaptée aux spécificités de chaque

territoire étudié et répondre à un objectif commercial en proposant une solution de production cartographique plus rapide et concurrentielle. La méthode repose sur une segmentation pratiquée sur une image THRS. Cette segmentation apporte un prédécoupage du paysage facilitant l'exercice de la photo-interprétation.

Afin de développer un processus de segmentation à la fois précis et souple, nous avons utilisé l'analyse fonctionnelle du besoin qui a permis de mettre en évidence les verrous techniques, thématiques et commerciaux d'une demande de production régulière de BD Ocsol GE.

La méthode a été rodée à partir de 3 prestations commerciales pour les territoires de la Métropole Nice Côte-d'Azur, la communauté d'agglomération de Manosque (DLVA) et du projet de PNR de l'Aubrac. Les applications principales qui ont été retenues sont trois demandes de prestations cartographiques formulées par des gestionnaires publics sur leur territoire. La diversité de ces demandes en font des champs d'expérimentation de choix, d'une part par l'hétérogénéité des territoires à cartographier et d'autre part par la confrontation à la réalité contractuelle de production de BD Ocsol GE impliquant des situations de production inédites.

L'élaboration de la méthode comporte trois grandes étapes réalisées à l'aide de 5 modules :

À l'étape 1, une phase de prétraitements conséquente est nécessaire pour préparer la segmentation. Les prétraitements qui sont proposés par les modules 1, 2 et 3, doivent apporter une réponse à l'ensemble des cas de figure de production qui pourrait compromettre l'implémentation de la segmentation : la volumétrie et/ou le format de l'imagerie à segmenter ; les données exogènes à incorporer dans le processus de segmentation. Il s'agit d'effectuer une standardisation des données entrantes afin de se prémunir des cas particuliers.

À l'étape 2, la segmentation d'image (module 4) intègre plusieurs tâches : l'intégration du ou des vecteur(s) de référence géométrique devant servir à contraindre la segmentation ; le paramétrage de l'algorithme de segmentation « *multi-resolution* » et son application ; l'exécution de plusieurs post-traitements liés à la superficie et à la forme des objets générés par la segmentation et enfin l'exportation du résultat de la segmentation en format vectoriel de type polygone.

À l'étape 3, la segmentation résultante subit, de nouveau, un post-traitement de généralisation cartographique. Le post-traitement est opéré au sein du module 5 visant à adapter la géométrie des objets segmentés à l'échelle de photo-interprétation.

Nous analysons les apports de la méthode à différents niveaux :

Sur le plan méthodologique, même si la généricité des solutions techniques a été privilégiée, la mise au point de l'assistance à la digitalisation nécessite un niveau d'expertise conséquent :

- le choix de développer des solutions techniques à travers plusieurs modules emboîtés apporte une adaptabilité face aux nombreuses configurations de production. Par ailleurs, les modules sont des outils dont la vocation peut facilement se transformer vers de nouveaux

usages. Toutefois, le regroupement des modules au sein d'un seul et même outil intégré peut également être envisagé pour améliorer l'ergonomie d'utilisation des solutions techniques ;

- l'utilisation des modules pour l'élaboration d'une assistance à la digitalisation induit de conduire de nombreux paramétrages dont la sensibilité sur le résultat du prédécoupage est variable. La maîtrise des paramètres peut s'acquérir rapidement. Néanmoins, l'expertise du praticien reste de mise. Il convient d'accompagner l'élaboration de l'assistance à la digitalisation par une formation adaptée auprès des praticiens ;

Sur le plan de la productivité de la photo-interprétation avec assistance, plusieurs constats sont faits :

- Une analyse comparative a été conduite entre la photo-interprétation assistée par un prédécoupage et la photo-interprétation non assistée. Cette analyse a confronté le travail de 4 photo-interprètes sur 4 terrains de configuration paysagère différente pendant une durée simulant l'exercice réel d'une réponse à une prestation. Cette expérimentation montre un gain de productivité de 35% en moyenne pour les travaux de photo-interprétation assistée. Ce gain varie en fonction de la configuration paysagère photo-interprétée. Toutefois, ce gain moyen doit être considéré avec précaution car il s'applique à une discipline encore soumise à la subjectivité du photo-interprète. Un gain de productivité est également observé dans les espaces artificialisés où seuls les contours de l'aire urbanisée sont délimités. Même si les trois prestations conduites dans cette thèse ne recouvrent pas la totalité des configurations paysagères possibles, ces réalisations apportent déjà des éléments suffisants pour évaluer s'il est opportun ou non, d'utiliser un prédécoupage pour la pratique de la photo-interprétation ;

- le gain de productivité est couplé à un gain d'ergonomie pour le photo-interprète. Le prédécoupage entraîne une diminution des manipulations de numérisation et propose une première lecture de l'image qui facilite l'expertise et la performance du photo-interprète. Ces conditions sont favorables à une meilleure endurance lors de l'exercice de la photo-interprétation. Toutefois, il est encore possible de travailler sur une meilleure ergonomie des conditions de photo-interprétation. Sur le prédécoupage, lui-même, deux pistes peuvent être améliorées : la généralisation cartographique et l'intégration de davantage de données vectorielles dans le processus de segmentation. Le but est d'augmenter l'acceptabilité du prédécoupage auprès du photo-interprète afin qu'il intervienne le moins possible sur les délimitations des polygones. D'autres pistes d'optimisation du confort du photo-interprète sont ciblées notamment à travers une meilleure interface graphique de numérisation ;

- l'assistance à la digitalisation apporte une meilleure homogénéité des délimitations des objets lorsque que la photo-interprétation est menée en équipe. Les photo-interprètes peuvent s'appuyer sur un prédécoupage commun, ce qui diminue, par conséquent, la subjectivité de chacun dans la manière de numériser l'occupation du sol. Ce gain doit pouvoir s'observer lors du contrôle qualité de la production cartographique, en particulier dans les zones forestières où les délimitations entre deux classes sont souvent floues. Cependant, ce postulat n'a pas fait l'objet d'une étude comparative avancée ;

- le recours à une assistance à la digitalisation pour la construction d'une BD Ocsol GE doit être étudié en fonction de la superficie du territoire à couvrir. La durée d'élaboration de l'assistance peut engendrer un surcoût, si l'exercice de photo-interprétation est mené sur un petit territoire. La surface minimale à couvrir pour atteindre une rentabilité de l'assistance est, pour le moment, estimée à environ 100 km². Parmi les perspectives techniques majeures, nous voulons tendre à diminuer le temps de mise en place de l'assistance à la digitalisation. Pour cela, il convient d'agir principalement sur l'optimisation des temps de calcul des algorithmes. En effet, la part décisionnelle liée aux choix des données à intégrer dans le prédécoupage et/ou aux paramétrages des seuils est plus difficilement compressible ;

Sur le plan thématique, nous relayons deux points de vue :

- du point de vue du photo-interprète, l'assistance à la digitalisation est une aide indéniable pour son exercice même si la qualité du prédécoupage reste une notion extrêmement subjective et dépendante d'un grand nombre de facteurs combinés (expérience du photo-interprète, objectifs cartographiques, données, paramétrages, etc.). Il n'est donc pas pertinent de parler de bonne ou mauvaise qualité du prédécoupage mais plutôt d'acceptabilité du prédécoupage pour la production cartographique attendue. Nonobstant ce postulat, il serait intéressant d'analyser l'impact du prédécoupage automatique sur la compréhension des consignes de cartographie par les photo-interprètes. En effet, le prédécoupage soumet au photo-interprète une trame polygonale (taille minimale de polygones, formes) qui répond plus ou moins à l'attente cartographique formulée et que le praticien va plus ou moins accepter. De même, l'impact d'une cartographie avec ou sans assistance sur les statistiques descriptives mesurées, mériterait d'être exploré.

- du point de vue de l'utilisateur final de la BD Ocsol GE, l'assistance peut être considérée comme une méthode acceptable à condition que cette automatisation de tâche soit maîtrisée et que l'expertise humaine nécessaire à la description des territoires soit conservée. Selon les utilisateurs sondés, les différences de tracés entre le produit cartographique issu d'une production assistée et celui issu d'une production non assistée ne sont pas significatives. Même si elles existent, ils reconnaissent qu'il est difficile de les démontrer. La majorité des utilisateurs de BD Ocsol GE, ne jugent pas essentiel de connaître l'ensemble des détails de la construction d'une base. Par contre, cette connaissance est exigée par le commanditaire et son acceptation vis-à-vis d'une méthode automatisée devient alors déterminante.

Sur le plan commercial, les perspectives d'application sont nombreuses. Les besoins liés à la grande échelle et la diversité des nomenclatures à produire, en l'absence de données standards adéquates, procurent une forte demande.

Une seule perspective d'application nous apparaît moins pertinente, c'est la mise à jour de référentiel cartographique existant. Le référentiel existant, constitue alors, lui-même, le prédécoupage du paysage qu'il faudra modifier et adapter à partir de l'image acquise pour l'année complémentaire. Ce constat définit l'utilité de l'assistance à un besoin précis de constitution d'un premier référentiel cartographique pour le territoire étudié. Nous avons formulé quelques perspectives de développement liées à une détection des changements remarquables d'occupation du sol entre deux dates à partir d'une nouvelle segmentation. Pour

le moment, cette piste nous semble fragile car nous pensons que cela n'apporterait qu'une faible valeur ajoutée au processus de production. Néanmoins, une réelle analyse fonctionnelle du besoin devra être menée pour étudier la faisabilité d'un procédé visant à optimiser la mise à jour de BD Ocsol GE.

Par contre, pour des réalisations cartographiques initiales, l'assistance à la digitalisation à partir d'une segmentation permet d'entrevoir une production de BD Ocsol GE sur-mesure plus agile et concurrentielle sans remettre en cause la qualité du produit attendu. Au-delà du gain de productivité que l'assistance apporte, il est possible d'ajuster plus précisément les coûts de production en fonction des configurations paysagères à photo-interpréter.

L'assistance dédouane, en partie, le photo-interprète de la tâche de numérisation, lui permettant ainsi de focaliser son attention sur l'interprétation du paysage. Ce recentrage thématique est favorable aux échanges constructifs avec le commanditaire de la donnée. Mais au-delà de ces échanges, l'utilisation d'une assistance rend possible la mobilisation de thématiciens non experts des solutions SIG, par exemple le personnel de la structure commanditaire. Cette solution offre la possibilité aux gestionnaires de pratiquer eux-mêmes l'interprétation de la trame prédécoupée. Une interprétation qu'ils peuvent alors conduire en intégrant leur propre connaissance du terrain. Pour certaines structures, la photo-interprétation est une tâche qui n'est pas envisageable pour des raisons de coûts (temps, argent et personnels). L'apport d'une assistance à la digitalisation serait alors un bon moyen de réaliser, de manière autonome, une production cartographique à moindre coût dans des temps de production maîtrisés.

Enfin, la procédure d'assistance réalisée pour un besoin particulier de production de BD Ocsol GE par photo-interprétation, sur un espace donné, peut être facilement reprise pour d'autres applications thématiques sur ce même espace. Il s'agirait alors d'adapter certains paramètres comme par exemple, l'échelle de segmentation, au nouveau besoin cartographique. Ces possibilités d'adaptation de la méthode élargissent ses potentialités à la fois sur le champ des applications thématiques mais aussi sur celui des différentes échelles de production.

Table des figures

Figure 1. Extrait de la base CORINE Land Cover (2012) au 1/100 000 ^e sur l'agglomération lyonnaise.....	31
Figure 2. Extrait de la base Urban Atlas (2012) au 1/10 000 ^e sur le centre-ville de Lyon.....	32
Figure 3. Extrait de la BD CARTO® de L'IGN au 1/100 000 ^e sur l'agglomération nancéenne	33
Figure 4. Extrait du produit cartographique SPOT Thema au 1/25 000 ^e sur l'agglomération stéphanoise.....	34
Figure 5. Extrait du produit cartographique OSO « Occupation du Sol » au 1/50 000 ^e sur l'agglomération lyonnaise.....	35
Figure 6. Extrait de la BD OCSOL-PACA (2014) au 1/50 000 ^e sur l'agglomération niçoise .	37
Figure 7. Extrait de l'OCS GE® IGN au 1/10 000 ^e sur la région nantaise selon 2 dimensions : (a) couverture du sol, (b) usage du sol	39
Figure 8. Pourcentage des organismes publics interrogés utilisant ou ayant utilisé au moins une fois une BD OCSOL, d'après l'enquête de l'IGN en 2013	40
Figure 9. Extrait de la BD Ocsol GE de la métropole Nice Côte d'Azur au 1/10 000 ^e	42
Figure 10. Les acteurs mobilisables pour un commanditaire de BD Ocsol GE	43
Figure 11. Triptyque de la fiabilité d'une prestation pour un bureau d'études	46
Figure 12. Structuration de la Recherche et développement (R&D).....	47
Figure 13. Triptyque partenarial classique (d'après Lefrancois 2016).....	48
Figure 14. Insertion du projet de R&D au sein des relations entre gestionnaires et bureau d'études privée (d'après Lefrancois 2016)	49
Figure 15. Structures interrogées pour l'étude de marché.....	55
Figure 16. Graphe des interacteurs permettant l'identification des fonctions de services de type FP (Fonction Principale) et de type FC (Fonction de Contrainte) entre les différents Éléments du Milieu Extérieur (EME) et le produit	61
Figure 17. Structuration du diagramme FAST où i est le numéro de la fonction de service ...	62
Figure 18. Positionnement d'une fonction dans le diagramme FAST	63
Figure 19. Caractéristiques d'une fonction (d'après Tassinari, 2006)	63
Figure 20. Graphe des interacteurs permettant l'identification des fonctions de service de type FP (Fonction Principale) et de type FC (Fonction de Contrainte) entre les différents Éléments du Milieu Extérieur (EME) et le produit BD Ocsol GE pour sa phase de production.....	68
Figure 21. Logigramme de production pour la réalisation d'une BD Ocsol GE par photo-interprétation.....	70
Figure 22. Démarche de la PIAO : (a) analyse de l'image THRS ; (b) digitalisation des éléments paysagers ; (c) attribution de classes d'occupation du sol	76

Figure 23. Hypothèse pour optimiser la production régulière de BD Ocsol GE par photo- interprétation : ajout d'un prétraitement pour la mise en place d'un support de digitalisation complémentaire (en vert) basé sur une segmentation de l'image à interpréter.....	78
Figure 24. Présentation du site d'étude du projet de PNR de l'Aubrac - crédit photos : B. Segala, 2014.....	85
Figure 25. Présentation du site d'étude de la Métropole Nice Côte d'Azur – crédit photos : M.Vitter 2015.....	87
Figure 26. Présentation du site d'étude de la DLVA – crédits photos : DLVA, 2015 ; B.Cabassot, 2015 ; F. Van der Beken, 2008	90
Figure 27. Couverture des images Pléiades sur le périmètre de la Métropole NCA	94
Figure 28. Mosaïque d'images RapidEye sur le périmètre d'étude du projet de PNR de l'Aubrac.....	95
Figure 29. Extraits des données de référence utilisés pour les trois cas d'application	96
Figure 30. Échelle de lecture et échelle de saisie de la BD Ocsol GE de la DLVA en milieu urbain et rural.....	97
Figure 31. Extrait de l'ossature routière de l'OCS GE produite par l'IGN sur la commune d'Aureilhan en région Midi-Pyrénées – source : IGN, 2015.....	99
Figure 32. Positionnement des travaux de thèse menés dans le projet R&D.....	110
Figure 33. Extrait (a) d'un socle polygonal de référence des infrastructures linéaires issue de la BD TOPO® IGN, (b) modifié géométriquement lors du processus de SI.....	119
Figure 34. Différence entre un découpage des espaces urbains réalisé par digitalisation (a) manuelle et (b) par une SI	120
Figure 35. Exemples de différentes segmentations et analyse du niveau de découpage du paysage pour la réalisation d'une BD Ocsol GE : (a) sur-segmentée, (b) légèrement sur-segmentée, (c) légèrement sous-segmentée et (d) sous-segmentée.....	121
Figure 36. Différence de tracés entre (a) une digitalisation manuelle et (b) une segmentation	122
Figure 37. Exemple (a et b) d'objets « tentaculaires » (en jaune) générés par une segmentation	122
Figure 38. Exemples de tracés produits par (a) une digitalisation manuelle et (b) une segmentation	123
Figure 39. Graphe des interacteurs et des fonctions de service de type FP (Fonction Principale) et FC (Fonction de Contrainte) entre les différents Éléments du Milieu Extérieur (EME) appliqué à l'assistance à la digitalisation par segmentation.....	124
Figure 40. Ordonnancement simplifié des fonctions (FAST) pour la création d'une assistance à la digitalisation à partir d'une segmentation d'image	126
Figure 41. Méthodologie générale pour la réalisation d'une assistance à la digitalisation à partir d'une segmentation d'image	129
Figure 42. Construction de l'assistance à la digitalisation à partir de 5 modules indépendants et non contraignants.....	131

Figure 43. Rappel de la méthodologie générale et opérations de prétraitements des données	134
Figure 44. Ordonnancement (FAST) des fonctions techniques liées à la fonction de service FC2 associée à la préparation des données image	136
Figure 45. Rappel de l'ordonnancement de la fonction technique FT ₂₁	136
Figure 46. Rappel de l'ordonnancement de la fonction technique FT ₂₂	137
Figure 47. Rappel de l'ordonnancement de la fonction technique FT ₂₃	138
Figure 48. Effet de bord dans la création des objets lié à l'exécution de l'algorithme de segmentation sur des dalles d'image contiguës	139
Figure 49. Principe du tuilage avec un chevauchement de 10% et du carroyage d'assemblage en rouge (ou « ligne de couture »)	140
Figure 50. Impact du tuilage sur la création des objets lors de la segmentation d'image	141
Figure 51. Tuilage de l'imagerie sur le territoire de la Métropole Nice Côte d'Azur (NCA)	142
Figure 52. Structuration du module 1 consacré au formatage de l'imagerie à segmenter	143
Figure 53. Ordonnancement (FAST) des fonctions techniques liées aux fonctions de service FC3 et FC4 associés à la préparation des vecteurs structurant la segmentation	146
Figure 54. Étapes d'élaboration de l'ossature polygonale des infrastructures routières et ferroviaires à partir de la BD TOPO®	148
Figure 55. Rappel de l'ordonnancement de la fonction technique FT311	149
Figure 56. Rappel de l'ordonnancement de la fonction technique FT312	150
Figure 57. Tronçons routiers de la BD TOPO® IGN (en jaune) transformés en information surfacique (en rouge) de 8m de largeur par défaut ou selon la valeur renseignée dans l'attribut « LARGEUR »	151
Figure 58. Comblement des petits espaces (en jaune) générés par l'ossature routière de la BD TOPO®IGN (en rouge) et ferroviaire (en vert) selon un seuil de surface et de largeur déterminé par l'utilisateur	152
Figure 59. Squelettes polygonaux des infrastructures linéaires pour les 3 cas d'étude : (a) projet de PNR de l'Aubrac ; (b) Communauté d'Agglomération de Manosque (DLVA) ; (c) Métropole Nice Côte d'Azur	154
Figure 60. Extraits de l'ossature polygonale des infrastructures linéaires dans des espaces urbains : (a) Manosque (DLVA) ; (b) Métropole Nice Côte d'Azur	155
Figure 61. Extraits de l'ossature polygonale des infrastructures linéaires dans des espaces ruraux : (a) projet de PNR de l'Aubrac ; (b) Métropole Nice Côte d'Azur	155
Figure 62. Rappel de l'ordonnancement de la fonction technique FT41	156
Figure 63. Délimitation approximative d'une « tache urbaine» (en jaune) réalisée par déformation morphologique (dilatation-érosion) à partir des bâtiments vectorisés de la BD TOPO® de l'IGN (en rouge)	157
Figure 64. Élaboration du masque urbain à l'aide des bâtiments de la BD TOPO® IGN et des parcelles cadastrale de la BD PARCELLAIRE® IGN	158
Figure 65. Calcul de la densité de bâtiments de la BD TOPO® IGN par parcelle cadastrale de la BD PARCELLAIRE® IGN	158

Figure 66. Calcul d'un indice de compacité des parcelles cadastrales pour la construction du masque urbain	159
Figure 67. Masque urbain (ou « tache urbaine ») construit à partir des solutions techniques proposées (ST ₄₁₁ et ST ₄₁₂).....	159
Figure 68. Exemple de délimitation cadastrée du masque urbain obtenue à l'aide des solutions techniques proposées (ST ₄₁₁ et ST ₄₁₂).....	160
Figure 69. Assemblage du masque urbain avec le squelette polygonal des infrastructures routières, ferroviaires et supplémentaires (canal).....	160
Figure 70. Extrait d'une image RapidEye (5 m) au 1/10 000 ^e sur le territoire du projet de PNR de l'Aubrac	161
Figure 71. Extraits du masque urbain assemblé aux infrastructures linéaires sur le territoire de la communauté d'agglomération de Manosque	162
Figure 72. Extraits du masque urbain assemblé aux infrastructures linéaires sur le territoire de Métropole Nice Côte d'Azur	163
Figure 73. Rappel de l'ordonnancement de la fonction technique FT ₄₁	163
Figure 74. Squelette polygonal des infrastructures routières (en rouge) réalisées à partir de la BD TOPO® sur le centre de ville de Nice selon les préconisations du CRIGE PACA	164
Figure 75. Compléments apportés par digitalisation manuelle au squelette polygonal des infrastructures routières (BD TOPO®IGN) dans les espaces urbains denses de Nice	165
Figure 76. Cartographie des parcelles cadastrales (en bleu) sur la ville de Nice : L'absence d'information représente l'espace public de la ville	165
Figure 77. Exemples d'optimisation du squelette polygonal des infrastructures linéaires (BD TOPO® IGN) à l'aide des parcelles cadastrales (BD PARCELLAIRE® IGN) dans le centre-ville de Nice.....	166
Figure 78. Structuration du module 2 consacré à l'élaboration du squelette polygonal des infrastructures linéaires.....	167
Figure 79. Structuration du module 3 consacré à l'élaboration du masque urbain	168
Figure 80. Stratégies pour la segmentation (ou zonage) d'une image.....	174
Figure 81. Relation entre les éléments du paysage et la résolution spatiale d'une image : (a) faible résolution, (b) moyenne résolution, (c) haute et très haute résolution (adapté de (Rapinel 2012))	176
Figure 82. Principe du processus de segmentation selon le diagramme de Voronoï sur une image élémentaire : (a) phase d'initialisation des germes, (b) phases itératives, (c, d, e) post-traitements de fusion des régions (f) pour limiter la sur-segmentation. (adapté de (Chassery et Melkemi 1991)).....	177
Figure 83. Principe du processus de segmentation selon un arbre quaternaire (quadtree), (a) partitionnement de l'image en bloc homogène, (b) organisation hiérarchique des blocs (adapté de (Burt, Hong, et Rosenfeld 1981))	177

Figure 84. Processus de segmentation selon une croissance de région : (a) phase d'initialisation des germes par un semis de points, (b et c) phases itératives, (d) partitionnement totale de l'image	178
Figure 85. Processus de segmentation selon le principe de la Ligne de Partage des Eaux (LPE) : (a) phase d'initialisation des germes par détection des minima locaux, (b et c) phase itérative (adapté de (Lefebvre 2011)).....	179
Figure 86. Liens de hiérarchie entre les niveaux de segmentation et les objets qui les composent (adaptée de (Baatz et al. 2004))	181
Figure 87. Les approches de cartographie orientée-objets (adapté de O'Neil-Dunne, 2009)	182
Figure 88. Description de l'étape 2 de segmentation dans la méthodologie générale	183
Figure 89. Ordonnancement (FAST) des fonctions techniques liées aux fonctions de service FC3(2), FC4(2), FC5, FC6 et FC7 associées à la segmentation	184
Figure 90. Structuration de « l'eCognundrum » permettant la création et la configuration des processus du « ruleset »	185
Figure 91. Rappel de l'ordonnancement des fonctions techniques FT ₃₂ et FT ₄₂	185
Figure 92. Intégration de « l'ossature polygonale » composée des espaces urbains et du réseau routier (en rouge) avant la procédure de segmentation. Délimitation « dentelée » (en vert) de l'ossature causée par la rastérisation d'eCognition®	186
Figure 93. Extraits des chemins et routes secondaires sur le territoire de la communauté d'agglomération de Manosque (DLVA)	187
Figure 94. Post-traitement morphologique sur les ossatures polygonales de référence et complémentaires : (a) emprise spatiale des ossatures polygonale, (b) érosion morphologique des ossatures jusqu'à la disparition totale de celles-ci.	188
Figure 95. Nature du paramétrage nécessaire pour le processus de segmentation « multi-résolution » (adapté de (Vannier 2011)).....	189
Figure 96. Rappel de l'ordonnancement des fonctions techniques FT51 et FT52	190
Figure 97. Extrait cartographique de la segmentation « multi-résolution » contrainte par des ossatures polygonales de référence et complémentaires sur la communauté d'agglomération de Manosque (DLVA)	193
Figure 98. Résultats de l'ESP tool pour les trois zones d'étude	194
Figure 99. Rappel de l'ordonnancement des fonctions techniques FT61	195
Figure 100. (a) Identification des objets « artefacts » (en rouge) issus de la segmentation selon un critère de superficie ($\leq 500 \text{ m}^2$). (b) Agrégation de ces objets avec un objet voisin partageant le maximum de contact	195
Figure 101. Rappel de l'ordonnancement des fonctions techniques FT ₇₁	196
Figure 102. (a) Identification des objets « fins » (en rouge) issues de la segmentation à partir de la « largeur estimée » $l_{est} (\leq 15 \text{ m})$. (b) Opération morphologique (érosion) jusqu'à disparition totale de ces objets « fins ».....	197
Figure 103. Exemple d'objets « tentaculaires » ou complexes (en jaune) couramment observés à la suite d'une segmentation MS	197

Figure 104. (a) Observation d'objets « tentaculaires » générés par la segmentation (en rouge) ; (b) érosion sur l'ensemble des objets générant des espaces « vides » (en orange). (c) les tentacules sont gommées par dilatation complète des objets vers les espaces « vides »	198
Figure 105. Structuration du dossier du module 4 consacré la réalisation d'une segmentation adaptée à la photo-interprétation d'une BD OCSOL GE.....	200
Figure 106. Rappel de la méthodologie générale et de l'étape de finalisation de l'assistance à la digitalisation	204
Figure 107. Ordonnancement (FAST) des fonctions techniques liées à la fonction de service FC2(2) associées une segmentation menée sur un gros volume de données	205
Figure 108. Découpage des tuiles segmentées par la ligne médiane de la zone de chevauchement entre les tuiles	205
Figure 109. Assemblage des fichiers de segmentation en un seul et même fichier	206
Figure 110. Élimination des contours de dalle (a) par identification et fusion des objets divisés par une ligne de bord (b)	207
Figure 111. Ordonnancement (FAST) de la fonction de service FC8 associées à l'adaptation de la géométrie des objets avec l'échelle de photo-interprétation	207
Figure 112. Exemple de délimitation des objets dans un procédé de segmentation (a) et lors d'une digitalisation manuelle (b)	208
Figure 113. Différence entre la simplification de ligne et le lissage de ligne. (a) simplification selon l'algorithme de Douglas et Peucker (Douglas et Peucker, 1973), (b) simplification à partir d'une analyse des caractéristiques de forme (Wang, 1996), (c) lissage à partir de la méthode PAEK et (d) lissage selon une interpolation de Bézier (illustrations extraites de l'aide en ligne du logiciel ArcGIS®)	209
Figure 114. Simplification de ligne à partir de l'algorithme Douglas-Peucker ((Douglas et Peucker 1973))	210
Figure 115. Simplification de ligne à partir de l'algorithme Visvalingham-Wyatt ((Visvalingham et Whyatt 1993)).....	211
Figure 116. Impact d'un algorithme de simplification de ligne sur un fichier SIG non topologique : (a) fichier SIG de polygones à simplifier en format shapefile, (b) erreurs topologiques (trous, superpositions) liées à l'application de l'algorithme de simplification de ligne (ici, Douglas-Peucker)	213
Figure 117. Test comparatif des performances de deux algorithmes de simplification de ligne (Douglas-Peucker et Visvalingham-Wyatt modifié) mené avec MapShaper selon trois niveaux de généralisation.	215
Figure 118. Diagramme FAST des fonctions de service FC3(3) et FC4(3)	216
Figure 119. Mise à jour (c) de la segmentation (a) par l'ossature polygonale de référence (b)	217
Figure 120. Structuration du module 5 consacré à la finalisation de l'assistance à la digitalisation.....	218
Figure 121. Exemple extrait du PNR de l'Aubrac : (a) Prédécoupage issu de l'assistance, (b) reprises manuelles du prédécoupage opérées par le photo-interprète et (c) identification de l'occupation du sol	220

Figure 122. Extrait des Résultats (a) du prédécoupage obtenue avec l'assistance, (b) des reprises manuelles opérées par le photo-interprète et (c) l'identification de l'occupation du sol sur une zone de haute montagne du territoire de la Métropole Nice Côte d'Azur	222
Figure 123. Extrait des Résultats (a) du prédécoupage obtenue avec l'assistance, (b) des reprises manuelles opérées par le photo-interprète et (c) l'identification de l'occupation du sol sur une zone urbanisée de l'agglomération niçoise	223
Figure 124. Extrait des Résultats (a) du prédécoupage obtenue avec l'assistance, (b) des reprises manuelles opérées par le photo-interprète et (c) l'identification de l'occupation du sol sur un secteur d'agriculture intense sur la communauté d'agglomération de Manosque (DLVA)	225
Figure 125. Rappel de la méthodologie générale et de l'ultime étape de mise à disposition de l'assistance à la digitalisation auprès du ou des photo-interprètes	234
Figure 126. Localisation des 4 secteurs d'expérimentation	235
Figure 127. Organisation des productions cartographiques selon les experts et les secteurs d'expérimentation (ZT).....	238
Figure 128. Support de photo-interprétation mise à disposition pour la méthodologie sans assistance pour chaque zone d'étude (ZT). La couche polygonale est composée du « squelette » des infrastructures routières croisé avec la limite de la ZT	239
Figure 129. Localisation des zones d'études sur le territoire de la DLVA	240
Figure 130. ZT1 : applications successives (a) du module 2 : élaboration du squelette polygonal des infrastructures linéaires ; (b) module 3 : élaboration du masque urbain ; (c) module 4 : réalisation de la segmentation d'image et (d) du module 5 : finalisation de l'assistance à la digitalisation	241
Figure 131. ZT2 : applications successives (a) du module 2 : élaboration du squelette polygonal des infrastructures linéaires ; (b) module 3 : élaboration du masque urbain ; (c) module 4 : réalisation de la segmentation d'image et (d) du module 5 : finalisation de l'assistance à la digitalisation	242
Figure 132. ZT3 : applications successives (a) du module 2 : élaboration du squelette polygonal des infrastructures linéaires ; (b) module 3 : élaboration du masque urbain ; (c) module 4 : réalisation de la segmentation d'image et (d) du module 5 : finalisation de l'assistance à la digitalisation.....	243
Figure 133. ZT4 : applications successives (a) du module 2 : élaboration du squelette polygonal des infrastructures linéaires ; (b) module 3 : élaboration du masque urbain (aucun objet « urbain » identifié) ; (c) module 4 : réalisation de la segmentation d'image et (d) du module 5 : finalisation de l'assistance à la digitalisation	244
Figure 134. Extraits cartographiques au 1/5 000 ^e des ZT1 et ZT2 réalisés avec et sans assistance	247
Figure 135. Extraits cartographiques au 1/5 000 ^e des ZT3 et ZT4 réalisés avec et sans assistance	247
Figure 136. Vitesse moyenne de cartographie (km ² /heure) enregistrée par expert selon les méthodes de production et la zone d'étude (ZT).....	252
Figure 137. Imbrication des 5 modules contribuant à la réalisation d'une assistance à la digitalisation à partir d'une segmentation	257

Figure 138. Comparaison des vitesses minimales et maximales de PIAO assistée et non-assistée sur un secteur paysager hétérogène	263
Figure 139. Prédécoupage d'un paysage fortement homogène	267
Figure 140. Apport de l'enveloppe urbaine (en vert) en zone rural.....	268
Figure 141. (a) Support de digitalisation pour la photo-interprétation non assistée, (b) superposition des 9 découpages non assistés de l'occupation du sol réalisée par les étudiants.....	269
Figure 142. (a) Support de digitalisation pour la photo-interprétation assistée, (b) superposition des 9 découpages assistés de l'occupation du sol réalisée par les étudiants.....	270
Figure 143. Diagramme de Kiviat de la performance de l'assistance à la digitalisation sur les compétences requises pour l'exercice de PIAO.....	272

Liste des tableaux

Tableau 1. Récapitulatif des caractéristiques des offres cartographiques remarquables sur l'occupation	29
Tableau 2. Exemples de BD régionales sur l'occupation du sol.....	36
Tableau 3. Lire une fonction dans le diagramme FAST	62
Tableau 4. Classes de flexibilité couramment utilisées	64
Tableau 5. Synthèse des trois cahiers des charges pour la production de BD Ocsol GE	92
Tableau 6. Nomenclature Corine Land Cover adaptée pour la Métropole NCA et la DLVA	102
Tableau 7. Nomenclature Corine Land Cover adaptée pour le projet de PNR de l'Aubrac...	103
Tableau 8. Comparaison des nomenclatures en niveau 4 pour les 3 cas d'études.....	107
Tableau 9. Déclinaison en niveau 5 de la nomenclature de la BD Ocsol GE du projet de PNR de l'Aubrac	109
Tableau 10. Aperçu de la variabilité et de l'importance des volumes de ou des donnée(s) image(s) de référence à interpréter en fonction des prestations	119
Tableau 11. Caractérisation des fonctions de service liées à la mise en place d'une assistance à la digitalisation	127
Tableau 12. Type d'imagerie mis à disposition par les commanditaires des trois études de cas	138
Tableau 13. Critères de sélection des tronçons routiers – Classe « ROUTE »	149
Tableau 14. Critère de sélection des surfaces routières – « SURFACE_ROUTE ».....	149
Tableau 15. Critères de sélection des tronçons de chemin de fer – Classe "TRONCON_VOIE_FERRE"	150
Tableau 16. Sélection et paramétrage appliqué à partir des données de la BD TOPO® IGN pour la construction des ossatures polygonales des trois cas d'étude	153
Tableau 17. Paramètres appliqués pour la construction du masque urbain	162
Tableau 18. Paramétrage de la segmentation « multi-résolution » sur les trois zones d'étude	192
Tableau 19. Nombre de vertex composant les fichiers SIG de segmentation devant subir une simplification de ligne pour les trois cas d'étude	213
Tableau 20. Tableau de synthèse des tâches accomplies dans la méthodologie générale et des modules associés	228
Tableau 21. Données exogènes mobilisées pour l'aide à la photo-interprétation	236
Tableau 22. Consignes de saisie pour la photo-interprétation	236
Tableau 23. Nomenclature retenue pour la description de l'occupation du sol à grande échelle	237

Tableau 24. Valeurs de Kappa entre productions (SA : Sans Assistance ; AA : Avec Assistance) par ZT aux trois premiers niveaux de nomenclature. (vert : ≥ 0.90 ; jaune : ≥ 0.80 ; orange : ≥ 0.70 ; rouge : <0.70).....	249
Tableau 25. Scores de la métrique de Hoover « correct detection » entre les productions (SA : Sans Assistance ; AA : Avec Assistance) par zone d'étude pour le niveau 4 de nomenclature (vert : ≥ 0.80 ; orange : ≥ 0.60 ; rouge : <0.60)	250
Tableau 26. Nombre de polygones par ZT et par niveau de nomenclature mesuré selon la méthode de cartographie et l'opérateur	251
Tableau 27. Temps de photo-interprétation effectif par expert et par zone d'étude selon la méthode de cartographie	252
Tableau 28. Paramètres de configuration (sensibilités et enjeux) pour la mise en œuvre d'une assistance à la digitalisation dans la production d'une BD Ocsol GE	259
Tableau 29. Estimation du temps de réalisation des tâches de préparation de la photo-interprétation.....	262
Tableau 30. Bilan des forces et des faiblesses de l'assistance à la digitalisation	280

Bibliographie

- AFIGEO. 2012. « Le réseau des CRIGES. Le partage d'expérience autour d'Inspire ». Poster présenté à Conférence Inspire 2012, Istanbul.
- Aguejdad, R. 2009. « Etalement urbain et évaluation de son impact sur la biodiversité, de la reconstitution des trajectoires à la modélisation prospective. Application à une agglomération de taille moyenne : Rennes Métropole. » Thèse, Rennes: Université Rennes 2. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00553665/document>.
- Ajouc, C. 2010. « Présentation de la base de données OCSOL-PACA ». présenté à Groupe de travail OCSGE, Saint-Mandé. http://cnig.gouv.fr/wp-content/uploads/2016/12/2010_OCSOL-PACA.pdf.
- . 2016. « Présentation d'une analyse comparative de l'OCSOL GE du CRIGE-PACA et du socle OCS GE du CNIG/IGN ». présenté à Groupe de travail OCSGE, Saint-Mandé. http://cnig.gouv.fr/wp-content/uploads/2016/11/20161201_gt_ocs_cnig_comparaison_ocsolge_crige.pdf.
- Arvor, D., L. Durieux, S. Andrés, et M. A. Laporte. 2013. « Advances in Geographic Object-Based Image Analysis with ontologies: A review of main contributions and limitations from a remote sensing perspective ». *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 82:125-37. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2013.05.003>.
- Autran, J. 2007. « Extension de la nomenclature “ Corine Land Cover ” pour la description de l'occupation du sol à grande échelle ». In *Journées Francophones sur les Ontologies*, 115-34. Sousse, Tunisia. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01483836>.
- Baatz, M., U. Benz, S. Dehghani, M. Heynen, A. Höltje, P. Hofmann, I. Lingenfelder, M. Mimler, M. Sohlbach, et M. Weber. 2004. « ECognition Professional User Manual 4 ». *Definiens Imaging, München*.
- Baatz, M., et A. Schape. 2000. « Multiresolution Segmentation: An Optimization Approach for High Quality Multi-Scale Image Segmentation. » In *Angewandte Geographische Informations-Verarbeitung, XII. Beitrage zum AGIT-Symposium Salzburg 2000*, édité par J. Strobl, T. Blaschke, et G. Griesbner, Herbert Wichmann Verlag, 12-23. Karlsruhe. [http://www.scirp.org/\(S\(351jmbntvnsjt1aadkposzje\)\)/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=1875442](http://www.scirp.org/(S(351jmbntvnsjt1aadkposzje))/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=1875442).
- Benz, U. C., P. Hofmann, G. Willhauck, I. Lingenfelder, et M. Heynen. 2004. « Multi-resolution, object-oriented fuzzy analysis of remote sensing data for GIS-ready information ». *ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing* 58 (3):239-258.
- Blaschke, T. 2010. « Object based image analysis for remote sensing ». *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing* 65 (1):2-16.
- Blaschke, T., G. J. Hay, M. Kelly, S. Lang, P. Hofmann, E. Addink, R. Queiroz Feitosa, et al. 2014. « Geographic Object-Based Image Analysis – Towards a new paradigm ». *Ispr Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 87 (100):180-91. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2013.09.014>.

- Blaschke, T., et J. Strobl. 2001. « What's wrong with pixels? Some recent developments interfacing remote sensing and GIS ». *GIS-Zeitschrift für Geoinformationssysteme* 14 (6):12-17.
- Bloch, M. 2014. « Simplification Tips ». GitHub. *mbloch* (blog). 2014. <https://github.com/mbloch/mapshaper/wiki/Simplification-Tips>.
- Bonn, F., et G Rochon. 1992. *Précis de télédétection. Volume 1: principes et méthodes*. Vol. 1. Presses de l'Université du Québec.
- Burghardt, D., M. Neun, et R. Weibel. 2005. « Generalization Services on the Web—Classification and an Initial Prototype Implementation ». *Cartography and Geographic Information Science* 32 (4):257-68. <https://doi.org/10.1559/152304005775194665>.
- Burt, P. J., T. H. Hong, et A. Rosenfeld. 1981. « Segmentation and Estimation of Image Region Properties through Cooperative Hierarchical Computation ». *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics* 11 (12):802-9. <https://doi.org/10.1109/TSMC.1981.4308619>.
- Caloz, R., et C. Collet. 2001. *Précis de télédétection. Volume 3, traitements numériques d'images de télédétection*. Vol. 3. Presses de l'Université du Québec. http://books.google.fr/books?hl=fr&lr=&id=9bepLPU5udQC&oi=fnd&pg=PP1&dq=Caloz+Colle+pr%C3%A9cis+de+t%C3%A9l%C3%A9d%C3%A9tection&ots=ZbQtJcfBGD&sig=f_YS7QNZ9MBSKFmUH-Cdl4_Sg8Y.
- Capri, A. 2007. « Caractérisation des objets dans une image en vue d'une aide à l'interprétation et d'une compression adaptée au contenu : application aux images échographiques ». Thèse, Orléans: Université d'Orléans.
- Castilla, G., et G. J. Hay. 2008. « Image Objects and Geographic Objects ». In *Object-Based Image Analysis*, édité par T. Blaschke, S. Lang, et G. J. Hay, Springer, 91-110. Lecture Notes in Geoinformation and Cartography. https://doi.org/10.1007/978-3-540-77058-9_5.
- Chassery, J. M., et M. Melkemi. 1991. « Diagramme de Voronoï appliqué à la segmentation d'images et à la détection d'évènements en imagerie multi-sources ». *Traitement du Signal* 8 (3):155-64.
- Chen, Z., Z. Zhao, P. Gong, et B. Zeng. 2006. « A new process for the segmentation of high resolution remote sensing imagery ». *International Journal of Remote Sensing* 27 (22):4991-5001. <https://doi.org/10.1080/01431160600658131>.
- Chevalier, R. 1966. « Problématique de la photo-interprétation à la recherche d'une logique ». In *Actes du 11e Symposium International de photo-interprétation*, 1-14. Paris.
- Cocquerez, J. P., et S. Philipp-Foliguet. 1995. *Analyse d'images: filtrage et segmentation*. Enseignement de la physique. Masson. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00706168>.
- Code de l'environnement - Article R371-29*. s. d. *Code de l'environnement*. Vol. R371-29. Consulté le 4 mai 2017.
- Code de l'urbanisme - Article L141-3*. s. d. *Code de l'urbanisme*. Vol. L141-3. Consulté le 4 mai 2017.

- Comber, A., P. Fisher, et R. Wadsworth. 2005. « What Is Land Cover? » *Environment and Planning B: Planning and Design* 32 (2):199-209. <https://doi.org/10.1068/b31135>.
- Congalton, R. G. 1991. « A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data ». *Remote Sensing of Environment* 37 (1):35-46. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(91\)90048-B](https://doi.org/10.1016/0034-4257(91)90048-B).
- Corgne, S. 2004. « Modélisation prédictive de l'occupation des sols en contexte agricole intensif. Application à la couverture hivernale des sols en Bretagne ». Thèse, Rennes: Université Rennes 2.
- Décaudin, F. 2016. « OCS2D Nord Pas de Calais, les spécificités techniques du référentiel OCS2D ». présenté à Groupe de travail OCSGE, Saint-Mandé. http://cnig.gouv.fr/wp-content/uploads/2016/12/2016_12_01-Les-sp%C3%A9cificit%C3%A9s-techniques-du-r%C3%A9f%C3%A9rentiel-OCS2D.pdf.
- Dorren, L. K. A., B. Maier, et A. C. Seijmonsbergen. 2003. « Improved Landsat-based forest mapping in steep mountainous terrain using object-based classification ». *Forest Ecology and Management* 183 (1):31-46.
- Douglas, D. H., et T. K. Peucker. 1973. « Algorithms for the reduction of the number of points required to represent a digitized line or its caricature ». *Cartographica: The International Journal for Geographic Information and Geovisualization* 10 (2):112-22. <https://doi.org/10.3138/FM57-6770-U75U-7727>.
- Dragut, L., O. Csillik, C. Eisank, et D. Tiede. 2014. « Automated parameterisation for multi-scale image segmentation on multiple layers ». *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 88:119-127.
- Dragut, L., D. Tiede, et S. R. Levick. 2010. « ESP: a tool to estimate scale parameter for multiresolution image segmentation of remotely sensed data ». *International Journal of Geographical Information Science* 24 (6):859-871.
- Dutton, G. 1999. « Scale, Sinuosity, and Point Selection in Digital Line Generalization ». *Cartography and Geographic Information Science* 26 (1):33-54. <https://doi.org/10.1559/152304099782424929>.
- Dyer, C. R., A. Rosenfeld, et H. Samet. 1980. « Region Representation: Boundary Codes from Quadtrees ». *Commun. ACM* 23 (3):171-179. <https://doi.org/10.1145/358826.358838>.
- EEA. 1994. « CORINE Land Cover ». European Environment Agency. <http://www.eea.europa.eu/publications/COR0-landcover>.
- Elissalde, B. 2005. « Territoire ». Hypergé. *Hypergé* (blog). 2005. http://www.hypergeo.eu/IMG/_article_PDF/article_285.pdf.
- Fricke, R., et E. Wolff. 2002. « The MURBANDY Project: development of land use and network databases for the Brussels area (Belgium) using remote sensing and aerial photography ». *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 4:33-50. [https://doi.org/10.1016/S0303-2434\(02\)00010-7](https://doi.org/10.1016/S0303-2434(02)00010-7).
- Geist, H. 2006. *Our Earth's Changing Land: A-K*. Vol. 1. Our Earth's Changing Land: A-K.
- Girard, M. C., et C. M. Girard. 2010. *Traitement des données de télédétection - 2ème édition - Environnement et ressources naturelles*. 2e édition. Dunod.

- Gökgöz, T., A. Sen, A. Memduhoglu, et M. Hacı. 2015. « A new algorithm for cartographic simplification of streams and lakes using deviation angles and error bands ». *ISPRS International Journal of Geo-Information* 4:2185-2204.
- González, A., A. Gilmer, R. Foley, J. Sweeney, et J. Fry. 2011. « Applying geographic information systems to support strategic environmental assessment: Opportunities and limitations in the context of Irish land-use plans ». *Environmental Impact Assessment Review* 31 (3):368-81. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2010.12.001>.
- Gourgand, B. 2014. « Prescriptions nationales pour la production d'une base de données d'occupation du sol à grande échelle ». version 1.2.
- Haralick, R. M., et L. G. Shapiro. 1985. « Image Segmentation Techniques ». *Computer Vision, Graphics, and Image Processing* 29 (1):100-132. [https://doi.org/10.1016/S0734-189X\(85\)90153-7](https://doi.org/10.1016/S0734-189X(85)90153-7).
- Harrower, M., et M. Bloch. 2006. « MapShaper.org: A Map Generalization Web Service ». *IEEE Computer Graphics and Applications* 26 (4):22-27.
- Hay, G. J., et G. Castilla. 2008. « Geographic Object-Based Image Analysis (GEOBIA): A new name for a new discipline ». In *Object-based image analysis*, 75-89. Springer. http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-540-77058-9_4.
- Hoover, A., G. Jean-Baptiste, X. Jiang, P. J. Flynn, H. Bunke, D. B. Goldgof, K. Bowyer, D. W. Eggert, A. Fitzgibbon, et R. B. Fisher. 1996. « An experimental comparison of range image segmentation algorithms ». *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on* 18 (7):673-689.
- Houet, T., O. Ribière, L. Vacquié, F. Vidal, et D. Galop. 2012. « Analyse spatiale de l'évolution des modes d'occupation et d'usages des sols sur le Vicdessos de 1942 à nos jours ». *Sud-Ouest Européen* sous presse:15.
- Hubert-Moy, L. 2004. *Occupation du sol et télédétection: de l'inventaire à la modélisation prédictive*. France.
- I. A. U. 2014. « Mos 1982-2012. Volume 2. De la carte au territoire ». Institut d'aménagement et d'urbanisme de la région île de France. 2014. <http://www.iau-idf.fr/savoir-faire/nos-travaux/edition/mos-1982-2012-volume-2-de-la-carte-au-territoire.html>.
- IGN. 2001. « BD CARTO, Descriptif de contenu ».
- . 2016a. « BD TOPO version 2.2 ».
- . 2016b. « Occupation du sol à grande échelle. Un outil de description de la couverture et de l'usage du sol ». présenté à GT National OSCGE - présentation CNIG, Paris.
- Inglada, J. 2016. « Le produit OSO "Occupation du SOL" ». CES - Centre d'Expertise scientifique présenté à Théia - Pôle thématique surfaces continentales, Toulouse.
- Jiang, X., C. Marti, C. Irniger, et H. Bunke. 2006. « Distance Measures for Image Segmentation Evaluation ». *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, n° 1:1-10. <https://doi.org/10.1155/ASP/2006/35909>.
- Joliveau, T. 2004. « Géomatique et gestion environnementale du territoire. Recherches sur un usage géographique des SIG ». HDR en Géographie, Rouen: Université de Rouen.

- Jung, C. R. 2007. « Combining wavelets and watersheds for robust multiscale image segmentation ». *Image and Vision Computing*, SIBGRAPI, 25 (1):24-33. <https://doi.org/10.1016/j.ima.vis.2006.01.002>.
- Kasperson, R. E., J. X. Kasperson, et B. Turner. 1995. *Regions at Risk: Comparisons of Threatened Environments*. United Nations University Press.
- Kazmierski, M., J. C. Desconnets, B. Guerrero, et D. Briand. 2014. « GEOSUD SDI: accessing Earth Observation data collections with semantic semantic-based services ». In *Connecting a Digital Europe through Location and Place*. Castellon: Huerta, Schade, Granell (Eds).
- Kim, J. B., et H. J. Kim. 2003. « Multiresolution-based watersheds for efficient image segmentation ». *Pattern Recognition Letters* 24 (1-3):473-88. [https://doi.org/10.1016/S0167-8655\(02\)00270-2](https://doi.org/10.1016/S0167-8655(02)00270-2).
- Kim, M., M. Madden, et T. Warner. 2008. « Estimation of optimal image object size for the segmentation of forest stands with multispectral IKONOS imagery ». In *Object-based image analysis*, 291-307. Springer. http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-540-77058-9_16.
- Lambin, E. F., B. L. Turner, Helmut J. Geist, Samuel B. Agbola, A. Angelsen, J. W. Bruce, O. T. Coomes, et al. 2001. « The causes of land-use and land-cover change: moving beyond the myths ». *Global Environmental Change* 11 (4):261-69. [https://doi.org/10.1016/S0959-3780\(01\)00007-3](https://doi.org/10.1016/S0959-3780(01)00007-3).
- Lefebvre, A. 2011. « Contribution de la texture pour l'analyse d'images à très haute résolution spatiale : application à la détection de changement en milieu périurbain ». Thèse, Rennes: Université Rennes 2.
- Lefebvre, A., T. Corpetti, et L. Hubert Moy. 2010. « Segmentation of very high spatial resolution panchromatic images based on wavelets and evidence theory ». In *SPIE Remote Sensing Conference*, 7830-13:1-13. Toulouse. <https://doi.org/10.1117/12.864802>.
- Lefrançois, E., Rochepeau, S., Blancher, P. 2016. « Montage et réalisation de projets de recherche entre organisme de recherche, gestionnaires et bureau d'étude : analyse à travers l'expérience d'Asconit Consultants, Abstract ». *Sciences Eaux & Territoires* Numéro 17 (2):62-65.
- Lengagne, G. 1999. « Perspectives d'évolution de l'information géographique et les conséquences pour l'IGN ». Rapport présenté au Premier Ministre La Documentation française. Collection des rapports officiels.
- LOI n° 2010-788 du 12 juillet 2010 portant engagement national pour l'environnement. 2010. 2010-788.
- Loriot, P., et M. Di Salvo. 2008. « Détermination d'un MOS et calcul d'une tache urbaine à partir de la BD TOPO® de l'IGN : étude expérimentale ». Rapport Technique. CERTU. <http://lara.inist.fr/handle/2332/1460>.
- Louvet, R., et C. Ajouc. 2014. « Groupe de travail "Occupation du sol à grande échelle" ». 3.
- Lubek, P., P. Cannard, Y. Cousquer, et V. Champagne. 2005. « Le référentiel à grande échelle de l'institut géographique national ». Rapport d'enquête. Paris: Inspection générale des

- Finances, Inspection générale de l'administration et Conseil général des Ponts et Chaussées.
- Maître, H. 2003. *Le traitement des images*. Paris: Hermes Science Publications.
- Marpu, P. R., M. Neubert, H. Herold, et I. Niemeyer. 2010. « Enhanced evaluation of image segmentation results ». *Journal of Spatial Science* 55 (1):55–68.
- Mather, J. R., V. M. Kotliakov, et G. F. White. 1991. *Global Change: Geographical Approaches*. University of Arizona Press.
- McMaster, R. B. 1986. « A Statistical Analysis of Mathematical Measures for Linear Simplification ». *The American Cartographer* 13 (2):103–16. <https://doi.org/10.1559/152304086783900059>.
- . 1987. « Automated Line Generalization ». *Cartographica: The International Journal for Geographic Information and Geovisualization* 24 (2):74–111. <https://doi.org/10.3138/3535-7609-781G-4L20>.
- Meinel, G., et M. Neubert. 2004. « A comparison of segmentation programs for high resolution remote sensing data ». *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* 35 (Part B):1097–1105.
- Merrien, F., M. Léobet, et M. Francès. 2015. *La directive Inspire pour les néophytes*. 4ème édition. Licence Ouverte Etalab. Paris: Mission de l'information géographique du ministère de l'écologie. http://formations-geomatiques.developpement-durable.gouv.fr/NAT009/Inspire/directive_inspire_neophytes/res/Directive_inspire_neophytes_papier.pdf.
- Meyer, W. B., B. L. Turner, et University Corporation for Atmospheric Research Office for Interdisciplinary Earth Studies. 1994. *Changes in Land Use and Land Cover: A Global Perspective*. Cambridge University Press.
- Nagao, M., et T. Matsuyama. 1979. « Edge Preserving Smoothing ». *Computer Graphics and Image Processing* 9 (4):394–407.
- Neubert, M., H. Herold, et G. Meinel. 2008. « Assessing Image Segmentation Quality – Concepts, Methods and Application ». In *Object-Based Image Analysis*, édité par T. Blaschke, S. Lang, et G. J. Hay, 769–84. Lecture Notes in Geoinformation and Cartography. Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-77058-9_42.
- Nikolaidis, A., et I. Pitas. 2001. « Region-Based Image Watermarking ». *IEEE Transactions on Image Processing: A Publication of the IEEE Signal Processing Society* 10 (11):1726–40. <https://doi.org/10.1109/83.967400>.
- OCDE. 2016. *Manuel de Frascati 2015: lignes directrices pour le recueil et la communication des données sur la recherche et le développement expérimental, Mesurer les activités scientifiques, technologiques et d'innovation*. OCDE. Paris: OCDE.
- O'Neil-Dunne, J. P. M., Sean MacFaden, et Keith C. Pelletier. 2011. « Incorporating contextual information into object-based image analysis workflows ». In *ASPRS 2011 Annual Conference*. Milwaukee.

- Ormsby, D., et W. Mackaness. 1999. « The Development of Phenomenological Generalization Within an Object-oriented Paradigm ». *Cartography and Geographic Information Science* 26 (1):70-80. <https://doi.org/10.1559/152304099782424910>.
- Pal, N. R., et S. K. Pal. 1993. « A review on image segmentation techniques ». *Pattern Recognition* 26 (9):1277-94. [https://doi.org/10.1016/0031-3203\(93\)90135-J](https://doi.org/10.1016/0031-3203(93)90135-J).
- Philipson, W. R. 1997. *Manual of photographic interpretation*. 2ème édition. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing. Bethesda, Maryland.
- Pratt, W. K. 2001. *Digital Image Processing: PIKS Inside*. 3ème édition. New York: Wiley-Interscience.
- Provencher, L., et J. M. Dubois. 2007. *Précis de télédétection. Volume 4, méthodes de photointerprétation et d'interprétation d'image*. Vol. 4. Presses de l'Université du Québec.
- Puissant, A. 2003. « Information géographique et images à très haute résolution : utilité et applications en milieu urbain ». Thèse, Strasbourg: Université Louis Pasteur Strasbourg 1.
- Rapinel, S. 2012. « Contribution de la télédétection à l'évaluation des fonctions des zones humides : de l'observation à la modélisation prospective ». Thèse, Rennes: Université Rennes 2.
- Robert, S., et J. Autran. 2012. « Décrire à grande échelle l'occupation des sols urbains par photo-interprétation. Réflexion méthodologique et expérimentation en Provence ». *Sud-Ouest européen. Revue géographique des Pyrénées et du Sud-Ouest*, n° 33:25-40.
- Roux, C. 2004. « CRIGE PACA: Retour d'expérience sur la base de données OCSOL 99 du CRIGE PACA ». présenté à Journée techniques du CRIGE.
- Roy, D. 2013. « Mode d'occupation des sols par photo-interprétation appuyée sur squelette polygonal. Nouvelle méthode de mesure pour une gestion économe de l'espace ». Mémoire de master 2, mention géographie Environnementale. Université de Strasbourg.
- Saffroy, T., et H. Lambert. 2013. « Étude du besoin des utilisateurs en occupation du sol à grande échelle (OCS GE) ». IGN Conseil.
- Santilli, S. 2012. « Simplifying a map layer using PostGIS topology ». *Strk's Blog* (blog). 2012. <https://strk.kbt.io/blog/2012/04/13/simplifying-a-map-layer-using-postgis-topology/>.
- Seifert, F. M. 2009. « Improving Urban Monitoring toward a European Urban Atlas ». In *Global mapping of human settlement: experiences, datasets and prospects*, édité par P. Gamba et M. Herold, Taylor & Francis, 231-50. London.
- Sheeren, D., S. Ladet, O. Ribière, B. Raynaud, M. Paegelow, et T. Houet. 2012. « Assessing Land Cover Changes in the French Pyrenees since the 1940s A Semi-automatic GEOBIA Approach Using Aerial Photographs ». In . <https://hal-univ-tlse2.archives-ouvertes.fr/hal-01197132/document>.
- Soares, F., et F. Muge. 2004. « Watershed lines suppression by waterfall marker improvement and line-neighbourhood analysis ». In *Proceedings of the 17th International Conference on Pattern Recognition, 2004. ICPR 2004.*, 1:604-607 Vol.1. <https://doi.org/10.1109/ICPR.2004.1334215>.

- Sun, Y., et G. J. He. 2008. « Segmentation of High-Resolution Remote Sensing Image Based on Marker-Based Watershed Algorithm ». In *2008 Fifth International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery*, 4:271-76. <https://doi.org/10.1109/FSKD.2008.249>.
- Tassinari, R. 2006. *Pratique de l'analyse fonctionnelle*. Dunod.
- Thomas, A. 2005. « Application de l'approche orientée-objet à l'extraction de fragments forestiers à partir de scènes Spot ». Rapport de fin d'étude, DESS SIGMA 2005.
- Touzet, T., X. Halbecq, et F. Lecordix. 2011. « Chaîne de production de la carte de la végétation arborée française ». In *International Cartographic Conference (ICC)*. Paris, France.
- Vannier, C. 2011. « Observation et modélisation spatiale de pratiques agricoles territorialisées à partir de données de télédétection : application au paysage bocager ». Thèse, Rennes: Université Rennes 2.
- Vincent, L., et P. Soille. 1991. « Watersheds in digital spaces: an efficient algorithm based on immersion simulations ». *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 13 (6):583-98. <https://doi.org/10.1109/34.87344>.
- Visvalingam, M., et J. D. Whyatt. 1993. « Line generalisation by repeated elimination of points ». *The Cartographic Journal* 30 (1):46-51. <https://doi.org/10.1179/000870493786962263>.
- Woodcock, C. E., et A. H. Strahler. 1987. « The factor of scale in remote sensing ». *Remote sensing of Environment* 21 (3):311-332.
- Wuest, B., et Y. Zhang. 2009. « Region based segmentation of QuickBird multispectral imagery through band ratios and fuzzy comparison ». *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 64 (1):55-64. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2008.06.005>.
- Zhang, X., P. Xiao, et X. Feng. 2012. « An unsupervised evaluation method for remotely sensed imagery segmentation ». *Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE* 9 (2):156-160.
- Zhang, Y. J. 1995. « Influence of segmentation over feature measurement ». *Pattern Recognition Letters* 16 (2):201-6. [https://doi.org/10.1016/0167-8655\(94\)00083-F](https://doi.org/10.1016/0167-8655(94)00083-F).
- . 1997. « Evaluation and comparison of different segmentation algorithms ». *Pattern Recognition Letters* 18 (10):963-74. [https://doi.org/10.1016/S0167-8655\(97\)00083-4](https://doi.org/10.1016/S0167-8655(97)00083-4).
- . 2006. « An Overview of Image and Video Segmentation in the Last 40 Years ». In *Advances in Image and Video Segmentation*, 1-16. Idea Group Inc (IGI). <http://www.igi-global.com/chapter/overview-image-video-segmentation-last/4834>.
- Zhou, S., et C. B. Jones. 2005. « Shape-Aware Line Generalisation With Weighted Effective Area ». In *Developments in Spatial Data Handling*, 369-80. Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/3-540-26772-7_28.

Résumé : Depuis une quinzaine d'années, l'émergence des données de télédétection à Très Haute Résolution Spatiale (THRS) et la démocratisation des Systèmes d'Information Géographique (SIG) aident à répondre aux nouveaux besoins croissants d'informations spatialisées. Le développement de nouvelles méthodes de cartographie offre une opportunité pour comprendre et anticiper les mutations des surfaces terrestres aux grandes échelles, jusqu'ici mal connues. En France, l'emploi de bases de données spatialisées sur l'occupation du sol à grande échelle (BD Ocsol GE) est devenu incontournable dans les opérations courantes de planification et de suivi des territoires. Pourtant, l'acquisition de ce type de bases de données spatialisées est encore un besoin difficile à satisfaire car les demandes portent sur des productions cartographiques sur-mesure, adaptées aux problématiques locales des territoires. Face à cette demande croissante, les prestataires réguliers de ce type de données cherchent à optimiser les procédés de fabrication avec des techniques récentes de traitements d'image. Cependant, la Photo-Interprétation Assistée par Ordinateur (PIAO) reste la méthode privilégiée des prestataires. En raison de sa grande souplesse, elle répond toujours au besoin de cartographie aux grandes échelles, malgré son coût important. La substitution de la PIAO par des méthodes de production entièrement automatisées est rarement envisagée. Toutefois, les développements récents en matière de segmentation d'images peuvent contribuer à l'optimisation de la pratique de la photo-interprétation. Cette thèse présente ainsi une série d'outils (ou modules) qui participent à l'élaboration d'une assistance à la digitalisation pour l'exercice de photo-interprétation d'une BD Ocsol GE. L'assistance se traduit par la réalisation d'un prédécoupage du paysage à partir d'une segmentation menée sur une image THRS. L'originalité des outils présentés est leur intégration dans un contexte de production fortement contraint. La construction des modules est conduite à travers trois prestations cartographiques à grande échelle commanditées par des entités publiques. L'apport de ces outils d'automatisation est analysé à travers une analyse comparative entre deux procédures de cartographie : l'une basée sur une démarche de photo-interprétation entièrement manuelle et la seconde basée sur une photo-interprétation assistée en amont par une segmentation numérique. Les gains de productivité apportés par la segmentation sont, évalués à l'aide d'indices quantitatifs et qualitatifs, sur des configurations paysagères différentes. À des degrés divers, il apparaît que quelque soit le type de paysage cartographié, les gains liés à la cartographie assistée sont substantiels. Ces gains sont discutés, à la fois, d'un point de vue technique et d'un point de vue thématique dans une perspective commerciale.

Mots Clés : cartographie, occupation du sol à grande échelle, photo-interprétation, segmentation d'image, images à très haute résolution spatiale, productivité.

Abstract: Abstract: Over the last fifteen years, the emergence of remote sensing data at Very High Spatial Resolution (VHRS) and the democratization of Geographic Information Systems (GIS) have helped to meet the new and growing needs for spatial information. The development of new mapping methods offers an opportunity to understand and anticipate land cover change at large scales, still poorly known. In France, spatial databases about land cover and land use at large scale have become an essential part of current planning and monitoring of territories. However, the acquisition of this type of database is still a difficult need to satisfy because the demands concern tailor-made cartographic productions, adapted to the local problems of the territories. Faced with this growing demand, regular service providers of this type of data seek to optimize manufacturing processes with recent image-processing techniques. However, photo interpretation remains the favoured method of providers. Due to its great flexibility, it still meets the need for mapping at large scale, despite its high cost. Using fully automated production methods to substitute for photo interpretation is rarely considered. Nevertheless, recent developments in image segmentation can contribute to the optimization of photo-interpretation practice. This thesis presents a series of tools that participate in the development of digitalization assistance for the photo-interpretation exercise. The assistance results in the realization of a pre-cutting of the landscape from a segmentation carried out on a VHRS image. Tools development is carried out through three large-scale cartographic services, each with different production instructions, and commissioned by public entities. The contribution of these automation tools is analysed through a comparative analysis between two mapping procedures: manual photo interpretation versus digitally assisted segmentation. The productivity gains brought by segmentation are evaluated using quantitative and qualitative indices on different landscape configurations. To varying degrees, it appears that whatever type of landscape is mapped, the gains associated with assisted mapping are substantial. These gains are discussed both technically and thematically from a commercial perspective.

Keywords: land cover/use mapping, large scale, photo-interpretation, image segmentation, very high spatial resolution images productivity.