



HAL
open science

Extraction semi-automatique de thèmes d'occupation du sol en milieu montagneux à partir d'ortho-images et de connaissances complémentaires, en vue de la production de la carte de base

Arnaud Le Bris

► To cite this version:

Arnaud Le Bris. Extraction semi-automatique de thèmes d'occupation du sol en milieu montagneux à partir d'ortho-images et de connaissances complémentaires, en vue de la production de la carte de base. [Rapport Technique] IGN - Laboratoire MATIS. 2010, pp.133. hal-02370247

HAL Id: hal-02370247

<https://hal.science/hal-02370247>

Submitted on 1 Jun 2023

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.



*Extraction semi-automatique de thèmes d'occupation
du sol en milieu montagneux à partir d'ortho-images
et de connaissances complémentaires, en vue de la
production de la carte de base*

Arnaud LE BRIS

IGN - Laboratoire MATIS

— 2006-2010 —

Extraction semi-automatique de thèmes d'occupation du sol en milieu montagneux à partir d'ortho-images et de connaissances complémentaires, en vue de la production de la carte de base

2006-2010 — 133 pages

Avant-propos :

Ce document a été rédigé en plusieurs temps, au gré des différents tests menés.

Ainsi, les premières expériences d'extraction de l'occupation du sol sur les zones tests de Saint-Christophe et Ossau datent de 2005-2006. Ces jeux tests furent complétés par un troisième (la zone de Modane) fin 2007. Les expériences sur la représentation cartographique débutèrent également en 2007.

Historique des modifications :

- **octobre 2006** : version originale, ne comportant que la partie “extraction de l'occupation du sol” (et uniquement sur les deux premiers jeux tests), ainsi que de la partie “industrialisation”.
- **2008** : ajout des expériences sur la zone de Modane et de la partie sur les traitements en vue de la représentation cartographiques.
- Corrections diverses. Ajout des retours de l'évaluation des résultats par les utilisateurs de la carte.
- **2010** : ajout des variantes de la méthode d'extraction de l'occupation du sol (approche hiérarchique et utilisation de données LANDSAT).

Rédigé par :

Arnaud LE BRIS (IGN - Laboratoire MATIS) — arnaud.le-bris@ign.fr



Extraction semi-automatique de thèmes d'occupation du sol en milieu montagneux à partir d'ortho-images et de connaissances complémentaires, en vue de la production de la carte de base

Arnaud LE BRIS

arnaud.le-bris@ign.fr

IGN - Laboratoire MATIS

2006-2010— 133 pages

Résumé : Les thèmes “rochers”, “éboulis” et “glacier” sont absents des bases de données numériques de l'IGN alors qu'ils sont nécessaires à la rédaction de la carte de base dans les zones de montagne. Il est donc nécessaire d'obtenir cette information à partir d'une autre source.

La méthode mise en œuvre dans cette étude consiste à extraire ces thèmes à partir d'ortho-images par classification supervisée. Or, dans les zones de montagne, l'extraction de l'occupation des sols par classification semi-automatique d'ortho-images est gênée par différents facteurs (importance des ombres, thèmes différents de radiométrie semblable, variations de la radiométrie au sein d'une même classe...).

Une amélioration est toutefois possible par l'apport d'informations complémentaires (ainsi que l'avait montré une étude précédente), telles que la connaissance des liens entre le relief et l'occupation du sol ou une autre base de données, plus ancienne ou plus généralisée. Ces connaissances sont interprétées en terme de probabilités *a priori* qui sont ensuite introduites dans un processus de classification de type *MAP (Maximum A Posteriori)*. Par ailleurs, l'utilisation de canaux dérivés de l'image initiale peut également permettre d'améliorer les résultats de la classification.

Une fois détectés, il s'agit de représenter sur la carte les trois thèmes qui nous intéressent. Dans le cas particulier des rochers et des éboulis, cette représentation doit laisser transparaître le relief sous-jacent. Ceci implique par exemple de représenter certaines lignes caractéristiques (lignes de pente, crêtes, ...) et d'avoir une représentation pouvant varier en fonction de la pente ou de l'orientation.

Mots-clés : Segmentation hiérarchique - Classification - Extraction de l'occupation du sol - Apport d'informations complémentaires dans le processus de classification - Nouvelle Carte de Base - Statistique - Radiométrie - Représentation Cartographique - Relief - Fusion de données



Semi-automatic extraction of land cover themes in mountainous areas out of aerial ortho-images and additional knowledge, in order to draw the national base map

Arnaud LE BRIS

arnaud.le-bris@ign.fr

IGN - Laboratoire MATIS

2006-2010— 133 pages

Abstract: Land cover themes “rocks”, “scree” and “glaciers” are missing in the digital databases of IGN, while they are necessary to be able to draw the national base map in mountainous areas. As a consequence, this necessary information have to be obtained otherwise.

The proposed approach consists in extracting them out of aerial ortho-images thanks to supervised classification.

However, in mountainous areas, the land cover extraction owing semi-automatic classification of ortho-images is limited by several factors (important shadows, radiometric similarities between different themes, variations of the radiometry among regions of the same class...).

Nevertheless, improvements can be obtained by introducing external information such as knowledge concerning the links between relief and land cover, or another (older or more generalized) database. These knowledges are interpreted in terms of *a priori* probabilities which are introduced in a *MAP* classification process.

Besides, the results of the classification can be improved by the use of channels calculated from the initial image.

Once they have been detected, the new issue is to represent these three land cover themes on the map. In the case of scree and rocks, this representation has also to show the underlying relief. Therefore, some characteristic lines (slope lines, ridges, ...) can be drawn on the map. Besides, the representation for one theme can vary according to slope or orientation.

Key-words: Multi-scale image segmentation - Classification - Land cover Extraction - Introduction of information in the classification process - New Base Map - Statistics - Radiometry - Map representation - Relief - Data fusion

Table des matières

I	Introduction - contexte	7
1	Introduction	8
1.1	Contexte de l'étude	8
1.2	Travail effectué	14
II	Extraction de l'occupation du sol	17
2	Extraction de l'occupation du sol par classification d'ortho-images aériennes	18
2.1	Approche proposée	18
2.2	Classes recherchées	18
3	difficultés rencontrées et solutions proposées	19
3.1	Problèmes rencontrés	19
3.1.1	Les zones d'ombre	20
3.1.2	Classes distinctes de radiométrie proche	20
3.1.3	Variations de la radiométrie au sein d'une même classe	21
3.1.4	Autres difficultés	23
3.2	Solutions proposées	26
3.2.1	Classes dédoublées	26
3.2.2	Introduction d'informations complémentaires	26
3.2.3	Récapitulatif	27
4	Présentation du processus d'extraction de l'occupation du sol	28
4.1	Segmentation	28
4.2	Classification	29
4.2.1	Présentation des algorithmes de classification	29
4.2.2	Prise en compte d'informations complémentaires	31
4.3	Informations <i>a priori</i> issues du relief	32
4.4	Informations issues d'une autre base de données : CORINE Land Cover 2000	34
4.4.1	Présentation de CORINE Land Cover 2000	34
4.4.2	Utilisation de CORINE Land Cover 2000 dans le processus	36
4.4.3	Cas d'une base de données plus ancienne	37
4.5	Utilisation d'images LANDSAT TM	37
4.5.1	LANDSAT TM et la détection des glaciers	37
4.5.2	Utilisation dans le processus	38
4.6	Connaissances <i>a priori</i> sur les ombres	39
4.7	Bilan	40
4.8	Variante	41
5	Zone d'étude "Saint-Christophe-en-Oisans"	42
5.1	Présentation de la zone et des principales difficultés rencontrées	42
5.2	Classes dédoublées	43
5.3	Introduction de connaissances <i>a priori</i>	44
5.3.1	Connaissances issues du relief	44
5.3.2	Connaissances issues de CORINE Land Cover 2000	45
5.3.3	Connaissances sur les ombres	46
5.4	Association de canaux	47
5.4.1	Quelques tests	47
5.4.2	Conclusion	47

6	Zone d'étude "Ossau"	49
6.1	Présentation de la zone et des principales difficultés rencontrées	49
6.2	Tests et résultats	52
6.2.1	Classes dédoublées	52
6.2.2	Combinaisons de canaux	54
6.2.3	Introduction de connaissances complémentaires et influence de la pondération	54
6.2.4	Introduction de probabilités sur les zones d'ombre	62
6.2.5	Utilisation d'un MNT "nouveau RGE alti"	63
7	Zone d'étude "Modane"	65
7.1	Présentation de la zone et des principales difficultés rencontrées	65
7.2	Tests et résultats	68
7.2.1	Processus "standard"	68
7.2.2	Résultats obtenus avec des variantes de la méthode	74
III	Pré-traitements cartographiques	89
8	Introduction	90
9	Filtrage des petites régions sans signification cartographique	90
10	Corrections à l'aide de masques issus du RGE	91
10.1	Bâtiments, routes et lits de rivière	91
10.2	Forêt, landes herbacées et lacs	91
10.3	Seuls trois thèmes conservés	92
11	Représentation des zones d'éboulis	93
11.1	Classification en fonction de la pente	93
11.2	Représentation des éboulis dans les zones de faible pente	93
11.3	Représentation des éboulis dans les zones de forte pente	93
12	Représentation des zones de rochers	95
13	Classification en fonction de la pente	95
13.1	Représentation des rochers dans les zones de faible pente	95
13.2	Représentation des rochers dans les zones de forte pente	95
13.2.1	Extraction des bordures inférieures des zones de rochers	96
13.2.2	Extraction des bordures supérieures des zones de rochers	97
13.3	Classification en fonction de l'orientation pour les zones de rochers	97
14	Extraction de lignes de pente	98
15	Extraction de lignes de crête	100
15.1	Méthodes d'extraction de lignes de crête	100
15.2	Méthode mise en œuvre	101
15.3	Tests et résultats	102
16	Exemples de résultats	106
16.1	Affichage des résultats obtenus et des éléments extraits	106
16.2	Représentation cartographique	112
17	Evaluation - conclusion	116
IV	Mise en œuvre opérationnelle - évaluation - bilan	117
18	Processus mis en œuvre	118

19 Mise en œuvre opérationnelle et scénarii d'industrialisation envisagés	118
19.1 Corrections interactives	118
19.2 Sous-échantillonnage	118
19.3 Temps de calcul et parallélisation	118
19.4 Industrialisation - choix d'une interface	119
20 Evaluation - bilan	121
20.1 Evaluation par les utilisateurs de la carte	121
20.2 Evaluation IGN/SDC	121
20.3 Perspectives	122
V Annexes	123
A Calcul des canaux utilisés lors de la classification	124
B Glossaire	125
C Présentation de l'utilisation de <i>PYRAM</i>	126
D Présentation de l'utilisation d'<i>AVET</i>	127
D.1 Présentation générale	127
D.2 Paramétrage	128
D.3 Utilisation	130
VI Bibliographie	131
Publications parues dans le cadre de cette étude	131
Références	131

Première partie

Introduction - contexte

1 Introduction

1.1 Contexte de l'étude

L'IGN a décidé de mettre en place un nouveau processus de production de ses cartes au 1 :25 000 et au 1 :50 000. Ce nouveau processus qui devra être le plus automatique possible consistera à dériver les cartes à partir des bases de données topographiques numériques désormais disponibles (BD Topo...). L'objectif du "Projet Nouvelle Carte de Base" est donc de mettre en place cette nouvelle chaîne de production de la carte de base, ainsi que de fournir un processus de récupération des informations qui lui sont nécessaires.

En effet, toutes les informations indispensables pour la réalisation de la carte de base ne figurent pas dans les bases de données actuelles de l'IGN. Il s'agit notamment du cas de certaines informations sur l'occupation du sol.

Ainsi, dans le cas des zones montagneuses, les zones de glaciers, de rochers et d'éboulis (pierriers) sont absentes des bases de données disponibles sur l'ensemble du territoire et notamment de la BD Topo "Pays". Or ces informations sont nécessaires pour réaliser les cartes des zones de montagne. Il est donc nécessaire de les récupérer à partir d'autres sources d'information.

Deux approches peuvent être envisagées pour la récupération de ces informations :

- à partir des cartes actuelles, par détramage
- à partir d'ortho-images (ou d'images aériennes), par classification semi-automatique

La saisie des zones de rochers, d'éboulis et de glaciers figurant sur les cartes actuelles est souvent assez ancienne, ce qui pose un problème d'actualité des données. En outre, sur certaines des cartes actuelles, la cartographie des rochers et des éboulis semble avoir surtout un rôle d'habillage du fond de carte : il semble qu'il n'y ait pas eu de règle générale quant à leur saisie (importance des zones, distinction éboulis/rochers...).

Leur représentation est par ailleurs très variable d'une feuille à une autre ainsi que le montre les exemples suivants (figures 1, 2, 3, 4, 5 et 6).

Il s'avère donc plus intéressant de récupérer les informations manquantes par classification automatique ou semi-automatique d'ortho-images (ou de clichés aériens). Une telle méthode pourrait par ailleurs permettre par la suite la mise à jour de ces données.

Toutefois, en montagne, la classification est gênée par plusieurs éléments (importance des zones d'ombre, thèmes différents de radiométrie semblable...) mais peut être améliorée par l'apport de connaissances complémentaires ainsi que l'avait montré une étude [LMTB02] précédente.

À l'issue de cette extraction, on disposera donc d'informations sur l'occupation du sol et en particulier sur les 3 thèmes recherchés. Néanmoins, ces données simples ne sont pas suffisantes dans les zones de rochers et d'éboulis pour dessiner directement la carte : il s'agit en effet d'obtenir une représentation de ces thèmes la plus expressive possible, c'est-à-dire une représentation qui reflète également le relief sous-jacent. En conséquence, afin de tracer la carte, certaines informations complémentaires devront être extraites lors de post-traitements, notamment en croisant les résultats de la classification avec un modèle numérique de terrain.

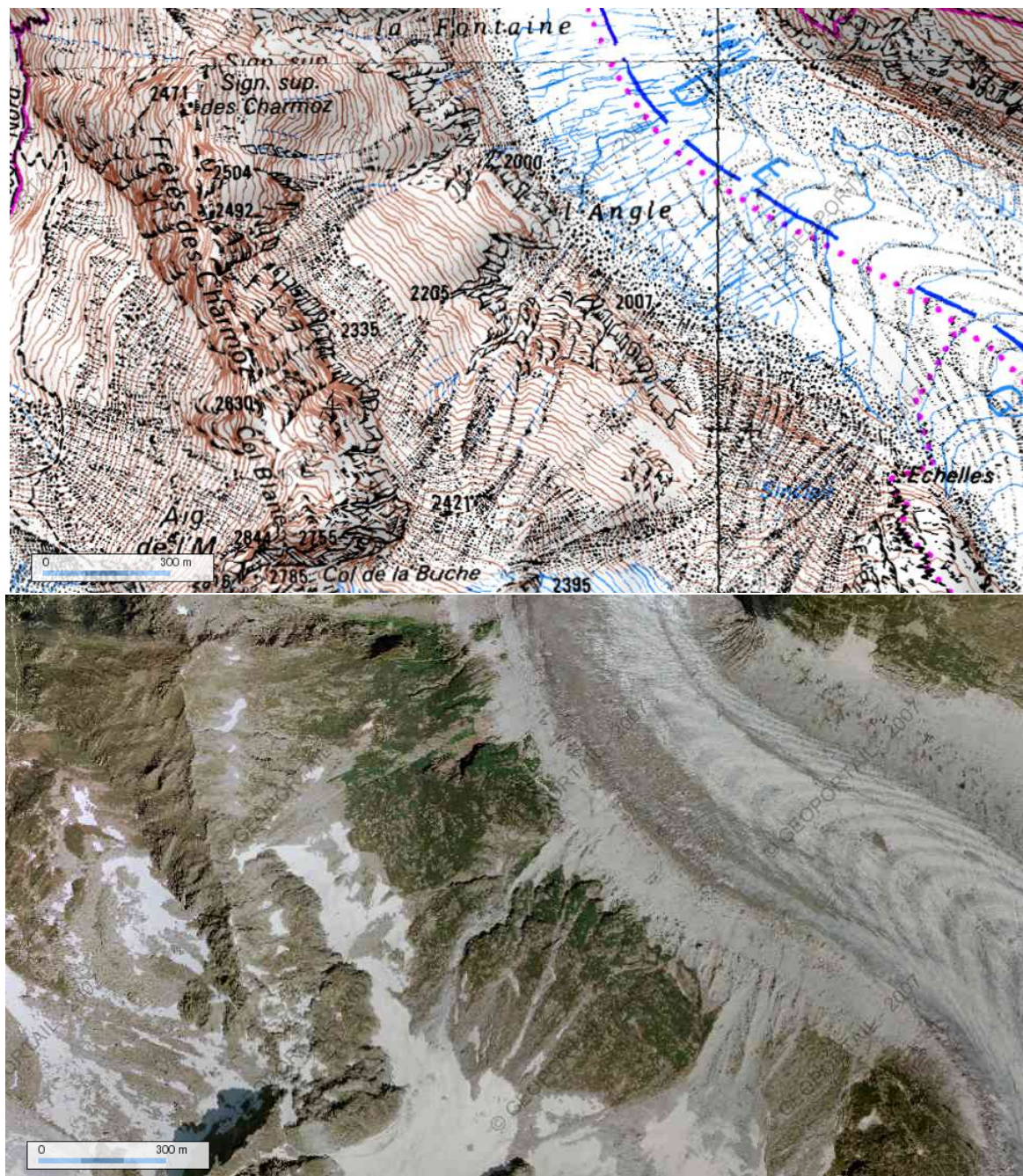


FIGURE 1 – Exemple de cartographie d'une zone de montagne dans la carte de base actuelle

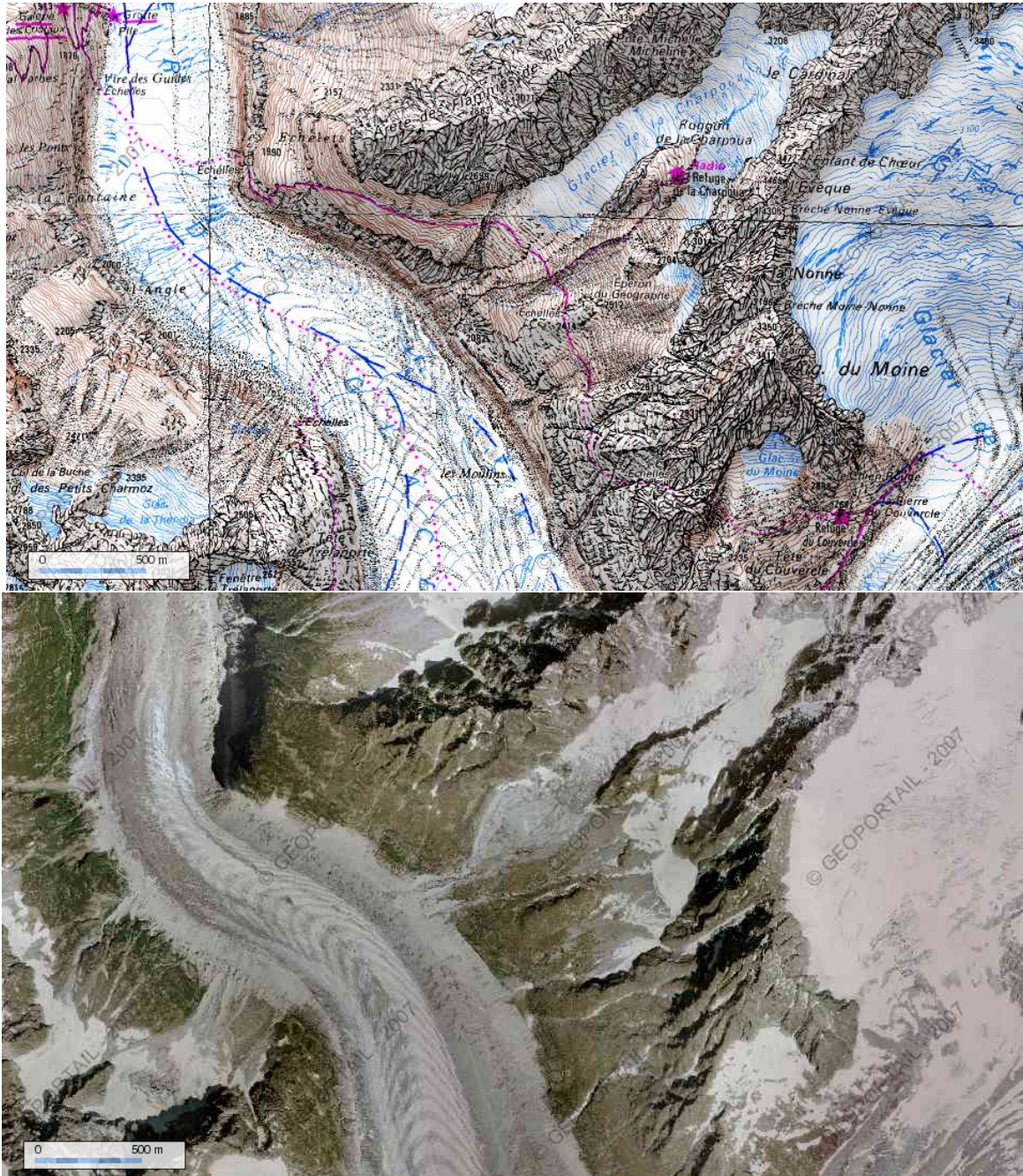


FIGURE 2 – Exemple de cartographie d’une zone de montagne dans la carte de base actuelle

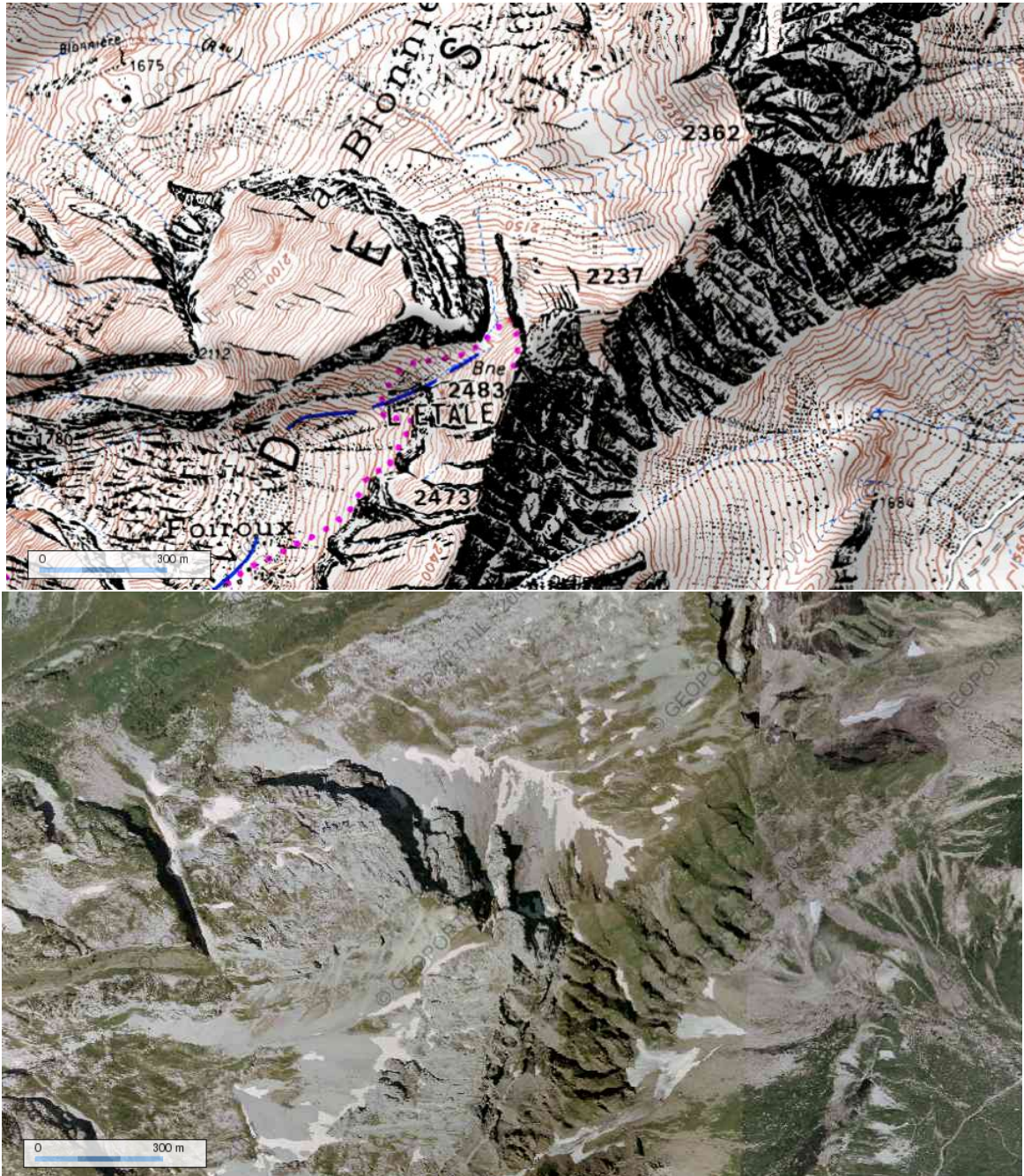


FIGURE 4 – Exemple de cartographie d’une zone de montagne dans la carte de base actuelle

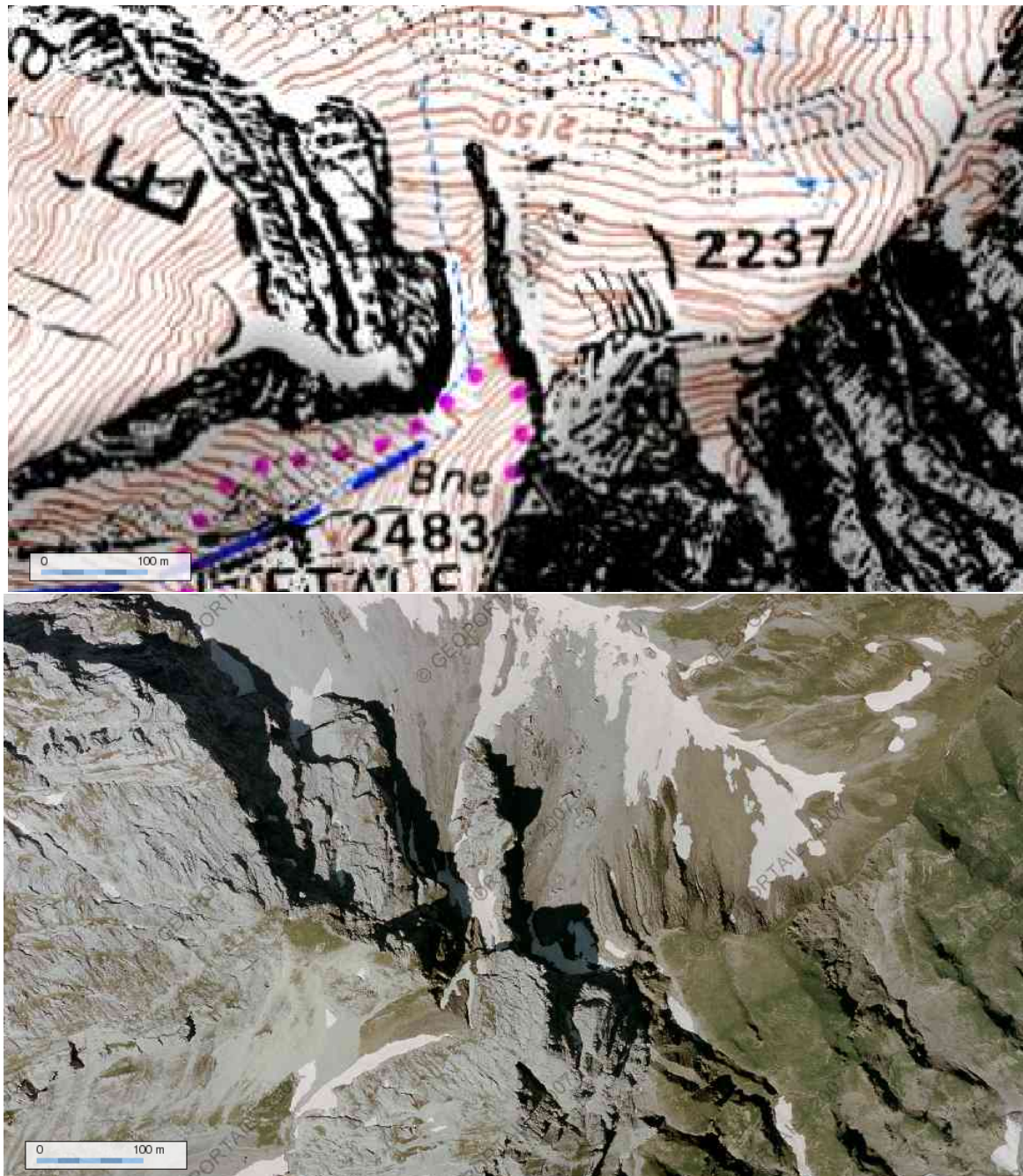


FIGURE 5 – Exemple de cartographie d'une zone de montagne dans la carte de base actuelle

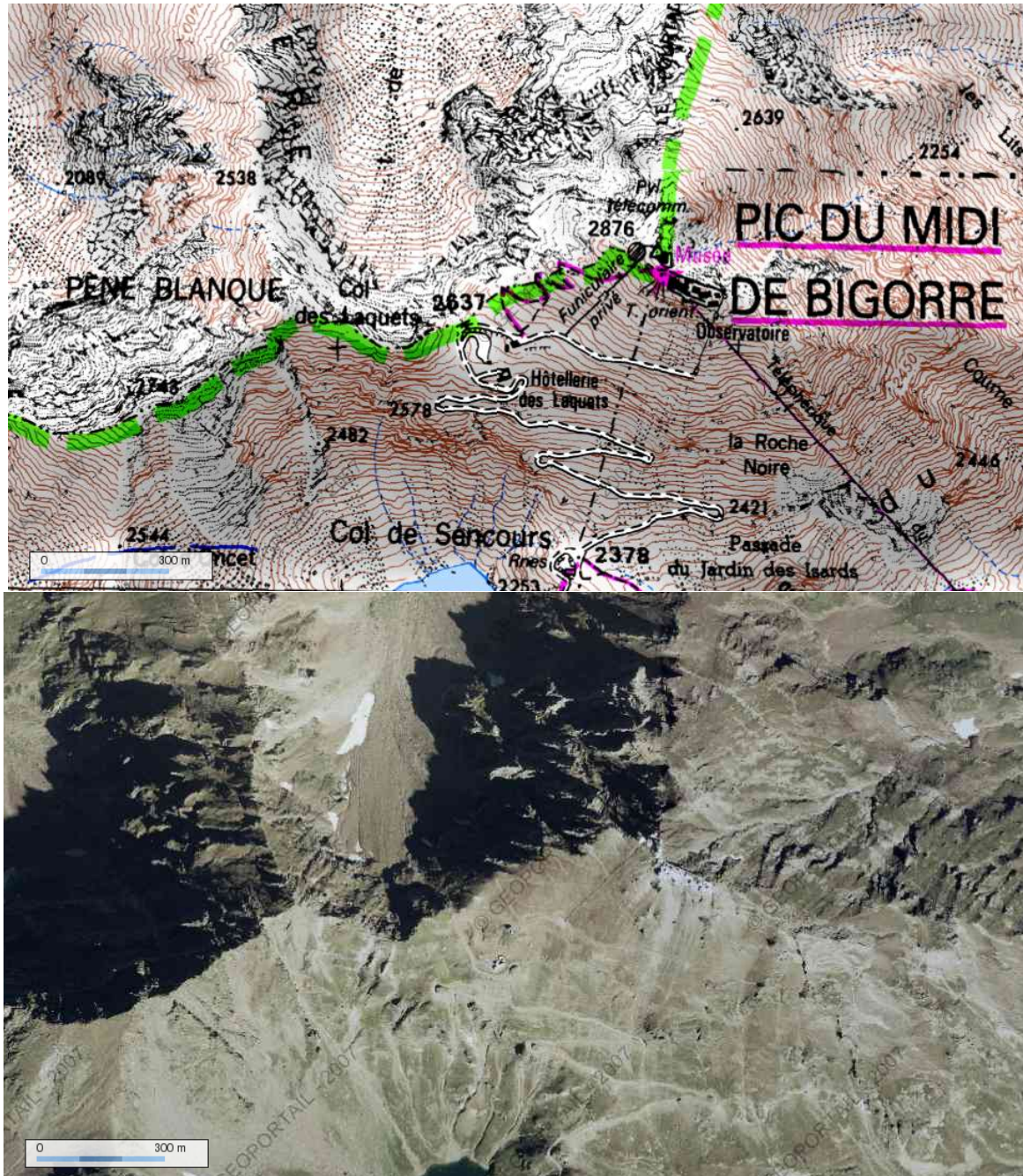


FIGURE 6 – Exemple de cartographie d'une zone de montagne dans la carte de base actuelle

1.2 Travail effectué

Le but de cette étude était donc de proposer et de tester une méthode d'extraction semi-automatique de l'occupation du sol en milieu montagneux.

Il s'agissait, dans un premier temps, d'adapter les outils de classification développés par R. TRIAS-SANZ [TS06] afin de prendre en compte des informations complémentaires (sous la forme de probabilités *a priori*) sur l'appartenance aux différentes classes d'occupation du sol, puis, dans un deuxième temps, de tester l'influence de différents paramètres sur la classification comme, par exemple, la combinaison de canaux utilisés pour la classification, la manière d'introduire les probabilités *a priori*, le choix des zones d'apprentissage, l'introduction

de connaissances *a priori* sur les zones d'ombre...

Il s'agissait ensuite, en liaison avec le Service de la Cartographie, de définir et d'appliquer un certain nombre de traitements aux résultats de la classification obtenus, notamment afin d'extraire, en les croisant avec les informations issues d'un modèle numérique de terrain, les informations permettant d'en dériver la carte. On pourra donc parler de pré-traitements cartographiques.

L'ensemble de la chaîne mise en œuvre peut donc se résumer par le schéma suivant (fig. 7) :

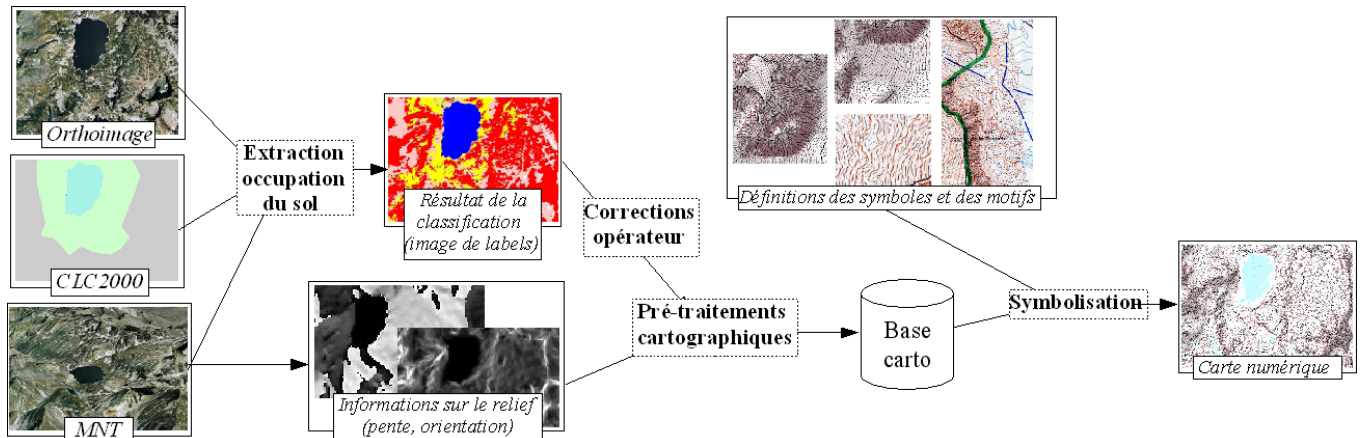


FIGURE 7 – Vue globale de la chaîne de traitement mise en œuvre

Les tests ont été effectués sur 3 zones d'études, avec à chaque fois des données différentes :

1. **Saint-Christophe-en-Oisans** (Isère, Alpes) (voir partie 5)

C'est la zone test de l'étude menée en 2002 [LMTB02]. Les mêmes données ont donc été utilisées afin de comparer les nouveaux résultats obtenus avec ceux de cette précédente étude. Les mêmes données ont été utilisées, à savoir des ortho-images argentiques (rouge-vert-bleu) (présentant un certain nombre de problèmes de radiométrie) et un MNT BD Alti. Tous les thèmes recherchés sont présents sur cette zone.

2. **Ossau** (Pyrénées-Atlantiques, Pyrénées) (voir partie 6)

Cette zone présente plusieurs intérêts. Des ortho-images rouge-vert-bleu-proche infrarouge acquises par la caméra numérique IGN y sont disponibles, permettant ainsi d'évaluer l'apport de ce type d'images (et notamment du canal proche infrarouge). Un MNT produit par les outils du projet "Nouveau RGE Alti" y est également disponible (ainsi que le MNT BD Alti). Il est intéressant de travailler sur cette zone pyrénéenne, c'est-à-dire sur un type de montagne différent de celui des deux autres zones test. Tous les thèmes y sont présents à l'exception des glaciers.

3. **Modane** (Savoie, Alpes) (voir partie 7)

Cette zone présente également plusieurs intérêts. Des ortho-images rouge-vert-bleu-proche infrarouge acquises par la caméra numérique IGN y sont aussi disponibles. Un MNT BD Topo y est disponible. Par ailleurs, des données BD Topo complète (i.e. saisies antérieurement à l'application des spécifications de la BD Topo "Pays") y sont disponibles. Cette version de la BD Topo comporte les zones de rochers, d'éboulis et de glaciers acquises par des opérateurs au début des années 1990. Ces données pourront donc être utilisées (aux problèmes de mise à jour près...) pour évaluer les résultats de la classification.

Deuxième partie

Extraction de l'occupation du sol à partir d'ortho-images aériennes

2 Extraction de l'occupation du sol par classification d'ortho-images aériennes

2.1 Approche proposée

Le processus d'extraction proposé va donc consister à extraire l'occupation du sol en montagne par classification supervisée d'ortho-images aériennes pouvant également en compte des informations complémentaires fournies par d'autres sources (MNT, autres base de données, autres images...).

Ce processus d'extraction de l'occupation du sol se décompose en quelques grandes étapes :

1. **Apprentissage** : Un modèle statistique de la radiométrie des différentes classes est calculé à partir de données d'entraînement.
2. **Extraction de l'occupation du sol** :
 - (a) **Segmentation** : On commence par segmenter l'image en régions d'occupation du sol homogène.
 - (b) **Classification** : On classe ensuite les régions de la segmentation d'après leur radiométrie suivant le modèle que l'on a précédemment calculé lors de l'apprentissage et d'après les autres informations disponibles.

Remarque : Le fait de segmenter l'image, puis de classer les régions de cette segmentation permet d'obtenir ensuite directement une classification moins "bruitée" qu'une classification par pixel, mais aussi dans une certaine mesure de contrôler le degré de généralisation du résultat.







2.2 Classes recherchées

En milieu montagneux, les thèmes d'occupation du sol nécessaires pour dessiner la carte mais absents des bases de données numériques actuelles de l'IGN sont les glaciers, ainsi que les rochers et les zones d'éboulis (pierriers). Ce sont ces trois thèmes qui doivent donc ici être récupérés à partir d'(ortho-)images aériennes, les autres thèmes devant apparaître sur la carte seront récupérés à partir d'autres sources (BD Topo, ...).

Il est toutefois nécessaire de prendre en compte lors de la classification les autres thèmes d'occupation du sol présents sur la zone à traiter (afin d'en obtenir une classification complète). On s'intéresse donc aux six classes suivantes :

- surfaces d'eau (lacs, étangs, ...)
- forêts
- alpages / pelouses
- rochers
- éboulis / pierriers
- glaciers

Dans la suite, on adopte donc la légende suivante :

	Surfaces d'eau (lacs, étangs, ...)
	Forêts
	Alpages / pelouses
	Rochers
	Éboulis / pierriers
	Glaciers

On pourrait par ailleurs ajouter une classe supplémentaire pour les zones bâties (tache urbaine et réseau routier) qui seraient obtenues *a priori* sous la forme d'un masque calculé à partir de la BDTopo.

Remarque : À l'issue de la classification, il est prévu de conserver uniquement les zones appartenant aux classes "glaciers", "éboulis" et "rochers".

3 Difficultés rencontrées pour la classification semi-automatique en milieu montagneux et solutions proposées

3.1 Problèmes rencontrés

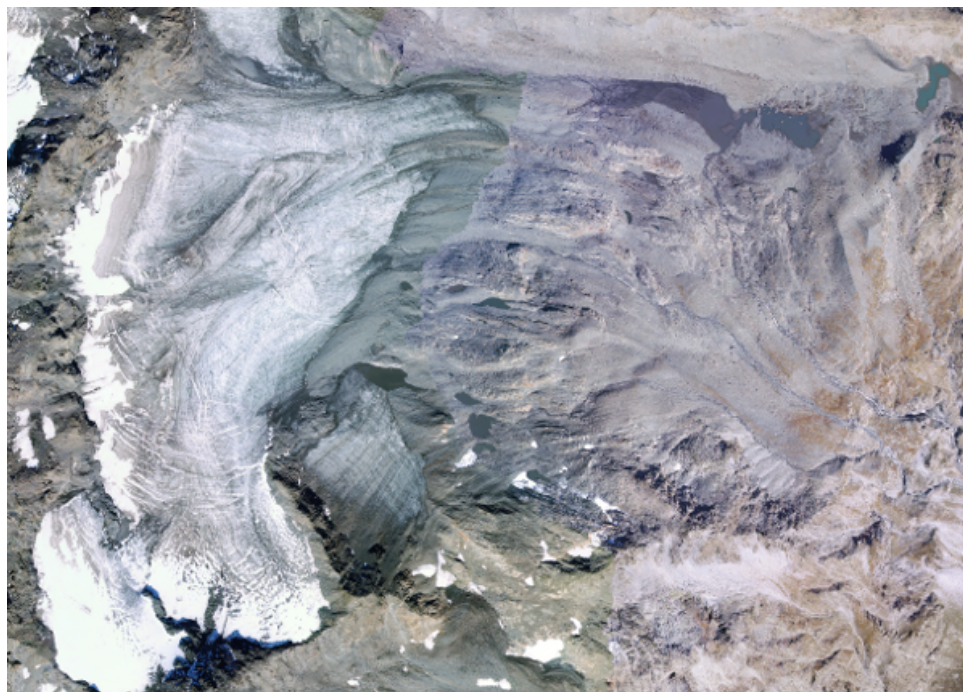


FIGURE 8 – Extrait de la BD Ortho illustrant bien les difficultés rencontrées : classes distinctes de radiométries assez proches et variations de la radiométrie au sein d'une même classe. Sur cet extrait sont présents rochers, éboulis, glaciers et pelouses...

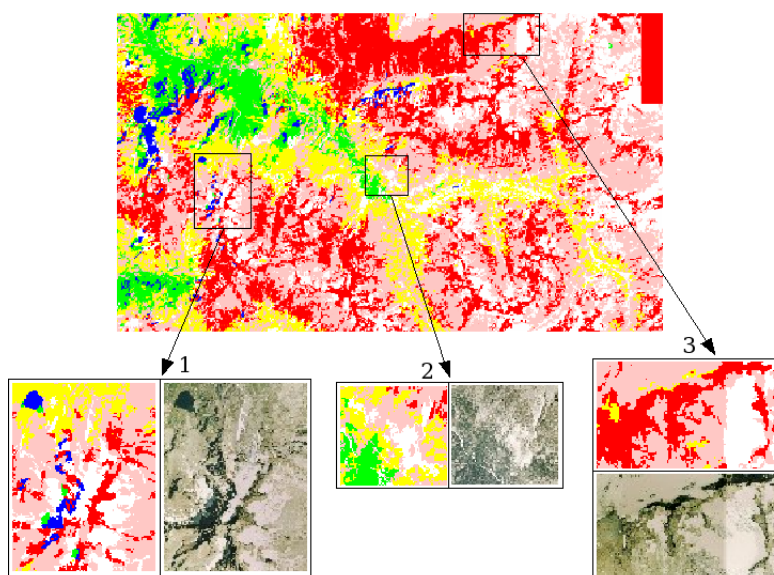


FIGURE 9 – Classification obtenue pour des classes non dédoublées sans probabilités *a priori* par la méthode “ML” (i.e. information exclusivement radiométrique), avec les canaux *logrs/intensité/teinte*

Les trois zooms précédents (fig. 9) illustrent les principales difficultés rencontrées au cours de la classification et également illustrées par la figure 8 :

1. Les zones d’ombres sont importantes en montagne. Si l’on ne prend pas de précautions, la classification y sera généralement mauvaise. (Les zones de “rochers à l’ombre” sont par exemple souvent classées parmi les “surfaces d’eau à la lumière”).
2. Certaines classes distinctes ont des radiométries très proches : elles se ressemblent. Ceci est notamment vrai pour les éboulis et les glaciers : ainsi que le montre le zoom no2 de l’exemple précédent, les zones d’éboulis les plus claires et de torrents asséchés classées parmi les glaciers.
3. La radiométrie peut varier de manière importante au sein d’une même classe, ces variations pouvant être “artificielles”, “naturelles” ou liées à l’éclairement et au relief.
En s’ajoutant au phénomène précédent, ces variations radiométriques au sein de l’image augmentent encore les confusions.

3.1.1 Les zones d’ombre

Du fait du relief fortement accentué, les zones d’ombre sont importantes en milieu montagneux (voir figure 10). Le modèle radiométrique décrivant une classe à la lumière est différent de celui qui la décrit à l’ombre.

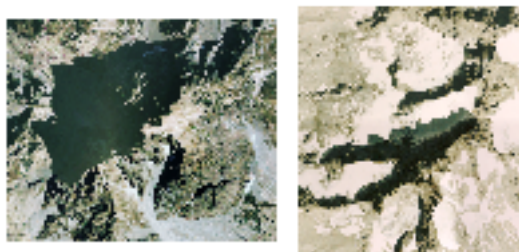


FIGURE 10 – Exemples de zones d’ombre importantes

Il faut donc tenir compte de ce fait lors de la classification :

- soit au préalable en détectant les zones à l’ombre et en appliquant des corrections radiométriques aux images dans ces zones : “on corrige les ombres”.
- soit en effectuant une classification avec des classes dédoublées : à chaque classe “*c*” sont alors associées les deux classes “*c à l’ombre*” et “*c à la lumière*”.

Une correction des ombres serait confrontée à plusieurs limites :

- Le modèle numérique de terrain est imprécis. (Notamment dans le cas d’une utilisation de la BD Alti standard dont la précision en montagne est en moyenne de 10-20 m sur les altitudes.)
- L’ortho-image utilisée est une mosaïque d’images aériennes ortho-rectifiées qui ont été fusionnées et que l’on ne peut plus isoler : il est donc impossible de connaître avec précision l’heure de prise de vue de chaque pixel de l’ortho-image. Une correction (et même une simple détection) des ombres est donc limitée par cette imprécision sur les heures de prise de vue.
- Ces images ont également auparavant subi différents traitements géométriques et radiométriques (parfois “manuels”) : dodging, égalisation statistique... Ces traitements radiométriques empiriques ne sont pas forcément connus avec exactitude, ce qui pose problème pour une correction des ombres : on ne peut plus revenir à la radiométrie d’origine. Si l’on souhaitait effectuer une correction des ombres, il vaudrait mieux travailler directement sur les clichés aériens.

La solution retenue consiste donc à dédoubler les différentes classes. On aura donc deux modèles radiométriques distincts pour chaque thème d’occupation du sol.

On pourra toutefois exploiter la connaissance approchée des dates de prise de vue en calculant des probabilités de se trouver à l’ombre connaissant cette information ainsi que le MNT.

3.1.2 Classes distinctes de radiométrie proche

Certains types d’occupation du sol distincts ont naturellement des radiométries très proches. (C’est notamment le cas des lits de torrents asséchés et des glaciers.) Ce phénomène est encore amplifié par les variations

importantes de la radiométrie au sein d'une même classe. Ainsi, dans l'exemple suivant (fig. 11), la radiométrie du glacier de la seconde vignette est plus proche de celle des éboulis de la première vignette que de celle du glacier de la première vignette.

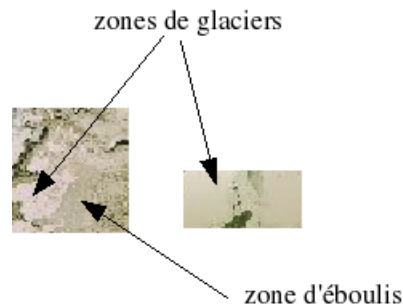


FIGURE 11 – Eboulis et glaciers peuvent se ressembler.

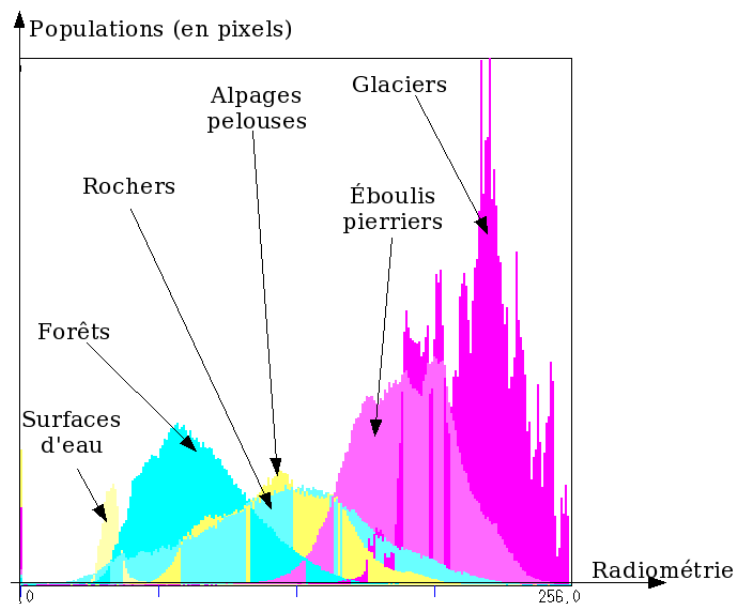


FIGURE 12 – Histogramme de la radiométrie de l'image pour le canal "intensité"

Sur l'histogramme de la figure 12 (qui représente le nombre de pixels par valeur possible des pixels de l'image (pour le canal "intensité"), pour les différentes classes "à la lumière"), on s'aperçoit que certaines classes ont des radiométries pouvant être très proches. Il s'agit notamment ici des glaciers et des éboulis, mais aussi des rochers et des pelouses.

Par ailleurs, la radiométrie de différentes classes (à l'exception des glaciers) dans les zones d'ombre est souvent assez semblable.

Ceci introduit une difficulté supplémentaire pour un processus de classification automatique.

L'introduction de connaissances complémentaires sur l'occupation du sol dans le processus de classification peut apporter une réponse à cette difficulté.

3.1.3 Variations de la radiométrie au sein d'une même classe

Ces variations vont être de plusieurs types.

Variations artificielles

Traitement

En 2006, les zones de montagnes ne sont pas encore toutes couvertes par des ortho-images acquises par caméra numérique mais encore partiellement par des ortho-images produites à partir d'images argentiques scannées.

Ces images ont subi différents traitements géométriques et radiométriques (parfois "manuels") : dodging, égalisation statistique ou physique... Ceci peut avoir pour conséquence des variations de la radiométrie au sein d'une même classe. Par conséquent, la radiométrie des différentes zones d'une classe d'occupation du sol varie selon les dalles au sein de la mosaïque d'ortho-image, alors que ce n'est pas le cas sur le terrain.

Dans le cas des dernières images testées (images caméras numériques ayant subi une égalisation physique), ces variations sont nettement moindres et posent moins de problèmes, mais elles sont tout de même ponctuellement présentes, comme l'illustre l'exemple de la figure 8 extrait d'un tel chantier.

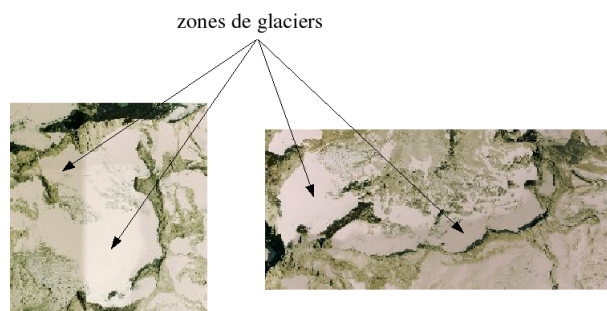


FIGURE 13 – Ces variations au sein de l'ortho-image sont artificielles.

Diachronisme

Par ailleurs, les différentes images constituant l'ortho-image couvrant la zone à classifier n'ont pas toutes été acquises à la même heure (ni même parfois le même jour, ni même lors de la même campagne de prise de vue, notamment si l'on se trouve à la frontière d'un département), d'où des variations de la radiométrie au sein de l'ortho-image.

Variations dues au relief

Ainsi qu'il a été dit plus haut, certaines variations de la radiométrie sont dues au fort relief des zones de montagnes. Toutes les surfaces ne sont pas exposées de la même manière à la lumière (Soleil, diffusion atmosphérique, diffusion du voisinage) et ne reçoivent donc pas le même éclairage, d'où des variations de la radiométrie. Ainsi, des éléments d'une même classe apparaîtront de manière plus ou moins sombre en fonction de l'endroit où ils se trouvent. (Le cas des zones d'ombre mentionné plus haut est un cas extrême de ce phénomène.)

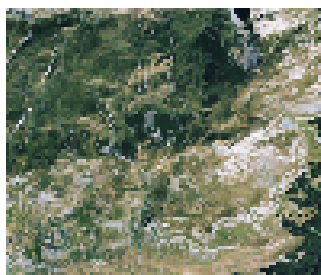


FIGURE 14 – Ces deux versants sont couverts par le même type de végétation, mais ne sont pas exposés au Soleil de la même manière

Variations naturelles de la radiométrie

D'autres facteurs peuvent provoquer des variations de la radiométrie au sein d'une même classe. En voici quelques exemples :

- changement de nature de la roche (et donc parfois de sa couleur)
- changement du type de végétation (ainsi, au sein de la classe des alpages, on pourra rencontrer des zones de pelouse mêlées à des zones de landes plus sombres)
- humidité du sol
- ...

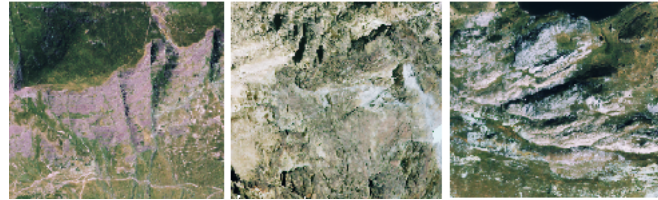


FIGURE 15 – Ces trois images présentent des zones de rochers de radiométrie différentes.

Toutes ces variations de la radiométrie s'ajoutent au phénomène précédent (i.e. au fait que certaines classes se ressemblent), pour constituer des limites à un processus de classification automatique. L'introduction de connaissances complémentaires sur l'occupation du sol dans le processus de classification peut constituer une réponse à ces difficultés.

3.1.4 Autres difficultés

Il existe d'autres difficultés spécifiques aux thèmes d'occupation du sol que l'on cherche à détecter. Par exemple, le fait qu'un thème d'occupation du sol puisse être masqué par un autre. Voici trois exemples de cas de figures pouvant se présenter.

Glaciers recouverts par des éboulis

Les glaciers sont en partie recouverts par des éboulis ainsi que l'illustre la figure 16. Il est donc logique que ces zones couvertes de pierres soient considérées comme des éboulis par un outil de classification utilisant uniquement l'image comme source d'information. Or, on souhaite que même recouverts, les glaciers soient détectés comme tels.

Cette fois encore, l'introduction de connaissances complémentaires sur l'occupation du sol (et notamment d'information issue du relief et si possible de données de télédétection "thermique" dans ce cas précis) dans le processus de classification peut constituer une réponse à ces difficultés.

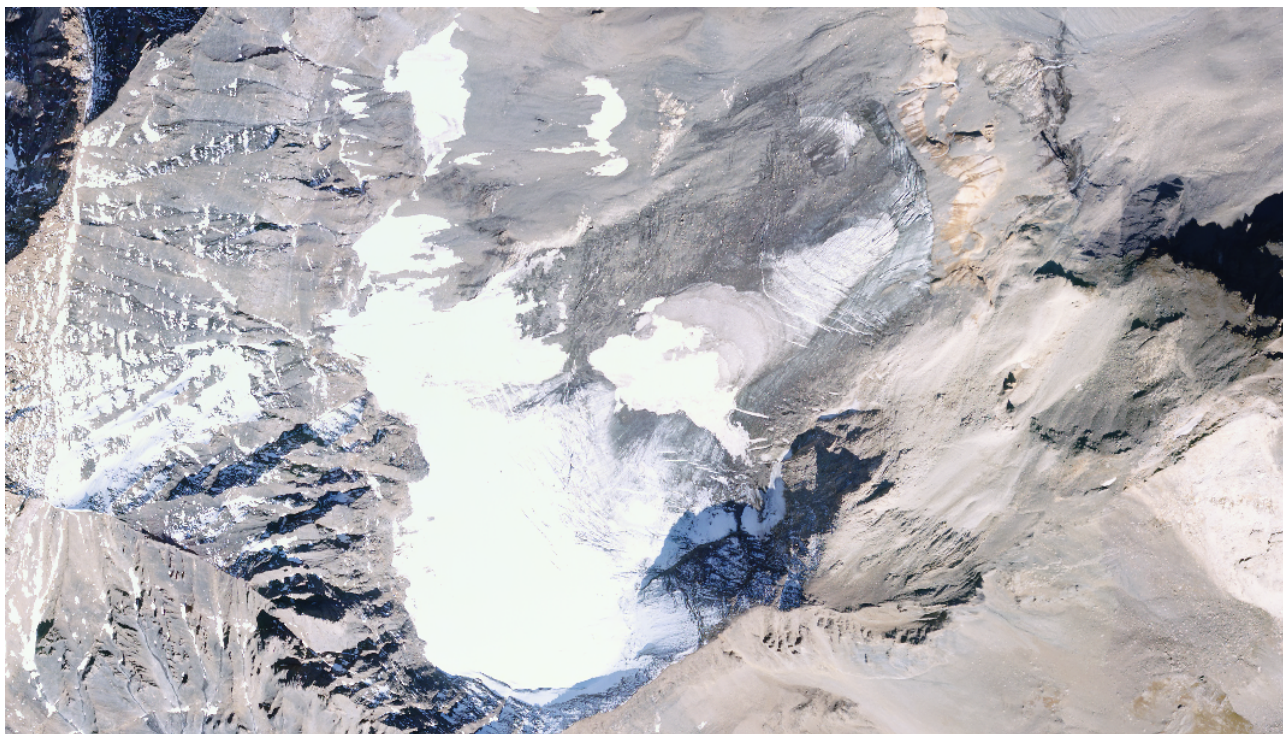


FIGURE 16 – Le glacier est ici partiellement recouvert d’éboulis. Par ailleurs, la radiométrie ne suffit pas à distinguer les zones de glacier des zones simplement enneigées au moment de la prise de vue.

Plaques de neiges résiduelles classées parmi les glaciers

Comme on peut le voir sur la figure 16, la radiométrie ne permet pas de distinguer les zones simplement encore enneigées lors de la prise de vue des véritables zones de glaciers.

On peut espérer que l’introduction de connaissances complémentaires pourrait limiter ces confusions (notamment des connaissances issues d’une base de données existantes).

Dans le cas contraire, on pourrait également envisager certains post-traitements (comme ne conserver parmi les éléments classés dans le thème “glaciers” que ceux dont la superficie serait supérieure à un certain seuil ainsi que prendre en compte leur orientation pour définir des alertes sur certaines zones situées sur certains versants).

Rochers masqués par de la végétation

Certaines zones de rochers sont en grande partie recouvertes par de la végétation (haute ou basse), excepté là où la pente est très forte comme l’explique la figure 17. Or, du fait de la perspective et de la manière dont les ortho-images sont calculées à partir des clichés aériens, ces falaises apparaissent parfois très peu sur l’ortho-image, sous la forme d’une ligne grise au milieu d’une zone de végétation (voire n’y apparaissent pas du tout). Ce phénomène est encore amplifié par le fait que la végétation (touffes d’herbe ou bien entendu arbres) peut dépasser au dessus de la falaise. Il n’est donc pas certain qu’elles soient bien segmentées dans une région distincte de la végétation environnante lors de l’étape de segmentation de l’image en régions homogène, or ceci serait un préalable à une bonne classification dans la classe des rochers.

On peut voir des exemples de ce genre de structures sur la figure 18, la falaise pourtant représentée de manière bien visible sur la carte ne se voit quasiment pas sur l’ortho-image. Or, la détection et la représentation de ces petites falaises revêtent malgré tout une certaine importance car elles peuvent d’une part représenter un danger pour le randonneur, et constituent d’autre part d’excellents amers visuels pour se repérer d’après la carte.

Cette fois encore, l’introduction de connaissances issues du relief (et plus particulièrement de la pente dans ce cas) pourrait permettre d’améliorer les choses.

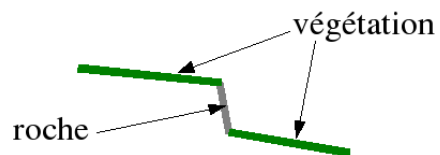


FIGURE 17 – Certaines zones de rochers sont en grande partie recouvertes par de la végétation haute ou basse, excepté là où la pente est très forte.

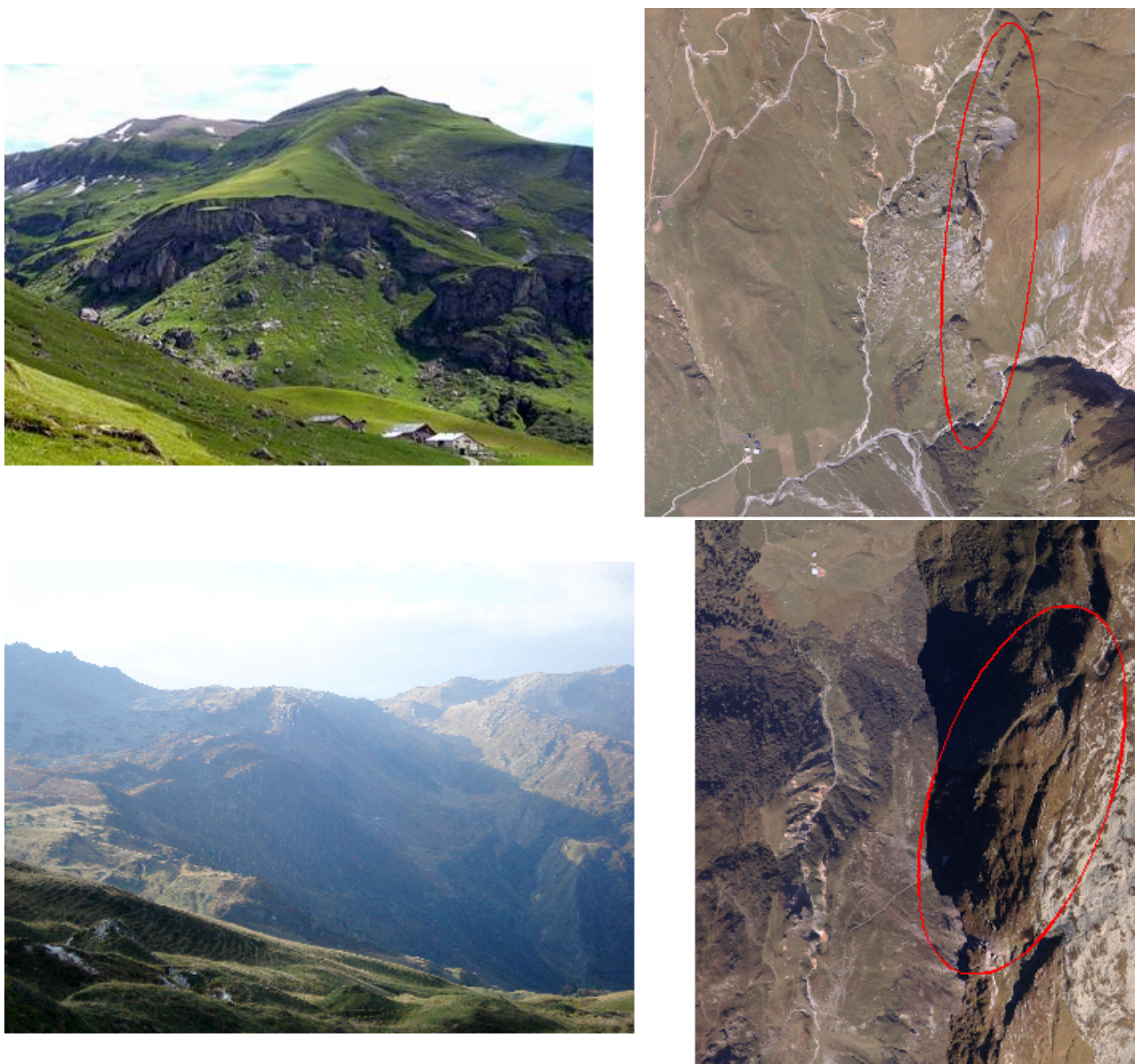


FIGURE 18 – Certaines zones de rochers, même importantes, sont en grande partie masquées sur l'ortho-image, et donc difficiles à détecter.













3.2 Solutions proposées

3.2.1 Classes dédoublées

Pour tenir compte des zones d'ombre importantes en milieu montagneux, les différentes classes d'occupation du sol sont dédoublées selon que le thème d'occupation du sol se trouve à l'ombre ou à la lumière. On obtient donc pour chaque thème “*c*” deux classes “*c à l'ombre*” et “*c à la lumière*”. On aura donc pour chaque thème d'occupation du sol deux modèles distincts.

Ces deux classes “*c à l'ombre*” et “*c à la lumière*” seront finalement rassemblées en une classe unique “*c*” à l'issue de la classification.

On adopte dans la suite la légende suivante :

à la lumière	à l'ombre	
		Surfaces d'eau (lacs, étangs, ...)
		Forêts
		Alpages / pelouses
		Rochers
		Éboulis / pierriers
		Glaciers

3.2.2 Introduction d'informations complémentaires (sous forme de probabilités *a priori*)

Pour limiter les erreurs de classification dues aux similarités radiométriques entre classes et aux variations de la radiométrie au sein de l'ortho-image pour une même classe, des connaissances complémentaires sont introduites dans le processus de classification. (Ces données interviendront sous la forme de probabilités *a priori* de rencontrer les différents thèmes.)

Ces sources d'informations complémentaires sont les suivantes :

— **Données issues d'un modèle numérique de terrain et de connaissances de géographie physique :**

En montagne, l'occupation du sol dépend fortement du relief, c'est-à-dire de l'altitude, de la pente et de l'orientation.

Il est donc possible de calculer en tout point de l'image une probabilité (fonction de ces paramètres) de rencontrer les différents thèmes d'occupation du sol. Les modèles de probabilités utilisés sont ceux qui avaient été utilisés dans l'étude [LMTB02] de 2002.

— **Données issues d'une autre base de données :**

Il est également possible d'utiliser une autre base de données moins précise ou plus ancienne, en vue d'une mise à jour comme source de probabilité *a priori* de rencontrer les différents thèmes. Dans le cas présent, il s'agit d'une base de données moins précise.

Dans l'étude [LMTB02] de 2002, la BD Carto avait été utilisée. Dans le cas présent, CORINE Land Cover 2000 sera utilisée. Cette base de données téléchargeable gratuitement, produite par l'Institut Français de l'ENvironnement (IFEN) et recalée sur la BD Carto de l'IGN, décrit en effet l'occupation du sol (sur l'ensemble du territoire européen).

— **Connaissances *a priori* sur les zones d'ombre :**

Disposant d'un modèle numérique de terrain et de l'intervalle de temps durant lequel les clichés constituant l'ortho-image ont été acquis (et même du tableau d'assemblage de cette prise de vue), il est possible de calculer des probabilités de se trouver à l'ombre ou à la lumière.

La méthode proposée est différente de celle mise en oeuvre dans l'étude [LMTB02] de 2002.

3.2.3 Récapitulatif

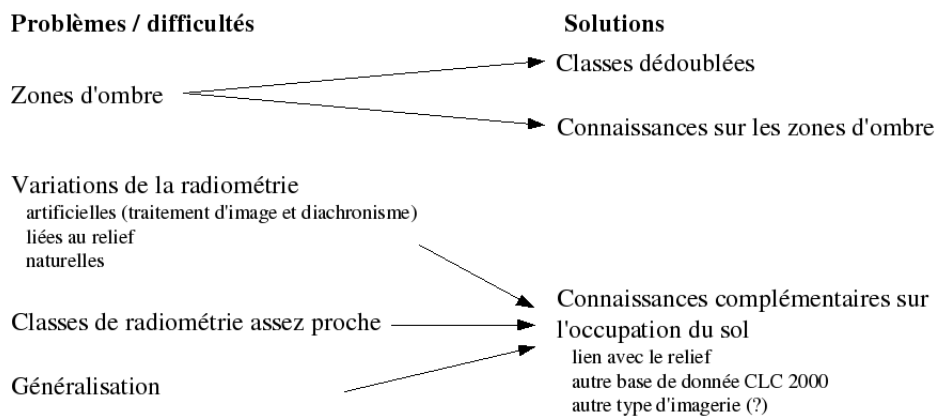


FIGURE 19 – Récapitulatif des solutions mises en œuvre

4 Présentation du processus d'extraction de l'occupation du sol

Le processus d'extraction mis en œuvre se décompose en deux grandes étapes :

1. **Segmentation** : On commence par segmenter l'image en régions d'occupation du sol homogène.
2. **Classification** : On classe ensuite les régions de la segmentation suivant un modèle que l'on aura précédemment calculé à partir de données d'entraînement. (Si l'on ne dispose pas de modèle, il faut avant toute chose en calculer un.)

4.1 Segmentation

Une segmentation est un partitionnement en un ensemble de régions toutes deux à deux disjointes, dont l'union est l'ensemble de départ.

La méthode de segmentation utilisée est la segmentation hiérarchique développée par L. GUIGUES [Gui04], [GLMC01], [GCLM06]. Cette segmentation s'effectue en deux temps : une sur-segmentation est d'abord calculée, puis les régions voisines fusionnent en fonction de certains critères (compromis entre la complexité de la segmentation et des contraintes d'attache au données).

Le résultat obtenu est donc en fait une pyramide de segmentations, à chaque niveau de laquelle est associée une segmentation plus ou moins fine (voir figure 20).

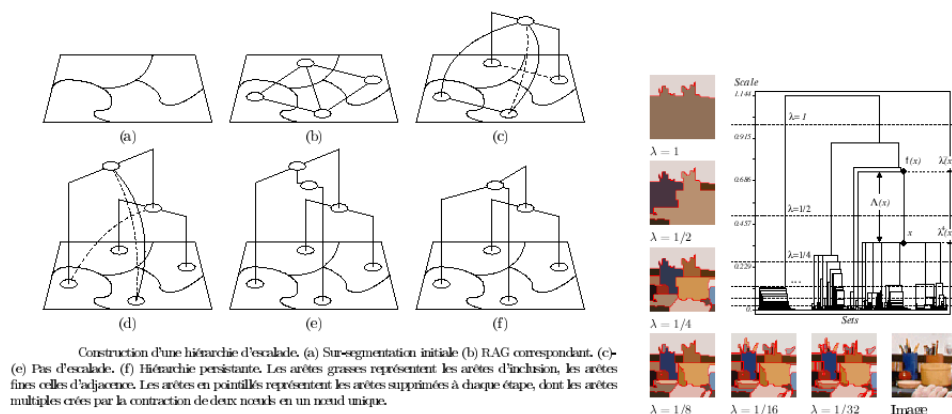
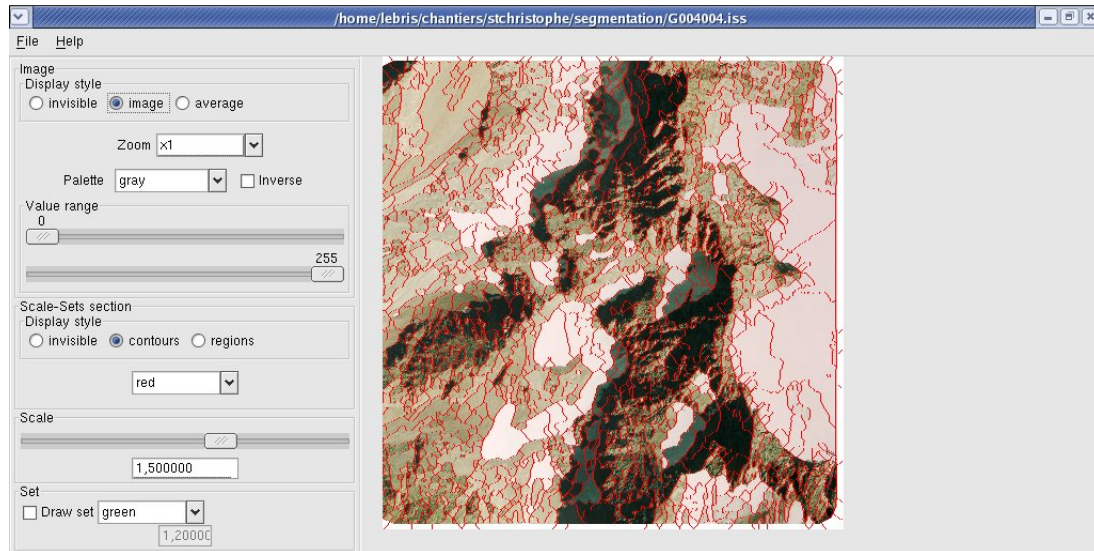


FIGURE 20 – Principe de l'outil de segmentation

L'obtention de la segmentation dont on va classer les régions s'effectue donc en deux étapes :

- calcul de la pyramide de segmentations
- coupe dans la pyramide à un certain niveau : obtention d'une segmentation

L'outil utilisé est l'exécutable *SXS/PYRAM* qui permet de calculer la pyramide de segmentation hiérarchique ainsi que d'y effectuer des coupes. (Le logiciel *SXS/interface graphique* permet de naviguer dans la pyramide et de visualiser les différents niveaux de la segmentation et pourra donc être utilisé pour identifier le bon niveau de coupe.)

FIGURE 21 – Interface du logiciel *SXS*

Le choix du niveau de la segmentation auquel on effectue la coupe dans la pyramide s'effectue de manière empirique. Il s'agit d'avoir des zones à la fois d'occupation du sol homogène et de taille significative.

- En effet, une segmentation trop fine risque d'avoir pour conséquence une classification plus bruitée : certaines petites régions ne comprendront pas une population de pixels suffisamment importante pour être significatives, et risqueront d'être finalement mal classées (classification bruitée).
- Une segmentation trop grossière conduira au problème inverse, certaines régions regroupant des classes différentes.

Néanmoins, il est parfois difficile de trouver un juste milieu. En effet, la segmentation la moins fine permettant de séparer en régions distinctes des zones appartenant à des classes différentes sera en réalité trop fine dans d'autres cas. Par exemple, il est souvent difficile de séparer les zones de glaciers à l'ombre des zones de rochers environnantes, tandis que les zones de forêt auront rapidement tendance à être sursegmentées (très petites zones d'ombre au milieu de zones exposées à la lumière).

Dans le cas présent, on cherche à obtenir un résultat relativement généralisé.

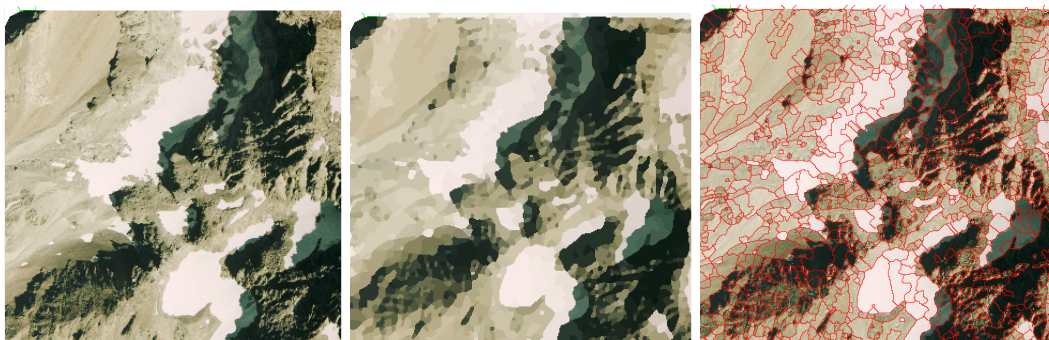


FIGURE 22 – À gauche, image originale ; au centre et à droite, image segmentée

4.2 Classification

4.2.1 Présentation des algorithmes de classification

AVET (Automatic Vegetation Extraction Technique) est un outil de classification semi-automatique développé par R. TRIAS-SANZ et décrit dans [TS06], [TSB05]. Il permet d'utiliser plusieurs canaux.

Cet outil est basé sur une approche statistique : un modèle probabiliste est en effet calculé pour chaque classe. Connaissant la radiométrie d'un pixel ou la distribution de la radiométrie au sein d'une région, il devient alors possible de lui attribuer sa classe la plus probable ou la plus proche statistiquement.

AVET procède en deux ou trois temps selon que l'on procède ou non à une évaluation des résultats obtenus :

— **Apprentissage - Estimation du modèle :**

À partir de données d'entraînement (zones d'apprentissage définies par un opérateur), *AVET* détermine pour chaque classe un modèle statistique. Cela s'effectue de la manière suivante. Pour chaque classe :

- *AVET* commence par calculer l'histogramme de la classe (i.e. la distribution radiométrique correspondante) à partir des données d'apprentissage. Cet histogramme est n-dimensionnel avec n le nombre de canaux de l'image utilisés.
- *AVET* estime ensuite pour différentes distributions statistiques paramétriques (gaussien, laplacien, uniforme...) ou non paramétriques (histogramme brut, histogramme avec "Kernel Density Estimation" ...) les paramètres permettant la meilleure modélisation de cet histogramme.
- Le meilleur modèle est ensuite retenu à l'aide du *BIC* (*Bayes Information Criterion*) qui permet de tenir compte de deux critères : son aptitude à modéliser la réalité du terrain et sa complexité. En effet, plus un modèle est complexe, plus il a de degrés de liberté et mieux il pourra "coller" aux données d'apprentissage, mais on risquera alors d'avoir un modèle qui correspond parfaitement à ces données particulières, mais modélise en fait moins bien la réalité du terrain qu'un modèle plus simple.

Remarque : *AVET* permet de calculer des modèles de deux types : les modèles simples et les modèles composés.

Dans le cas d'un modèle simple, la radiométrie de la classe est modélisée par une des distributions statistiques citées précédemment.

Les modèles composés ont été prévus pour les cas où la radiométrie d'une classe peut toujours être modélisée par la même distribution statistique à une translation ou une transformation affine près. Leur utilisation (notamment lors de l'acquisition de données d'apprentissage) est plus complexe.

— **Classification :**

AVET classe les images. Différentes méthodes de classification sont disponibles, certaines par pixels (donnant des résultats souvent bruités), d'autres par régions (à condition de disposer d'une segmentation préalable de l'image). Ces méthodes de classification par régions ne sont pas de simples extensions des méthodes par pixels (qui pourraient par exemple consister à s'intéresser à la valeur moyenne de la radiométrie sur la zone, ou encore à faire voter les pixels de la zone).

AVET propose deux familles de méthodes de classification :

- les méthodes probabilistes bayésiennes : à partir du modèle calculé précédemment, on estime pour chaque pixel (ou chaque région), connaissant sa radiométrie (ou du moins la distribution de sa radiométrie dans le cas d'une région), sa probabilité d'appartenance aux différentes classes. Chaque pixel (ou chaque région) se voit alors attribuer sa classe la plus probable d'après le modèle précédemment calculé. Il s'agit de méthodes du type *MAP* (*Maximum A Posteriori*) ou *ML* (*Maximum Likelihood*).
- les méthodes basées sur la mesure d'une distance entre une distribution statistique (le modèle estimé) et l'histogramme de l'échantillon : cette distance peut être la mesure du Chi2 ou la distance de Kullback-Leibler. Une région donnée se verra attribuer la classe dont le modèle est le plus proche de la distribution de la radiométrie (i.e. l'histogramme) au sein de cette région.

— **Évaluation :**

À partir de données test (zones témoins définies par l'utilisateur), *AVET* évalue la qualité de la classification. Il calcule, pour différents seuils de confiance, une matrice de confusion ainsi qu'une image de labels bien/mal classés. En effet, au cours de l'étape précédente, lorsqu'*AVET* classe un pixel (ou une région), il lui attribue également une mesure de confiance. Il est donc possible de ne s'intéresser, au cours de l'évaluation, qu'aux pixels (ou aux régions) classés avec une mesure de confiance supérieure à un certain seuil.

Une matrice de confusion permet de juger la qualité d'une classification. C'est un tableau qui donne dans un sens la **précision utilisateur** (*user accuracy*) c'est-à-dire, pour chaque classe, le pourcentage de pixels effectivement bien classés parmi les pixels classés dans cette classe et, dans l'autre sens, la **précision producteur** (*producer accuracy*), i.e. pour chaque classe, le pourcentage de pixels bien classés

parmi les pixels appartenant effectivement à cette classe sur le terrain.

En résumé, la précision utilisateur donne la probabilité qu'un pixel classé dans une classe (à l'issue de la classification) en fasse effectivement partie (sur le terrain) tandis que la précision producteur donne la probabilité qu'un pixel appartenant (sur le terrain) à une classe soit bien classé (à l'issue de la classification).

Les chiffres annoncés par la matrice de confusion doivent cependant être pris avec certaines précautions. En effet, ces statistiques dépendent des zones témoins utilisées pour les calculer.

- Ces zones peuvent être disséminées dans l'image et avoir été choisies de manière à ce que l'on soit certain de leur classe d'appartenance. Les régions les plus susceptibles de poser des problèmes de confusion sont alors écartées. Les chiffres annoncés sont donc sans doute plus optimistes que la réalité.
- La saisie complète d'une partie de l'image permet d'éviter ce problème, mais des confusions peuvent alors être commises lors de la saisie des zones témoin par l'opérateur : on risque en effet alors de se trouver contraint d'attribuer un label à des zones difficiles à classer même pour un opérateur humain : on se trouve alors face à des risques d'erreur également de la part de l'opérateur, mais aussi de cas où plusieurs solutions semblent acceptables...

Utilisation de canaux dérivés On ne travaille pas forcément directement sur les canaux de l'image initiale, mais sur des canaux transformés. Ces canaux calculés sont de deux types :

- canaux radiométriques : ce sont des indices (*ndvi*), des canaux issus d'un changement d'espace colorimétrique (espace intensité/teinte/saturation)...
- canaux de texture

Il est également possible de travailler sur des canaux par pixel ou par région (si l'on dispose d'une segmentation).

L'intérêt de travailler sur ces canaux dérivés provient du fait qu'ils permettent parfois de mieux discriminer certaines classes que les canaux initiaux. Ainsi, le canal *ndvi* calculé à partir des canaux rouge et infrarouge est très discriminant pour la distinction végétation/non végétation et permet même celle-ci par un simple seuillage.

Remarque sur le choix de la discrétisation des histogrammes Il est possible de régler le pas de discrétisation lors du calcul des histogrammes décrivant la distribution de la radiométrie au sein d'une classe, ou d'une région. Plus ce pas est fin, et plus la quantité de mémoire requise est importante. Néanmoins, le fait de diminuer la valeur de ce pas peut dégrader de manière assez importante le résultat de la classification.

4.2.2 Prise en compte d'informations complémentaires sous forme de probabilités *a priori*

La méthode utilisée dans le cas présent est une méthode du type *MAP (Maximum A Posteriori)* par régions, avec modèles simples. Cette méthode présente notamment l'avantage de permettre facilement l'introduction de connaissances complémentaires sous forme de probabilités *a priori* dans la classification.

À l'issue de l'apprentissage et de l'estimation du modèle, on dispose pour chaque classe c d'une fonction v_c donnant la probabilité que le pixel s ait pour radiométrie $I(s)$ s'il appartient à cette classe.

On a donc $v_c(s) = P(I(s)|c(s) = c)$ (avec la notation $c(s)$ "classe de s ").

On en déduit la probabilité d'appartenance à la classe c du pixel s connaissant sa radiométrie $I(s)$:

$$P(c(s) = c|I(s)) = \frac{P(I(s)|c(s) = c) \cdot P(c(s) = c)}{P(I)} = \frac{v_c(s) \cdot P(c(s) = c)}{P(I)}$$

Le terme $P(c(s) = c)$ est la probabilité *a priori* que le pixel s appartienne à la classe c .

Remarque : $I(s)$ est un vecteur dont la dimension est le nombre de canaux utilisés pour la classification.

On en déduit la probabilité d'appartenance à la classe c d'une région R connaissant la radiométrie de ses pixels :

$$P(c(R) = c|\{I(s)\}_{s \in R}) = \frac{P(c(R) = c) \cdot \prod_{s \in R} P(I(s)|c(s) = c)}{P(I)} = \frac{P(c(R) = c) \cdot \prod_{s \in R} v_c(s)}{P(I)}$$

Le terme $P(c(R) = c)$ est la probabilité *a priori* que la région R fasse partie de la classe c .

Finalement, le label attribué à la région R est sa classe la plus probable

$$\operatorname{argmax}_c [P(c|R) = c | \{I(s)\}_{s \in R}] = \operatorname{argmax}_c \left[P(c|R) = c \cdot \prod_{s \in R} P(I(s)|c(s) = c) \right]$$

On s'assure en pratique, comme dans la méthode *MAPNN* d'*AVET*, que les poids relatifs entre probabilités *a priori* et probabilités connaissant l'image ne dépendent pas de la taille de la région.

La classe la plus probable de la région R est donc en fait

$$\operatorname{argmax}_c \left[P(c|R) = c \cdot \left(\prod_{s \in R} P(I(s)|c(s) = c) \right)^{\frac{1}{\operatorname{Card} R}} \right]$$

Dans le cas présent, on dispose de plusieurs sources de probabilités *a priori* auxquelles on ne souhaite pas nécessairement donner la même influence.

La classe la plus probable de la région R devient donc :

$$\operatorname{argmax}_c \left[\left(\prod_{i \text{ proba } a \text{ priori}} (P_i(c|R) = c)^{a_i} \right) \cdot \left(\prod_{s \in R} P(I(s)|c(s) = c) \right)^{\frac{1}{\operatorname{Card} R}} \right]$$

avec a_i coefficients de pondération entre les différentes sources de probabilité *a priori*.

4.3 Informations *a priori* issues du relief

En montagne, l'occupation du sol est très fortement liée au relief (cf le cas bien connu des différents étages de végétation). Par conséquent, la probabilité de rencontrer un thème d'occupation du sol plutôt qu'un autre dépend fortement du relief : c'est-à-dire de l'altitude, de la pente et de l'orientation du terrain.

À partir du modèle numérique de terrain,

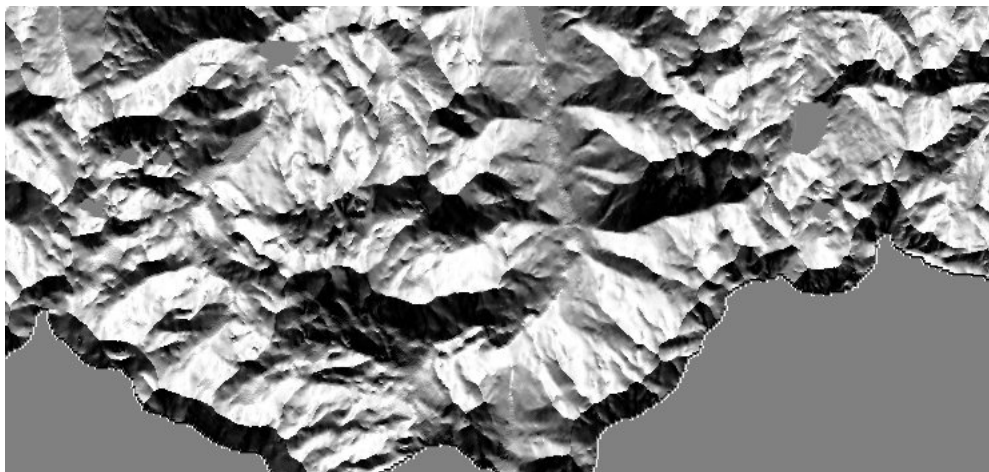


FIGURE 23 – MNT

on calcule la carte de pente :

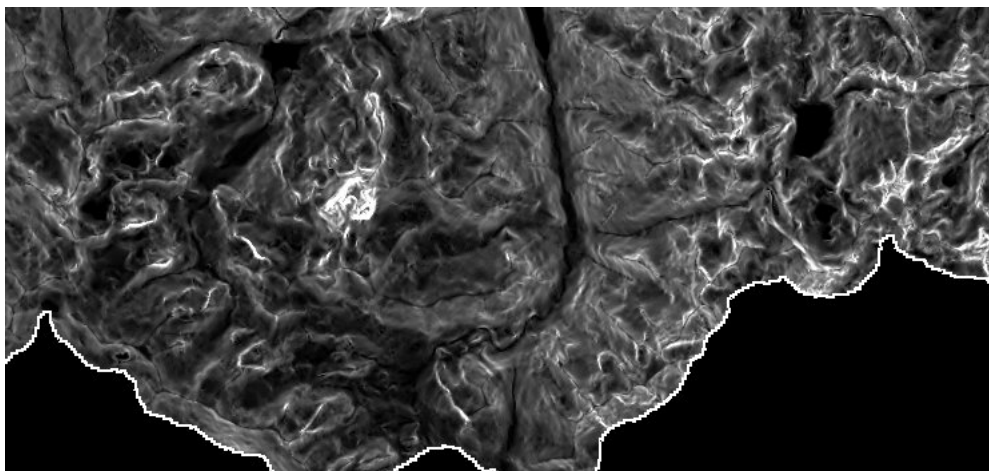


FIGURE 24 – Carte de pente

ainsi que la carte de l'orientation du terrain :

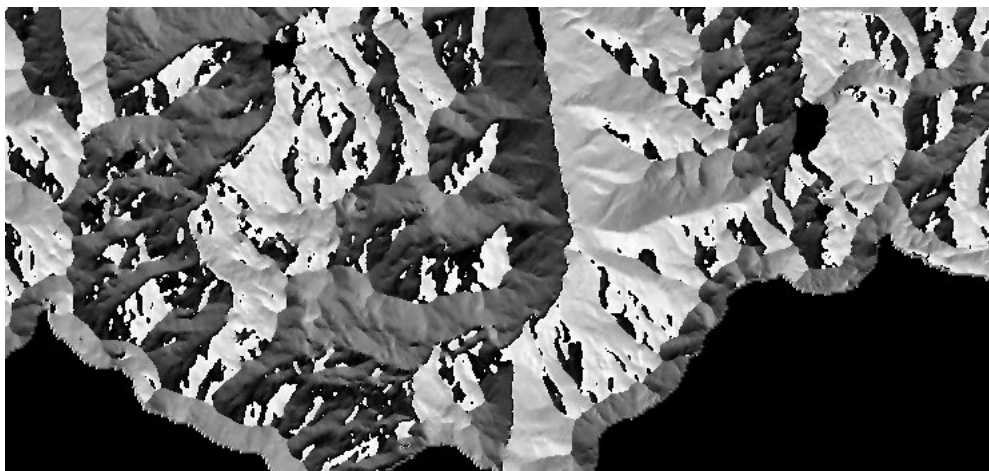


FIGURE 25 – Carte de l'orientation du terrain

On en déduit ensuite les probabilités *a priori* issues du MNT à partir des modèles (linéaires par morceaux) suivants présentés dans la figure 26 et initialement proposés par [LMTB02] à partir de connaissances “géographiques” issues de [Lac01, Elh68]. La première figure montre le modèle de probabilité (exprimée en %) P_{alti} en fonction de l'altitude (exprimée en mètres), la seconde présente le modèle de probabilité (exprimée en %) P_{pente} en fonction de la pente (donnée en %).

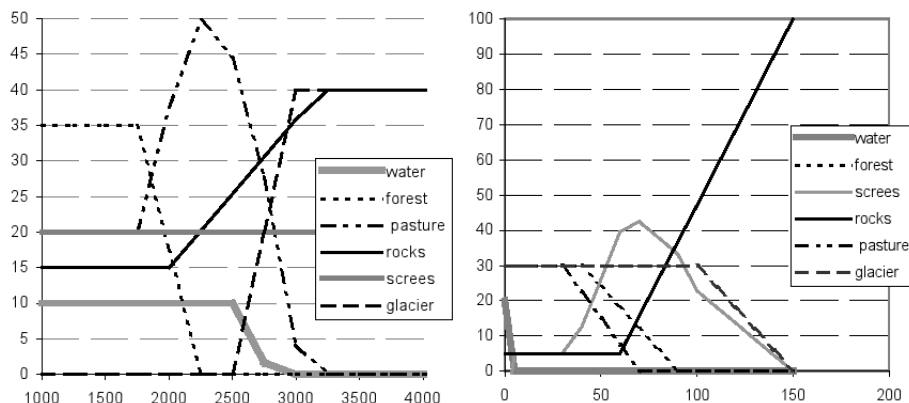


FIGURE 26 – Modèles de probabilité (en %) de rencontrer les différents thèmes connaissant l'altitude (en m) (à gauche) et la pente (en %) (à droite).

On ne prend en compte l'orientation du terrain que pour les glaciers et la forêt, de la manière suivante :

$$P_{alti-ori}(theme = glacier|altitude = z, azimuth = az, pente = p) =$$

$$P_{alti}(theme = glacier|altitude = z - p \cdot \cos(az)) \text{ et}$$

$$P_{alti-ori}(theme = foret|altitude = z, azimuth = az, pente = p) =$$

$$P_{alti}(theme = foret|altitude = z + p \cdot \cos(az))$$

Bien entendu, pour les autres thèmes $P_{alti-ori} = P_{alti}$.

On fusionne les informations altitude, pente et orientation suivant la formule suivante qui donne la probabilité de rencontrer le thème T pour une altitude z , une pente p et une orientation az :

$$P(theme = T|altitude = z, azimuth = az, pente = p) =$$

$$\frac{P_{pente}(theme = T|pente = p) \cdot P_{alti-ori}(theme = T|altitude = z, azimuth = az, pente = p)}{\sum_{t \in themes} P_{pente}(theme = t|pente = p) \cdot P_{alti-ori}(theme = t|altitude = z, azimuth = az, pente = p)}$$

On obtient ainsi en pratique ces probabilités sous forme d'images dont chaque canal est la probabilité d'appartenance à un thème.

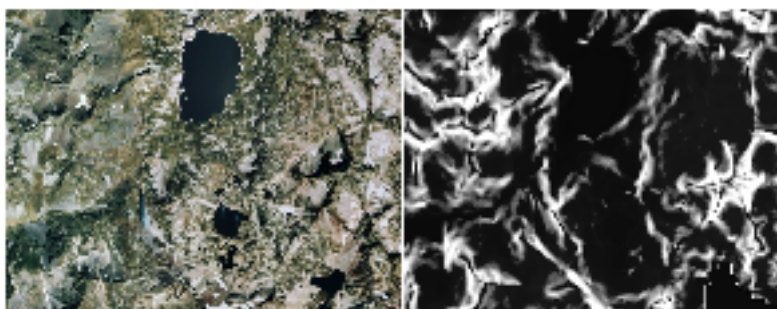


FIGURE 27 – Sur une même zone : ortho-image (à gauche) et probabilité *a priori* de rencontrer des rochers connaissant le relief (à droite)

4.4 Informations issues d'une autre base de données : CORINE Land Cover 2000

4.4.1 Présentation de CORINE Land Cover 2000

CORINE Land Cover est une base de données géographiques produite dans le cadre du projet européen CORINE, de COOrdination et d'INformation sur l'Environnement . Il s'agit d'un inventaire biophysique de

l'occupation des terres.

La base de données CORINE Land Cover 2000, dite CLC 2000, a été acquise à partir d'images satellitaires de l'année 2000. Elle constitue un référentiel d'occupation du sol, "calé" sur la BD cartographique de l'IGN, et proche par la date des recensements de la population (1999) et de l'agriculture (2000).

Une base de données d'échelle inférieure à celle de la carte de base

L'échelle de travail choisie pour la production de CORINE Land Cover 2000 est le 1/100 000. "L'unité spatiale au sens de CORINE Land Cover 2000 est une zone dont la couverture peut être considérée comme homogène, ou être perçue comme une combinaison de zones élémentaires qui représente une structure d'occupation. Elle doit présenter une surface significative sur le terrain et se distinguer nettement des unités qui l'entourent. De plus, sa structure doit être suffisamment stable pour servir d'unité de collecte pour des informations plus précises." La surface de la plus petite unité cartographiée (i.e. le seuil de description) est de 25 hectares.

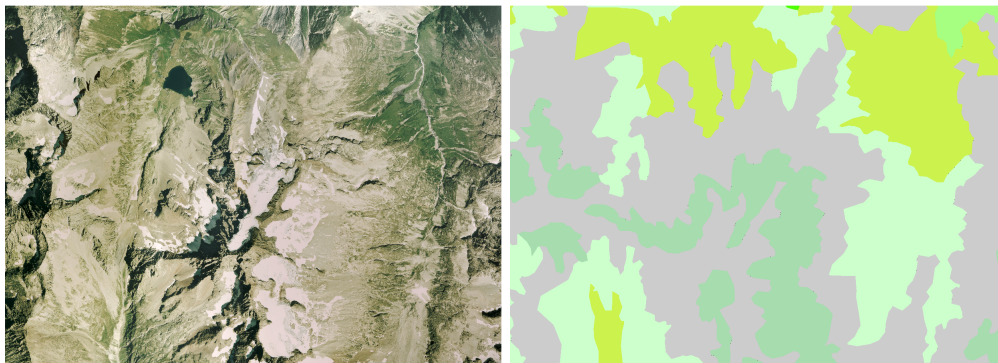


FIGURE 28 – L'échelle de CORINE Land Cover est le 1/100 000, d'où des zones plus grossières que ce que l'on cherche à obtenir.

Une base de données sémantiquement plus précise

La nomenclature de CORINE Land Cover 2000 a été conçue de manière à permettre la cartographie de l'intégralité du territoire de l'Union Européenne.

Elle est hiérarchisée en trois niveaux :

- Le premier niveau (composé de 5 classes) correspond aux grandes classes d'occupation de sol repérables au niveau planétaire.
- Le second niveau (comprenant 15 postes) est utilisable pour des échelles comprises entre 1/500 000 et 1/1 000 000.
- Le troisième niveau (de 44 thèmes) correspond à des échelles de lecture de l'ordre du 1/100 000.

CORINE Land Cover est orientée vers l'occupation biophysique du sol (et non sur son utilisation). Par conséquent, les labels des différentes classes décrivent davantage la nature (forêts, cultures, surfaces en eau, roches affleurantes...) des objets classifiés que leur fonction socio-économique (agriculture, habitat...).

Un mot sur le processus de production de CORINE Land Cover 2000

- La donnée de base de CORINE Land Cover 2000 est une image satellitaire SPOT (XS) ou LANDSAT (MSS) reproduite à partir d'une composition colorée "fausses-couleurs" sur un tirage photographique à l'échelle de 1/100 000.
- Cette image satellitaire est interprétée visuellement à l'aide d'informations complémentaires (photographies aériennes, cartes topographiques IGN et thématiques). Les contours des zones d'occupation du sol homogène sont reportés sur un calque.
- Le photo-interprète utilise les 44 postes de la nomenclature pour classer ces zones, les zones d'une superficie inférieure à 25 hectares n'étant pas prises en compte ou étant associées à d'autres unités pour former une unité homogène, correspondant à un poste de la nomenclature.
- Le calque final est ensuite mis au propre, contrôlé et numérisé.
- Les différents calques sont finalement assemblés.

4.4.2 Utilisation de CORINE Land Cover 2000 comme source d'information complémentaire

Il s'agit de prendre en compte l'information issue de CORINE Land Cover 2000 en termes probabilistes, lors du processus de classification. Deux difficultés se présentent :

- *Les différents thèmes de CLC2000 ne correspondent pas exactement à ceux recherchés :*
Dans certains cas, la nomenclature de CORINE Land Cover 2000 est plus fine : ainsi, dans CORINE Land Cover, parmi les zones de forêt, on distingue les forêts de feuillus, les forêts de conifères, ainsi que les forêts où ces espèces sont mélangées.

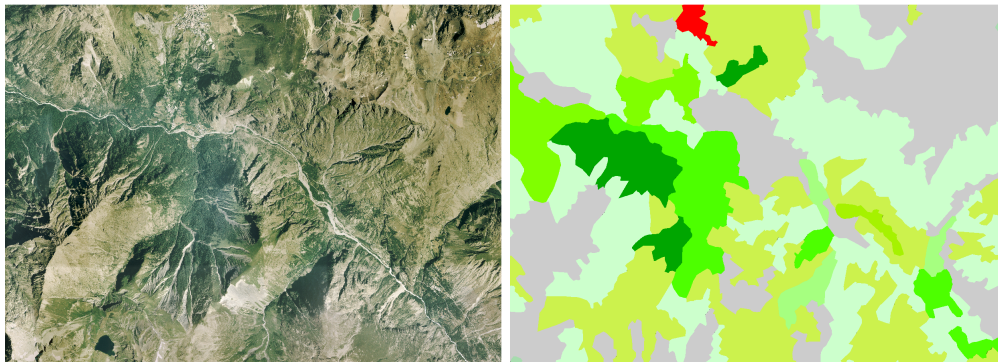


FIGURE 29 – L'échelle de CORINE Land Cover est le 1/100 000, d'où des zones assez grossières.

Dans d'autres cas, une classe de CORINE Land Cover 2000 peut concerner plusieurs thèmes d'occupation du sol de notre classification : par exemple, la classe "Roche nue" de CORINE Land Cover concerne à la fois les classes "rochers" et "éboulis".

Le plus souvent, un thème d'occupation du sol (de la légende de la carte de base) est concerné par plusieurs postes de CORINE Land Cover 2000.

- *L'échelle des deux bases de données est différente :*
Les plus petites surfaces cartographiées dans CORINE Land Cover 2000 ont une superficie supérieure à 25 hectares.
Les zones sont donc plus "grossières" que celles que l'on cherche à obtenir. Par conséquent, une zone CLC2000 va généralement contenir plusieurs des thèmes de notre classification.

L'introduction de connaissances issues de CLC2000 dans le processus de classification doit donc prendre en compte ces deux incertitudes :

- Incertitude sémantique : Quels thèmes de la classification correspondent à un poste de CLC2000 donné ?
- Incertitude liée au degré de généralisation : Comme les régions de CORINE Land Cover sont très généralisées, il faut souvent prévoir le cas où un thème différent de celui attribué à la région y est également présent. Par exemple, dans une région CORINE Land Cover de type "forêt ...", il sera possible de trouver de petites zones de rochers ou d'alpages, par exemple, mais pas de zones de glaciers.

Solution retenue

Les connaissances issues de CORINE Land Cover 2000 sont introduites dans le processus de classification sous forme de probabilités *a priori*. Ces probabilités *a priori* doivent refléter des considérations semblables à celles du paragraphe précédent.

On définit empiriquement pour chaque classe " $C_{classif}$ " de notre classification une probabilité $P(C_{classif}|C_{CLC2000})$ de se rencontrer dans une zone du poste " $C_{CLC2000}$ " de CORINE Land Cover 2000.

Par exemple, voici les probabilités de rencontrer les différents thèmes de notre classification dans une zone de poste CLC2000 324 "Forêt et végétation arbustive en mutation (arbres épars)" :

- Surfaces d'eau : 0%
- Forêt : 77%
- Alpage : 20%
- Rochers : 1%
- Éboulis : 2%
- Glaciers : 0%



FIGURE 30 – Sur une même zone : ortho-image (à gauche), CLC2000 (au centre) et probabilité *a priori* de rencontrer des rochers connaissant CLC2000 (à droite)

Plusieurs modèles de ce type ont été testés, avant d’en retenir un. On aurait pu envisager de déterminer ce modèle par apprentissage, mais cela aurait nécessité de disposer d’une importante vérité terrain.

Il aurait aussi pu être envisageable de modéliser les transitions entre deux zones CORINE Land Cover de thèmes différents (par exemple par un système de zones tampons). Malheureusement, il n’y a pas de règles générales concernant ces transitions : on ne peut par exemple pas définir de lois du type : “dans le cas d’un voisinage entre deux classes A et B, la classe A se prolonge toujours dans la zone appartenant à la classe B” ou “la coupure entre les classes A et B est toujours nette” .

4.4.3 Cas d’une base de données plus ancienne

Dans le cas d’une base de données plus ancienne, il aurait fallu modéliser les évolutions sachant que les zones appartenant à certains thèmes sont en régression (comme par exemple la fonte des glaciers), tandis que d’autres augmentent leur étendue.

4.5 Utilisation d’images LANDSAT TM

4.5.1 LANDSAT TM et la détection des glaciers

Des images issues de capteurs aux caractéristiques géométriques et spectrales différentes de celles des ortho-images aériennes utilisées peuvent être disponibles. C’est notamment le cas d’ortho-images issues des satellites LANDSAT TM.. Ces satellites de télédétection ont une résolution spatiale trop basse pour permettre d’atteindre le niveau de détail recherché. Ils offrent à l’inverse davantage d’information spectrale (plus de canaux, sur un domaine spectral plus important) que les ortho-images aériennes utilisées ici et possèdent notamment des canaux dans l’infrarouge thermique.

Plusieurs indices utiles peuvent dès lors être calculés à partir d’images LANDSAT :

- l’indice *NDSI* (*Normalized Difference Snow Index*) utile pour détecter les zones enneigées et glacées [HRS95, SW99]

$$NDSI = \frac{TM2 - TM5}{TM2 + TM5}$$

- l’indice *NDVI* (*Normalized Difference Vegetation Index*) utile pour détecter les zones couverte de végétation [HB99]

$$NDVI = \frac{TM4 - TM3}{TM4 + TM3}$$

- l’indice *NDWI* (*Normalized Difference Water Index*) utile pour détecter les surfaces d’eau [HKH⁺02]

$$NDWI = \frac{TM1 - TM4}{TM1 + TM4}$$

De nombreuses approches s’appuyant sur les images LANDSAT TM pour cartographier les glaciers et suivre leur évolution existent dans la littérature. On peut notamment citer [Pau00, Pau03, PHK⁺02, EKDO06].

Dans le cas présent, les données LANDSAT TM (et notamment les canaux infrarouge moyen et lointains) pourrait apporter une information supplémentaire pour aider à détecter les glaciers même recouverts d’éboulis.

4.5.2 Utilisation dans le processus

Il aurait été possible d'utiliser directement les données LANDSAT TM (canaux originaux et dérivés) directement dans le processus de classification au même titre que les ortho-images aériennes, mais la différence de résolution entre ces deux types de données pourrait poser problème pour la modélisation statistique des différentes classes (limites trop "floues"...).

Il aurait également été possible d'effectuer une première classification uniquement à partir des données LANDSAT, puis de l'introduire dans le processus de classification à la manière d'une base de données existante (comme dans la partie 4.4, et plus précisément 4.4.3).

Dans le cas présent, la seule information apportée par l'imagerie LANDSAT TM que l'on souhaite utiliser est son aptitude à mieux détecter les zones de glacier. Par conséquent, la méthode mise en œuvre pour l'intégrer au processus de classification est la suivante :

1. Calcul de l'indice *NDSI* (*Normalized Difference Snow Index*) à partir des données LANDSAT TM.
2. Détection des glaciers par simple seuillage de l'indice *NDSI*.
3. Convolution de ce masque des glaciers par une gaussienne.

L'image obtenue est la probabilité de rencontrer un glacier connaissant la détection des glaciers d'après les données LANDSAT TM. La probabilité de détecter les autres thèmes est l'inverse de cette probabilité.

Comme pour les autres sources d'information déjà présentées, ces probabilités sont introduites dans le processus de classification sous forme de probabilités *a priori*.

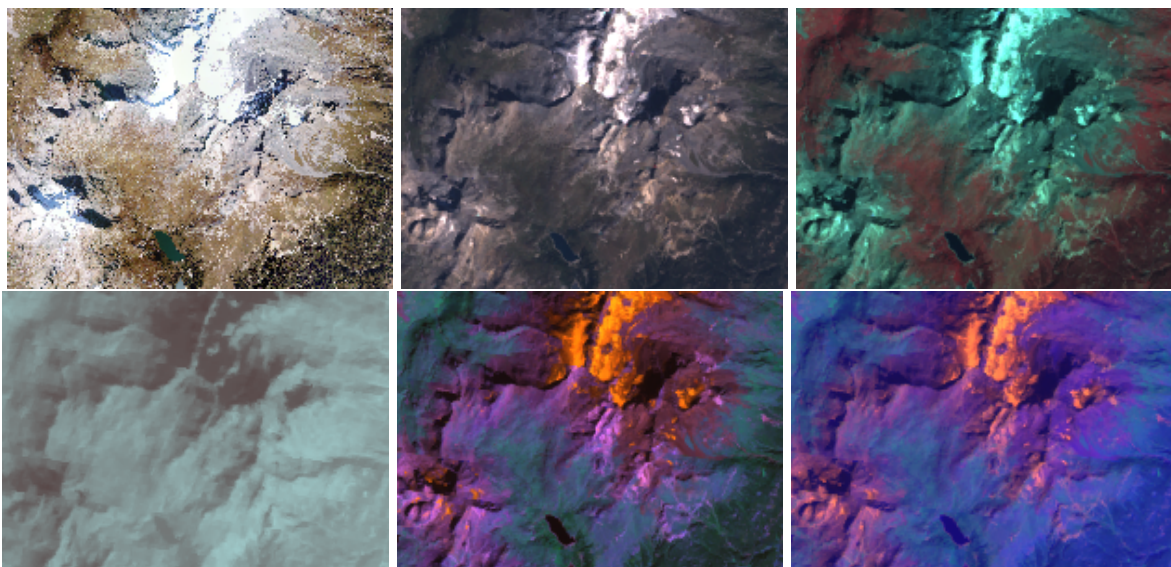


FIGURE 31 – De haut en bas et de gauche à droite : ortho-image caméra numérique IGN, ortho-image RVB LANDSAT TM (TM3 TM2 TM1), ortho-image IRC LANDSAT TM (TM4 TM3 TM2), canaux infrarouge thermiques de LANDSAT TM (TM6 TM7), LANDAT TM (TM3 TM4 TM5), LANDSAT TM (TM3 TM4 TM6)

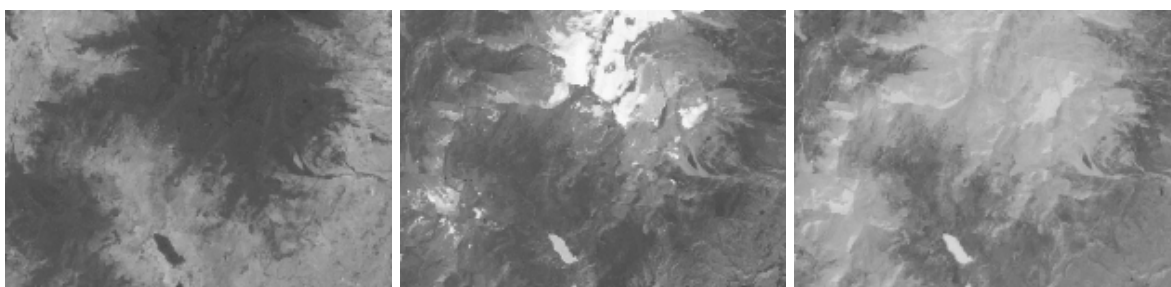


FIGURE 32 – De gauche à droite : indices *NDVI*, *NDSI* et *NDWI* calculés à partir d'images LANDSAT TM



FIGURE 33 – De gauche à droite : ortho-image IRC LANDSAT, glaciers détectés par seuillage de l'indice *NDSI*, probabilité *a priori* de rencontrer des glaciers connaissant la détection effectuée à partir de l'indice *NDSI*

Remarque : Cette source d'information n'a été utilisée que lors de tests sur la zone test "Modane" (voir partie 7). En effet, la procédure de récupération et de préparation des images LANDSAT (téléchargement et sélection des images, projection dans le bon format) serait difficile pour une utilisation opérationnelle. Il s'agissait seulement de voir ce que cette source d'information pouvait apporter.

4.6 Connaissances *a priori* sur les ombres

Ainsi qu'il a été dit plus haut, une correction radiométrique des ombres et même plus simplement leur détection précise se heurtent à plusieurs problèmes : il n'est notamment plus possible de connaître avec exactitude l'heure de prise de vue de chaque pixel de l'ortho-image.

Disposant d'un modèle numérique de terrain et de l'intervalle de temps durant lequel les clichés constituant l'ortho-image ont été acquis, il est toutefois possible (cf [Gil01]) de calculer des probabilités de se trouver à l'ombre ou à la lumière : on connaît en effet d'après le tableau d'assemblage de la mission de photographie aérienne l'intervalle de temps durant lequel chaque pixel a pu être acquis.

On calcule les zones d'ombre toutes les cinq minutes durant l'intervalle de temps durant lequel les clichés composant l'ortho-image ont été acquis. On obtient ainsi des probabilités de se trouver à l'ombre ou à la lumière. La méthode proposée est différente de celle mise en oeuvre dans l'étude [LMTB02] menée en 2002. Dans cette étude, on supposait en effet en outre que les erreurs du modèle numérique de terrain suivent une loi de probabilité gaussienne (ce qui n'est en réalité pas le cas ; les erreurs dépendent en effet notamment de la pente...). L'information radiométrique était également utilisée pour la détection des zones d'ombre. Par ailleurs, dans cette étude, l'objectif de l'extraction des zones d'ombre était différent puisqu'il s'agissait ensuite de les corriger, et non simplement de les introduire dans le processus de classification comme une connaissance *a priori*.

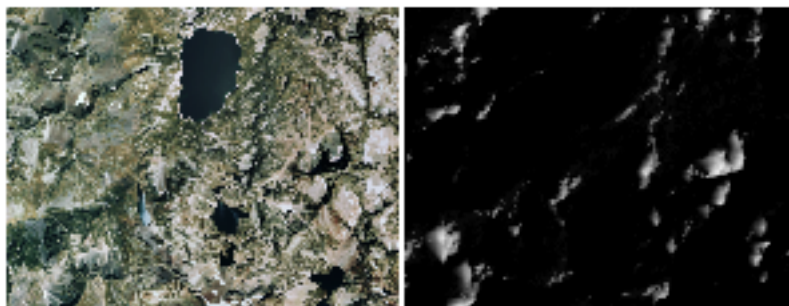
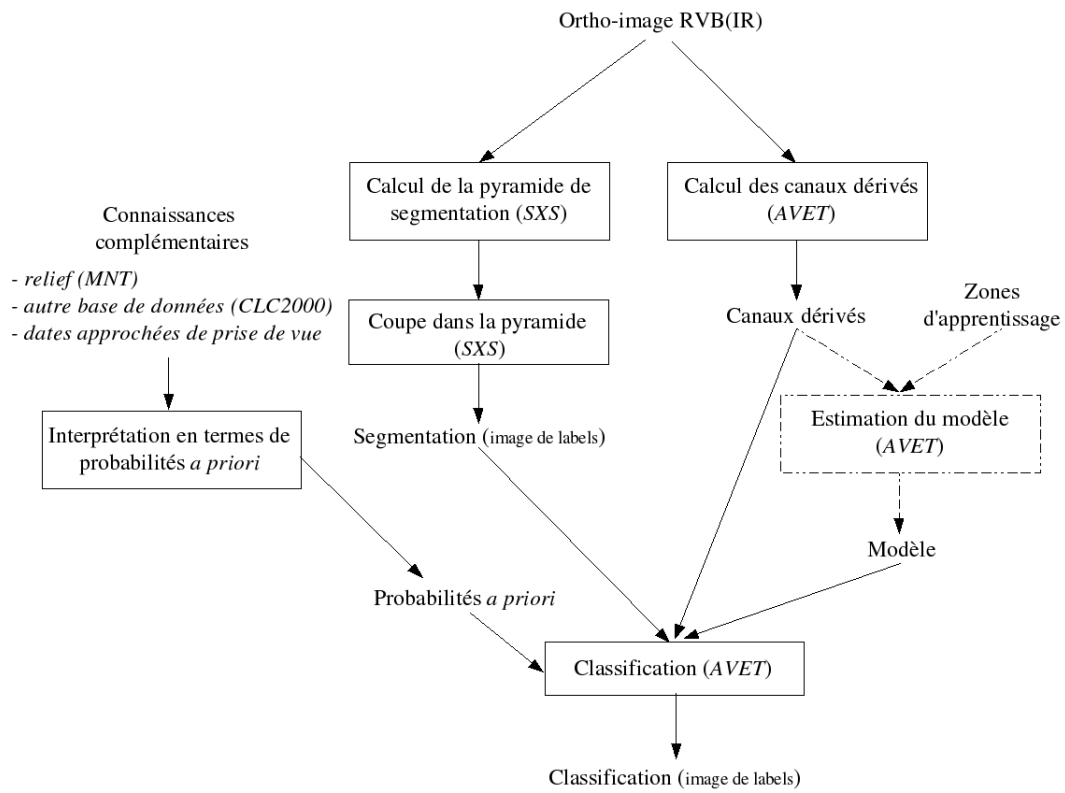


FIGURE 34 – Sur une même zone : ortho-image (à gauche) et probabilité *a priori* de se trouver à l'ombre (à droite)

4.7 Bilan



4.8 Variante

Une variante de ce processus a également été testée (sur une seule zone d'étude). Elle s'appuie sur le fait que certains thèmes vont être mieux séparés des autres pour un paramétrage donné de la méthode présentée précédemment (i.e. pondération des différentes sources d'information, association de canaux utilisée).

Il s'agit donc ici de procéder à une extraction hiérarchique des différents thèmes, le processus standard de classification de l'occupation du sol décrit précédemment étant lancé à chaque niveau avec un paramétrage différent. On aura donc par exemple la chaîne de traitement suivante :

1. Détection de la végétation et des surfaces d'eau. On ne s'intéresse par la suite qu'aux zones qui ne sont ni de la végétation, ni des surfaces d'eau.
2. Détection des glaciers. (La légende de la classification ne comporte alors plus que les 3 classes "rochers", "éboulis" et "glaciers".)
3. Séparation des éboulis et des rochers (l'information sur la pente du terrain est un critère plus important que la radiométrie ici.)

Remarque : Cette variante du processus d'extraction de l'occupation du sol a été mise en œuvre uniquement sur la zone test "Modane" (voir partie 7).

5 Zone d'étude "Saint-Christophe-en-Oisans"

5.1 Présentation de la zone et des principales difficultés rencontrées

Cette zone d'étude se situe aux alentours de Saint-Christophe-en-Oisans, dans le département de l'Isère.

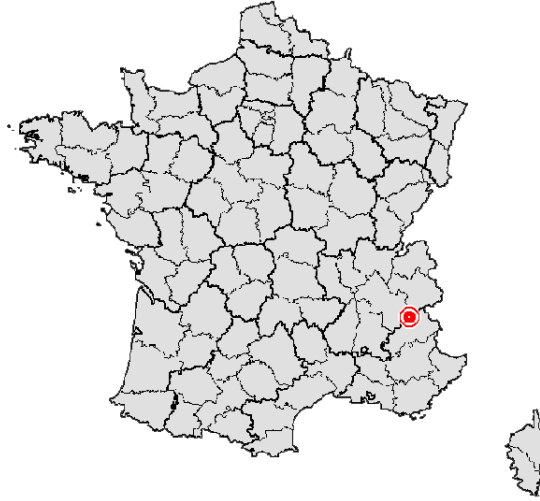


FIGURE 35 – Localisation de la zone d'étude

Il s'agit d'une zone de haute montagne, avec des altitudes comprises entre 735m et 3885m. Les différents thèmes d'occupation du sol de la classification sont présents sur cette zone.

On dispose sur cette zone d'une ortho-image constituée à partir d'images aériennes argentiques comportant uniquement des canaux rouge, vert et bleu.



FIGURE 36 – Ortho-image RVB sur la zone d'étude

Les principales difficultés rencontrées sur cette zone sont dues :

- aux variations artificielles de radiométrie causées par les traitements subis par l'ortho-image.
- à la présence de zones d'ombre
- aux similarités radiométriques entre classes

Les confusions les plus souvent rencontrées sont les suivantes :

- Les glaciers à l'ombre sont classés parmi les rochers, voire la forêt.
- Les zones d'ombre sont souvent classées parmi les surfaces d'eau.
- Des confusions entre glaciers à la lumière et éboulis à la lumière se produisent fréquemment (et dans les deux sens).
- Des zones d'alpages à la lumière sont considérées comme de la forêt à la lumière pour peu qu'elles soient plutôt sombres. (Ceci n'est pas vraiment gênant, car on souhaite avant tout détecter les rochers, les éboulis et les glaciers.)
- Les confusions rochers/éboulis sont assez fréquentes.
- Des confusions entre rochers à la lumière et alpage à la lumière (et dans une bien moindre mesure des confusions entre rochers à la lumière et forêt à la lumière) se produisent également.

5.2 Classes dédoublées

Sur cette zone d'étude, les principaux thèmes rencontrés dans les zones d'ombre sont des rochers, des glaciers et, dans une moindre mesure des éboulis et de la forêt. Avant de dédoubler les classes, ces zones sont quasiment toutes classées parmi les rochers ou les surfaces d'eau, et également dans certains cas la forêt.

Sans l'introduction de probabilités *a priori*, la classification reste néanmoins mauvaise. Dans le cas contraire, on parvient notamment, dans la plupart des cas, à distinguer les zones de glaciers à l'ombre des zones de rochers voisines. Les confusions entre zones d'ombre et surfaces d'eau sont quant à elles éliminées par l'introduction de ces connaissances complémentaires.

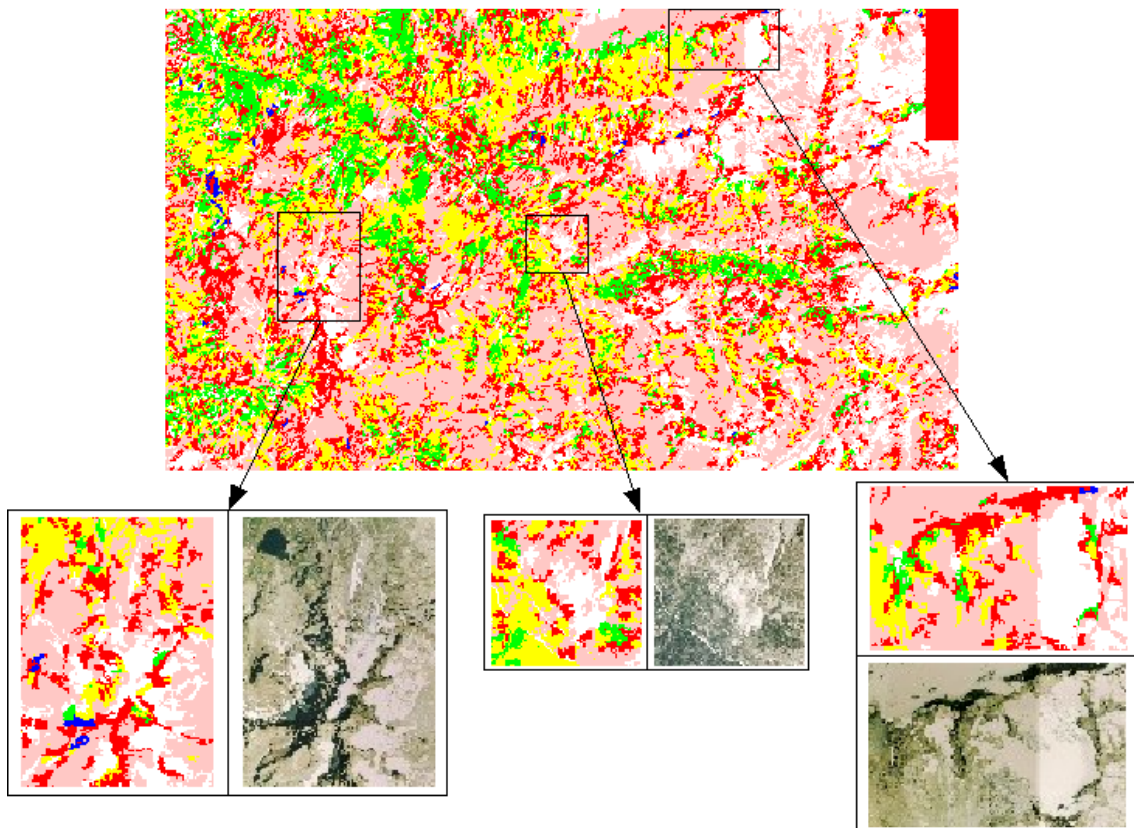


FIGURE 37 – Résultat obtenu pour la combinaison de canaux *intensité/teinte* sans probabilités *a priori*, avec des classes dédoublées

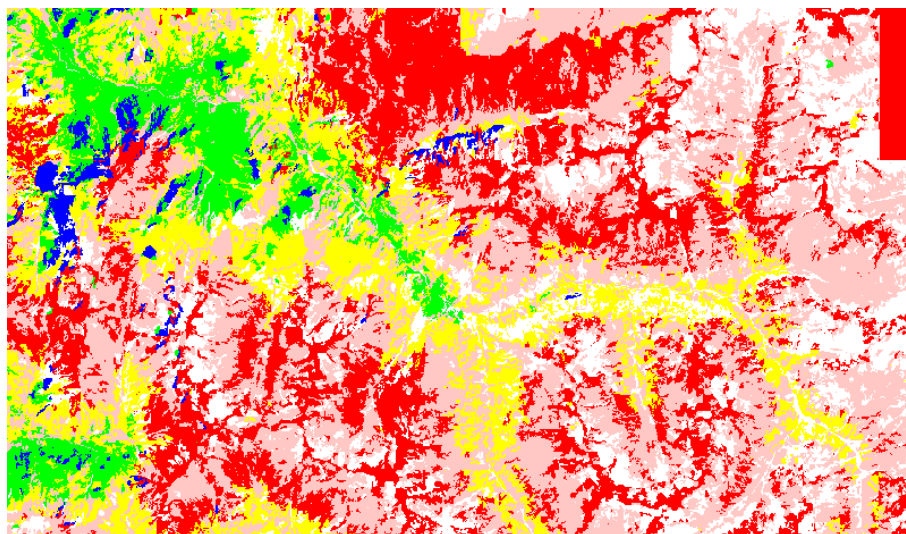
5.3 Introduction de connaissances *a priori*

Les différents résultats présentés dans cette partie ont été obtenus en utilisant la combinaison de canaux *intensité/teinte/logrs*.

L'image suivante présente le résultat obtenu.

5.3.1 Connaissances issues du relief

L'introduction de probabilités *a priori* issues du relief améliore nettement la classification. Nombre de confusions disparaissent (notamment les différentes confusions glacier/fond de torrent, surface d'eau/ombre), ainsi que l'illustrent les exemples de classifications des figures suivantes et leurs matrices de confusion (calculées à partir d'une vérité terrain saisie sur une zone témoin assez importante).



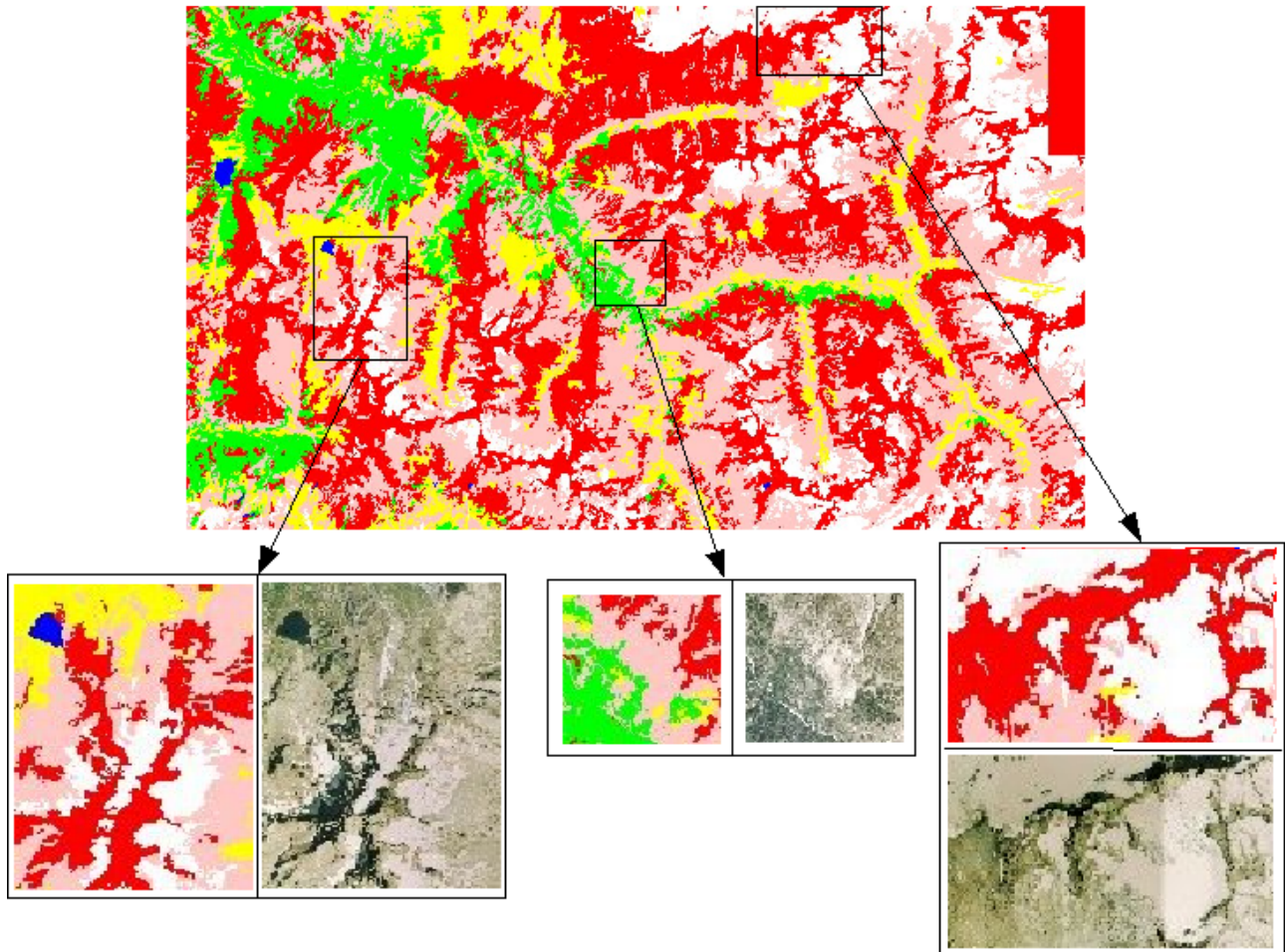


FIGURE 38 – Résultats obtenus pour les canaux *intensité/teinte/logrs* avec probabilités *a priori* issues du MNT.

Les meilleurs résultats sont obtenus pour les canaux intensité, teinte et *logrs*.

On obtient, sur la zone témoin, 61,65% des pixels bien classés avant agrégation des classes dédoublées et 65,37% des pixels bien classés après agrégation.

66,55% des pixels “glacier” sont bien classés.

5.3.2 Connaissances issues de CORINE Land Cover 2000

Des probabilités *a priori* issues de CORINE Land Cover 2000 ont également été introduites dans le processus de classification. Le poids relatif donné à ces probabilités *a priori* est relativement faible par rapport à celui des probabilités *a priori* issues du MNT. En effet, un poids trop important donné à CLC2000 entraîne une généralisation trop importante, qui peut poser problèmes.

L'apport de CLC2000 améliore généralement la classification. Toutefois, du fait de l'important degré de généralisation de cette base de données, il lui arrive de provoquer ponctuellement de fausses classifications qui ne se produisaient pas auparavant.

Sur cette zone d'étude, différents modèles (cf partie 4.4.2) de probabilités issues de CLC2000 ont été testés, avant d'en retenir un. Les résultats obtenus varient peu, car ces modèles restaient assez proches et car un poids assez faible était donné aux connaissances issues de CLC2000 lors de la classification.

TABLE 1 – Résultats obtenus uniquement avant (à gauche) et après (à droite) l'introduction de probabilités *a priori* issues du relief

	<i>user-acc</i>	<i>prod-acc</i>		<i>user-acc</i>	<i>prod-acc</i>
Eau à la lumière	0,0	/	Eau à la lumière	/	/
Forêt à la lumière	84,5	31,8	Forêt à la lumière	79,2	65,7
Alpage à la lumière	54,1	68,1	Alpage à la lumière	70,8	42,1
Rochers à la lumière	74,6	45,9	Rochers à la lumière	62,6	69,5
Éboulis à la lumière	53,4	66,2	Éboulis à la lumière	53,5	73,1
Glaciers à la lumière	33,0	68,8	Glaciers à la lumière	58,7	68,1
Eau à l'ombre	/	/	Eau à l'ombre	/	/
Forêt à l'ombre	/	0,0	Forêt à l'ombre	/	0,0
Alpage à l'ombre	/	0,0	Alpage à l'ombre	/	0,0
Rochers à l'ombre	86,4	7,9	Rochers à l'ombre	81,9	19,8
Éboulis à l'ombre	/	0,0	Éboulis à l'ombre	/	0,0
Glaciers à l'ombre	1,3	53,2	Glaciers à l'ombre	60,3	1,0
Pixels bien classés		52,7	Pixels bien classés		61,8
Eau	0,0	/	Eau	/	/
Forêt	85,5	30,4	Forêt	81,0	63,5
Alpage	54,2	67,6	Alpage	70,8	41,7
Rochers	85,4	46,2	Rochers	73,9	72,9
Éboulis	53,5	66,1	Éboulis	53,5	73,1
Glaciers	20,6	69,4	Glaciers	58,8	65,9
Pixels bien classés		54,8	Pixels bien classés		65,6

TABLE 2 – Résultats obtenus pour la combinaison de canaux *intensité/teinte/logrs*, en donnant un poids de 0,8 aux probabilités issues du MNT et un poids de 0,2 aux probabilités issues de CLC200.

	<i>user-acc</i>	<i>prod-acc</i>
Eau à la lumière	/	/
Forêt à la lumière	79,1	66,7
Alpages à la lumière	70,8	52,4
Rochers à la lumière	64,9	66,5
Éboulis à la lumière	54,7	73,4
Glaciers à la lumière	58,5	71,8
Eau à l'ombre	/	/
Forêt à l'ombre	/	0,0
Alpages à l'ombre	/	0,0
Rochers à l'ombre	81,0	20,2
Éboulis à l'ombre	/	0,0
Glaciers à l'ombre	5,9	0,3
Pixels bien classés		63,2
Eau	/	/
Forêt	81,9	65,2
Alpages	71,1	52,2
Rochers	76,4	69,9
Éboulis	54,7	73,3
Glaciers	58,6	69,5
Pixels bien classés		67,0

5.3.3 Connaissances sur les ombres

On rencontre essentiellement des éboulis, des rochers ou des glaciers dans les zones d'ombre. Comme on l'a dit plus haut, l'introduction de connaissances complémentaires (issues du relief ou de CLC2000) permet d'améliorer la classification dans les zones d'ombre. Toutefois, certaines zones à l'ombre continuent à

être classées dans des thèmes à la lumière : par exemple, les glaciers à l'ombre sont parfois classés parmi les rochers à la lumière. Il est donc intéressant d'introduire des connaissances *a priori* sur les zones d'ombre dans le processus de classification. Ainsi que le montre l'exemple suivant, cela permet d'y améliorer la classification.



FIGURE 39 – À gauche, image originale. Au centre, classification obtenue sans connaissances sur les zones d'ombre. À droite, classification obtenue avec connaissances sur les zones d'ombre.

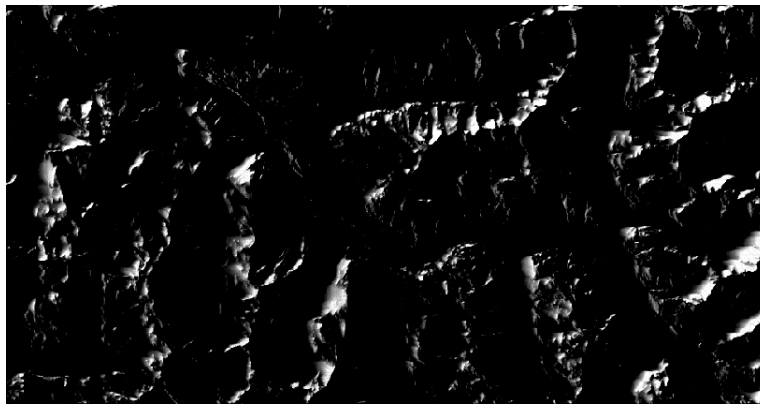


FIGURE 40 – Probabilité de se trouver à l'ombre (en blanc) sur la zone d'étude des Alpes

5.4 Association de canaux

5.4.1 Quelques tests

Il s'agissait de rechercher parmi les différents canaux calculés par *AVET* à partir de l'image initiale ceux qui permettent d'obtenir la meilleure classification. De nombreuses combinaisons de deux ou trois canaux ont donc été testées pour différentes conditions (avec ou sans probabilités *a priori*, pour des classes dédoublées ou non, ...).

Certaines combinaisons de canaux pouvaient être écartées par avance au vu de leur histogramme. En effet, si les différentes classes apparaissent isolées dans l'histogramme, alors l'association de canaux utilisée permet de les distinguer. Si ce n'est pas le cas, cette association de canaux n'est pas intéressante.

Ainsi, il est possible de construire des combinaisons de canaux intéressantes de la manière suivante, en choisissant des canaux permettant chacun de bien séparer des classes différentes : le canal A distingue les classes 1 et 2 de la classe 3, le canal B sépare la classe 1 des classes 2 et 3, ...

5.4.2 Conclusion

Plusieurs combinaisons de canaux permettent d'obtenir de bons résultats. Certaines d'entre elles permettent parfois d'obtenir de bons résultats sur une partie de l'image et des résultats nettement moins bons sur une autre partie de l'image, tandis que d'autres produisent l'effet inverse.

Les canaux de texture qui pouvaient *a priori* sembler utiles pour distinguer certaines classes radiométriquement assez proches mais de texture différente (comme par exemple les forêts et les alpages) ont tendance à provoquer une surdétection en faveur de la classe des rochers, notamment au détriment des éboulis et de la forêt.

Les combinaisons de canaux donnant les meilleurs résultats sont les combinaisons *intensité/teinte/logrs* et *kl1/kl2/kl3*.

TABLE 3 – Résultats obtenus pour différentes combinaisons de canaux (avec prise en compte de probabilités *a priori* issues du relief)

	<i>kl1/kl2/kl3</i>		<i>rouge/vert/bleu</i>		<i>intensité/teinte/logrs</i>		étude 2002	
	<i>user-acc</i>	<i>prod-acc</i>	<i>user-acc</i>	<i>prod-acc</i>	<i>user-acc</i>	<i>prod-acc</i>	<i>user-acc</i>	<i>prod-acc</i>
Eau à la lumière	/	/	/	/	/	/	/	/
Forêt à la lumière	79,1	67,3	79,1	66,3	79,2	65,7	/	/
Alpage à la lumière	82,3	34,1	66,6	37,4	70,8	42,1	/	/
Rochers à la lumière	66,8	62,6	64,1	68,5	62,6	69,5	/	/
Éboulis à la lumière	51,3	79,7	51,8	72,7	53,5	73,1	/	/
Glaciers à la lumière	67,8	68,7	54,1	57,5	58,7	68,1	/	/
Eau à la l'ombre	/	/	/	/	/	/	/	/
Forêt à la l'ombre	/	0,0	/	0,0	/	0,0	/	/
Alpage à la l'ombre	/	0,0	/	0,0	/	0,0	/	/
Rochers à la l'ombre	58,4	57,4	73,8	35,3	81,9	19,8	/	/
Éboulis à la l'ombre	/	0,0	/	0,0	/	0,0	/	/
Glaciers à la l'ombre	0,0	0,0	70,4	1,0	60,3	1,0	/	/
Pixels bien classés	62,3		60,8		61,8		/	
Eau	/	/	/	/	/	/	/	/
Forêt	80,7	64,8	81,0	64,2	81,0	63,5	79,6	35,6
Alpage	82,4	33,8	66,7	37,0	70,8	41,7	60,7	35,9
Rochers	74,2	70,0	73,4	72,4	73,9	72,9	64,3	61,6
Éboulis	51,3	79,6	51,8	72,6	53,5	73,1	43,2	62,4
Glaciers	67,9	66,5	54,3	55,7	58,8	65,9	37,4	67,2
Pixels bien classés	65,2		63,9		65,6		53,7	

6 Zone d'étude "Ossau"

6.1 Présentation de la zone et des principales difficultés rencontrées

Cette zone d'étude se situe à la frontière entre le département des Pyrénées-Atlantiques et celui des Hautes-Pyrénées. Les altitudes y sont comprises entre 1000m et 3130m.

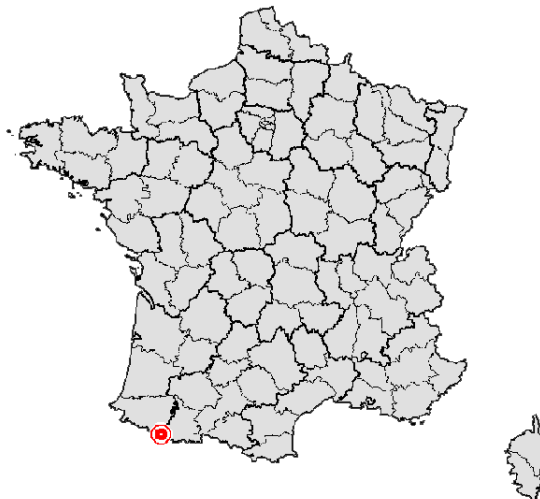


FIGURE 41 – Localisation de la zone d'étude

Parmi les différents thèmes recherchés, seul le thème "glacier" est absent de la zone d'étude. On dispose toutefois de quelques zones enneigées à l'Est de la zone d'étude. Ces zones seront classées dans le thème des glaciers. Rappelons au passage, que la radiométrie ne permet pas de distinguer les glaciers des zones enneigées.

On dispose sur cette zone d'un extrait de BDOrtho avec cette fois des ortho-images issues d'une acquisition effectuée par la caméra numérique de l'IGN mais ayant cette fois encore subi un traitement d'égalisation radiométrique statistique. On dispose des canaux rouge, vert, bleu et proche infra-rouge. Deux MNT sont disponibles sur cette zone : il s'agit d'un MNT BDAlti et d'un MNT "Nouveau RGE Alti".



FIGURE 42 – Ortho-image RVB sur la zone d'étude

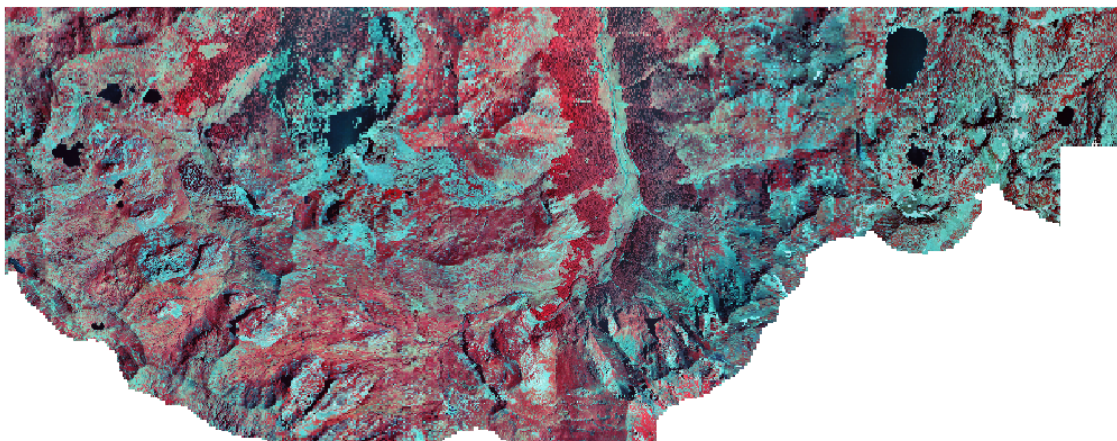


FIGURE 43 – Ortho-image IRC sur la zone d'étude

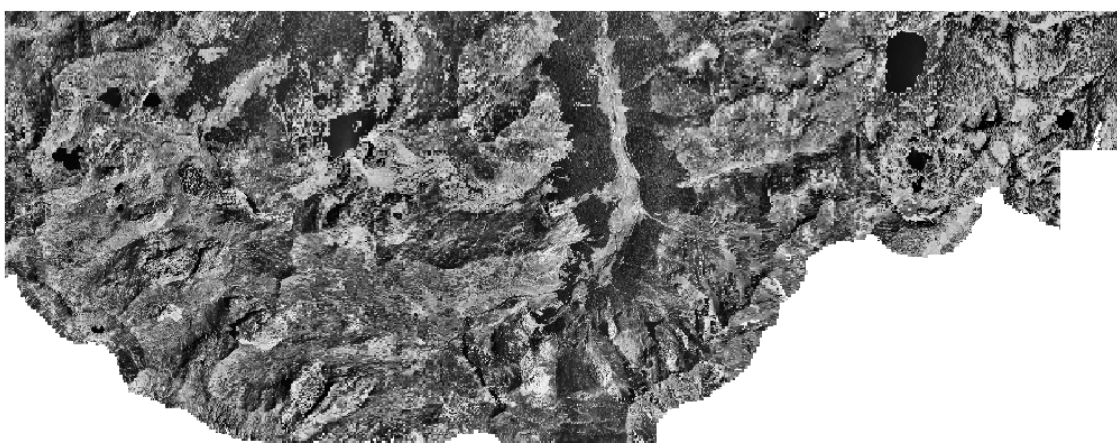


FIGURE 44 – Canal rouge de l'ortho-image sur la zone d'étude



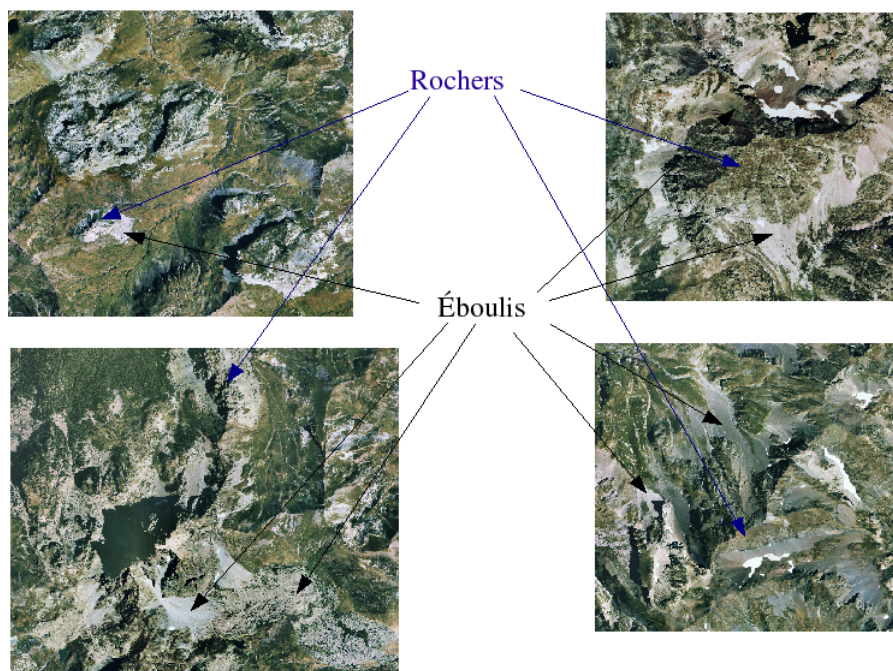
FIGURE 45 – Canal infrarouge de l'ortho-image sur la zone d'étude

Les principales difficultés rencontrées sur cette zone sont dues :
— à la présence d'ombres (notamment autour du Pic d'Ossau)

- aux variations naturelles de la radiométrie au sein d'une même classe (différences d'illumination dues au relief notamment et présence de végétation plus ou moins sombre dans la classe alpage (landes / pelouse))
- aux similarités radiométriques entre certaines classes
- à la différence entre les traitements appliqués aux canaux rouge-vert-bleu et ceux appliqués au canal infrarouge : ceci pose notamment des problèmes pour le calcul du canal *ndvi* utile pour séparer les zones de végétation des zones minérales. À ceci s'ajoute le fait que toutes les images constituant l'ortho-image n'aient pas été acquises à la même date (c'est notamment visible pour le canal proche infrarouge, ainsi qu'on peut le constater sur la figure 45).

Les problèmes les plus souvent rencontrés sur ces nouvelles zones test sont par conséquent les suivants :

- des confusions liées à la présence d'ombre
- des confusions rochers/éboulis ou forêt/alpages dues aux différences d'illumination dues au relief.
- des confusions rochers/éboulis, rochers/alpage
- des confusions neige/éboulis et neige/rochers dans les zones les plus claires.



Variations de la radiométrie au sein d'une classe.

Elles sont moins importantes que dans le cas précédent, mais sont la cause de confusions :

- les zones d'éboulis ou de roches les plus claires peuvent être classées comme étant des glaciers.
- les zones de rochers peuvent être classés parmi les alpages.
- les zones de lande peuvent être classées parmi les forêts

FIGURE 46 – Difficultés pour la classification des rochers et des éboulis

Bien qu'elles ne sont pas problématiques dans notre cas (où l'on souhaite détecter les zones de rochers, d'éboulis et de glaciers), plusieurs situations causant des erreurs de classification alpage / forêt se présentent :

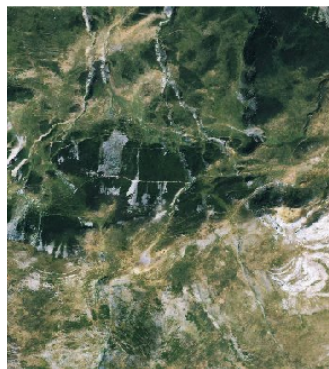
- des confusions forêt/alpage dues à la présence de zones de végétation sombre, des zones de lande notamment
- Les alpages sont parcourus par des ruisseaux au bord desquels la végétation apparaît plus sombre :



- Certaines zones semblent plus sombres du fait de variations d'éclaircement dues au relief :



- La végétation n'est pas la même partout ; on trouve des zones de landes plus sombres que les zones de pelouse.



Là encore, l'introduction de connaissances *a priori*, issues du MNT et d'une base de données existante permet d'améliorer le résultat de la classification.

6.2 Tests et résultats

Les différents paramètres testés sont :

- le fait que les classes soient dédoublées ou non
- la combinaison de canaux utilisée lors de la classification
- la pondération appliquée aux deux sources de probabilité *a priori*
- l'introduction d'une connaissance *a priori* sur les zones d'ombre
- l'influence du MNT sur le résultat puisque deux MNT étaient disponibles sur la zone.

6.2.1 Classes dédoublées

Les différents résultats présentés ci-dessous montrent que le fait de dédoubler les classes permet d'améliorer la classification.



FIGURE 47 – Ortho-image originale

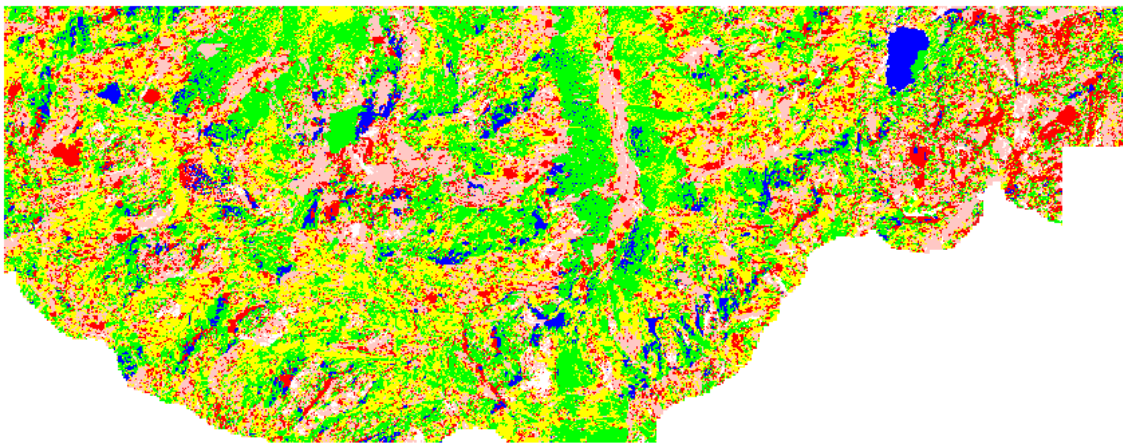


FIGURE 48 – Classification obtenue sans informations complémentaires, sans dédoubler les classes

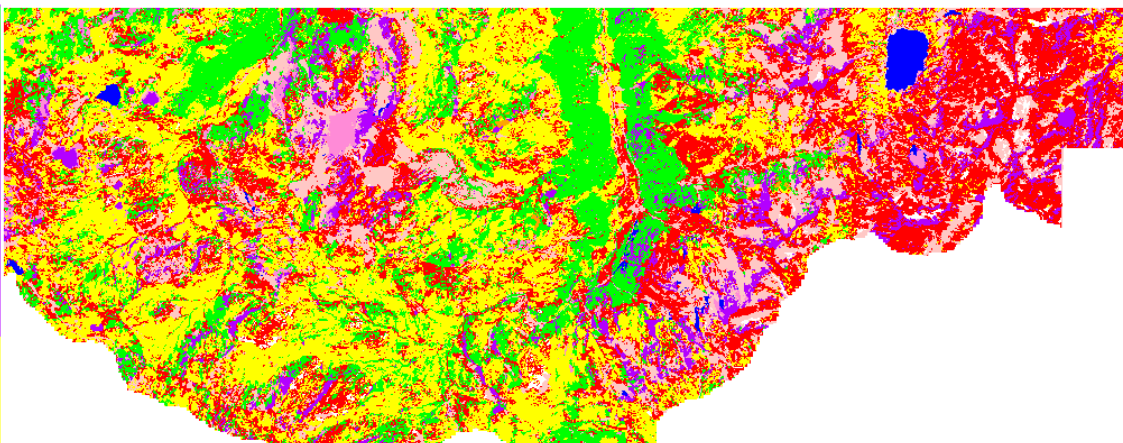


FIGURE 49 – Classification obtenue sans informations complémentaires, en dédoublant les classes

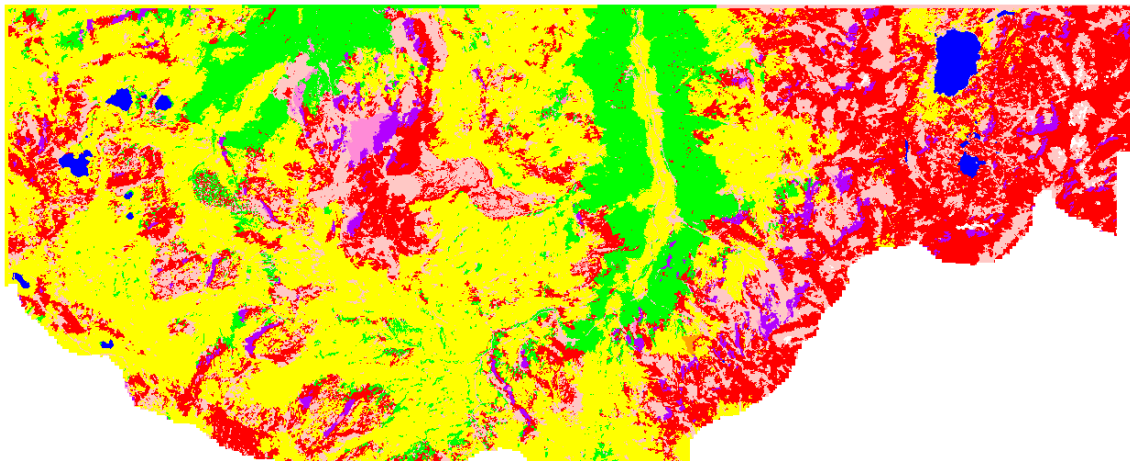


FIGURE 50 – Classification obtenue avec des informations complémentaire, en dédoublant les classes

6.2.2 Combinaisons de canaux

Différentes combinaisons de canaux ont été testées pour l'estimation du modèle. Sur cette nouvelle zone d'étude, le canal infrarouge était disponible. Il était donc intéressant d'utiliser le canal *ndvi* utile pour distinguer les zones de végétation des autres zones. Toutefois, les canaux visibles (rouge-vert-bleu) n'ont pas subi les mêmes traitements que le canal infra-rouge, ce qui a parfois pour conséquence des variations artificielles au sein du canal *ndvi* calculé.

Plusieurs combinaisons de canaux donnent des résultats satisfaisants et sensiblement équivalents. C'est notamment le cas de la combinaison *intensité-teinte-ndvi*.

Remarque : Les canaux de texture n'ont pas véritablement apporté d'amélioration à la classification. En effet, ils ont surtout tendance à distinguer les zones de texture lisse des zones de texture rugueuse, sans pour autant éviter les confusions entre classes. De plus, il y a parfois des textures "parasites".

6.2.3 Introduction de connaissances complémentaires et influence de la pondération

La classification varie en fonction du poids attribué aux différentes sources de probabilités *a priori*. Mieux vaut ne pas accorder le même poids aux différentes sources d'informations. En effet, les probabilités issues de la radiométrie vont généralement être faibles, tandis que les probabilités issues de CORINE Land Cover seront soit faibles (aucune chance de trouver un thème donné dans une zone donnée), soit fortes. (Les zones de CORINE Land Cover ne sont en fait pas totalement homogènes. Par ailleurs, aucune fonction du type zone tampon n'a été utilisée pour modéliser la transition entre deux zones CORINE Land Cover de thèmes différents.)

Si le poids attribué à CORINE Land Cover est trop fort par rapport à ceux attribués aux autres sources de probabilités *a priori*, alors le résultat obtenu est trop généralisé : en simplifiant, la classification se limite alors à modifier les labels des zones CORINE Land Cover.



FIGURE 51 – Ortho-image originale

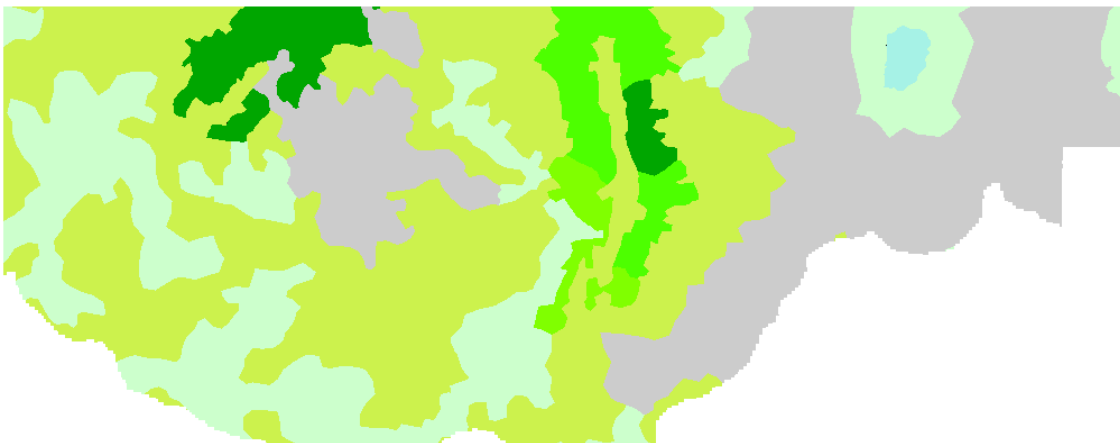


FIGURE 52 – CORINE Land Cover sur la zone d'étude

Voici quelques résultats obtenus pour la combinaison de canaux intensité/teinte/ndvi :

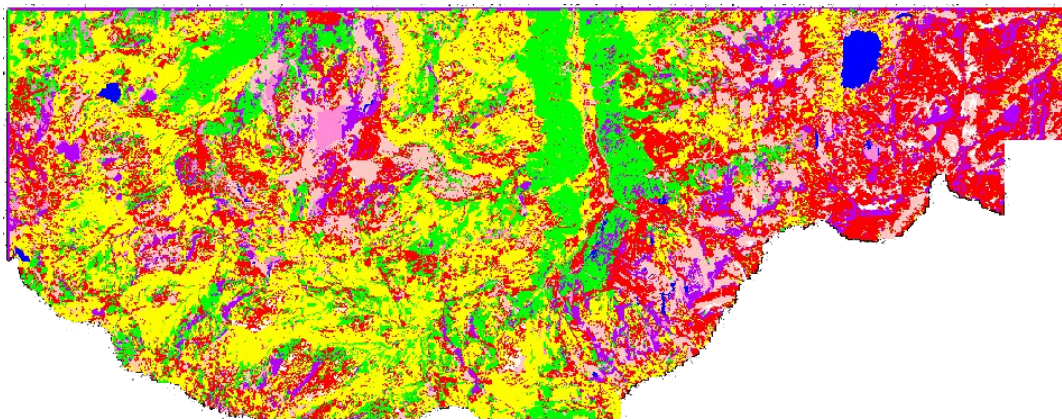


FIGURE 53 – sans probabilités *a priori*

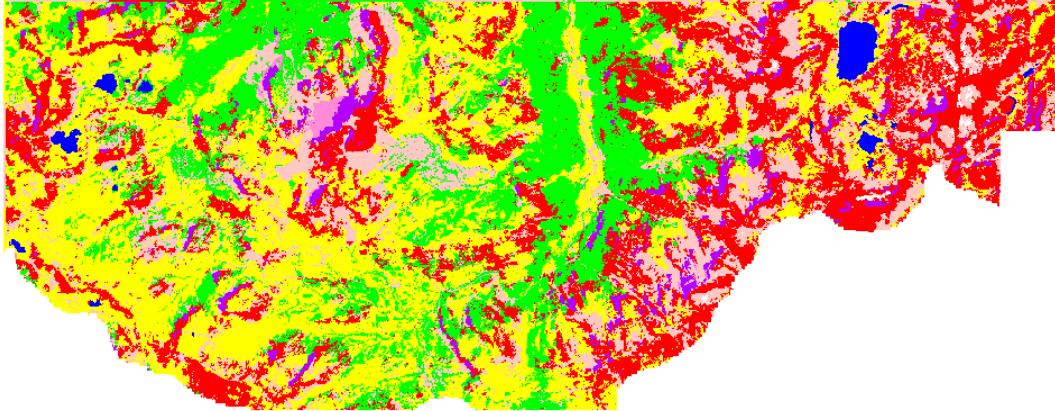


FIGURE 54 – avec probabilité MNT uniquement : (CLC2000 : 0 - MNT : 1 - radiométrie : 1)

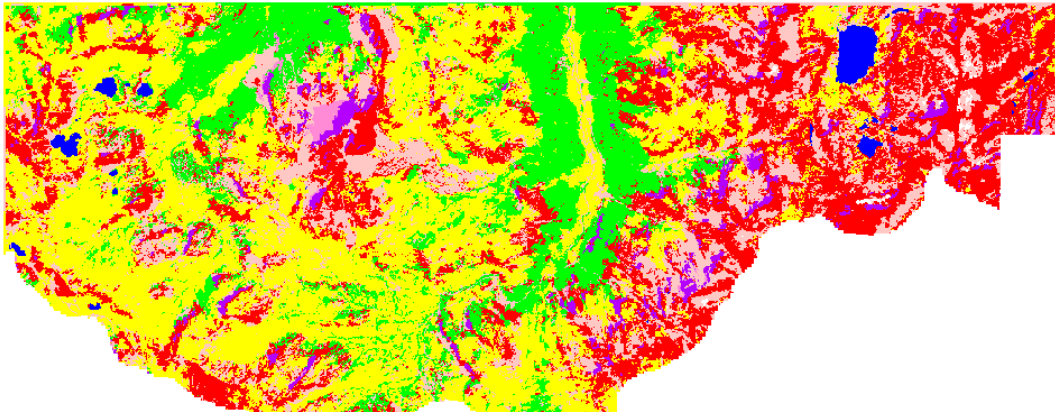


FIGURE 55 – (CLC2000 : 0,25 - MNT : 0,75 - radiométrie : 1)

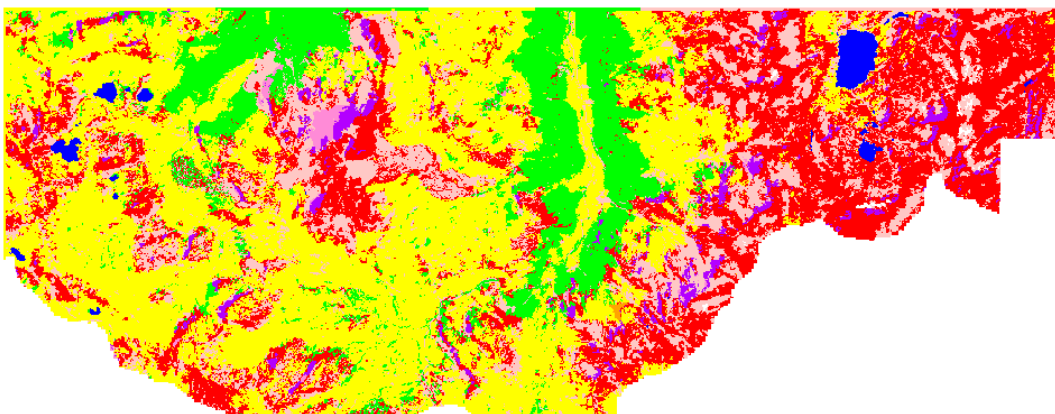


FIGURE 56 – (CLC2000 : 0,5 - MNT : 0,5 - radiométrie : 1)

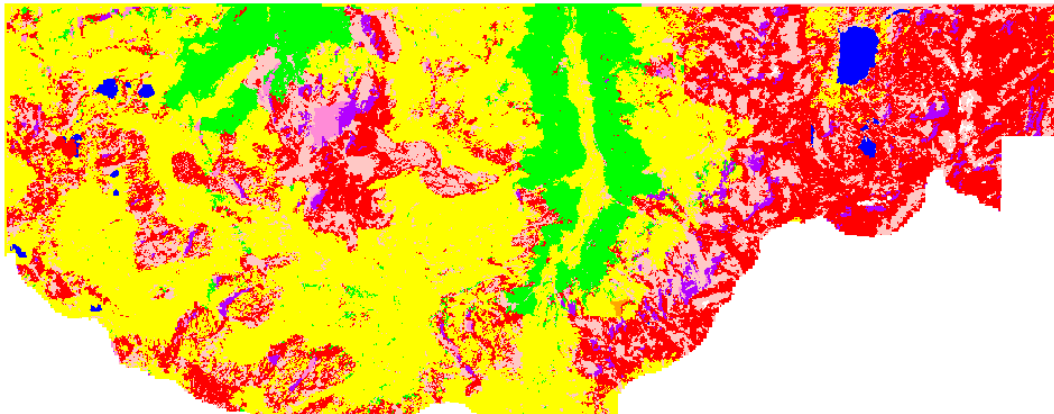


FIGURE 57 – (CLC2000 : 0,75 - MNT : 0,25 - radiométrie : 1)

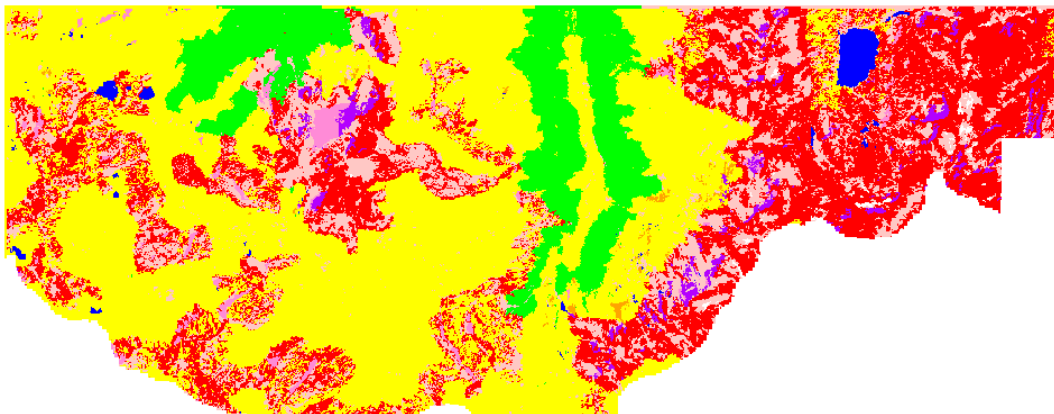


FIGURE 58 – avec probabilité CLC2000 uniquement : (CLC2000 : 1 - MNT : 0 - radiométrie : 1)

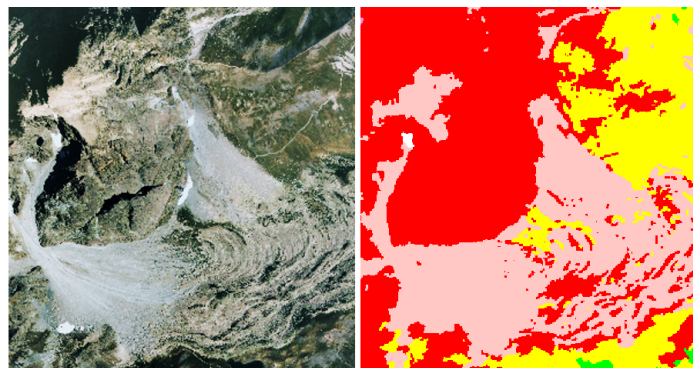


FIGURE 59 – Exemple de classification obtenue

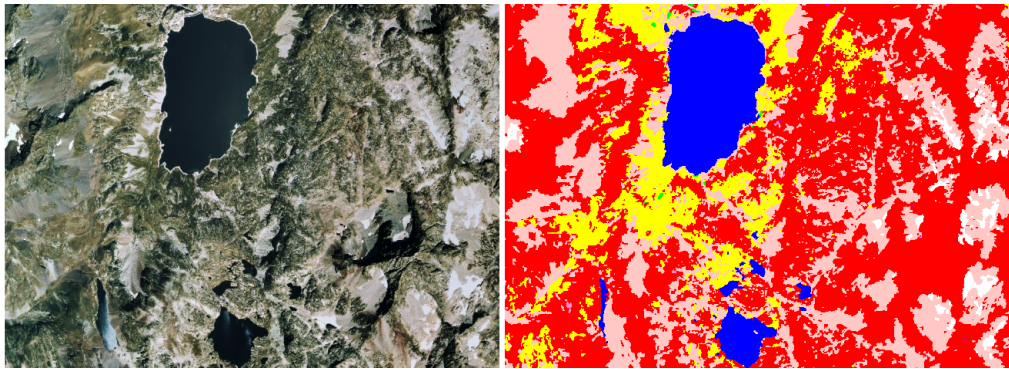


FIGURE 60 – Exemple de classification obtenue

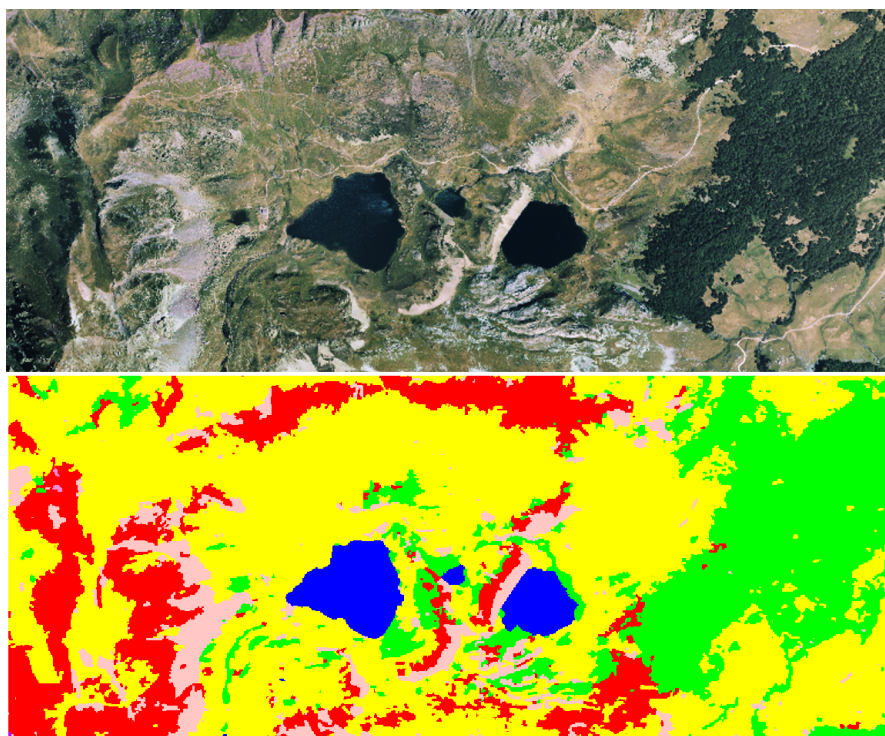


FIGURE 61 – Exemple de classification obtenue

Quelques commentaires On peut constater que, logiquement, plus le poids attribué à CORINE Land Cover augmente, plus le résultat obtenu est généralisé.

Les meilleurs résultats sont obtenus pour un poids de 75% attribué au MNT et un poids de 25% donné à CORINE Land Cover, ou un poids de 50% pour le MNT et pour CORINE Land Cover. Toutefois, le résultat obtenu pour cette seconde configuration commence à être un peu trop généralisé.

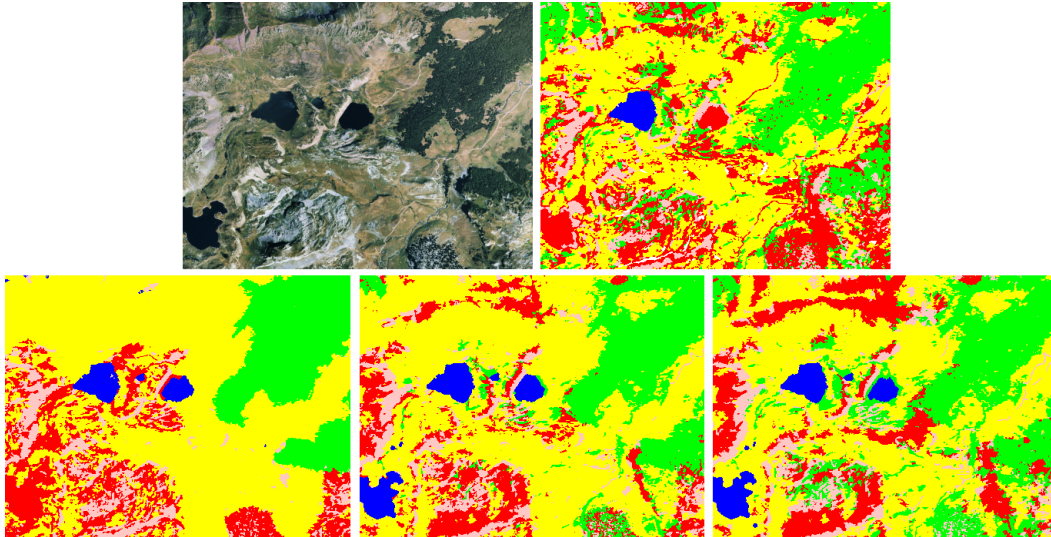


FIGURE 62 – Influence de la pondération entre connaissances issues du relief et de CLC2000 sur la généralisation du résultat

Quelques chiffres Pour chaque test effectué, une matrice de confusion (présentée dans le tableau 4) est calculée à partir de zones témoin saisies. Contrairement à la zone de Saint-Christophe, ces zones témoin sont disséminées dans l'image, afin que tous les thèmes soient pris en compte lors de l'évaluation. Néanmoins, les zones témoin ont été choisies de telle manière que leur appartenance à une classe soit certaine. On ne prend donc pas en compte lors de l'évaluation de régions dont la classe est difficile à identifier pour un opérateur, comme pour *AVET*. Les chiffres obtenus sont donc à considérer avec précautions. Par ailleurs, certains thèmes, plus présents que d'autres, risquent donc de présenter davantage de zones témoin).

Les résultats obtenus à l'issue de la classification sont toujours moins bons pour les classes à l'ombre que pour les classes à la lumière.

Les zones à l'ombre sont moins importantes que les zones à la lumière. Par conséquent, lors de l'apprentissage, on dispose de moins de pixels d'entraînement pour les classes à l'ombre que pour les classes à la lumière. Le modèle obtenu pour les classes à l'ombre risque donc de davantage "coller" aux données d'apprentissage et de donner une probabilité d'appartenance à la classe faible pour une zone de la même classe de radiométrie un peu différente. Par ailleurs, une partie de l'information radiométrique des images aériennes originales dans les zones d'ombre a pu être perdue du fait des traitements radiométrique qu'elles ont subi au cours de la production de la BDOOrtho.

Par ailleurs, on disposera également de moins de zones témoins, avec le risque d'avoir des statistiques non significatives.

TABLE 4 – Taux de bonne classification (précisons “utilisateur” et “producteur”) pour les résultats obtenus pour des pondérations différentes entre les différentes sources d’information.

ML : radiométrie uniquement

1000 : 1 pour CLC, 0 pour relief

7525 : 0,75 pour CLC, 0,25 pour relief

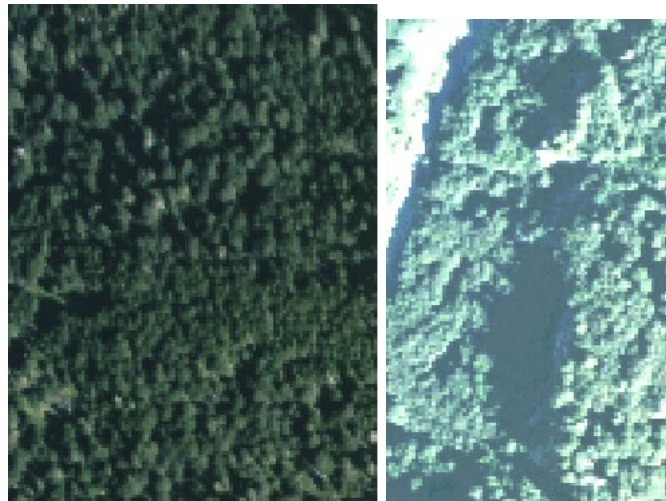
5050 : 0,5 pour CLC, 0,5 pour relief

2575 : 0,25 pour CLC, 0,75 pour relief

	<i>ML</i>		1000		7525		5050		2575	
	<i>user-acc</i>	<i>pro-acc</i>	<i>user-acc</i>	<i>pro-acc</i>	<i>user-acc</i>	<i>pro-acc</i>	<i>user-acc</i>	<i>pro-acc</i>	<i>user-acc</i>	<i>pro-acc</i>
Eau à la lumière	59,4	12,5	99,7	77,4	100,0	77,6	100,0	77,6	100,0	50,9
Forêt à la lumière	79,3	74,7	78,3	92,0	88,3	97,5	95,6	99,1	97,8	99,4
Alpage à la lumière	94,9	76,0	90,0	75,8	95,3	86,9	97,2	95,8	97,1	98,3
Rochers à la lumière	54,5	78,2	58,4	74,7	67,8	84,4	75,1	89,4	74,9	90,3
Éboulis à la lumière	89,3	76,2	86,3	85,3	88,8	85,3	90,2	84,6	90,7	83,0
Glaciers à la lumière	44,3	96,5	94,2	73,3	98,3	73,2	98,3	72,2	99,8	75,4
Eau à la l’ombre	/	0,0	/	0,0	/	0,0	/	0,0	/	0,0
Forêt à la l’ombre	/	0,0	/	0,0	/	0,0	/	0,0	/	0,0
Alpage à la l’ombre	86,9	9,2	/	0,0	/	0,0	/	0,0	100,0	1,9
Rochers à la l’ombre	26,1	76,2	54,7	64,3	56,8	64,6	63,7	63,8	65,4	59,7
Éboulis à la l’ombre	10,8	32,3	50,3	26,4	49,4	26,9	27,7	27,1	27,0	35,9
Glaciers à la l’ombre	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
Pixels bien classés	73,6		78,7		85,7		90,2		90,6	
Eau	59,4	12,3	99,7	76,2	100,0	76,4	100,0	76,4	100,0	50,1
Forêt	79,6	73,1	78,7	90,2	89,0	95,8	96,5	97,5	98,8	97,9
Alpage	95,1	74,1	90,9	74,2	96,3	85,1	98,4	94,0	98,7	96,8
Rochers	50,9	84,4	62,3	78,8	71,0	87,2	78,5	91,3	78,5	91,2
Éboulis	79,8	74,6	85,6	83,1	88,0	83,1	87,8	82,4	87,3	81,2
Glaciers	44,3	96,5	94,3	73,3	98,3	73,2	98,3	72,2	99,8	75,4
Pixels bien classés	75,0		80,1		87,4		91,9		92,5	

Les résultats obtenus affichent environ 80% de pixels bien classés. Sur la zone d'étude, il n'y avait à l'ombre ni zones d'eau, ni glaciers de taille vraiment significative.

Aucune des zones de forêt et d'alpage à l'ombre n'a été correctement classée. Les zones de forêt à la lumière comprennent en fait de petites zones d'ombres, qui sont prises en compte lors de l'apprentissage. Aussi, certaines zones de forêt à l'ombre sont ensuite facilement classées comme des zones de forêt à la lumière.



Dans d'autres cas, la forêt à l'ombre est classée parmi les rochers à l'ombre. Ces deux classes sont en effet très sombres et radiométriquement difficiles à distinguer. Par ailleurs, les zones de forêt à l'ombre correspondent souvent à une pente assez forte, et sont dominées par des zones de rochers : on peut donc se trouver dans le cas où l'information issue du MNT penche pour une occupation du sol du type rochers ou éboulis et où au sein d'une même région de la segmentation, on trouve à la fois de la forêt et des rochers, voire où la forêt cache ce thème sur l'image.

L'introduction de connaissances sur les zones d'ombre permet toutefois d'éviter que ce type de confusions ne se produise là où la forêt à l'ombre n'est due qu'à des différences de hauteurs entre les arbres : la forêt à l'ombre est alors considérée comme de la forêt à la lumière.

Les zones entièrement à l'ombre sont plus rares que les zones à la lumière. Il s'agit la plupart du temps de zones de rochers, ou dans une moindre mesure d'éboulis (au pied de falaises rocheuses).

Un problème analogue se pose pour les confusions alpages à l'ombre / rochers à l'ombre et éboulis à l'ombre / rochers à l'ombre.

Il est souvent difficile de séparer les zones de rochers à l'ombre des zones d'autres thèmes à l'ombre lors de la segmentation (du moins si l'on souhaite éviter la sur-segmentation des zones exposés à la lumière). Il est d'ailleurs parfois difficile de les distinguer visuellement.

En dehors des cas précédents liés aux ombres, des confusions forêt / alpage continuent à se produire assez fréquemment : certaines zones d'alpage assez sombres étant classées parmi les zones de forêt. Ces confusions ne sont pas très gênantes, puisqu'il n'est pas prévu d'utiliser le résultat de la classification pour cartographier les thèmes 'alpage' et 'forêt' qui seront récupérés à partir d'autres sources.

Les confusions rochers/éboulis à la lumière / alpage à la lumière restent assez fréquentes, et se produisent dans les deux sens. Il n'est pas toujours évident de distinguer ces deux classes : des rochers peuvent être partiellement recouverts par de la végétation. Par ailleurs, pour une pente forte, les probabilités issues du MNT donnent un poids plus important aux rochers ; ainsi des zones d'alpages vont être classées parmi les rochers. Le cas des défilés rocheux est un peu différent. Il s'agit souvent de zones rocheuses isolées parmi les alpages. Comme la pente est généralement forte auprès de ces zones, un poids trop important donné aux probabilités issues du MNT cause la classification des zones d'alpage voisines dans la classe "rochers" (La végétation y est d'ailleurs un peu plus clairsemée). Un poids trop fort donné à CORINE Land Cover cause l'inverse. Par ailleurs, des confusions rochers à la lumière / éboulis à la lumière se produisent souvent dans ces zones de défilés dans

lesquelles les rochers sont très clairs.

6.2.4 Introduction de probabilités sur les zones d'ombre



FIGURE 63 – Probabilité de se trouver à l'ombre

Les résultats obtenus sont les suivants (figures 64 et 65) :

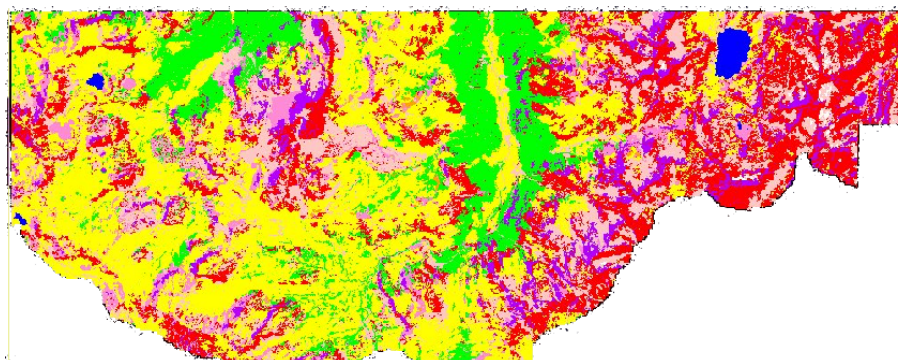


FIGURE 64 – Classification obtenue sans connaissances *a priori* sur les ombres

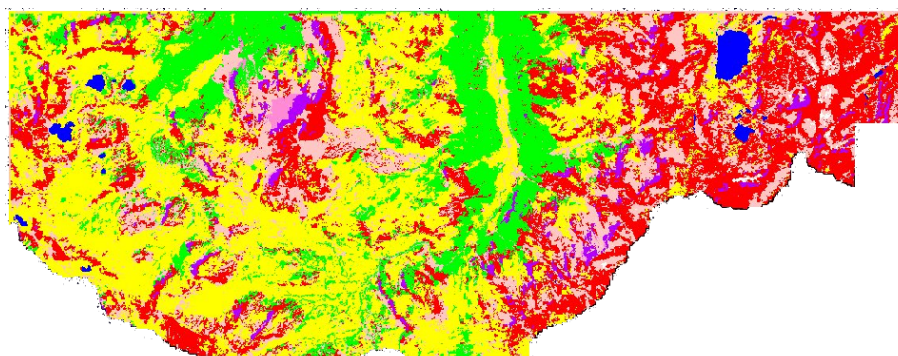


FIGURE 65 – Classification obtenue en prenant en compte des connaissances *a priori* sur les ombres

L'introduction de cette connaissance permet ici notamment d'éviter que toute zone un peu sombre (notamment en forêt) soit classée parmi les rochers ou les éboulis à l'ombre. Elle évite également un certain nombre de confusions entre des surfaces d'eau (très sombres) à la lumière et des zones de rochers à l'ombre.

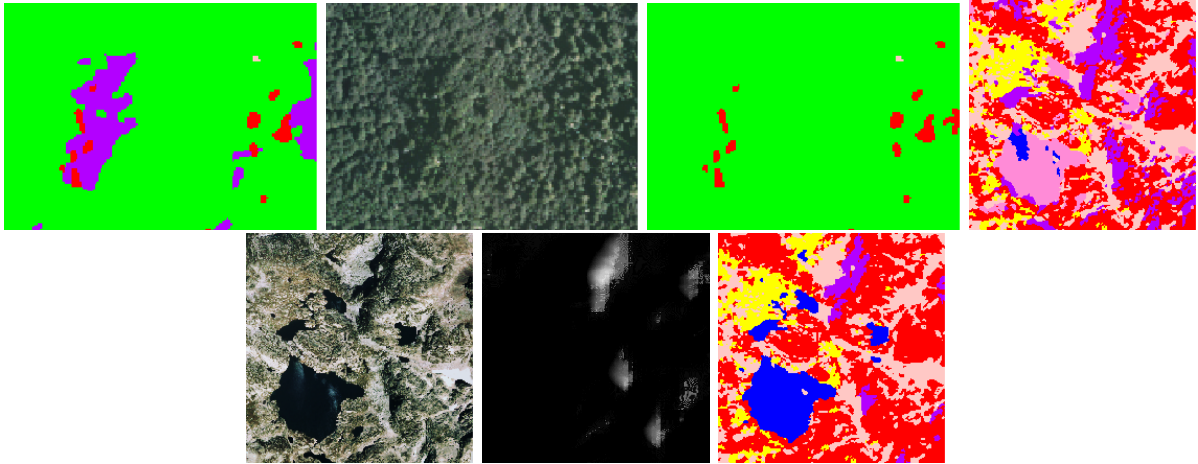


FIGURE 66 – À gauche, classification obtenue sans connaissances sur les ombres ; à droite, classification obtenue après introduction de connaissances sur les ombres

Elle présente néanmoins quelques risques : en effet, ainsi qu’il a déjà été dit, le MNT reste imprécis et les dates de prise de vue exactes ne sont pas connues (puisque l’on travaille sur une mosaïque d’images orthorectifiées). Des “erreurs” lors du calcul de la probabilité de se trouver à l’ombre se produisent donc. On peut alors par exemple classer dans les thèmes à la lumière une zone à l’ombre (ou inversement). Sur la zone d’étude, on rencontre quelques erreurs de ce type mais elles ne sont pas gênantes.

On rencontre deux autres limites déjà citées plus haut :

- la segmentation dans les zones d’ombre ne donne pas les mêmes “résultats” que dans les zones exposées à la lumière : les régions sont fusionnées plus facilement dans les zones d’ombre.
- cette détection des ombres ne prend pas forcément en compte les autres variations d’éclairement dues au relief.

6.2.5 Utilisation d’un MNT “nouveau RGE alti”

Les tests précédents ont été réalisés en utilisant le MNT “BDAlti”. Ainsi qu’il a déjà été dit, un MNT “Nouveau RGE Alti” était également disponible sur la zone. Il était donc intéressant de tester l’influence du MNT utilisé sur les résultats obtenus.

Ainsi que le montre l’illustration, les changements apportés par le nouveau MNT ne sont pas très nombreux. Ils concernent le plus souvent des détails. Certains sont des améliorations, d’autres non.

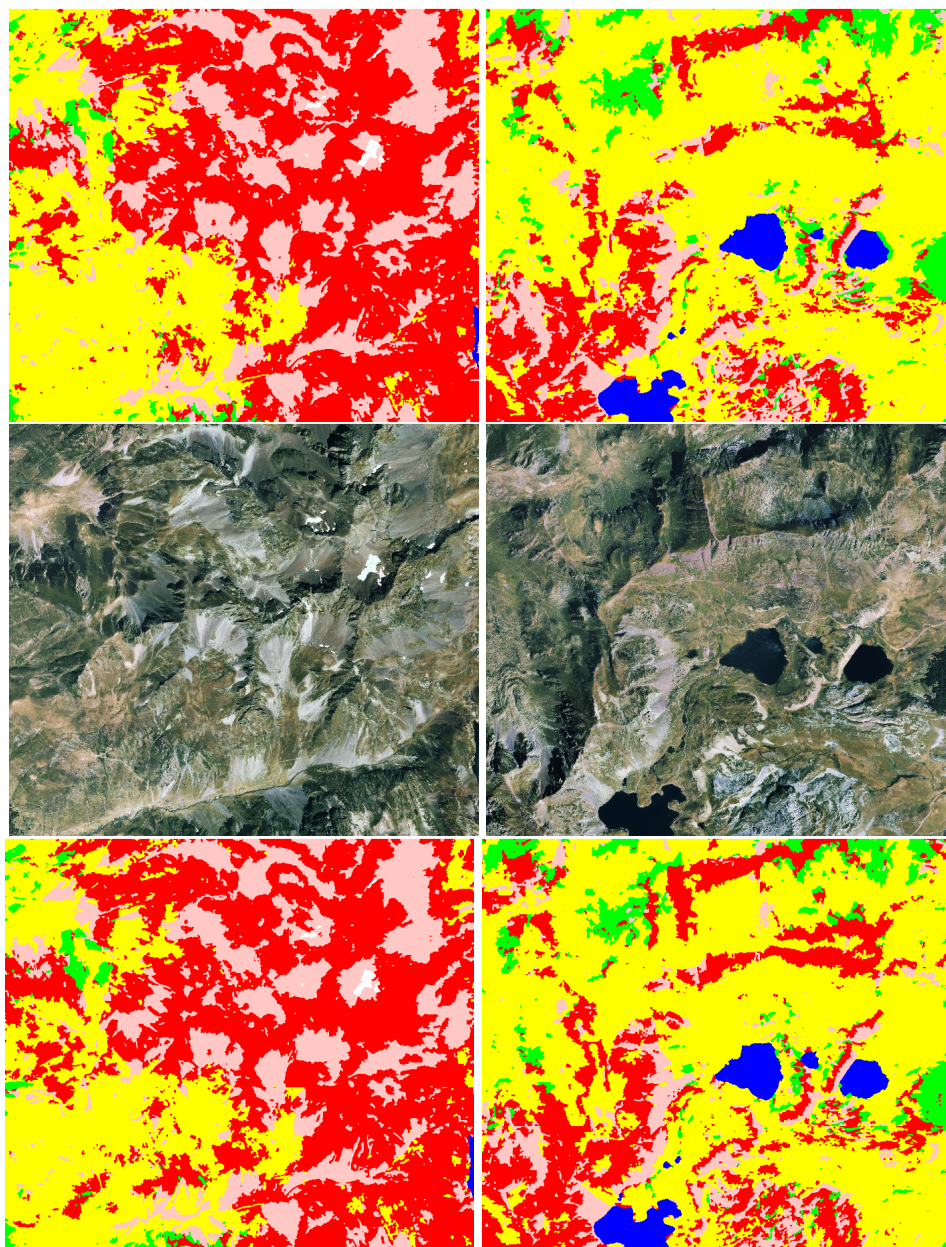


FIGURE 67 – En haut : résultats obtenus avec le MNT “BDAlti”, au milieu : ortho-images, en bas : résultats obtenus avec le MNT “Nouveau RGE Alti”

7 Zone d'étude "Modane"

7.1 Présentation de la zone et des principales difficultés rencontrées

Cette troisième zone d'étude est une zone de haute montagne se situant dans les Alpes. L'altitude y est comprise entre 1300 et 3690 m.



FIGURE 68 – Localisation de la zone d'étude

Les thèmes de la classification sont tous présents sur la zone.

Cette zone présente l'intérêt d'être couverte par la BD Topo standard :

- Le MNT disponible sur cette zone est donc un MNT BDTopo.
- On dispose déjà de données sur les rochers, les éboulis et les glaciers acquises par un opérateur sur l'ensemble de la zone. Même si ces données ne sont pas à jour (saisie dans les années 1990), elles permettent d'avoir un bon élément de comparaison entre ce qui pourrait être fait par une saisie effectuée par un opérateur et ce que l'on obtient par classification semi-automatique. Elles permettent donc une évaluation des résultats sur l'ensemble de la zone.

L'ortho-image disponible sur la zone a été réalisée à partir de clichés acquis par une caméra numérique IGN. Elle comporte les canaux rouge-vert-bleu-proche infrarouge et a subi une égalisation physique.

Sur cette zone imagée plus récemment, les problèmes liés à l'ortho-image sont moins importants mais subsistent, comme l'illustre la figure 70. Ce sont les ressemblances entre classes distinctes et plus particulièrement entre rochers et éboulis (dont comme d'habitude la radiométrie varie en outre au sein de la zone) mais aussi les confusions neige/glacier qui posent problème.



FIGURE 69 – Aperçu de l'ortho-image sur la zone d'étude

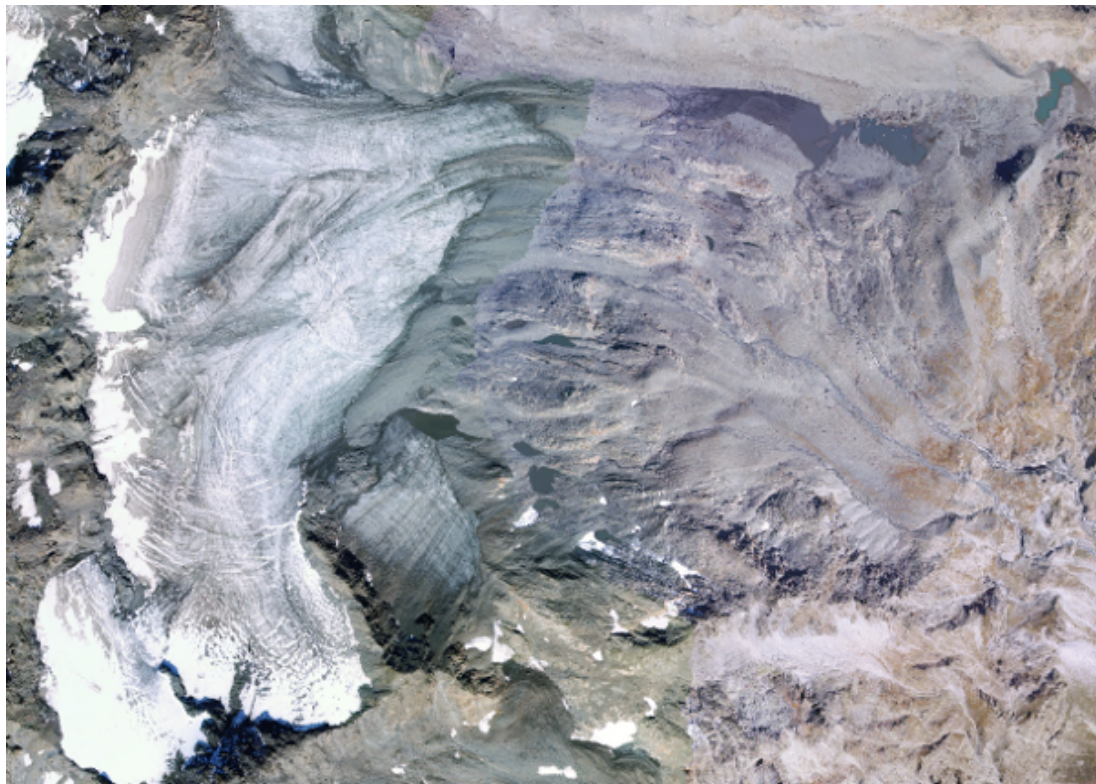


FIGURE 70 – Extrait de la BD Ortho sur la zone de Modane : classes distinctes aux radiométries assez proches et variations de la radiométrie au sein d'une même classe. Sur cet extrait sont présents rochers, éboulis, glaciers et pelouses...

7.2 Tests et résultats

Par ailleurs, l'emprise de la zone d'étude correspond à l'emprise d'une feuille de la carte de base : il s'agissait en effet cette fois de se placer dans le cadre opérationnel de la production. Pour cette raison, peu de tests ont donc dans un premier temps été effectués : il s'agissait avant tout d'obtenir un résultat, d'effectuer (et évaluer) les reprises manuelles nécessaires et de le transformer en carte (cf partie III) afin de valider le processus standard déjà mis en œuvre sur les deux précédentes zones test. Ainsi, seules les combinaisons de canaux (et plus particulièrement "intensité", "teinte" et "ndvi") ayant précédemment fourni les meilleurs résultats lors des tests précédents ont été utilisées.

Des variantes de ce processus ont ensuite été expérimentées : il s'agit d'une part de l'introduction de connaissances issues d'images LANDSAT TM dans le processus d'extraction standard (cf partie 4.5) et d'autre part de l'approche hiérarchique décrite dans la partie 4.8.

Comparaison à la BDTopo L'évaluation quantitative de la classification a cette fois été calculée à partir des données de la BDTopo. En effet, contrairement aux zones d'étude précédentes, celle-ci était couverte par de la BDTopo dans sa version initiale dont la nomenclature comportait les différents thèmes de la classification à l'exception des alpages.

Si ces données offrent donc ici l'avantage de pouvoir évaluer quantitativement sur l'ensemble de la zone d'étude les résultats de la classification par rapport à une vérité terrain assez analogue à ce que l'on souhaiterait obtenir, il faut toutefois garder en mémoire que cette comparaison présente en pratique quelques inconvénients.

- Ces données ont été acquises dans les années 1990 et ne sont donc pas forcément à jour. Par exemple, depuis l'acquisition de ces données BDTopo, les glaciers ont régressé au profit des autres thèmes, et plus particulièrement des rochers et des éboulis ; et il est donc parfaitement prévisible que des classifications exactes seront dès lors considérées comme des confusions en certains points. On peut donc supposer que les résultats de l'extraction de l'occupation du sol seront en réalité meilleurs qu'annoncés par cette évaluation quantitative pour ces trois thèmes.
- **Lacunes dans la BDTopo** Outre ce problème de mise à jour, la BDTopo peut présenter des lacunes. Ainsi, la figure 77 présente des exemples de rochers absents de la BDTopo mais détectés lors de l'extraction semi-automatique et semblant suffisamment escarpés pour mériter d'être saisis.
- **Plusieurs solutions ?** Dans certaines zones, les thèmes éboulis et rochers se ressemblent fortement (tant du point de vue de la radiométrie que de la texture...). L'opérateur BDTopo et les algorithmes de classification peuvent alors y avoir fait des choix différents mais parfois tout aussi défendables au vu de l'ortho-image. Ceci est notamment illustré par les figures 83 et 84.

7.2.1 Processus "standard"

Il s'agit ici du processus standard déjà mis en œuvre sur les deux zones d'étude précédentes.

Les résultats présentés ci-dessous par le tableau 5 et les illustrations des figures 71 et 72) ont été obtenus en donnant un poids de 0,75 aux informations issues du relief et un poids de 0,25 à celles issues de CLC2000. L'association de canaux utilisée est toujours formée par "l'intensité", "la teinte" en l'indice "ndvi".

75,6% des pixels sont bien classés en utilisant les connaissances complémentaires dans le processus de classification tandis que seuls 67,6% des pixels étaient bien classés en utilisant exclusivement l'information radiométrique.

Les résultats sont en réalité meilleurs qu'annoncés par la matrice de confusion pour les glaciers, rochers et éboulis. En effet, depuis l'acquisition des données BDTopo, les glaciers ont régressés au profit des thèmes minéraux (avec pour conséquence lors de l'évaluation par rapport à la BDTopo une précision utilisateur des rochers et des éboulis plus faible qu'en réalité, de même pour la précision producteur des glaciers. Par ailleurs, dans certaines zones où les thèmes éboulis et rochers se ressemblent, l'opérateur et l'algorithme ont fait des choix différents mais souvent tous deux défendables au vu de l'ortho-image.

Un certain nombre de confusions glacier / étendue de neige se produisent également.

Outre la comparaison par rapport à la BDTopo, les résultats obtenus ont également été confrontés, de manière visuelle, à la carte actuelle. Pour cela, les masques de rochers et d'éboulis issus de la détection semi-automatique ont été superposés au fond de carte actuel (et plus précisément à la planche noire). Les figures 73, 74 et 75 en montrent quelques exemples.

TABLE 5 – Résultats obtenus par le processus standard

	<i>user-acc</i>	<i>prod-acc</i>
Eau	98,3	40,6
Forêt	98,7	88,8
Alpage	/	/
Rochers	54,2	76,5
Éboulis	68,9	52,3
Glaciers	91,5	67,3
Pixels bien classés		75,6

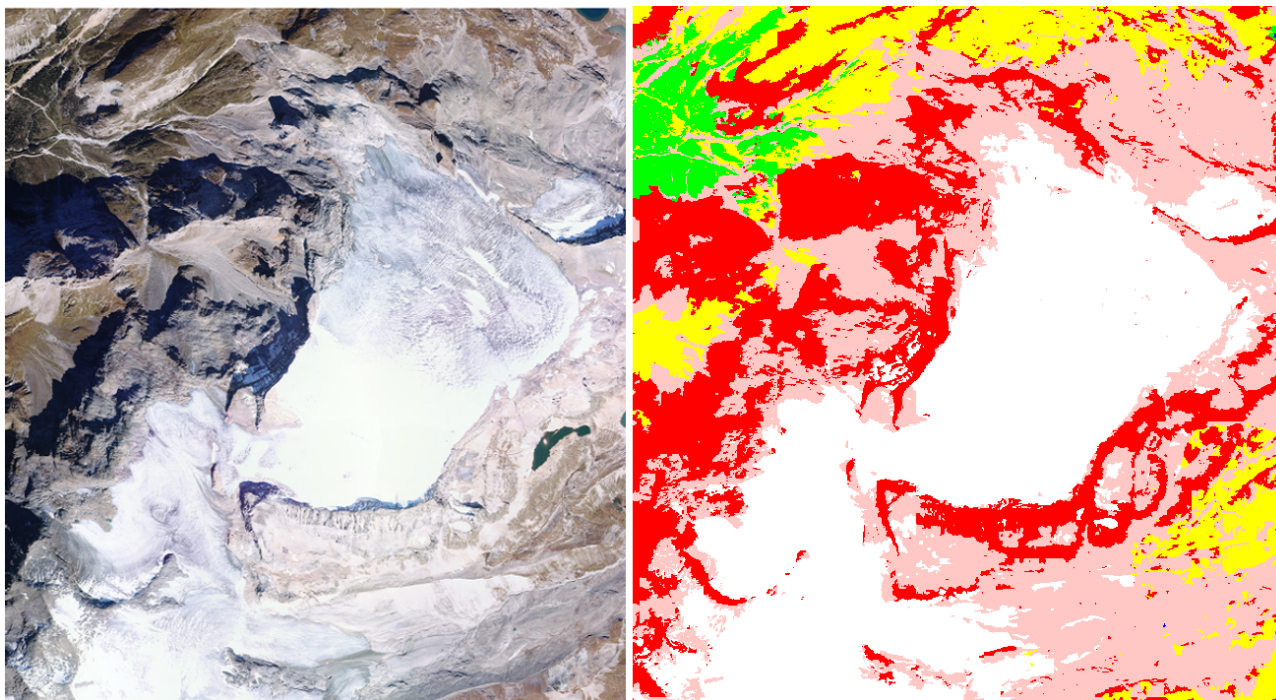


FIGURE 71 – Exemple de résultats obtenus

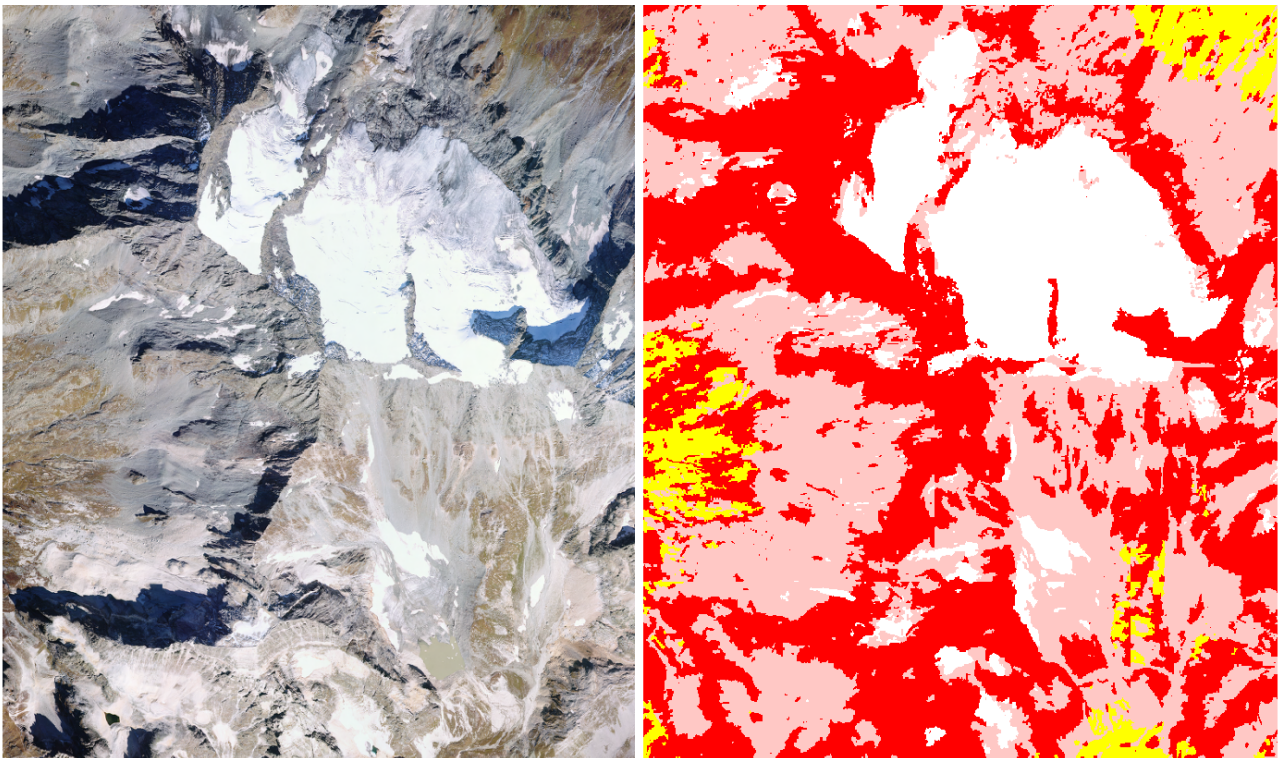


FIGURE 72 – Exemple de résultats obtenus

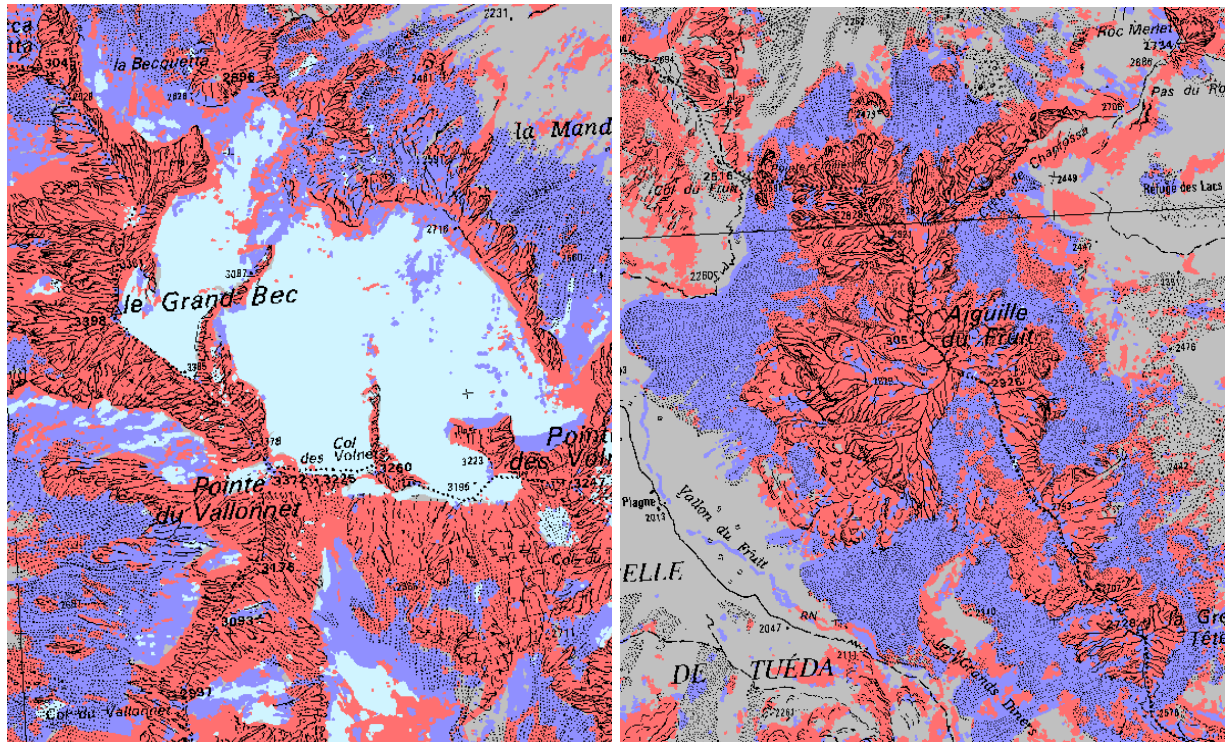


FIGURE 73 – Superposition de la détection des rochers (en rouge) et des éboulis (en mauve) et du fond de carte actuel.

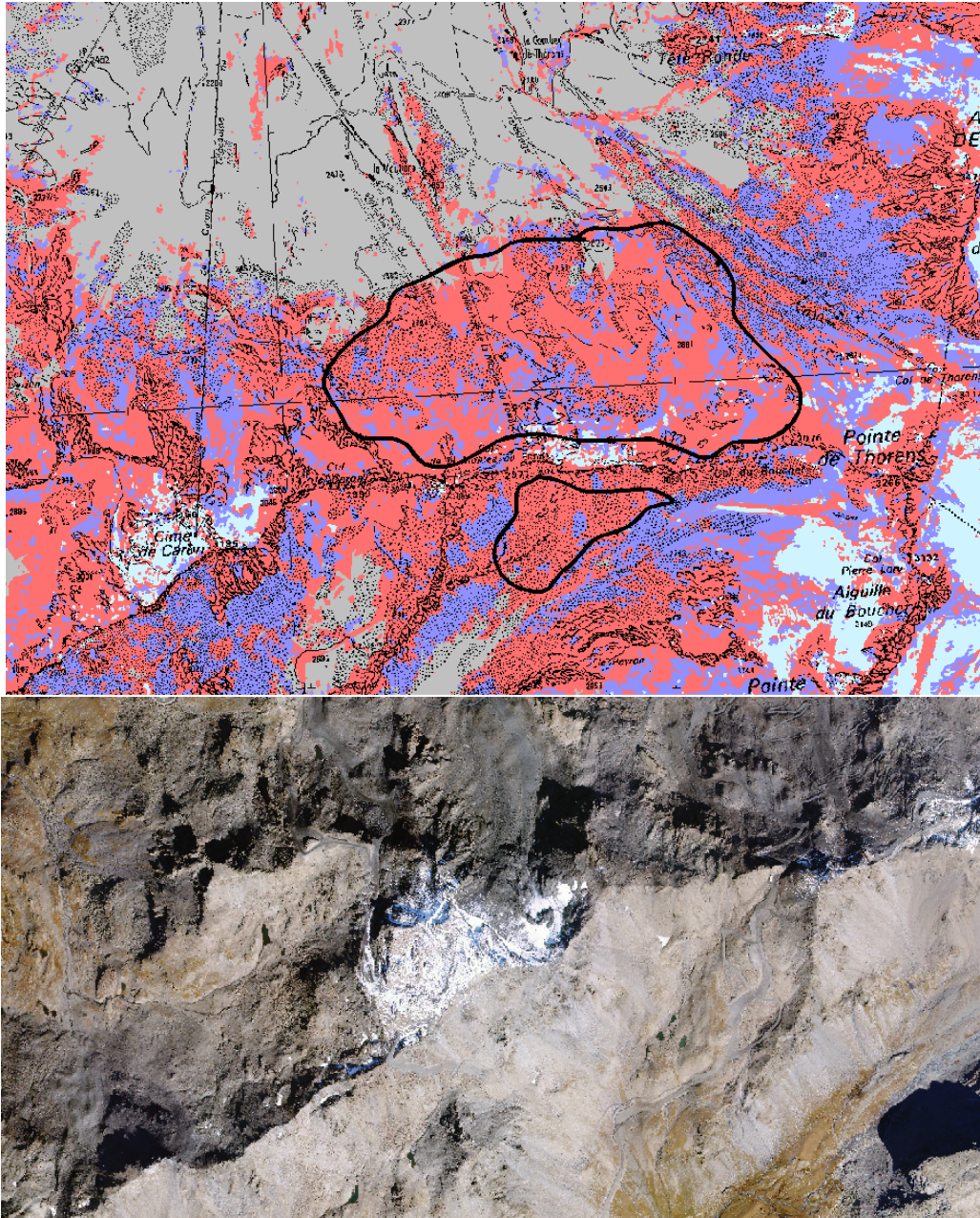


FIGURE 74 – Superposition de la détection des rochers (en rouge) et des éboulis (en mauve) et du fond de carte actuel. Il y a surdétection de rochers dans la zone entourée en noir.

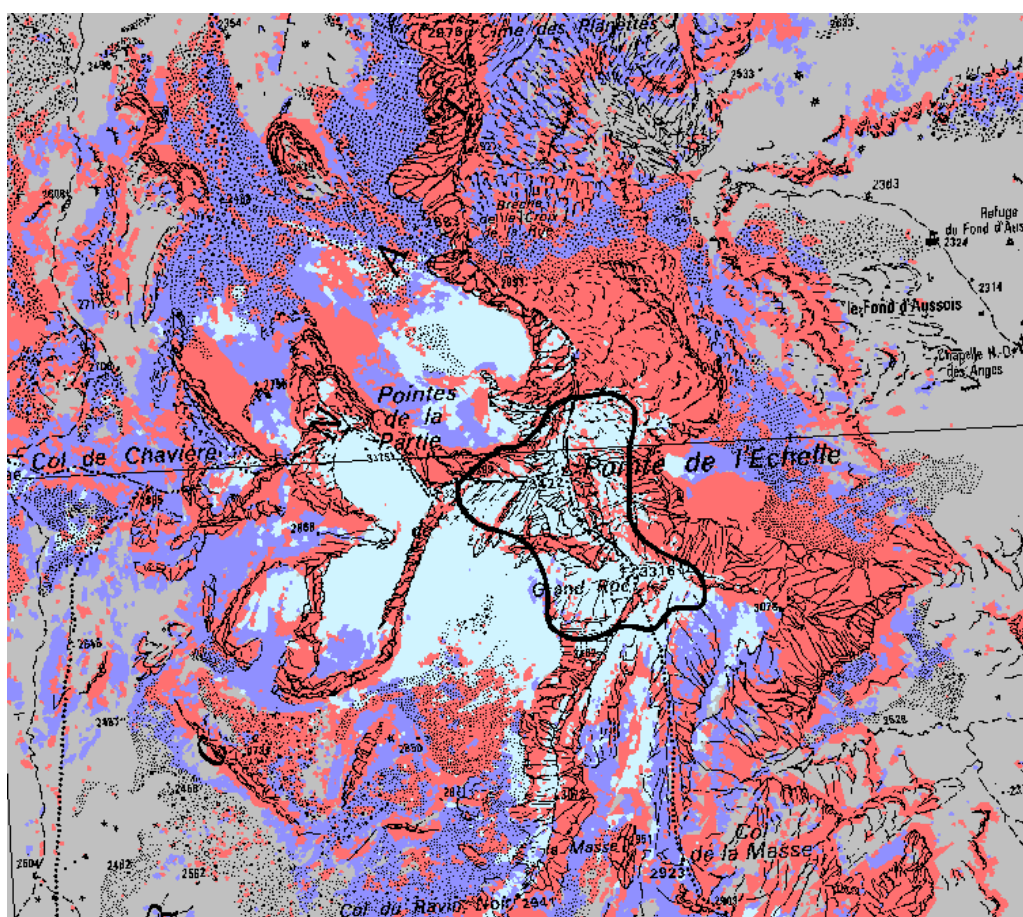


FIGURE 75 – Superposition de la détection des rochers (en rouge) et des éboulis (en mauve) et du fond de carte actuel. Les neiges résiduelles ont été classées comme du glacier.

7.2.2 Résultats obtenus avec des variantes de la méthode

Utilisation de données LANDSAT TM dans le processus de classification

Cette variante du processus consiste simplement à exploiter des données LANDSAT TM comme source d'information complémentaire, et à introduire ces connaissances dans le processus de classification de la manière décrite dans la partie 4.5.

Le principal intérêt espéré de ces données dans notre cas serait d'aider la détection des glaciers (et notamment de leurs parties couvertes d'éboulis) à la fois en terme d'exhaustivité et d'exactitude (moins de surdétection). Les informations issues de CLC2000 ne sont par contre plus utilisées : elles sont en effet notamment utiles pour connaître les zones dans lesquelles on doit s'attendre à rencontrer des glaciers, mais restent sur ce point moins précises que les informations apportées par LANDSAT TM.

Les résultats présentés dans le tableau 6 et sur les différentes figures qui suivent (sous la dénomination "processus standard + LANDSAT TM") ont été obtenus en utilisant toujours l'association de canaux utilisés formée par "l'intensité", "la teinte" en l'indice "ndvi" et en donnant un poids de 0,75 aux informations issues du relief et un poids de 0,5 à celles issues des données LANDSAT TM.

Classification hiérarchique

Comme cela a déjà été expliqué dans la partie 4.8, il s'agit de prendre en compte le fait que certains thèmes sont mieux séparés des autres pour un paramétrage donné du processus standard utilisé jusqu'à présent, c'est-à-dire pour une certaine pondération des différentes sources d'information, pour une association de canaux utilisée... L'extraction des différents thèmes d'occupation du sol s'effectue de manière hiérarchique (le processus standard de classification de l'occupation du sol étant lancé à chaque niveau avec un paramétrage spécifique) :

1. On commence par séparer la végétation (fusion des classes "forêt" et "alpage") et les surfaces d'eau des autres thèmes.

Association de canaux : "ndvi" et canal proche infrarouge.

Pondération des différentes sources d'information complémentaires : relief(0,05), CLC2000(0), LANDSAT TM(0)

Remarque : C'est surtout la radiométrie qui permet ici la distinction entre végétation, les surfaces d'eau et les autres classes. Les connaissances issues du relief sont malgré tout utiles notamment dans les zones d'ombre (où la radiométrie des différentes classes est assez semblable) afin d'éviter certaines confusions rochers-forêt.

2. Parmi les zones restantes, on souhaite séparer les glaciers des rochers/éboulis. (La légende de la classification ne comporte plus que les 3 classes "rochers", "éboulis" et "glaciers".)

Association de canaux : teinte et infrarouge

Pondération des différentes sources d'information complémentaires : relief(0,75), CLC2000(0), LANDSAT TM(0,25)

3. Parmi les zones restantes, distinction entre rochers et éboulis

Association de canaux : intensité et variance de l'intensité (au sein de fenêtre de côté 5 pixels).

Pondération des différentes sources d'information complémentaires : relief(10), CLC2000(0), LANDSAT TM(0)

Remarque : Ce sont surtout les connaissances issues du relief qui permettent ici la distinction entre ces deux classes. Néanmoins, leur radiométrie et dans une moindre mesure leur texture (bien que variable) aident également cette détection.

Les résultats de cette extraction hiérarchique de l'occupation du sol sont présentés dans le tableau 6 et sur les différentes figures qui suivent.

Résultats et discussion

Remarque : Les résultats obtenus par le processus standard restent généralement assez similaires que l'on utilise les connaissances issues de LANDSAT TM ou non. (La principale différence concerne comme prévu une légère amélioration de la détection des glaciers.) Les remarques qui suivent sont donc valables dans les deux cas.

Comparaison par rapport à la BDTopo Les remarques déjà faites plus haut demeurent valables ici :

- **Glaciers en régression** Les résultats de l'extraction de l'occupation du sol sont en réalité meilleurs qu'annoncés dans le tableau 6 pour les glaciers, rochers et éboulis. En effet, depuis l'acquisition des données BDTopo, les glaciers ont regressés principalement au profit des rochers et des éboulis, ainsi qu'on peut le constater sur les différentes illustrations qui suivent.
- **Lacunes dans la BDTopo** Outre ce problème de mise à jour, la BDTopo peut présenter des lacunes. Ainsi, la figure 77 présente des exemples de rochers absents de la BDTopo mais détectés lors de l'extraction semi-automatique et semblant suffisamment escarpés pour mériter d'être saisis.
- **Plusieurs solutions ?** Dans certaines zones, les thèmes éboulis et rochers se ressemblent fortement (tant du point de vue de la radiométrie que de la texture...). L'opérateur BDTopo et les algorithmes de classification peuvent alors y avoir fait des choix différents mais parfois tout aussi défendables au vu de l'ortho-image. Ceci est notamment illustré par les figures 83 et 84.

Détection des rochers Les deux approches testées présentent chacune des avantages et des inconvénients pour la détection des rochers et des éboulis :

- Une certaine surdétection des rochers au détriment des alpages les plus hauts se produit parfois avec le processus "standard", mais pas avec le processus "hiérarchique" (dont ce problème était une des principales raisons d'être).
- Le problème des falaises et autres zones de rochers apparaissant peu sur l'ortho-image, mais suffisamment pentues pour nécessiter d'être détectées a été présenté plus haut (voir figures 17 et 18). Ces zones rocheuses se trouvent souvent au milieu de zones d'alpage et de végétation. Par conséquent, si ces zones rocheuses parviennent encore souvent à être détectées par le processus "standard" (utilisant information radiométrique et connaissances apportées par le relief), elles sont le plus souvent omises par l'approche "hiérarchique" qui les détecte comme de la végétation dès le début de la chaîne s'appuyant principalement sur la radiométrie de l'image.
- Le processus "standard" tend ici à surdétecter les zones de rochers. Ceci s'effectue notamment au détriment des éboulis. Ceci s'explique par le fait que ces deux thèmes se ressemblent beaucoup, les rochers étant généralement plus sombres. Les zones d'éboulis les plus sombres ont tendance à être classées parmi les rochers.

Le processus "hiérarchique" effectue la distinction rochers/éboulis indépendamment de la détection des autres thèmes et donne alors un poids très important aux connaissances issues du relief (et donc de la pente) par rapport aux informations issues de l'ortho-image. Le résultat obtenu ressemble davantage à ce qui existait dans la BDTopo. Ce phénomène est particulièrement visible dans la partie "Évaluation "rochers et éboulis" uniquement" du tableau 6.

Par ailleurs, ainsi qu'on l'a déjà dit plus haut, du fait des fortes ressemblances entre rochers et éboulis, les algorithmes de classification peuvent dans certaines zones parfois faire des choix de labellisation différents mais tous aussi défendables au vu de l'ortho-image.

On pourrait donc envisager un processus hiérarchique un peu différent de celui proposé précédemment et qui se déroulerait comme suit :

1. Extraction de l'occupation du sol par le processus "standard" avec son paramétrage "standard" (canaux "intensité", "teinte" et "ndvi"; pondération : relief(0,75) CLC ou LANDSAT(0,25))
2. Fusion des masques de rochers et d'éboulis en un masque unique "minéral"
3. Re-classification des régions de ce masque en "rochers" ou "éboulis" en appliquant le processus "standard" avec un poids très fort donné aux connaissances issues du relief.

Ce processus a également été testé. L'évaluation des résultats obtenus est présenté dans le tableau 6 dans la colonne "hiérarchique2".

TABLE 6 – Évaluation des résultats obtenus par le processus “standard” (avec LANDSAT TM) et par les processus “hiérarchiques”

	Processus “standard”		Processus “hiérarchique”		Processus “hiérarchique2”	
	<i>user-acc</i>	<i>prod-acc</i>	<i>user-acc</i>	<i>prod-acc</i>	<i>user-acc</i>	<i>prod-acc</i>
Évaluation “toutes classes”						
Eau	97,32	50,13	97,32	50,13	97,32	50,13
Forêt	98,80	88,99	98,51	79,71	98,80	88,99
Alpage	/	/	/	/	/	/
Rochers	53,46	75,26	75,05	60,71	71,80	67,37
Éboulis	68,15	51,06	68,90	77,20	67,46	71,59
Glaciers	95,67	66,50	96,19	66,23	95,67	66,50
Pixels bien classés	75,2		74,4		78,7	
Évaluation “rochers, éboulis et glaciers” uniquement						
Rochers	59,56	81,16	80,61	70,85	83,43	72,66
Éboulis	69,73	65,09	70,64	90,98	69,15	91,26
Glaciers	95,69	66,62	96,20	66,29	95,69	66,62
Pixels bien classés	70,6		78,2		78,4	
Évaluation “rochers et éboulis” uniquement						
Rochers	64,75	83,25	84,43	72,46	86,98	74,52
Éboulis	83,53	65,21	83,43	91,21	82,38	91,44
Pixels bien classés	73,1		83,8		84,1	

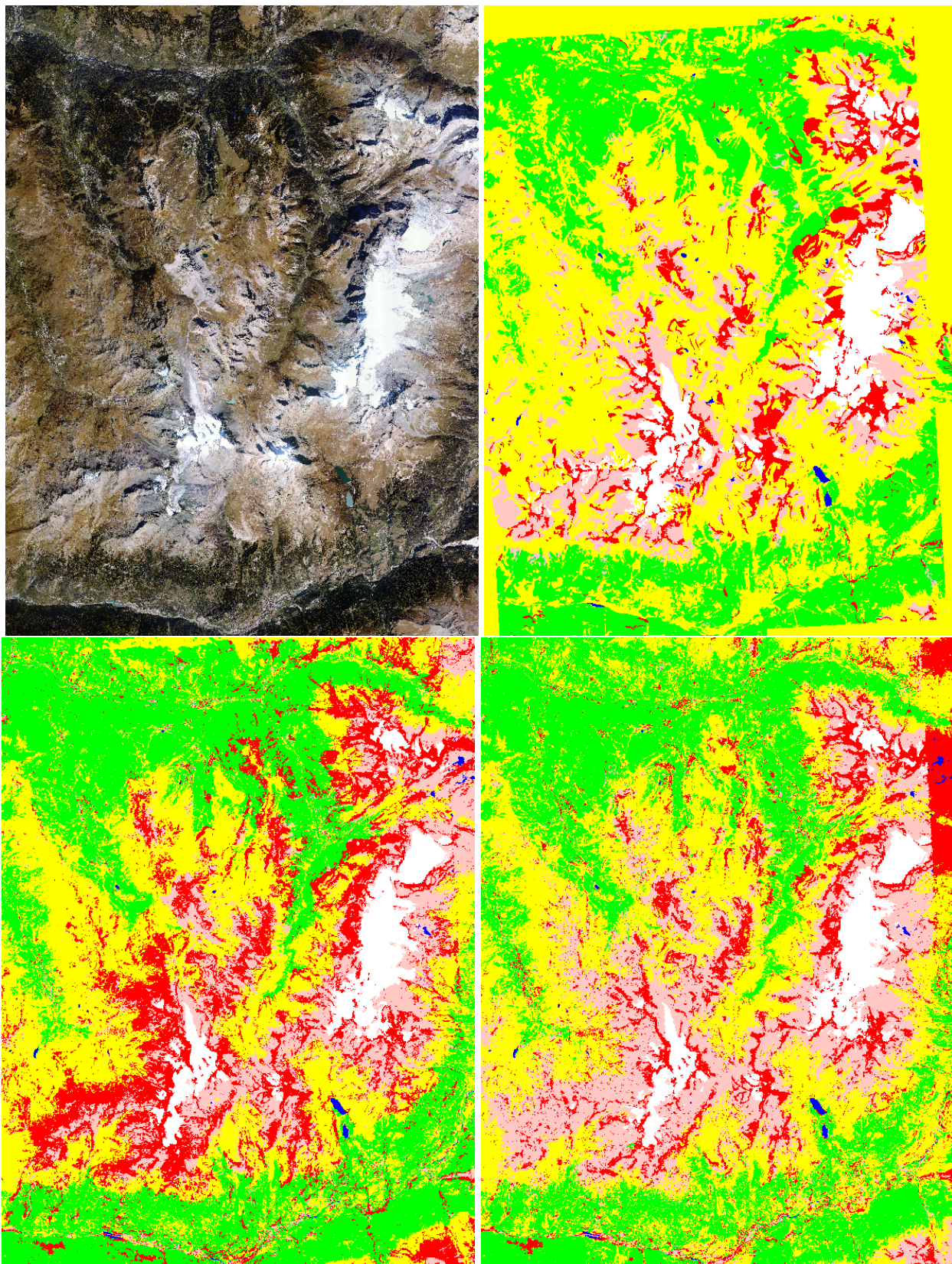


FIGURE 76 – Résultats obtenus sur l'ensemble de la zone : de haut en bas et de droite à gauche, ortho-image, occupation du sol de la BDTopo, occupation du sol extraite par le processus standard (+LANDSAT TM), occupation du sol extraite par l'approche hiérarchique

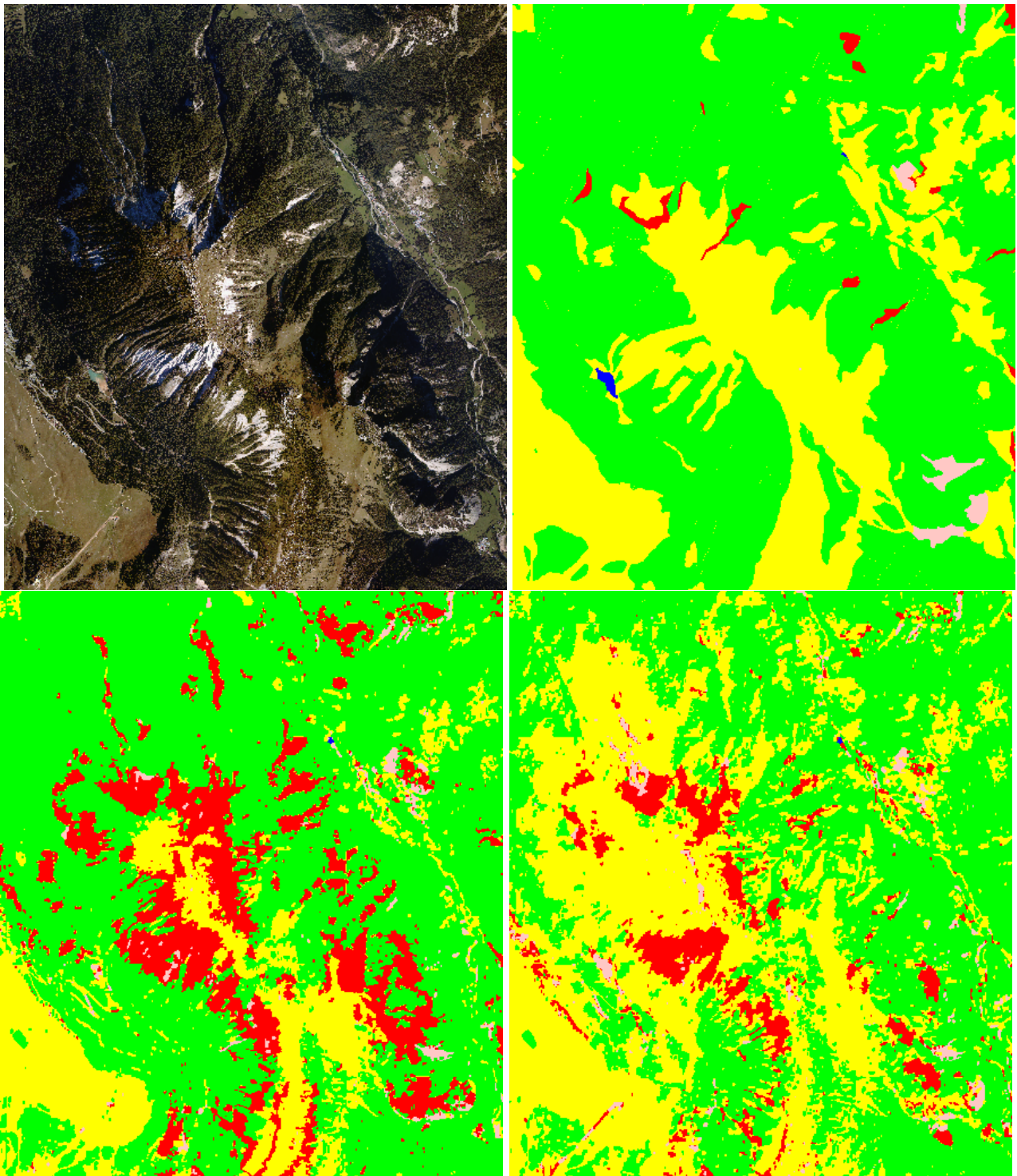


FIGURE 77 – Exemple de résultats obtenus : de haut en bas et de droite à gauche, ortho-image, occupation du sol de la BDTopo, occupation du sol extraite par le processus standard (+LANDSAT TM), occupation du sol extraite par l'approche hiérarchique. On s'aperçoit ici de l'existence de lacunes dans la BDTopo. En effet, une bonne partie des zones de rochers détectées lors de l'extraction semi-automatique semblent suffisamment escarpées pour mériter d'être saisies.

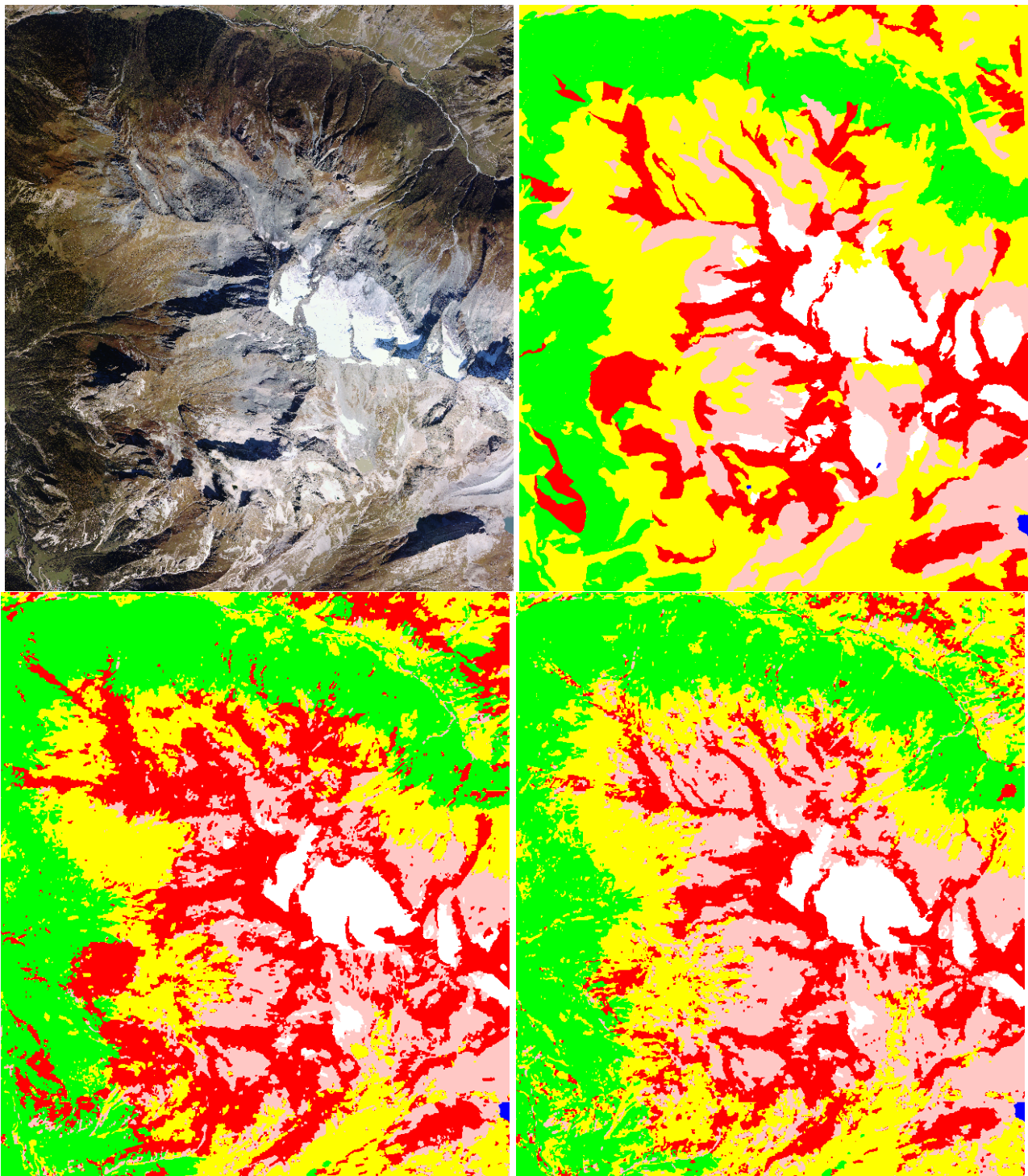
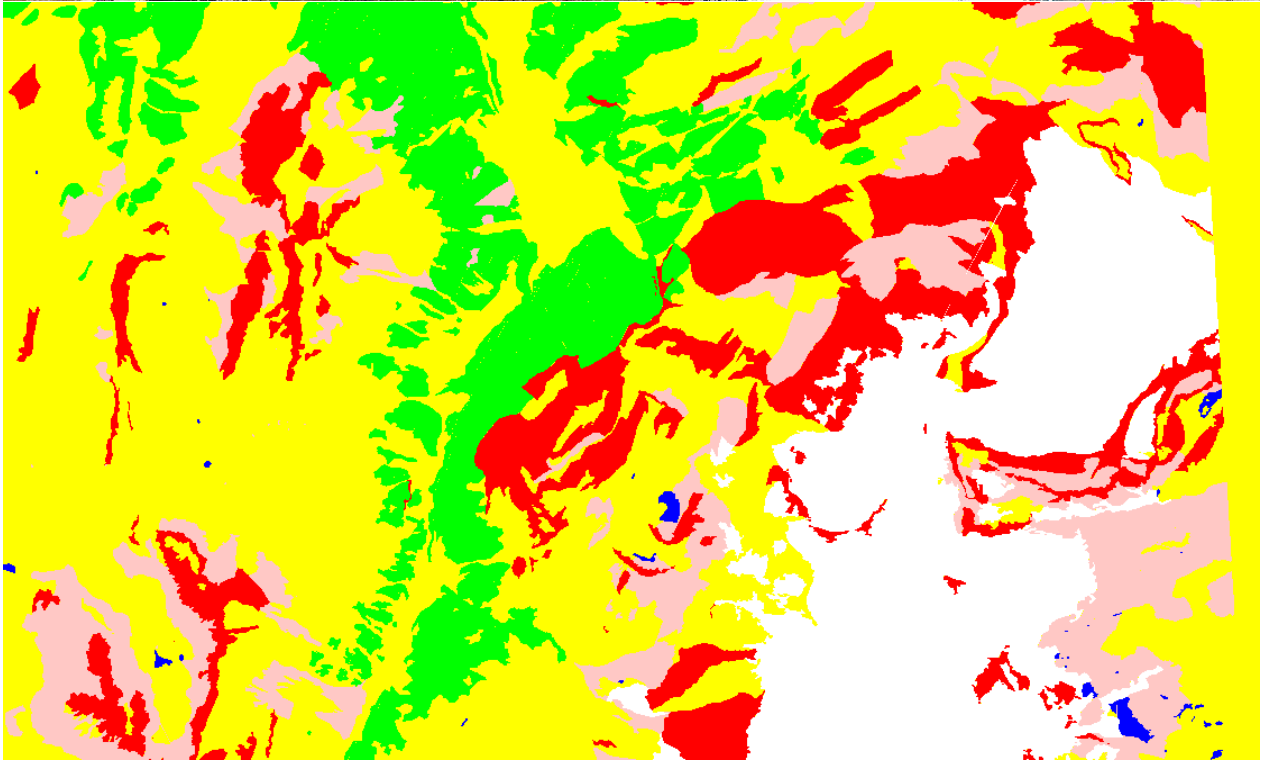
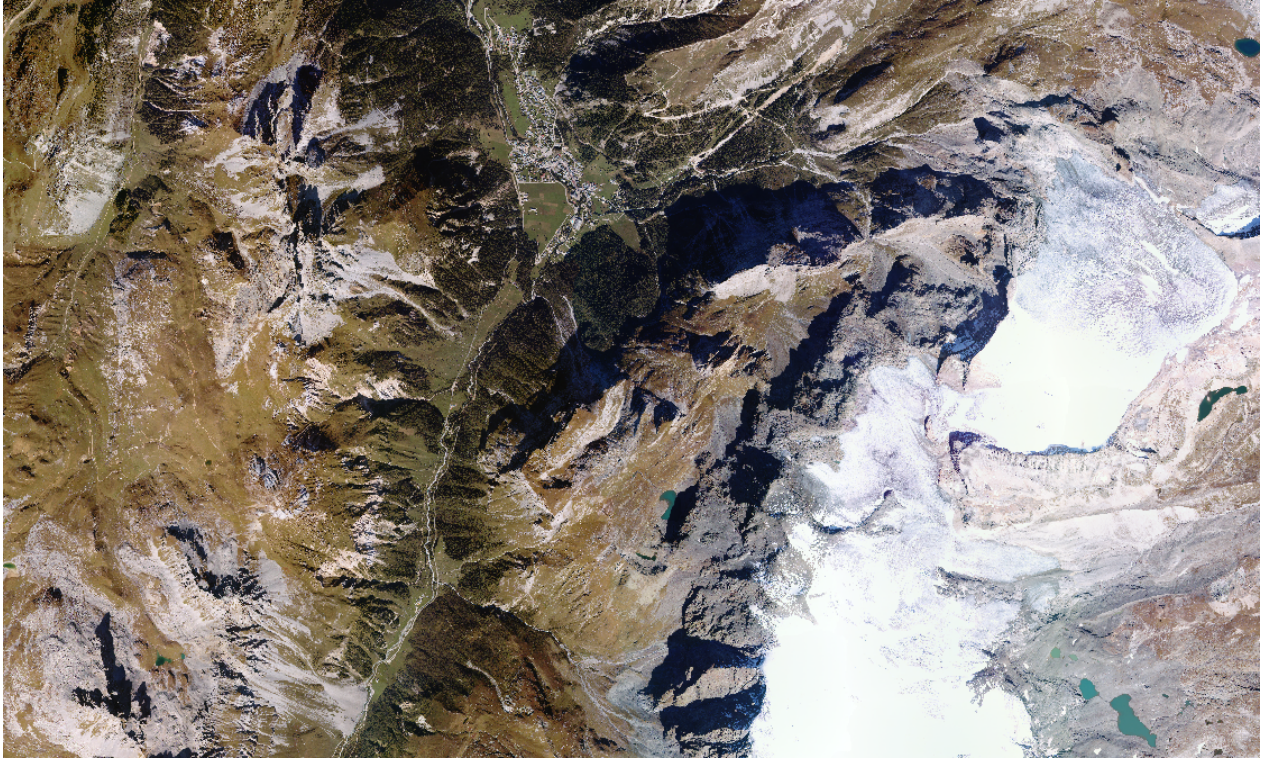


FIGURE 78 – Exemple de résultats obtenus : de haut en bas et de droite à gauche, ortho-image, occupation du sol de la BDTopo, occupation du sol extraite par le processus standard (+LANDSAT TM), occupation du sol extraite par l'approche hiérarchique. On s'aperçoit ici de la régression de certains glaciers.



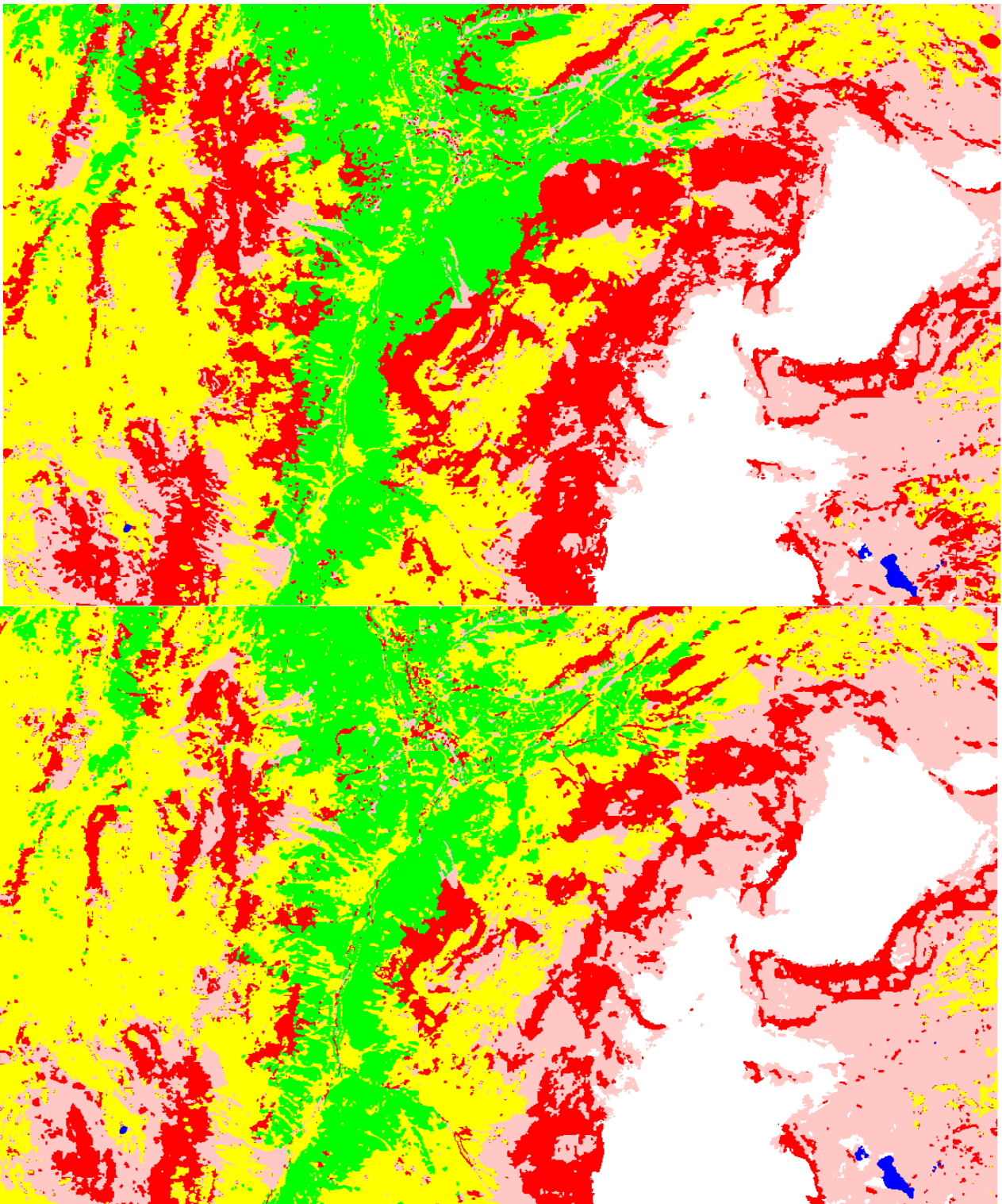
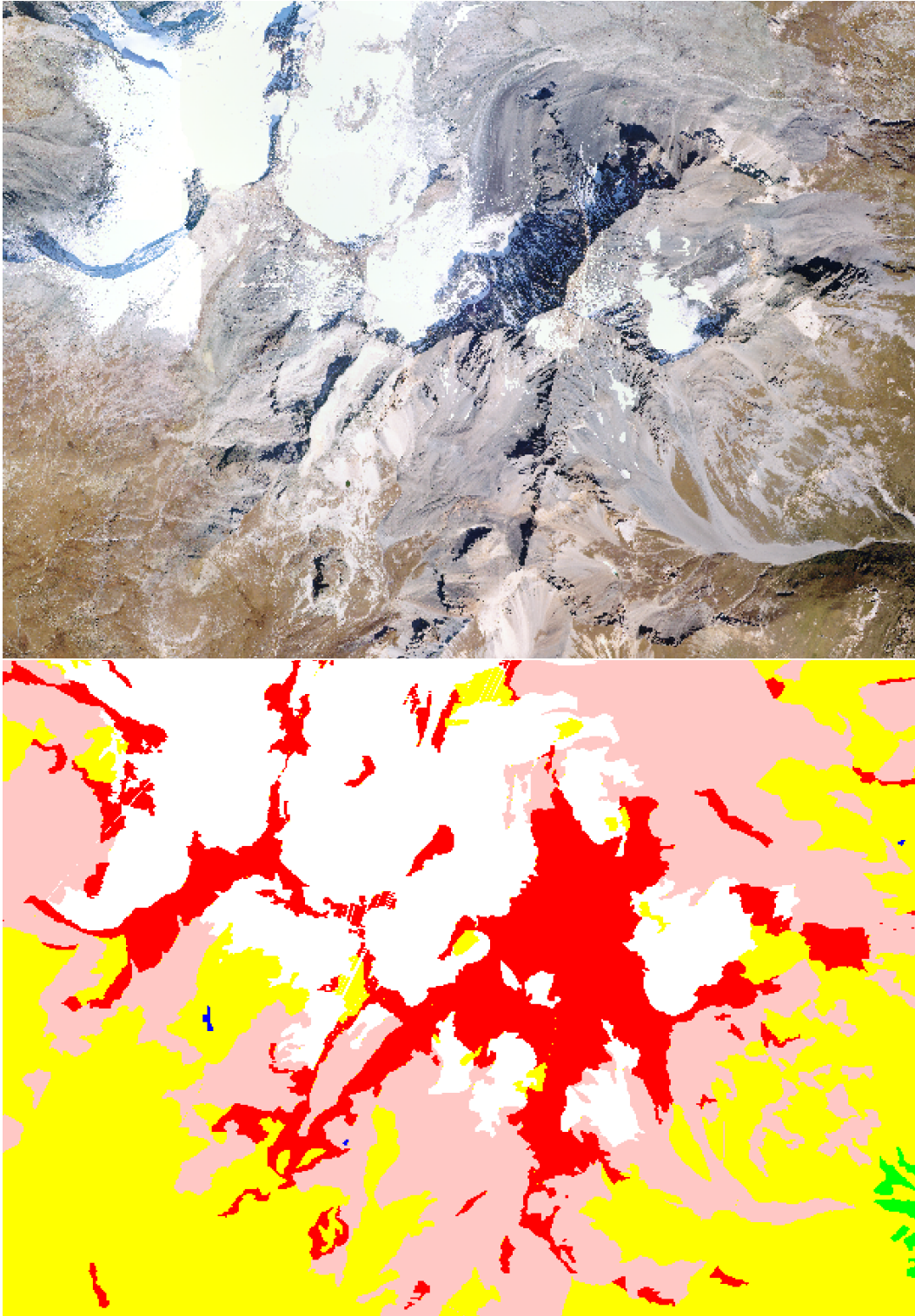


FIGURE 79 – Exemple de résultats obtenus : de haut en bas, ortho-image, occupation du sol de la BDTopo, occupation du sol extraite par le processus standard (+LANDSAT TM), occupation du sol extraite par l'approche hiérarchique.



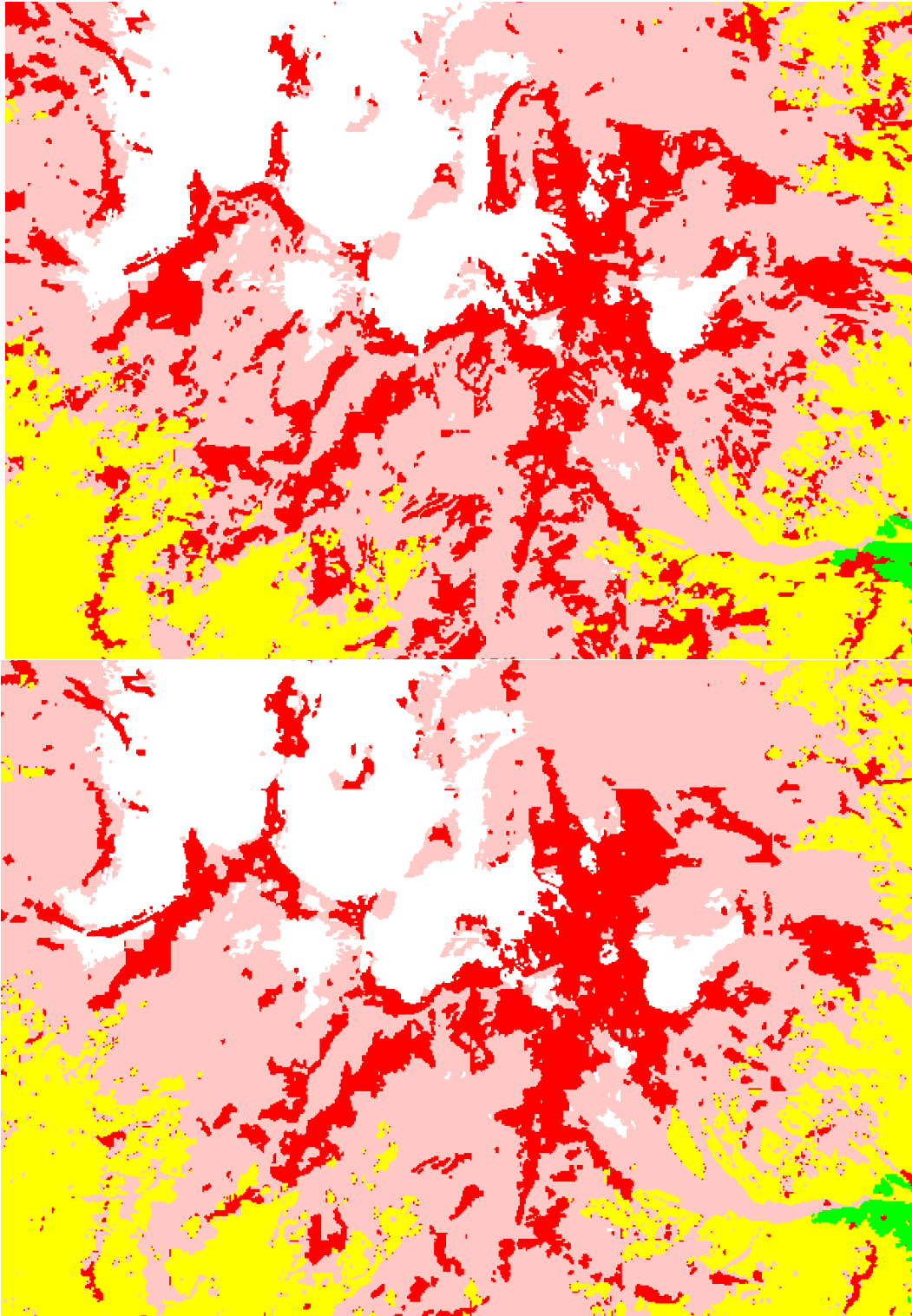
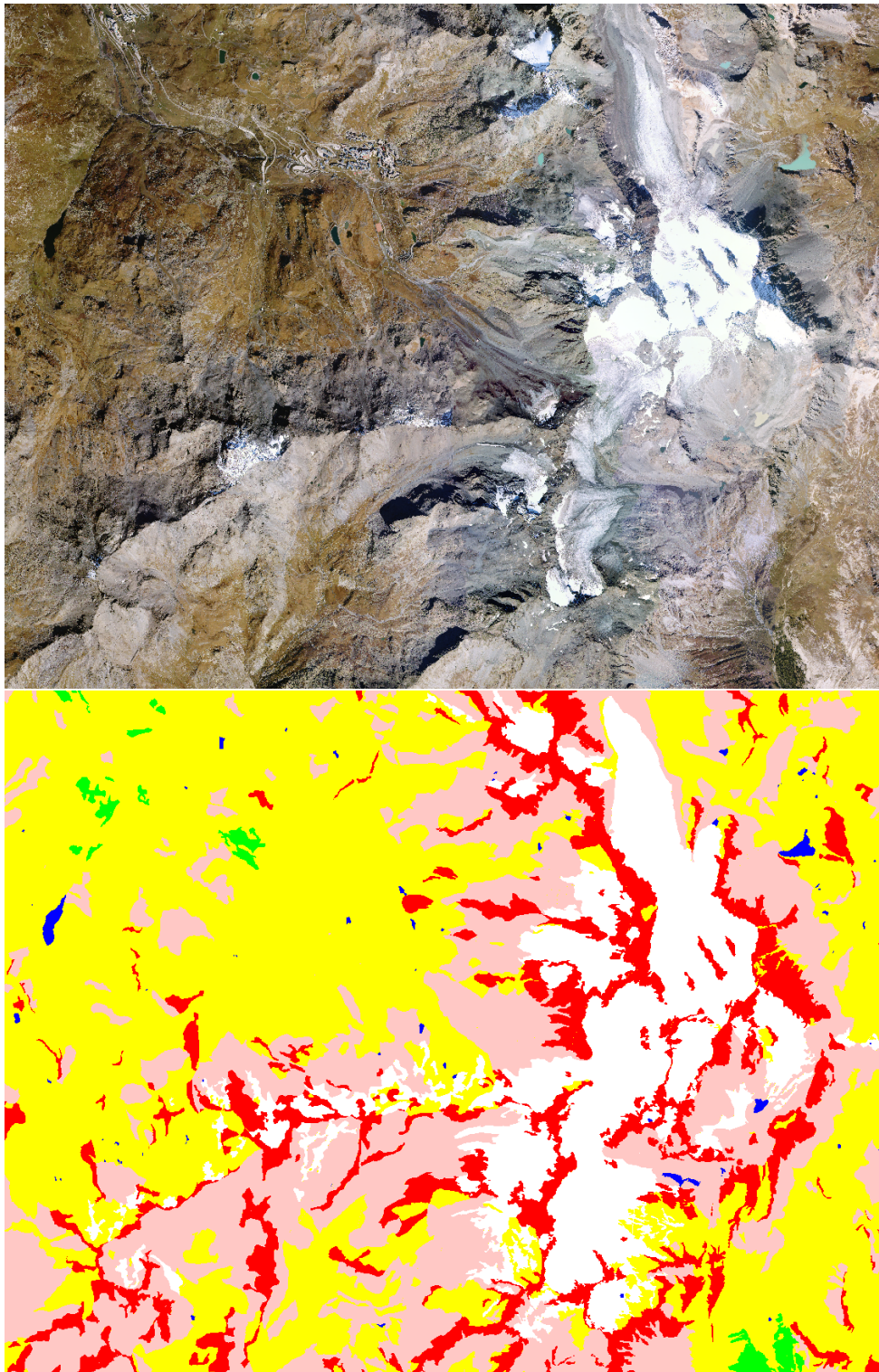


FIGURE 80 – Exemple de résultats obtenus : de haut en bas, ortho-image, occupation du sol de la BDTopo, occupation du sol extraite par le processus standard (+LANDSAT TM), occupation du sol extraite par l'approche hiérarchique. On s'aperçoit ici de la régression de certains glaciers.



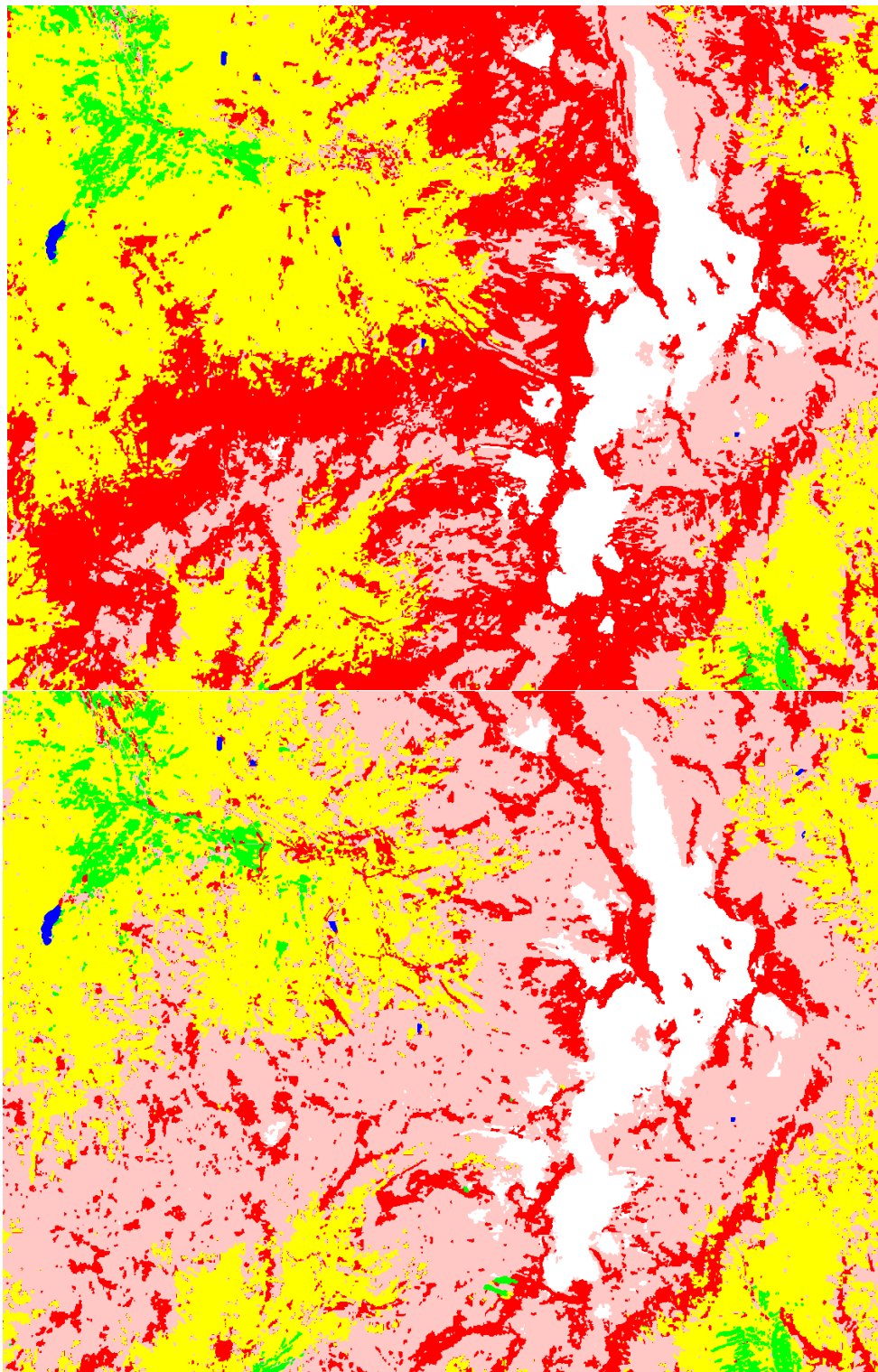


FIGURE 81 – Exemple de résultats obtenus : de haut en bas, ortho-image, occupation du sol de la BDTopo, occupation du sol extraite par le processus standard (+LANDSAT TM), occupation du sol extraite par l'approche hiérarchique. Les zones de rochers semblent surdétectées par le processus standard tandis que l'approche hiérarchique fournit un résultat plus proche du contenu de la BDTopo.

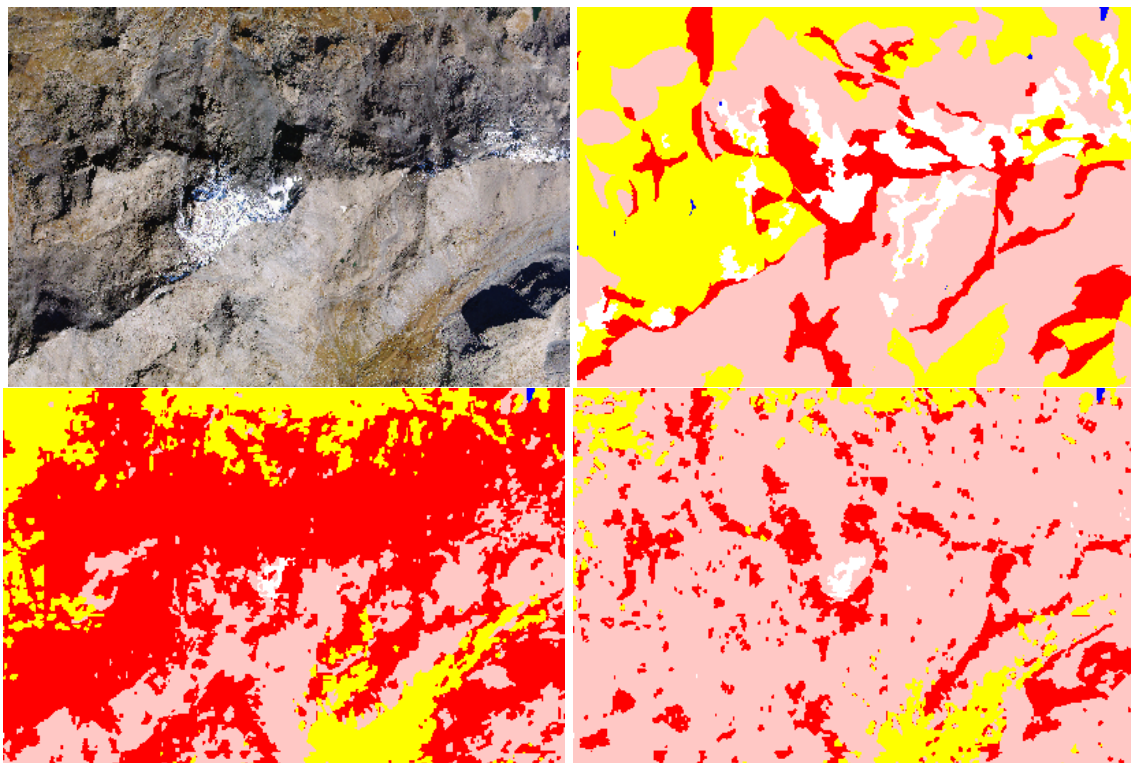


FIGURE 82 – Exemple de résultats obtenus : de haut en bas et de droite à gauche, ortho-image, occupation du sol de la BDTopo, occupation du sol extraite par le processus standard (+LANDSAT TM), occupation du sol extraite par l'approche hiérarchique. Les zones de rochers semblent surdétectées au détriment des éboulis par le processus "standard" tandis que l'approche hiérarchique fournit un résultat plus proche du contenu de la BDTopo mais tendant à l'inverse vers une sous-détection des rochers. Ceci s'explique ici par le fait que cette zone d'éboulis est sombre alors que la plupart des autres zones d'éboulis sont généralement plus claires que les rochers.

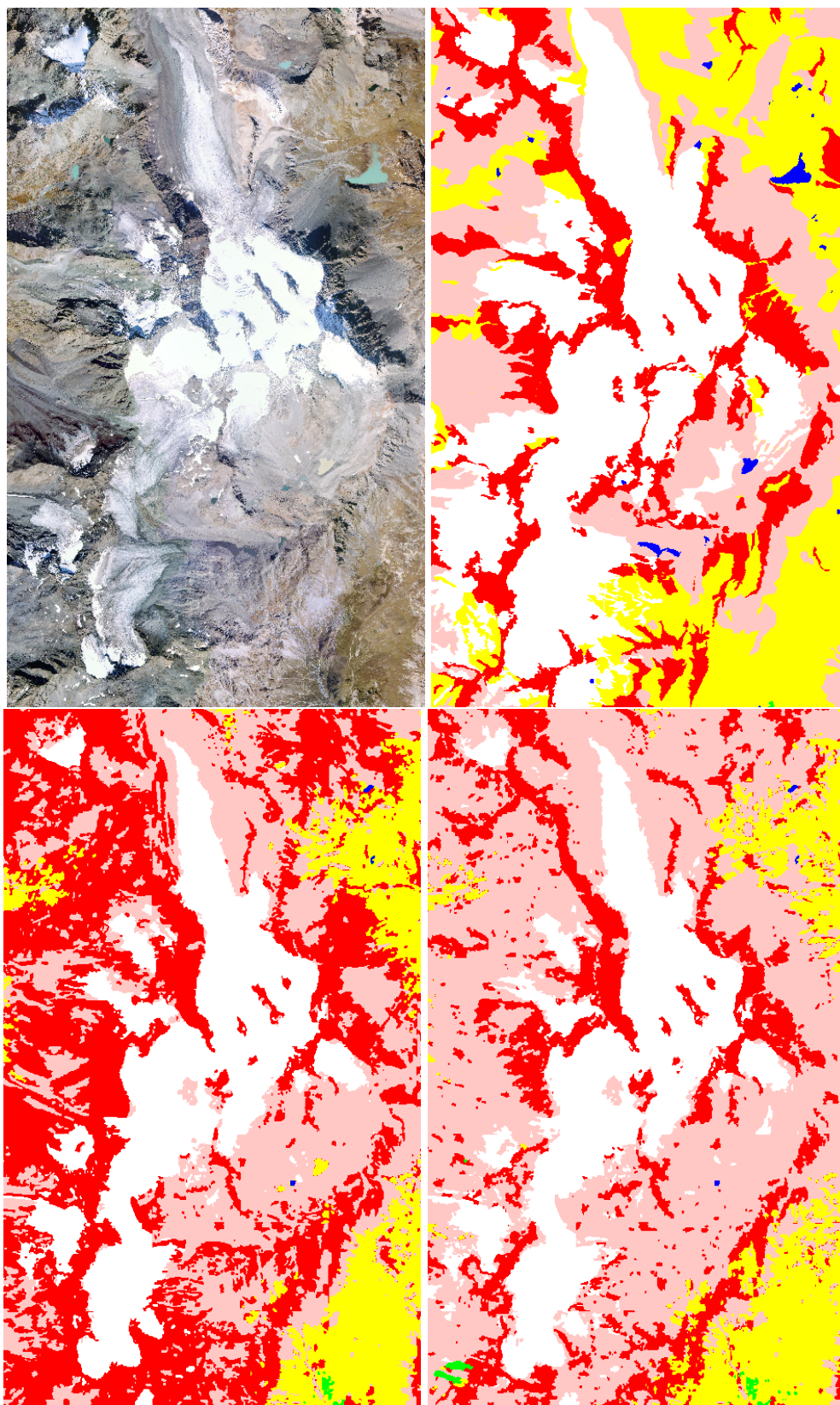


FIGURE 83 – Exemple de résultats obtenus : de haut en bas et de droite à gauche, ortho-image, occupation du sol de la BDTopo, occupation du sol extraite par le processus standard (+LANDSAT TM), occupation du sol extraite par l'approche hiérarchique. On s'aperçoit ici de la régression de certains glaciers. Les zones de rochers semblent surdétectées au détriment des éboulis par le processus "standard" tandis que l'approche hiérarchique fournit un résultat plus proche du contenu de la BDTopo. Néanmoins, dans certaines zones où les thèmes éboulis et rochers se ressemblent (tant du point de vue de la radiométrie que de la texture), l'opérateur BDTopo et les algorithmes ont fait des choix différents mais restant parfois défendables au vu de l'ortho-image.

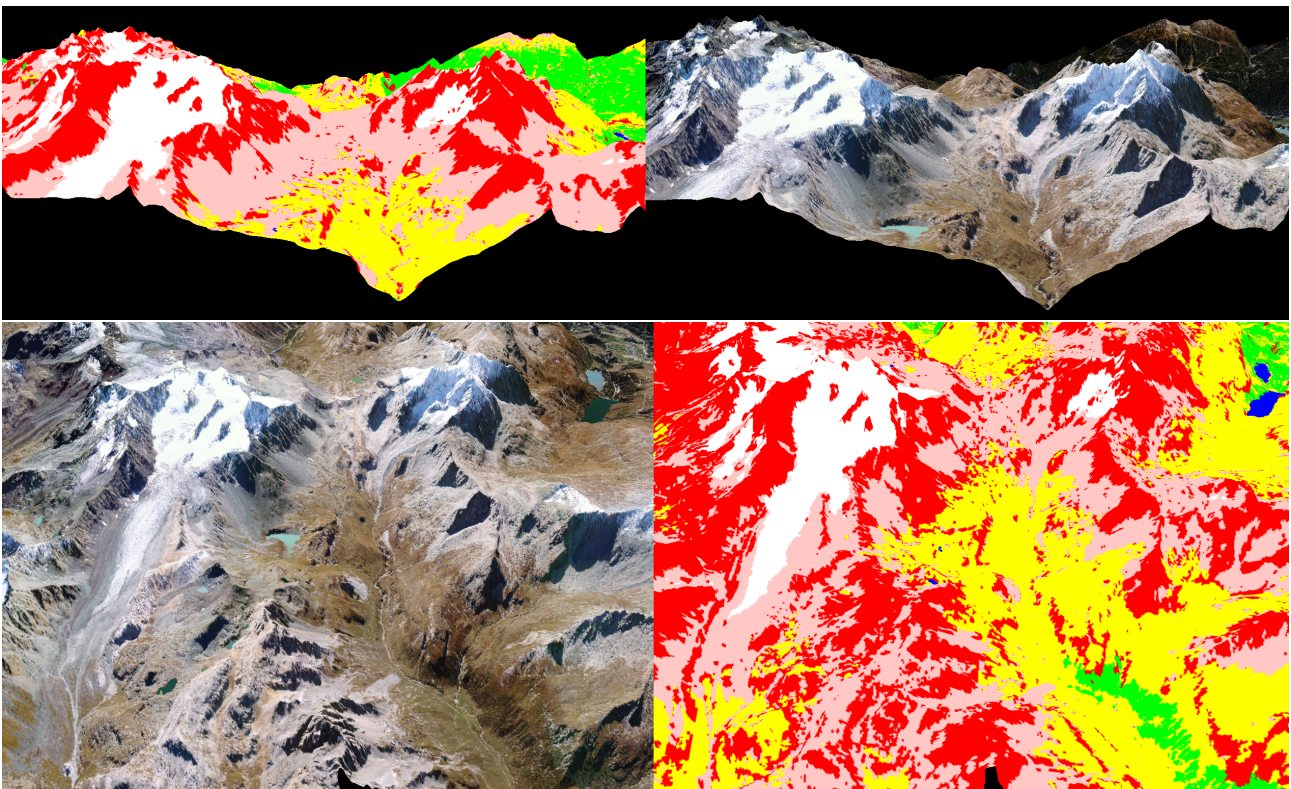


FIGURE 84 – Vues 3D des résultats obtenus sur la même zone que pour la figure 83. (première ligne, extraction hiérarchique, deuxième ligne, processus standard). Ces vues 3D confirment que, dans certaines zones, les thèmes éboulis et rochers se ressemblent (tant du point de vue de la radiométrie que de la texture) et que des choix de classification différents peuvent être défendables.

Troisième partie

Pré-traitements cartographiques :

**Post-traitements de la classification et
extraction d'informations complémentaires en
vue de la représentation cartographique**

8 Introduction

Le résultat brut de la classification est insuffisant pour en dériver directement une carte. Un certain nombre de post-traitements vont être nécessaires.

- Tout d’abord, la classification comporte un certain nombre de petites zones sans réelle signification cartographique. Il s’agit donc d’identifier ces petites zones et de les fusionner avec leurs voisines.
- La légende de la classification ne comporte pas de classe bâtiment, route ou lit de rivière. Les zones appartenant à ces classes sont donc classées dans les classes minérales (“rochers” et “éboulis”). Afin de ne pas les représenter, il faut donc les identifier à partir des données du RGE les concernant et les masquer.
- Dans un second temps, un certain nombre de traitements devront être appliqués aux rochers et éboulis afin de pouvoir les tracer sur la carte dans une représentation permettant (en complément des courbes de niveau et de l’estompage) une bonne lisibilité de la structure du relief sous-jacent (ainsi que l’illustre la figure 85). Ceci revêt ici une importance particulière ici : certaines zones sont d’accès potentiellement dangereux et ceci doit apparaître à la lecture de la carte.

Il s’agira notamment d’extraire différents éléments (lignes de structure (pente, crête), zones orientées) destinés à être fournis à un logiciel de cartographie pour être représentés sur la carte.

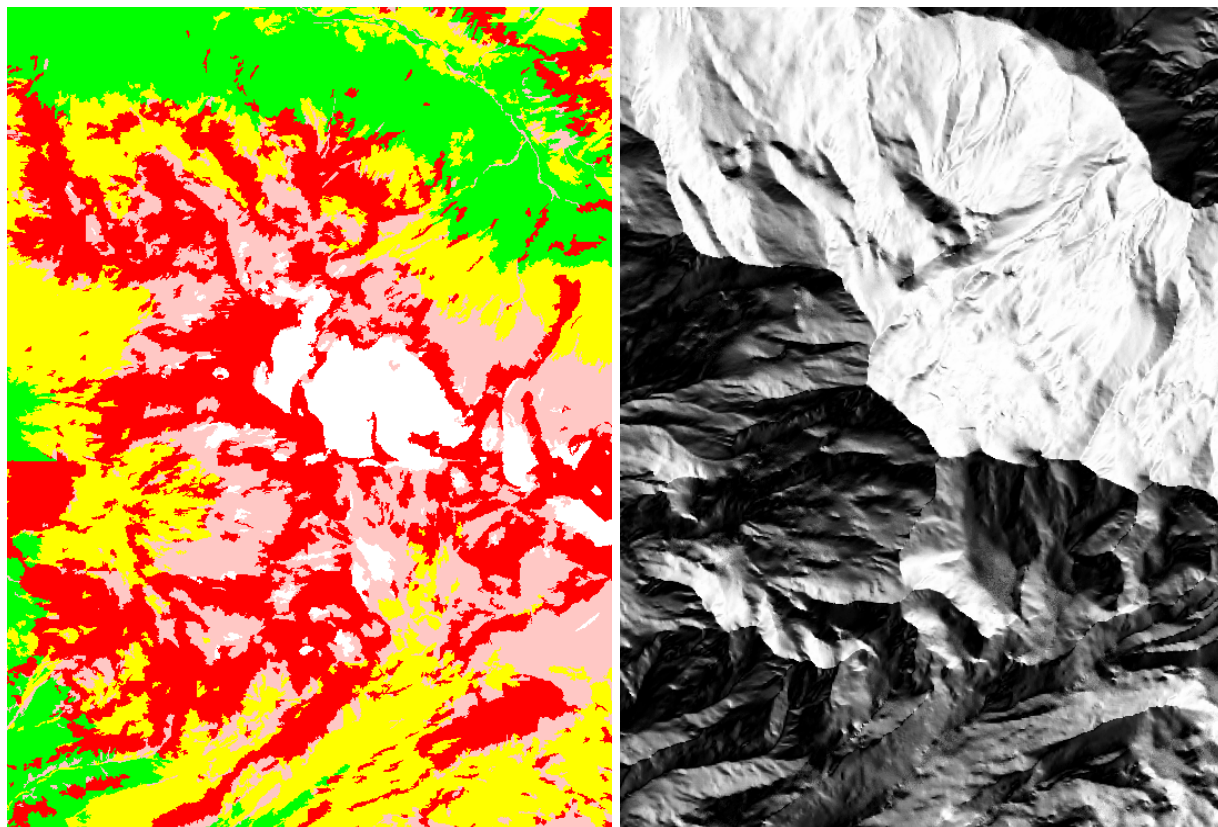


FIGURE 85 – Il s’agit de représenter l’occupation du sol de manière à faire ressortir le relief sous-jacent.

9 Filtrage des petites régions sans signification cartographique

Le résultat de la classification comporte un certain nombre de régions (d’occupation du sol différente de celles de leurs voisines) trop petites pour avoir une signification cartographique. Il convient donc de “généraliser” la carte d’occupation du sol en éliminant les régions dont la surface est inférieure à un certain seuil, ainsi que l’illustre la figure 86.

La méthode mise en œuvre consiste à traiter chaque région R de la carte d’occupation du sol de la manière suivante :

1. Si l'aire de R est supérieure au seuil d'élimination, R est conservée.
2. Dans le cas contraire, R reçoit le label de sa région voisine avec laquelle elle partage la plus longue frontière.

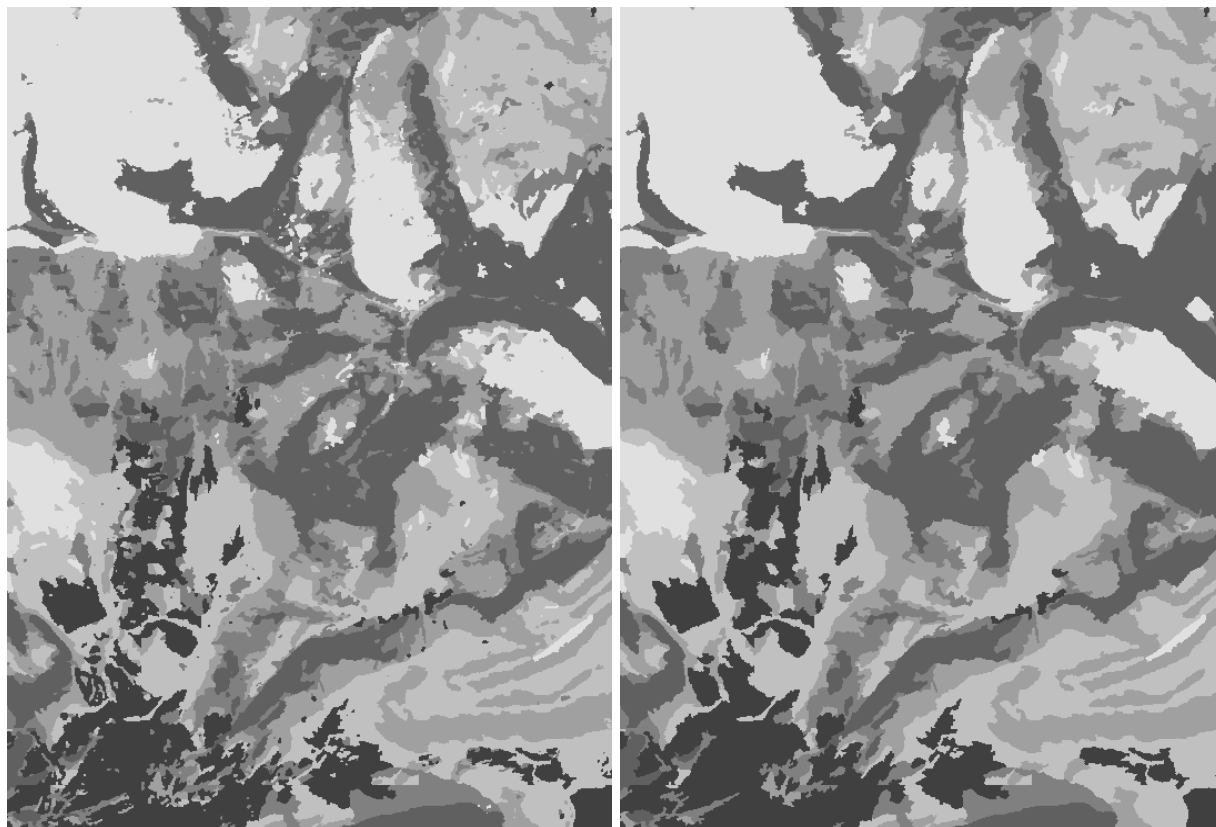


FIGURE 86 – Les zones dont la surface est inférieure à un certain seuil sont éliminées.

10 Corrections à l'aide de masques issus du RGE

10.1 Bâtiments, routes et lits de rivière

La légende de la classification ne comporte pas de classes “bâtiment”, “routes” et “lit de rivière” (souvent couvert de débris rocheux). Or ces thèmes sont présents sur les zones traitées, et sont donc mal classés. En général, ils sont labellisés en tant qu'éboulis ou que rochers.

Bâtiments, routes et réseau hydrographique sont présents dans la base de données topographiques de l'IGN. Il est par conséquent possible de dériver à partir de cette BD un masque sur ces zones. Il s'agit donc simplement de créer un masque par simple rasterisation des objets de la base de données correspondant à ces thèmes, en les dilatant dans le cas des routes (pour un élément structurant variable en fonction de la largeur des tronçons) et des rivières/torrents. Ce masque est ensuite appliqué à l'image de label de la classification.

10.2 Forêt, landes herbacées et lacs

Les bases de données de l'IGN comportent également des données sur les surfaces d'eau et les forêt (couche végétation). Par ailleurs, il sera à terme possible de disposer également d'une saisie des landes herbacées (en partenariat avec l'IFN). Comme toutes ces données sont saisies par des opérateurs, on peut les considérer comme *a priori* plus fiables que le résultat de la classification automatique. Il est dès lors possible de les utiliser pour effectuer une première correction de la classification.

Par conséquent, des masques sont calculés à partir de ces données et appliqués à la classification : là où la base de donnée indique un thème et la classification un autre, on donne raison à la base de données.

10.3 Seuls trois thèmes conservés

A l'issue des différentes étapes de filtrage précédentes, seuls les trois thèmes "rochers", "éboulis" et "glaciers" sont conservés. A partir de ce moment, on ne se préoccupe plus des autres thèmes d'occupation du sol présent de la nomenclature de la classification.

11 Représentation des zones d'éboulis

Afin d'accentuer la notion de relief, les éboulis ont une représentation cartographique différente selon la pente du terrain sur lequel ils se trouvent.

11.1 Classification en fonction de la pente

On divise donc les éboulis en deux sous-classes :

- éboulis de forte pente pour une pente $> 33\%$
- éboulis de faible pente pour une pente $< 33\%$

Ce seuil de 33% a été suggéré par des professionnels de la montagne (guides, gendarmes, chasseurs alpins...) et a un réel sens physique (stabilité des éboulis).

Remarque : Une nouvelle élimination des trop petites régions est possible à l'issue de cette division en sous-classes.

11.2 Représentation des éboulis dans les zones de faible pente

Comme le montre la figure 87, les éboulis de faible pente sont représentés par un motif (composé de points et de disques) suggérant des rochers disposés aléatoirement.

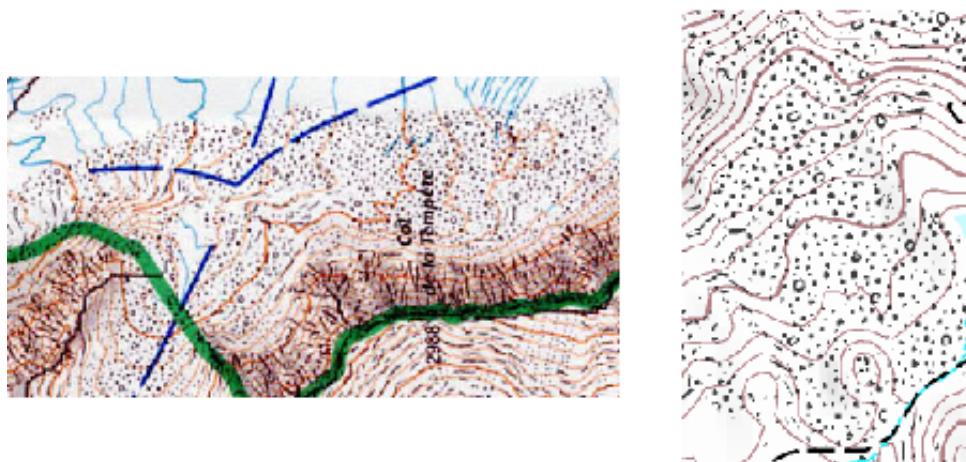


FIGURE 87 – Représentation des éboulis de faible pente.

11.3 Représentation des éboulis dans les zones de forte pente

Comme l'illustre la figure 88, les éboulis de forte pente sont représentés par un motif linéaire de manière à faire ressortir la direction de leur pente. Ils sont en fait représentés par des points de taille croissante le long des lignes de pente.

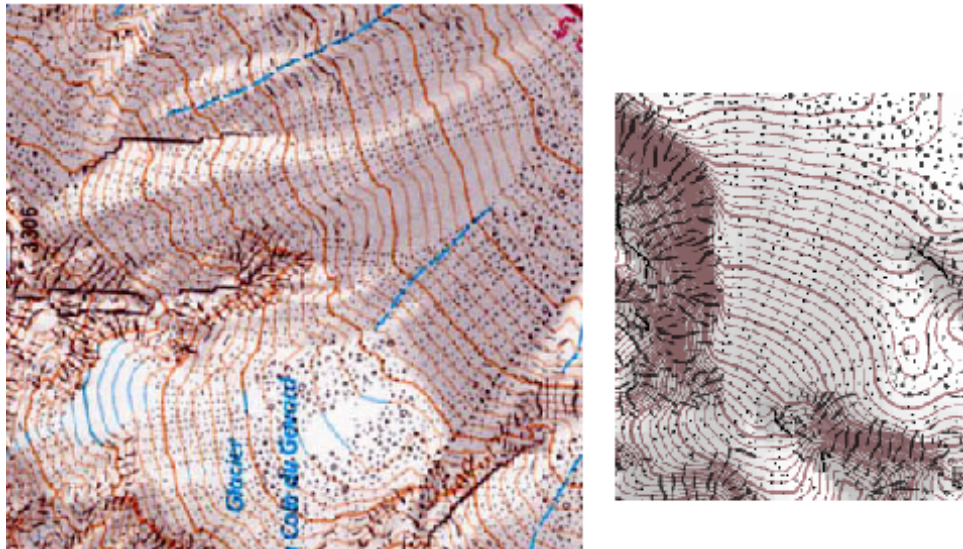


FIGURE 88 – Représentation des éboulis de forte pente.

Extraction des lignes de pente dans les zones d'éboulis de forte pente La méthode d'extraction des lignes de pente est décrite dans la partie 14.

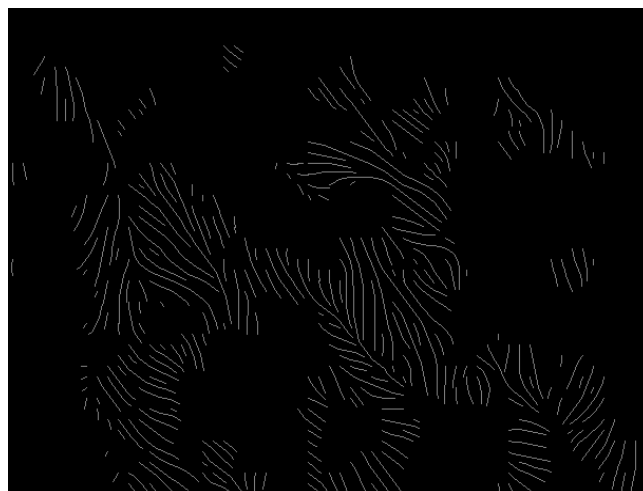


FIGURE 89 – Les lignes de pente sont extraites dans les zones d'éboulis de forte pente.

12 Représentation des zones de rochers

Comme pour les éboulis, les rochers sont représentés différemment en fonction de la pente du terrain sur ils se trouvent, afin d'accentuer la notion de relief sur la carte.

13 Classification en fonction de la pente

Les rochers sont donc divisés en deux sous-classes :

- rochers de forte pente pour une pente $> 100\%$
- rochers de faible pente pour une pente $< 100\%$

13.1 Représentation des rochers dans les zones de faible pente

Comme on peut le voir sur la figure 87, les rochers de faible pente sont représentés par un motif répétitif de hachures. Ces hachures sont orientées dans la direction des courbes de niveau.

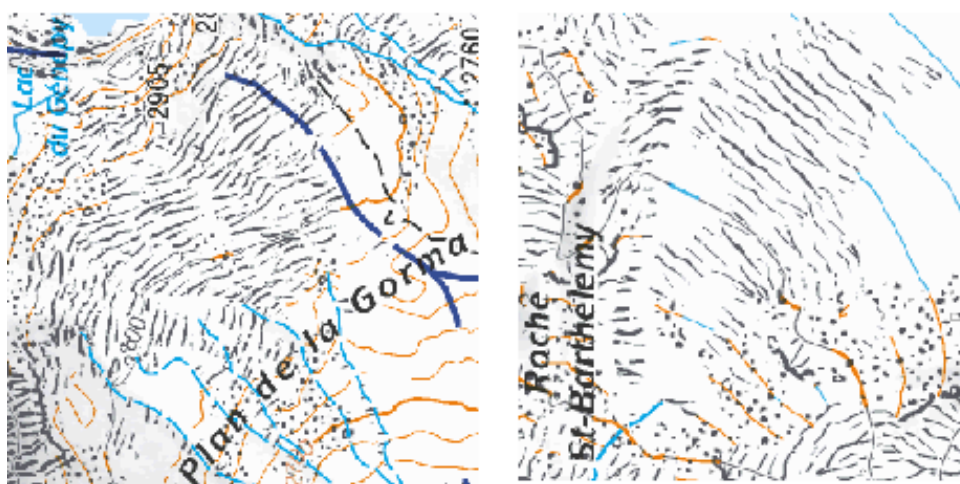


FIGURE 90 – Représentation des rochers de faible pente.

13.2 Représentation des rochers dans les zones de forte pente

Comme le montre la figure 88, les rochers de forte pente sont représentés par un motif répétitif de hachures. Ces hachures sont orientées dans la direction de la pente.



FIGURE 91 – Représentation des rochers de forte pente.

Remarque : Une autre représentation analogue à celle des éboulis (extraction de lignes de pente à partir d'un maillage régulier) a également été testée. Le paramétrage de l'algorithme décrit en 14 était alors différent.

13.2.1 Extraction des bordures inférieures des zones de rochers

Afin de mieux structurer la scène et d'aider à la lecture de la carte en introduisant une "cassure" dans la représentation, il est intéressant de faire figurer les bordures inférieures des zones de rochers de forte pente sur la carte. Ces lignes doivent donc être extraites du MNT (cf figure 92).

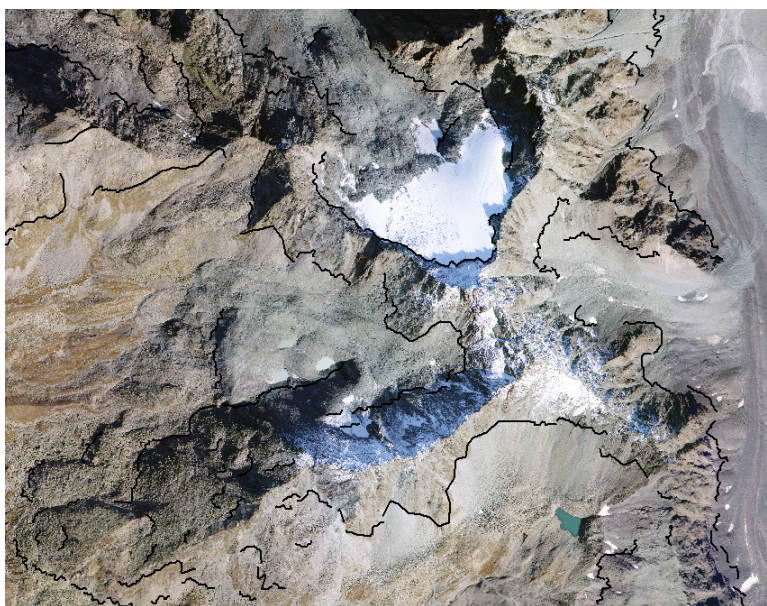


FIGURE 92 – Les bordures inférieures des zones de rochers de forte pente sont extraites.

On considère qu'un point situé sur la frontière d'une zone de rocher fait partie d'une de ses bordures inférieures s'il vérifie les 3 critères suivants :

- “*isBordInferieur*” : il s'agit d'un test sur le côté de la pente. (Ce critère est vérifié si on quitte la zone de rocher en suivant la pente.)
- “*isContourEnPente*” : on vérifie si le contour n'est pas (localement) à peu près dirigé dans la même direction que la pente. Mesure d'un écart angulaire.
- “*nbVoisinPlusHaut*” : (> 0.5) On s'intéresse au nombre de pixels voisins d'altitude supérieure à celle du pixel courant.

Pour une zone de rocher donnée, l'algorithme mis en œuvre est donc le suivant.

- Extraction des pixels du contour de la zone de rocher.
- Détection des bords inférieurs : ne sont conservés comme bords inférieurs que les chaînes de plus de n_{min} pixels consécutifs vérifiant les 3 critères précédents.
- Polygonalisation et vectorisation de ces chaînes.

13.2.2 Extraction des bordures supérieures des zones de rochers

Lors des premiers tests de représentation des rochers effectués dans le cadre de cette étude, il avait été envisagé d'également dessiner les bordures supérieures des zones de rochers de forte pente. Néanmoins, il est apparu qu'il était sans doute plus pertinent pour la compréhension du relief de faire apparaître les lignes de crête.

13.3 Classification en fonction de l'orientation pour les zones de rochers

Les deux sous-classes de rochers (de forte et de faible pente) sont représentées sur la carte par des textures répétitives orientées en fonction de l'orientation de la pente du terrain.

D'un point de vue pratique, le dessin de la carte est assuré par un logiciel de cartographie qui associe à chaque classe une représentation unique (i.e. dans le cas des régions un motif de texture). En conséquence, les deux sous-classes de rochers subissent une classification supplémentaire en fonction de leur orientation avec un pas de 20 (comme on peut le voir sur la figure 93). On obtient alors 36 sous-classes de rochers, à chacune desquelles est associé un motif de texture orientée. Ce sont donc finalement les masques de ces 36 sous-classes (exportés dans un format vectoriel) ainsi que les motifs élémentaires de texture qui leur sont associés qui sont fournis au logiciel de cartographie.

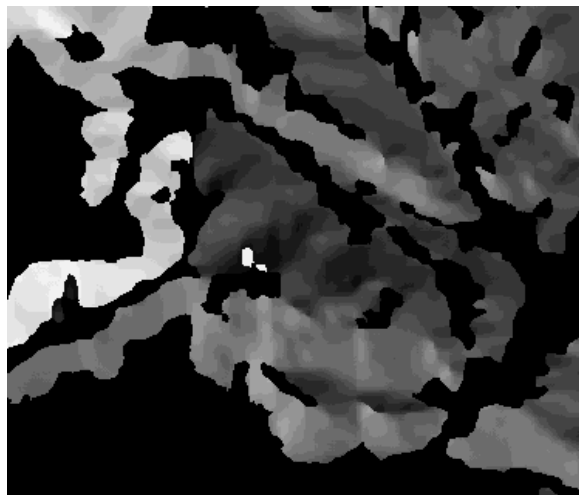


FIGURE 93 – Les rochers sont classés en 36 sous-classes en fonction de l'orientation du terrain où ils se trouvent.

14 Extraction de lignes de pente

L'algorithme mis en œuvre pour l'extraction de lignes de pente consiste à se doter d'une grille régulière de points de départ à partir desquels on va tracer une ligne en suivant la plus forte pente jusqu'à ce qu'un critère d'arrêt soit vérifié. Ces critères sont :

- hors zone,
- trop proche d'une ligne de pente déjà tracée
- la pente s'inverse, le point le plus bas a été atteint.

L'algorithme possède donc plusieurs paramètres $(D_0, d_{lim0}, d_{lim}, D_i, D_j)$:

- D_0 : longueur des segments élémentaires de la ligne de pente.
- d_{lim0} : tolérance de contact entre les lignes pour le premier segment
- d_{lim} : tolérance de contact entre les lignes pour les autres segments
- D_i, D_j , paramètres (pas en ligne et en colonne) de la grille régulière des points de départ

Le paramétrage est différent selon que les lignes de pente sont extraites dans les zones d'éboulis ou de rochers :

- Pour les éboulis : $(D_0, d_{lim0}, d_{lim}, D_i, D_j) = (5 \text{ pixels}, 4 \text{ pixels}, 4 \text{ pixels}, 10 \text{ pixels}, 10 \text{ pixels})$
- Pour les rochers : $(D_0, d_{lim0}, d_{lim}, D_i, D_j) = (10 \text{ pixels}, 8 \text{ pixels}, 8 \text{ pixels}, 20 \text{ pixels}, 20 \text{ pixels})$

Remarque : Finalement, les lignes de pente n'ont plus été utilisées que pour la représentation des éboulis.

L'algorithme est appliqué en 4 balayages successifs des points de départ dans des sens différents : en effet, sans cette précaution, une nouvelle ligne de pente risque de tomber tout de suite sur un segment déjà tracé, ce qui met fin directement à son tracé (voir exemple de la figure 94). On peut alors se trouver dans un cas où le tracé se fait en "pointillé" au lieu d'avoir une ligne de pente continue...

On applique donc l'algorithme en parcourant les points de départ possibles de gauche à droite et de haut en bas, puis de gauche à droite et de bas en haut, puis de droite à gauche et de haut en bas et enfin de droite à gauche et de bas en haut. Pour chacun de ses passages, on définit l'intervalle d'orientations $[Az_{min}; Az_{max}]$ au sein desquelles une ligne de pente qui démarre peut se diriger (comme l'illustre la figure 95).



FIGURE 94 – Exemple de problème rencontré au cas où l'algorithme s'effectuerait en un seul passage (ici, en parcourant les points de départ de la gauche vers la droite, et du haut vers le bas). Le tracé de la ligne de pente représentée ici en rouge s'arrête immédiatement, car rencontrant tout de suite une ligne de pente déjà tracée, d'où un effet de tracé en pointillés.

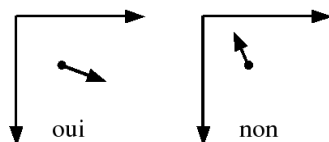


FIGURE 95 – Dans le cas d'un balayage des points de départs de gauche à droite et de bas en haut : exemple d'un cas où la ligne de pente part dans une direction acceptable pour ce balayage (à gauche), et d'un cas où elle part dans une direction non autorisée pour ce balayage (à droite).

L'algorithme de tracé d'une ligne de pente à partir d'un point de départ p_0 est le suivant :

Algorithme de tracé d'une ligne de pente à partir d'un point de départ $P_0(x_0; y_0)$ pour un des 4 balayages de la zone

 $(L) = \text{TraceLignePente}(P_0, D_0, d_{lim0}, d_{lim}, Az_{min}, Az_{max})$

Point de départ : $P_0(x_0; y_0)$ **si** une ligne de pente déjà tracée passe dans un voisinage de rayon d_{lim0} de P_0 **alors**

arrêt

finsiCalcul du vecteur pente $\vec{V}(P_0)$ en P_0 à partir du MNT.**si** $\vec{V}(P_0)$ n'est pas dirigé du bon côté pour ce balayagei.e. $\text{arg}((\vec{V}(P_0).x; \vec{V}(P_0).y)) \notin [Az_{min}; Az_{max}]$ **alors**

arrêt

finsiPoints de la ligne de pente : $L \leftarrow \{P_0\}$ $p_0 \leftarrow P_0$ **tantque** rien n'arrête cette boucle **faire**Calcul du point suivant de la ligne : $p \leftarrow p_0 + D_0 \cdot (\vec{V}(p_0).x; \vec{V}(p_0).y)$

//On vérifie que le nouveau segment ne coupe pas ou ne frôle pas une ligne déjà tracée.

si le segment $[p_0; p]$ intersecte une ligne de pente déjà tracée **alors**

arrêt

finsi**si** une ligne de pente déjà tracée passe dans un voisinage de rayon d_{lim} de p **alors**

arrêt

finsi**si** p est en dehors du masque du thème à représenter **ou** en dehors de la zone d'étude **alors**

arrêt

finsi**si** $MNT(p) > MNT(p_0)$ **alors**

//On s'assure que l'on est pas arrivé tout en bas, en vérifiant si l'on ne commence pas à remonter une pente

arrêt

finsi $L.\text{push_back}(p)$ $p_0 \leftarrow p$ **fin tantque**

15 Extraction de lignes de crête

Afin d'accentuer l'impression de relief et la lisibilité de la carte, il est intéressant d'y faire figurer les lignes de crêtes les plus importantes, là où le relief est accentué. Il s'agit donc ici plus particulièrement d'extraire les lignes de crêtes dans les zones de rochers de forte pente.

15.1 Méthodes d'extraction de lignes de crête

Il existe bon nombre de méthodes décrites dans la littérature pour extraire les lignes de crêtes. Ces approches sont assez variées, basées sur des considérations géomorphologiques/géomorphométriques, hydrologiques ou simplement géométriques (pour les plus génériques d'entre elles).

[Duf85] propose de modéliser localement le MNT par une quadrique ayant la formule suivante : $Z(x, y) = H_0 + a \cdot x + b \cdot y + \frac{c}{2} \cdot x \cdot x + d \cdot x \cdot y + \frac{e}{2} \cdot y \cdot y$. Une formule exprimant la courbure horizontale des courbes de niveau peut alors se déduire de ce modèle : $\Gamma_n = \frac{2 \cdot a \cdot b \cdot d - c \cdot b^2 - e \cdot a^2}{(a^2 + b^2)^{\frac{3}{2}}}$. Cette mesure présente des valeurs "fortement" positives dans les zones de crêtes, "fortement" négatives dans les zones de thalwegs et faibles ailleurs. Néanmoins, au vu des tests effectués sur les MNT dont nous disposons, les résultats d'une détection de crête se basant uniquement sur cette mesure restaient bruités, et le seuillage difficile à déterminer.

D'autres méthodes sont d'inspiration plus géomorphologique. Ainsi, [Ria89] propose plusieurs méthodes d'extraction des lignes de crêtes et des thalweg en partant de points de départ bien choisis (cols ou maxima locaux). Par exemple, la recherche des lignes de crêtes peut se faire à partir d'un col : on remonte alors le relief suivant la ligne de plus forte pente. On peut aussi partir des maxima locaux et descendre vers des points présentant un changement de pente convexe dans une des 3 directions (hors celle d'où l'on vient).

Les méthodes par calcul d'écoulement global (méthodes "hydrologiques") ont pour idée commune de simuler une pluie homogène sur l'ensemble du terrain, et d'en déduire le calcul d'un graphe d'écoulement (i.e. dans quel pixel sortant se déverse l'eau arrivant dans un pixel donné) et du débit en régime permanent en tout point du MNT. Il est alors possible d'extraire les thalwegs de cette carte des débits. [CD01] propose un état de l'art de ces différentes méthodes d'extraction de thalwegs.

Les premiers algorithmes de cette famille considéraient que le flux sortant de chaque pixel ne pouvait se déverser qu'en un seul des pixels voisins, ce qui a pour effet de créer certains artefacts. D'autres algorithmes ont alors été proposés de manière à gérer des écoulements multiples comme dans [Rie92], [Jam95] ou [Car95] : le flux en sortie d'un pixel peut se répartir sur plusieurs de ces voisins.

La plupart de ces méthodes détectent alors les thalwegs comme étant les zones où le débit en régime permanent est le plus important, ce qui implique de fixer un seuil sur le débit, ce seuil pouvant être différent selon la taille de la zone, le type de relief... Pour pallier à cela, [Jam95] se sert d'un critère différent : sont considérés comme appartenant à un thalweg, les pixels pour lesquels la dérivée du débit en régime permanent dans la direction de plus forte pente est supérieure à un certain seuil.

Une fois, les thalwegs détectés, les bassins versants associés à chacun d'entre eux sont extraits. Les lignes de crêtes sont définies comme des parties des limites entre ces bassins versants présentant une courbure importante.

Une approche "morphologie mathématique" consiste simplement à appliquer au MNT l'algorithme de la Ligne de Partage des Eaux (LPE). Au vu d'un test effectué, cette méthode était assez longue et certains artefacts avaient dans certains cas tendance à apparaître, tandis que dans d'autres cas, certains détails souhaités n'apparaissaient pas.

[Col02] propose une méthode de détection de zones de crête reposant sur la fusion de deux critères géométriques calculés sur un certain voisinage (fenêtre carrée constituée de couches concentriques) autour du point dont on souhaite savoir s'il appartient ou non à une zone de crête.

- En effet, les points appartenant aux lignes de crête sont des points plus hauts que la plupart des autres points de leur voisinage (comme les points de la ligne de crête ne sont pas des sommets, certains points de leur voisinage sont néanmoins plus hauts mais restent minoritaires). Autrement dit, la dénivelée entre le point courant et ses voisins doit être forte.

On en déduit un premier critère à vérifier pour qu'un pixel appartienne à une zone de crête : le nombre de pixels voisins d'altitude supérieure à celle de ce pixel à un seuil près. (La différence d'altitude entre ce pixel central et un pixel du voisinage considéré doit en effet être inférieure à un seuil *seuilAltitude* pour que le pixel central soit effectivement considéré d'altitude inférieure, afin de garantir une certaine

robustesse/tolérance aux imprécisions du MNT). Ces tests se font pour chaque pixel sur un certain voisinage constitué de couches concentriques. Après avoir traité tous les pixels d'une couche, on vérifie que le nombre de pixels d'altitude supérieure au pixel central ne dépasse pas un certain seuil fixé. Si c'est le cas, le pixel central n'appartient pas à une crête, sinon on passe à la couche suivante.

- Les crêtes se caractérisent également par un critère de forme : elles correspondent à des zones dans lesquelles le terrain est convexe dans au moins une direction. Par conséquent, un point ne possédant pas une convexité assez marquée dans au moins une direction ne pourra être considéré comme appartenant à une ligne de crête. On en déduit le critère de convexité qui suit.

Il s'agit de vérifier qu'un pixel candidat à l'appartenance à une zone de crête présente un caractère convexe dans au moins une des quatre directions (horizontale, verticale et les deux diagonales). Si la valeur maximale parmi les dérivées secondes des altitudes dans ces quatre directions est supérieure au seuil *seuilConvexite*, alors on se trouve bien dans une zone de crête. Dans le cas contraire, on ne se trouve pas dans une telle zone de crête.

Cette méthode présente l'intérêt d'être rapide, simple à implémenter et de ne posséder que trois paramètres (à régler en fonction de la qualité du MNT, du type de relief, et de ce que l'on souhaite obtenir), à savoir :

- la taille de la fenêtre de recherche
- *seuilAltitude*, i.e. le seuil de tolérance d'erreur d'altitude du MNT lors de la comparaison des altitudes pour la détermination de points hauts
- *seuilConvexite*, i.e. le seuil de détermination de zones convexes

Par contre, elle ne fournit pas directement des lignes de crête, mais des zones de crête, qu'il convient de squelettiser. Or, dans certains cas, cette squelettisation peut créer certains artefacts gênants.

Par ailleurs, les crêtes extraites par cette méthode ne sont pas forcément les "vraies" lignes de crête, mais des lignes de rupture dans le relief.

D'autres méthodes plus géométriques, et davantage orientées vers le traitement de nuages de points 3D ou de maillages triangulés existent. On peut notamment citer [Tra06], [G04], [BMP07] et [YBS05]. En particulier, [YBS05] détecte les lignes en fonction de critères de courbure.

Parmi ces méthodes, [G04] et [YBS05] ont été testées donnant des résultats assez peu satisfaisants (problème de conversion des données ou de paramétrage?).

15.2 Méthode mise en œuvre

La méthode mise en œuvre s'inspire des approches "hydrologiques" ou par calcul d'écoulement global de [Jam95, Rie92, Mon97] : les crêtes sont détectées parmi les limites de bassins versants, ce qui implique d'avoir au préalable extrait ces bassins versants, et les thalwegs qui leur sont associés. Ce type d'approche est pertinent dans le cas de figure présent, puisque l'on travaille effectivement avec un MNT...

Le principe de l'algorithme mis en œuvre est donc le suivant :

1. Lissage (optionnel) du MNT
2. Construction d'un graphe d'écoulement et d'une carte des débits en régime permanent (on permet les écoulements multidirectionnels)
 - (a) Initialisation de toutes les valeurs de débits en chaque pixel à f_o (débit de la pluie)
 - (b) Tri des pixels du MNT du plus haut au plus bas
 - (c) Parcours des pixels du plus haut au plus bas :
 - i. Calcul du vecteur pente \vec{P} en le pixel courant $p(x, y)$.
 - ii. Répartition du débit de p sur ces voisins (plus bas), en fonction de \vec{P} .
3. Détection des thalwegs
 - (a) Calcul (en chaque pixel) de la dérivée du débit ; autrement dit : calculer la différence entre les débits au niveau du pixel courant et du pixel affluent voisin de plus fort débit.
 - (b) $tlw \leftarrow \emptyset$
 - (c) Parcours des pixels du plus haut au plus bas
 - i. Si la dérivée du pixel courant p_0 est supérieure à un certain seuil S_{deriv} :
 - $tlw.push_back(p_0)$

- Recherche parmi les pixels voisins de p_0 et d'altitude inférieure de celui présentant le plus fort débit. Notons p_1 ce pixel.
 - Si aucun pixel de ce type n'existe, on s'arrête.
 - Si la dérivée du débit en p_1 est inférieure au seuil S_{deriv} , on s'arrête.
 - Si p_1 a déjà été identifié comme faisant partie d'un thalweg, on s'arrête.
 - $p_0 \leftarrow p_1$, et on repart de l'étape 2-b-ii.
- ii. Si tlw contient plus de l_{min} éléments, il s'agit bien d'un nouveau tronçon de thalweg : *thalwegs.ajoute_nouvel_e*.
- Dans le cas contraire, on considère qu'il s'agit d'une fausse détection.
- iii. $tlw \leftarrow \emptyset$
4. En déduire les bassins versants associés à ces thalwegs.
 5. Extraction des limites de ces bassins versants
 6. En déduire le masque des lignes de crêtes correspondant aux limites de bassin versant situées dans des zones où un critère sur la courbure du terrain est vérifiée (zones fortement convexes). (Le critère utilisé s'inspire de [YBS05]).
 7. Chaînage-vectorisation de ces lignes de crêtes (Pour se débarrasser de certains artefacts résiduels, on applique préalablement un algorithme de squelettisation au masque raster des lignes de crêtes détectées.)

Remarque : Par ailleurs, le fait de lisser le MNT en le convoluant au préalable par une gaussienne permet de "choisir" le niveau de détail des lignes de crête que l'on va extraire.

Traitement des zones plates et des pixels sans exutoire : En principe, il faudrait gérer les zones plates et les pixels sans exutoire. Néanmoins, dans le cas présent, on souhaite extraire des lignes de crêtes uniquement dans les zones de rochers où le relief est accentué. On peut donc supposer que ce genre de cas de figure ne s'y présentera qu'assez rarement pour être négligé.

15.3 Tests et résultats

La BDTopo dans sa version originale devait comporter une saisie des lignes de crêtes principales. Sur la zone de Modane, cette donnée est disponible, et peut donc être confrontée (comme sur la figure 96 aux crêtes extraites de manière automatique par la méthode précédente (15.2), ainsi que par la méthode de [Col02] à partir d'un MNT de pas 5m.

D'autres illustrations (toujours pour ces deux méthodes et toujours sur la zone de Modane) sont données par les figures 98 et 97.

Les deux méthodes donnent des résultats satisfaisants, bien que légèrement différents. La méthode de [Col02] fournit en effet des lignes de crêtes qui ne sont pas forcément les "vraies" lignes de crête, mais des lignes de "rupture" du relief (crête bien marquée, bord de falaise), ainsi que l'illustre la figure 98. Ceci peut être intéressant pour le présent problème de représentation cartographique.

En revanche, cette méthode crée parfois des artefacts (comme par exemple des structures circulaires) dus au fait qu'elle ne détecte pas directement des lignes de crête, mais des **zones** de crête, qui sont ensuite squelettisées.

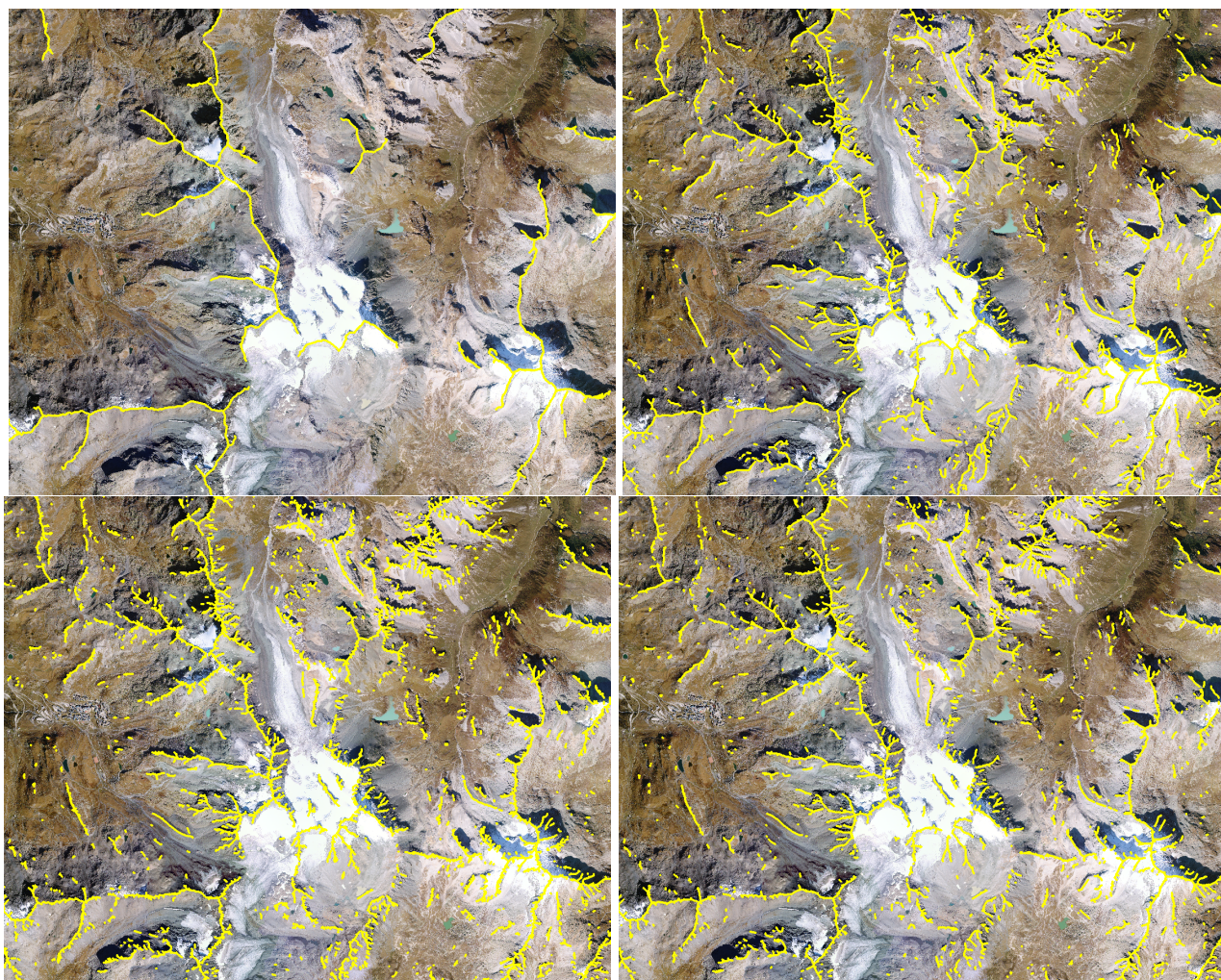


FIGURE 96 – De gauche à droite et de haut en bas :
lignes de crêtes issues de la BDTopo (acquises par un opérateur)
lignes de crêtes extraites automatiquement par la méthode proposée [Col02]
lignes de crêtes extraites automatiquement par la méthode “bassin versant” avec le MNT brut
lignes de crêtes extraites automatiquement par la méthode “bassin versant” avec le MNT lissé par une gaussienne

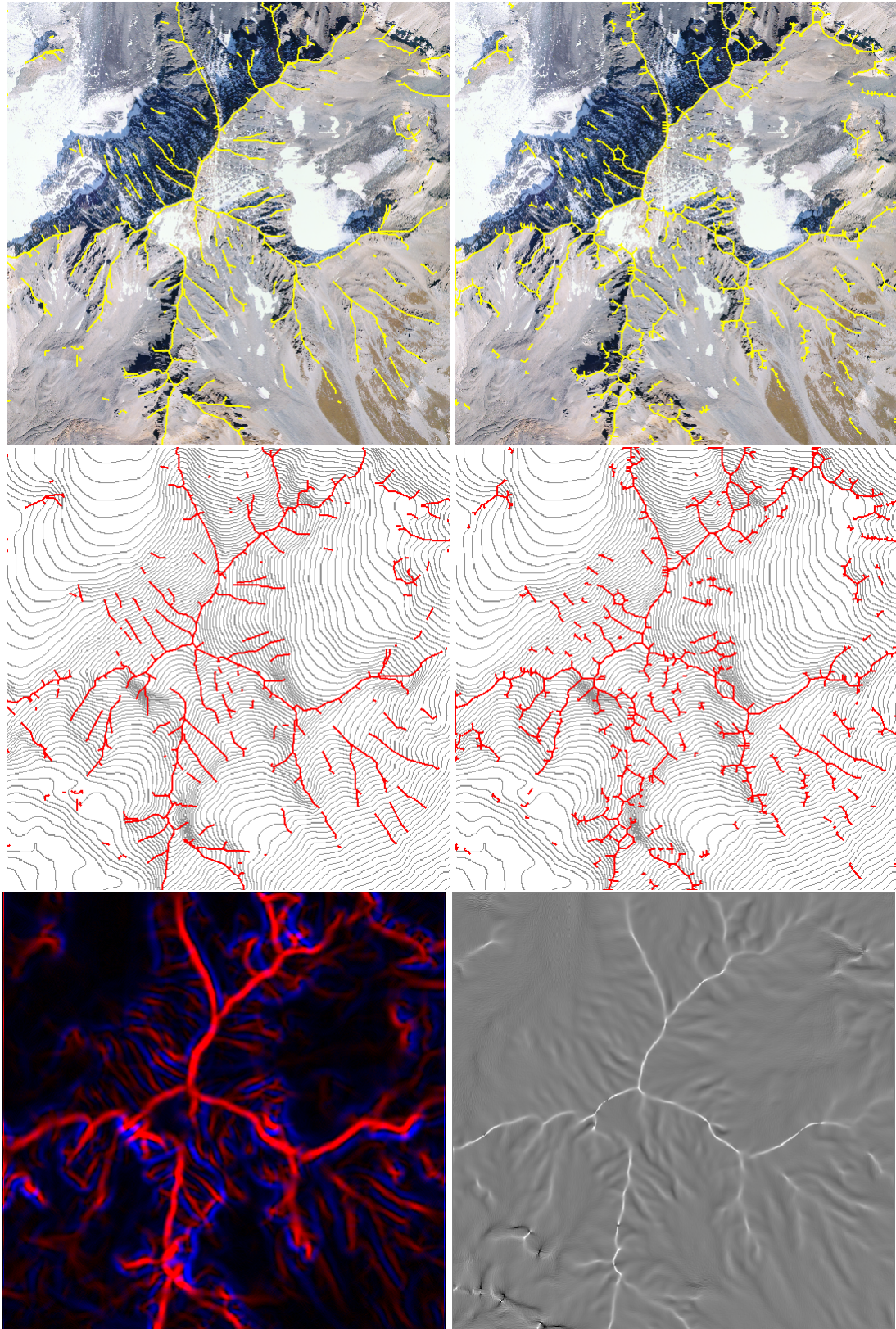


FIGURE 97 – Première et deuxième lignes : lignes de crêtes extraites par la méthode proposée en 15.2 à gauche et par la méthode de [Col02] à droite. Ligne du bas : à gauche, “courbure” du terrain : en rouge, “courbure convexe”, en bleu, “courbure concave” ; seuls les tronçons de crêtes situés dans les zones les plus “rouges” sont conservés. A droite, la courbure horizontale des courbes de niveau aurait pu constituer un critère analogue, mais semblait parfois plus bruitée.

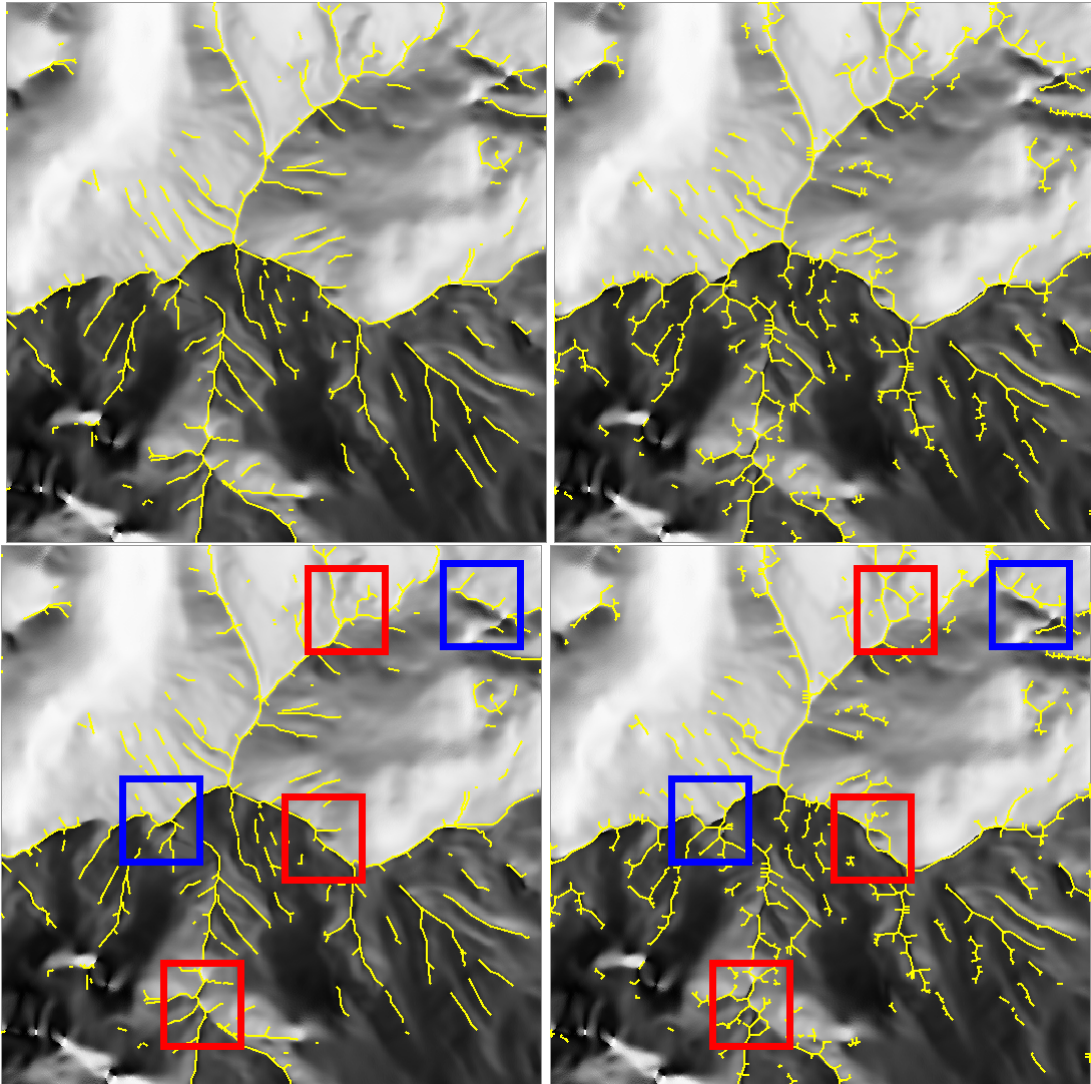


FIGURE 98 – lignes de crêtes extraites par la méthode proposée en 15.2 à gauche et par la méthode de [Col02] à droite. Les cadres rouges des figures de la ligne du bas montrent des zones où cette seconde méthode présente quelques inconvénients (avec la détection de structures circulaires...). Les cadres bleus indiquent deux cas où la ligne de crête détectée par cette seconde méthode s'éloigne de la vraie ligne de crête pour s'approcher d'un bord de falaise.

Amélioration possible ? Afin de rendre le tracé des lignes de crêtes détectées un peu plus lisse, mais aussi de les faire mieux coller aux véritables lignes de “rupture” du relief (bords supérieurs de falaise, ...), il serait possible de déformer le réseau de lignes de crêtes extrait. Il s'agirait alors de déplacer et déformer les lignes de crêtes en recherchant un compromis entre d'une part des contraintes sur leur élasticité, leur courbure et leur position initiale (afin d'éviter de trop grands déplacements) et d'autre part un terme d'attache aux données, qui pourrait être ici liée à la “courbure convexe” du terrain (ou à la courbure horizontale des courbes de niveau, ou encore au gradient de l'ortho-image).

La méthode des contours actifs (ou snakes) est une manière de traiter ce problème. On cherche alors à minimiser l'énergie totale E_{totale} de la courbe que l'on déforme. Cette énergie est la somme de plusieurs termes. Dans le cas présent, on aurait une formule du type :

$$E_{totale} = E_{interne} + \lambda_{inertie} \cdot E_{inertie} + \lambda_{donnees} \cdot E_{donnees} \text{ avec :}$$

- $E_{interne} = \alpha \cdot E_{elasticite} + \beta \cdot E_{courbure} = \alpha \cdot \int_C |c'(s)|^2 \cdot ds + \beta \cdot \int_C |c''(s)|^2 \cdot ds$ (énergie interne de la courbe C à déformer)
- $E_{inertie} = \int_C |c(s) - c_0(s)|^2 \cdot ds$: énergie imposant aux points de la courbe de ne pas trop s'éloigner de leur position initiale.

- $E_{donnees}$: énergie d'attache aux données, favorisant ici l'attraction par les zones de forte courbure fortement convexes du MNT. Cette énergie doit donc être minimale dans les zones où cette mesure est la plus forte.

On peut donc par exemple avoir : $E_{donnee} = \int_C -(CourbureConvexe(s))^2 \cdot ds$

16 Exemples de résultats

16.1 Affichage des résultats obtenus et des éléments extraits

Voici quelques exemples (sur la zone test de Modane) d'image de synthèse 3D représentant sur fond de MNT drappé par l'ortho-image les différents éléments dont l'extraction vient d'être décrite dans les sections précédentes.

La légende de ces différentes illustrations est la suivante :

- rouge : lignes de crête
- cyan : limites des zones de glacier
- magenta : lignes de pente dans les zones de rochers de pente $> 100\%$
- vert : lignes de pente dans les zones d'éboulis de pente $> 33\%$

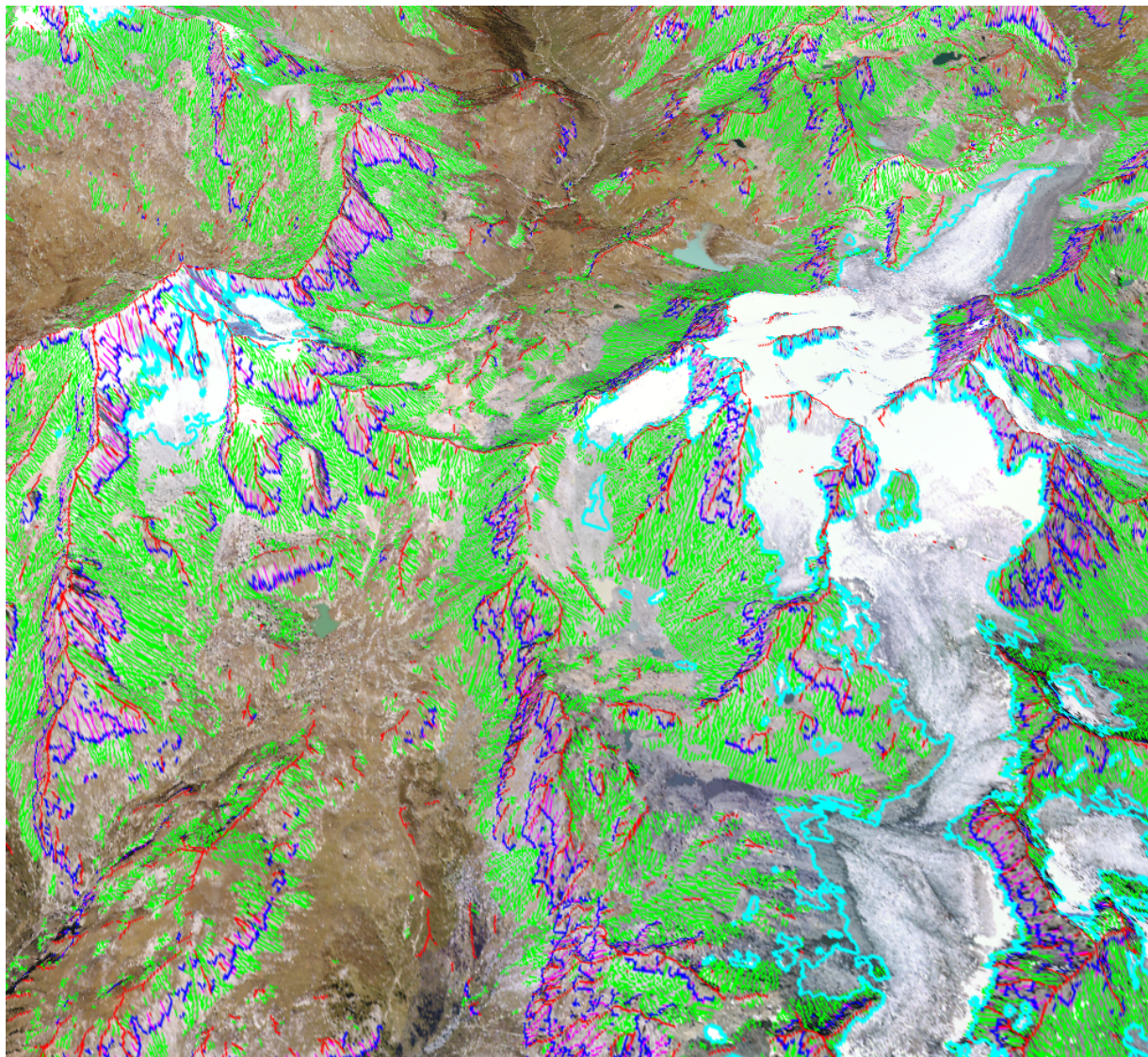


FIGURE 99 – Exemple de vue 3D des différents éléments détectés

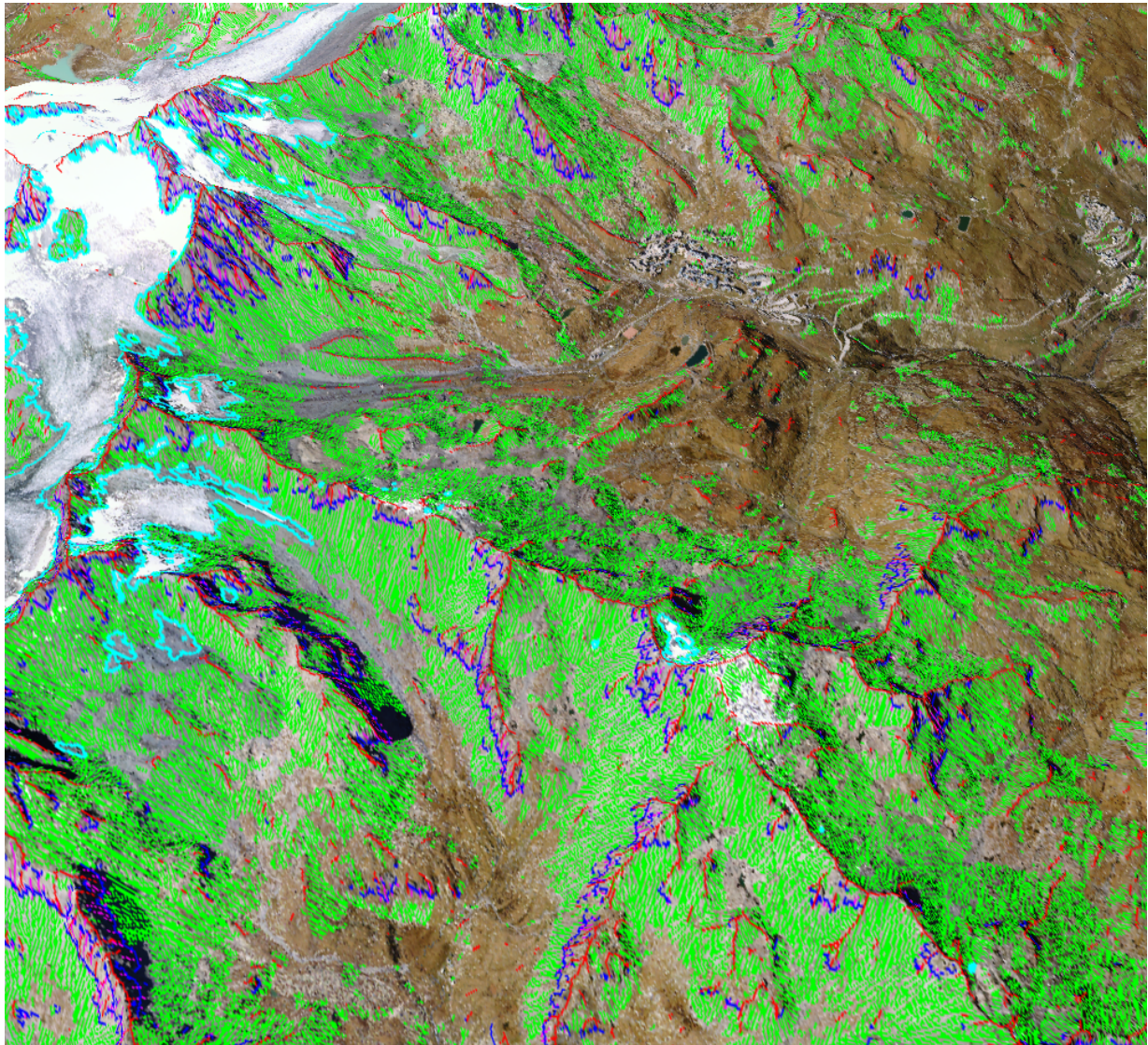


FIGURE 100 – Exemple de vue 3D des différents éléments détectés

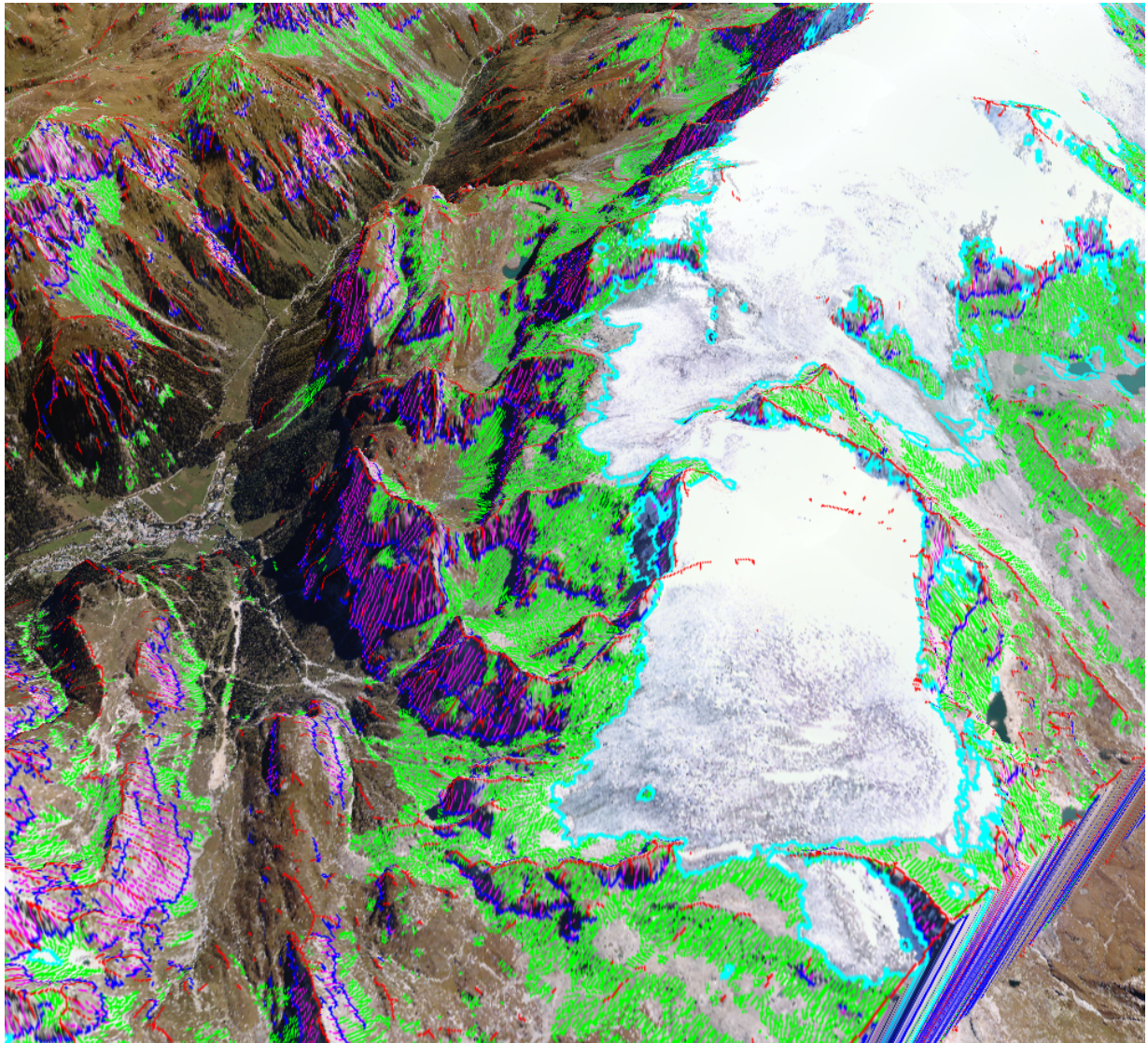


FIGURE 101 – Exemple de vue 3D des différents éléments détectés

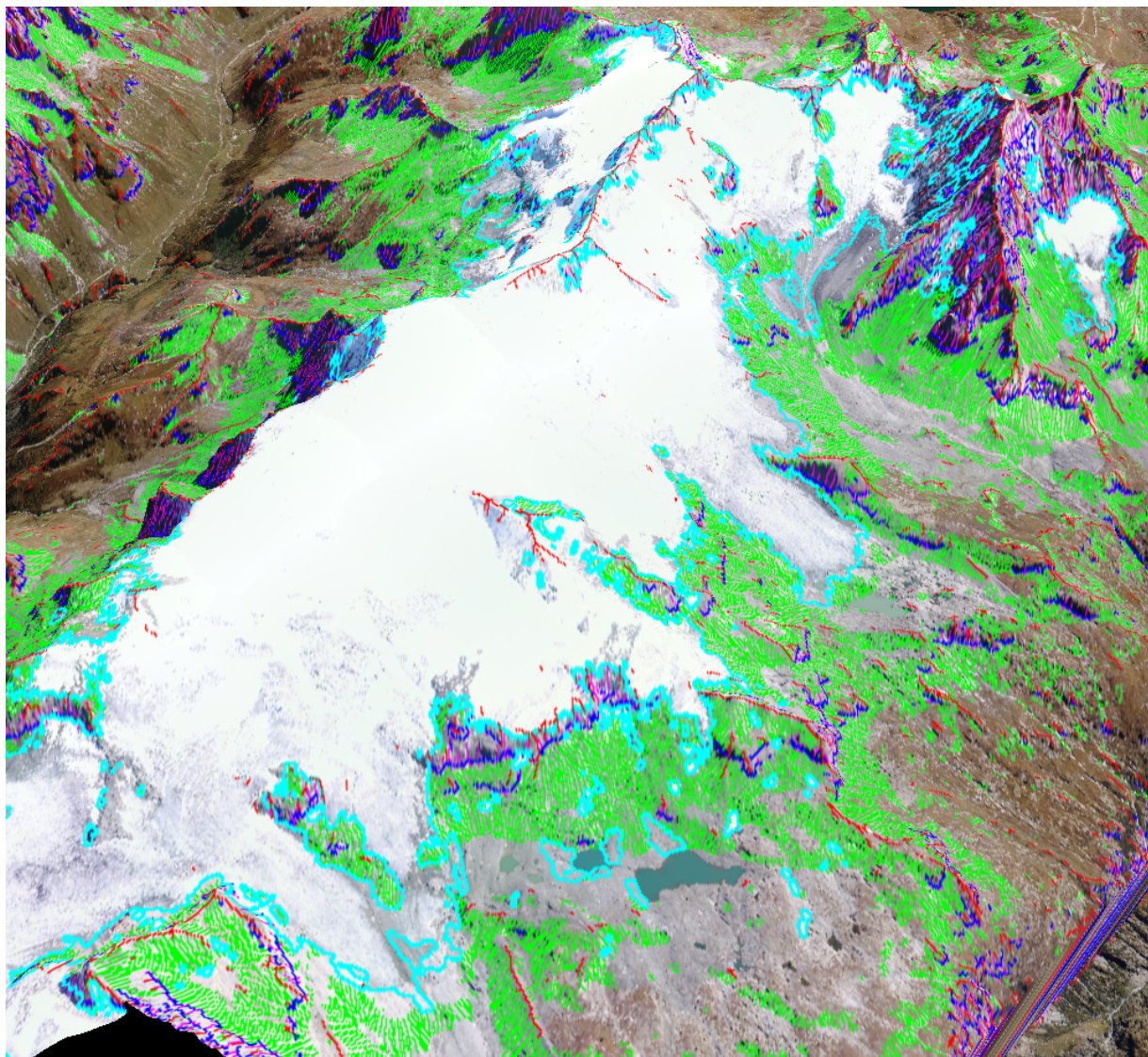


FIGURE 102 – Exemple de vue 3D des différents éléments détectés

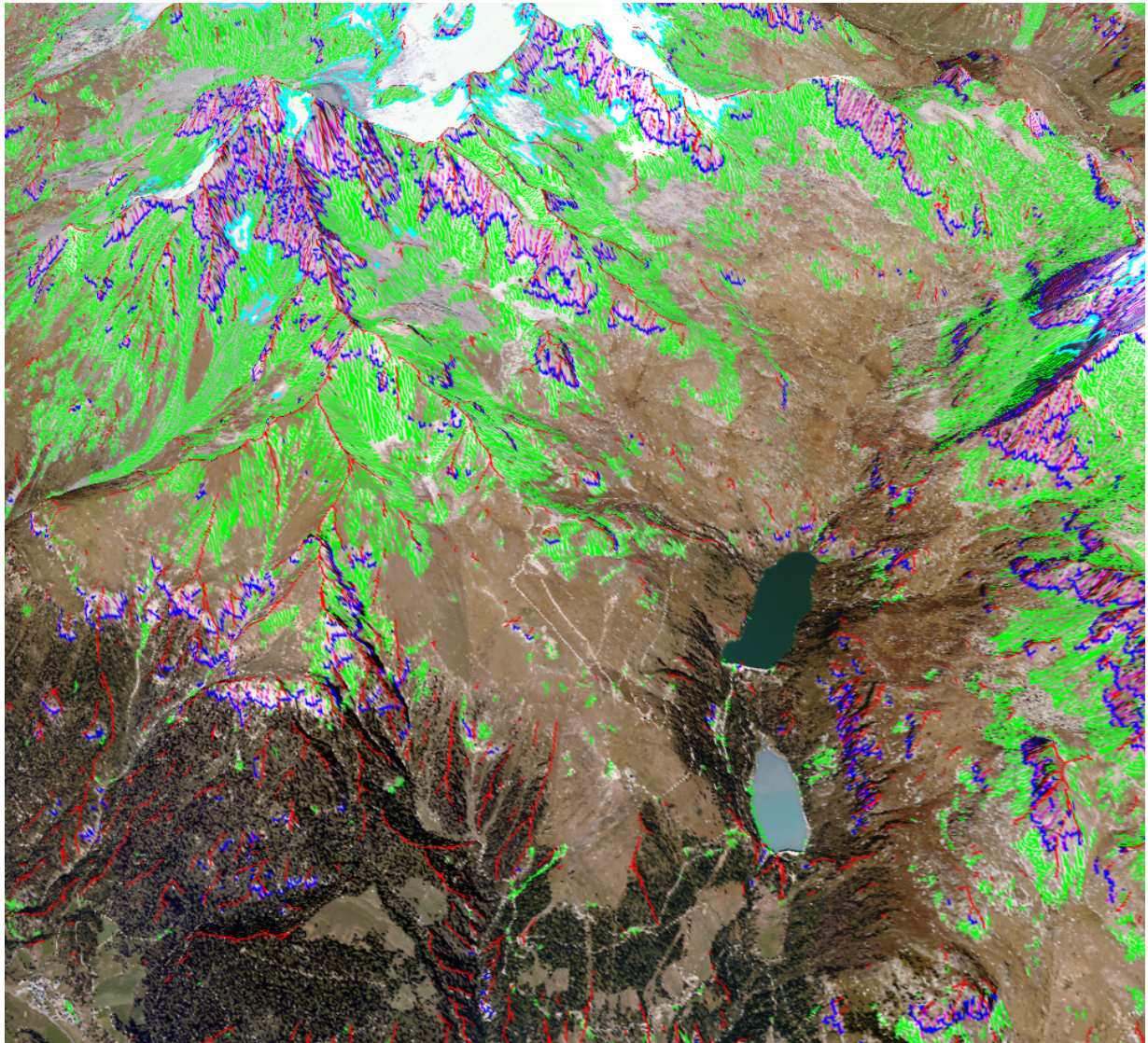


FIGURE 103 – Exemple de vue 3D des différents éléments détectés

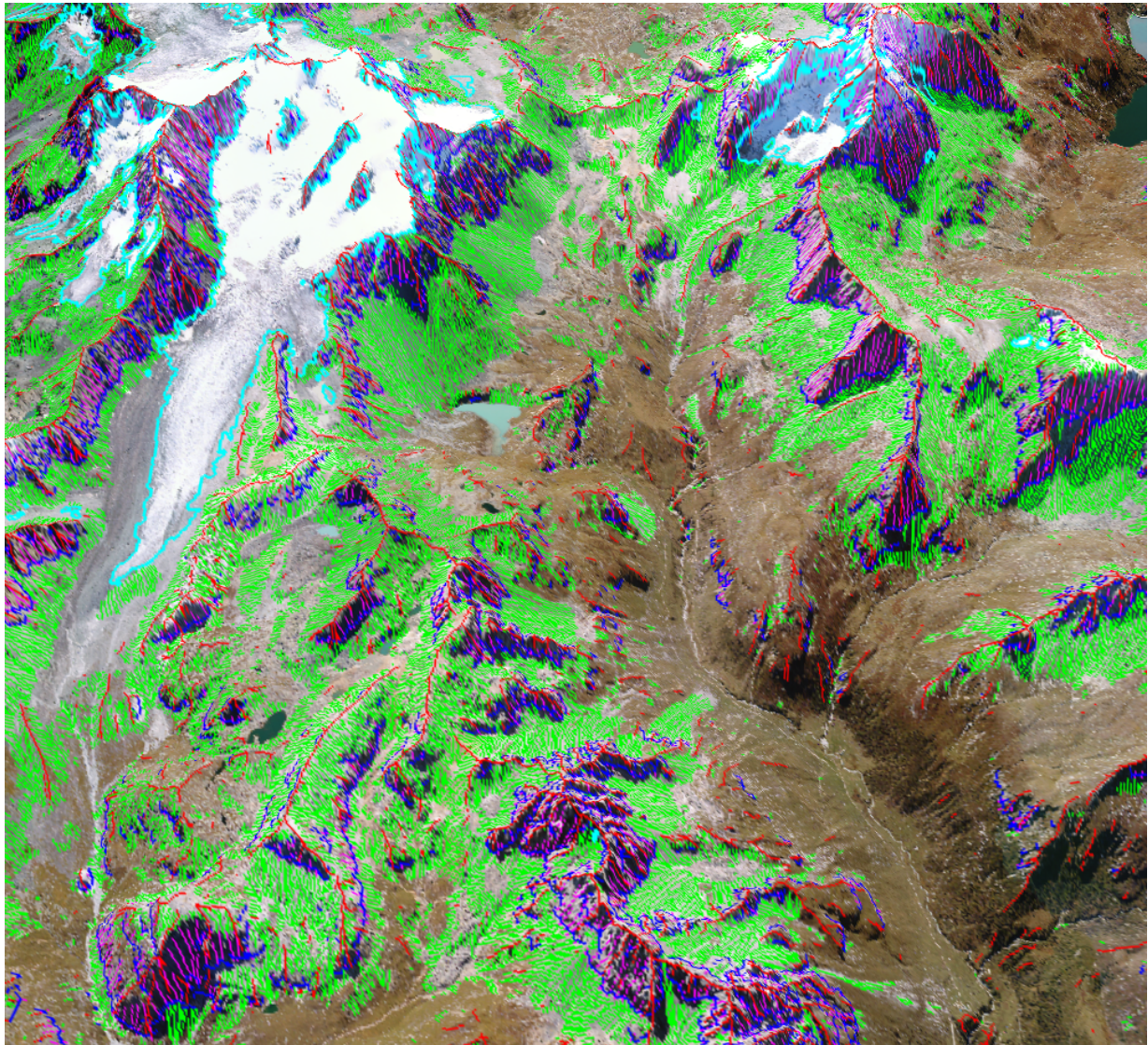


FIGURE 104 – Exemple de vue 3D des différents éléments détectés

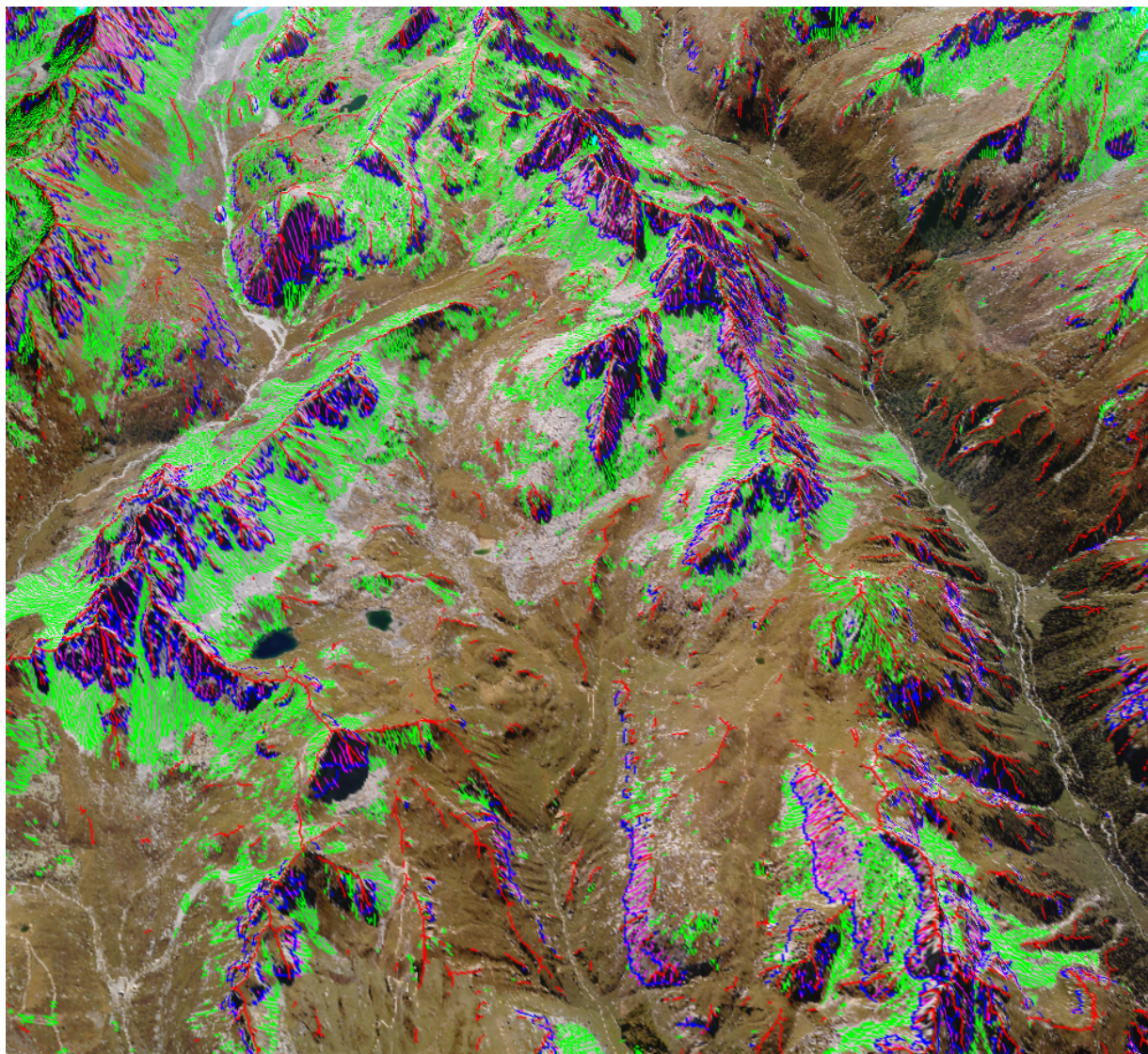


FIGURE 105 – Exemple de vue 3D des différents éléments détectés

16.2 Représentation cartographique

Un premier prototype de rendu cartographique à partir des différents éléments dont l'extraction a été décrite dans les sections précédentes a été réalisé au SDC. Les figures 106, 107 et 108 en montrent des exemples sur deux jeux-tests différents (Ossau et Modane).

Ces prototypes ont alors fait l'objet d'une évaluation [DL08] par des utilisateurs "experts" de la carte de base en montagne (Peloton de Gendarmerie de Haute Montagne, Ecole Nationale de Ski et d'Alpinisme, Centre National d'Instruction de Ski et d'Alpinisme de la Gendarmerie, Guides de Haute Montagne). Les principaux reproches concernaient une représentation trop "floue" du relief, ne le faisant pas assez ressortir (perte de la perception 3D qu'on peut avoir à la lecture de la carte actuelle). Certaines zones très pentues ne le semblent pas sur la carte : elles ne paraissent pas assez dangereuses.

En conséquence, un second prototype a été proposé, de manière à faire ressortir davantage le relief. Il est visible sur la figure 108.

On pourrait aussi remarquer que sur la carte actuelle, les courbes de niveaux sont plus resserrées, donnant l'impression que les zones de forte pente sont colorées en orange-marron, et accentuant ainsi l'impression de relief ; cela fait ressortir à la lecture de la carte un bloc coloré correspondant aux zones où le relief est le plus fort.

L'estompage y est également plus marqué. Par conséquent, une possible solution pour augmenter l'impression de relief à la lecture de la carte pourrait consister à se doter d'un estompage un peu différent dans les zones de rochers ou plus généralement les zones de forte pente, par exemple en s'inspirant des méthodes présentées dans [Jen01, HJDH01, Hur08], voire en mettant de la couleur dans ces zones de rochers.

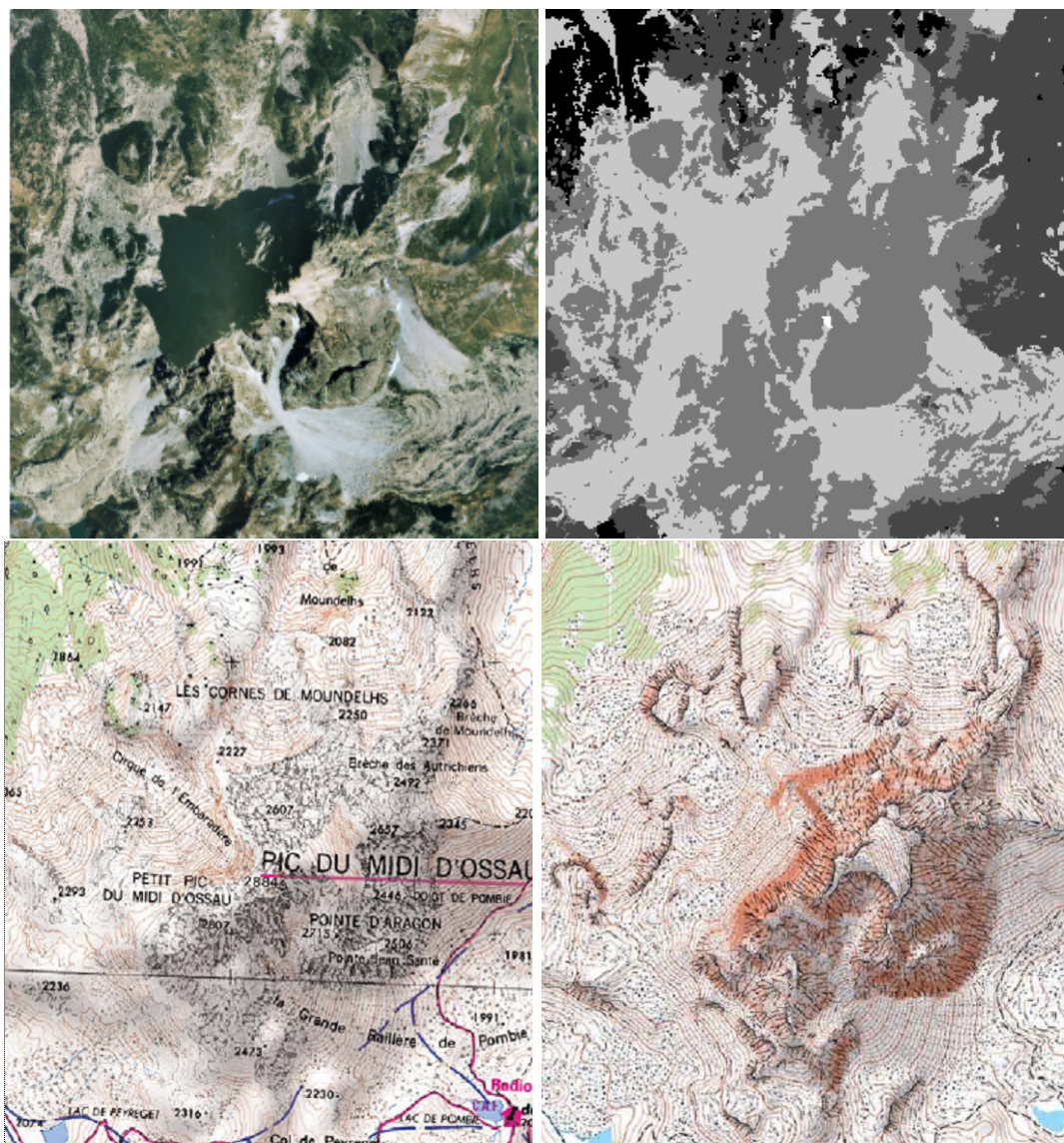


FIGURE 106 – Première ligne : ortho-image (à gauche) et classification de l'occupation du sol (à droite)
Seconde ligne : carte actuelle (à gauche) et prototype (à droite)

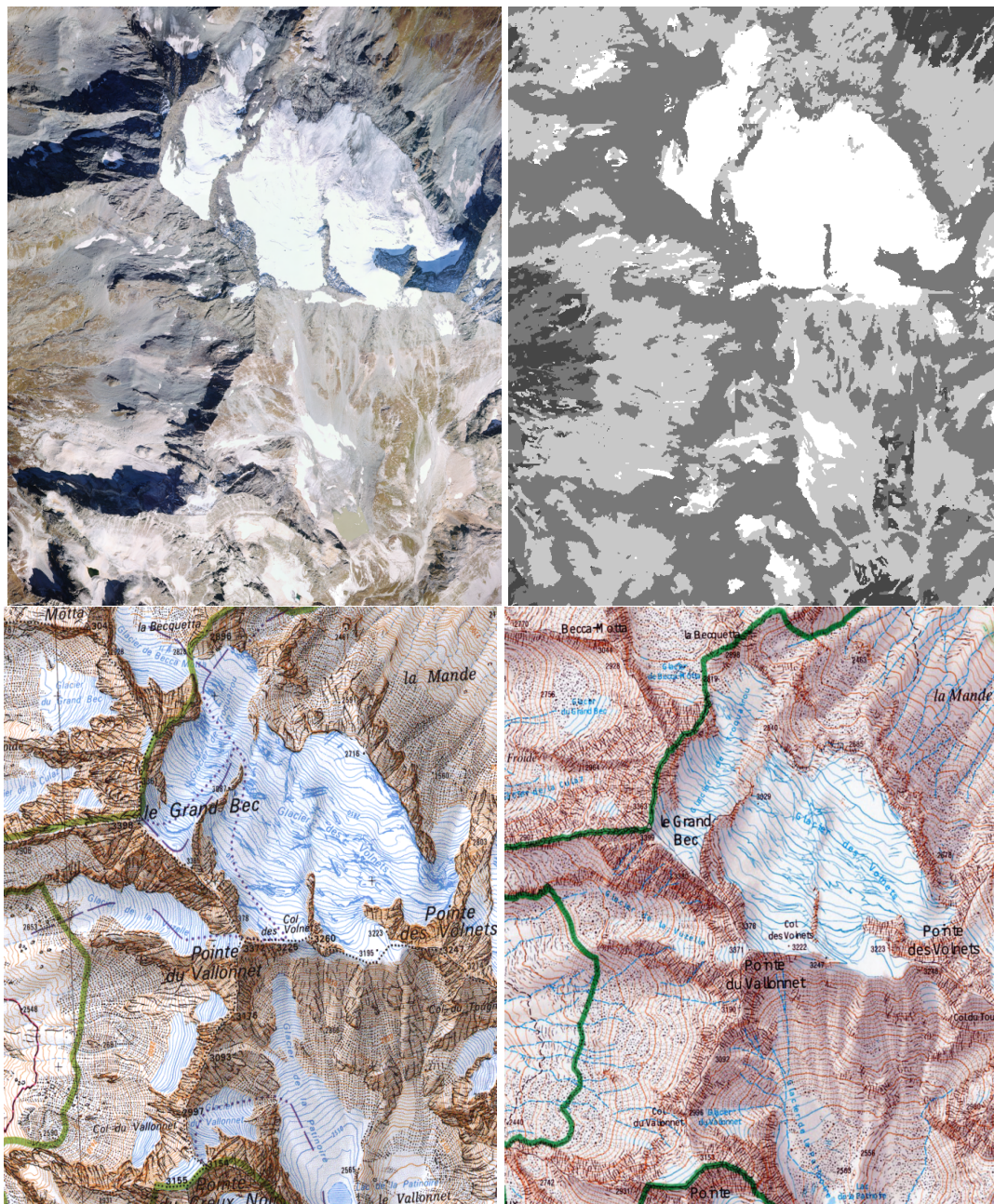


FIGURE 107 – Première ligne : ortho-image (à gauche) et classification de l'occupation du sol (à droite)
 Seconde ligne : carte actuelle (à gauche) et prototype (à droite)

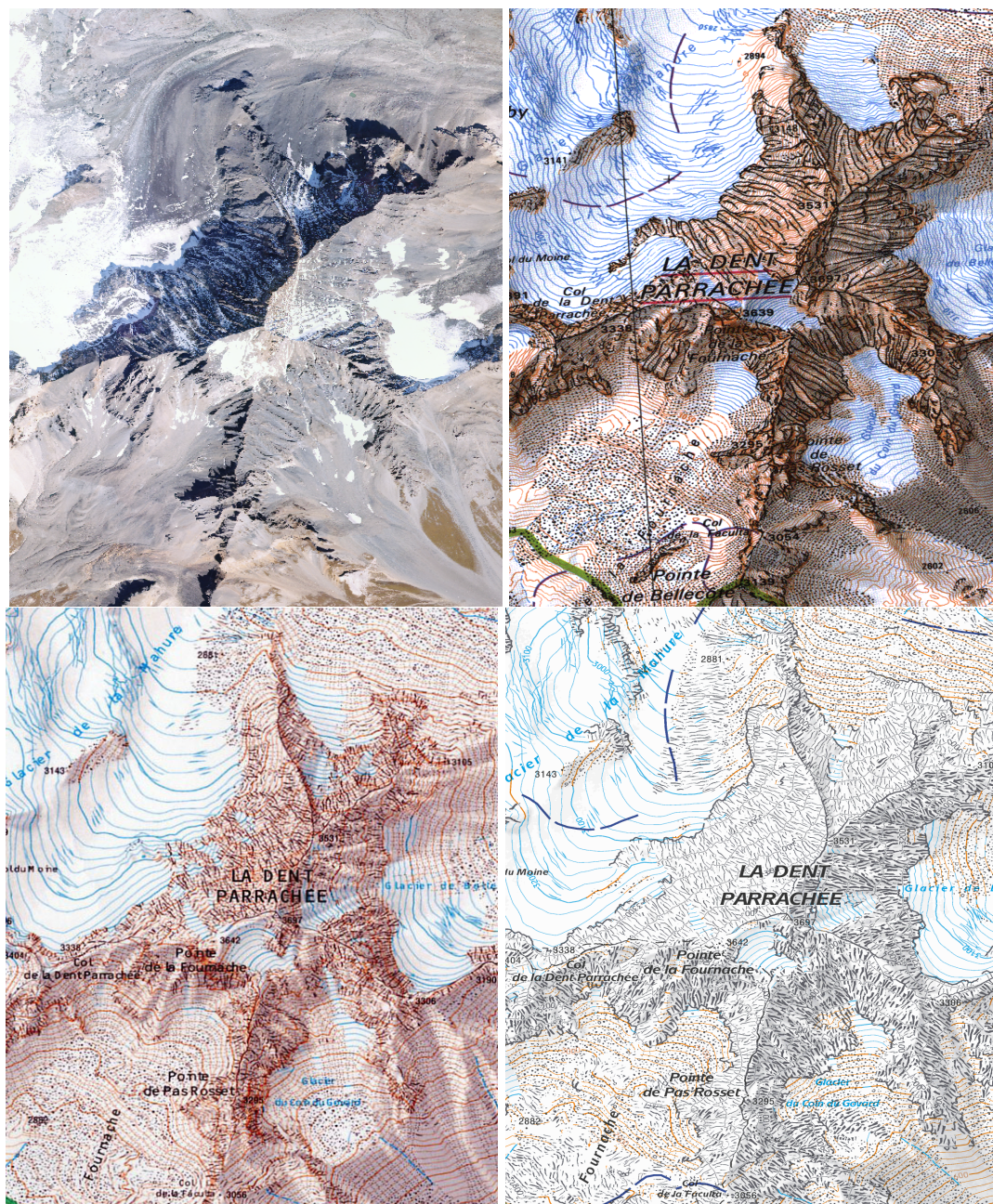


FIGURE 108 – Première ligne : ortho-image (à gauche) et carte actuelle (à droite)
 Seconde ligne : premier prototype (à gauche) et second prototype (à droite)

17 Evaluation - conclusion

Un autre reproche récurrent lors de l'évaluation par les utilisateurs "experts" de la carte [DL08] par comparaison à la carte actuelle concerne l'absence ou la disparition d'un certain nombre d'éléments plus détaillés, comme par exemples les barres rocheuses, les dolines, les rochers isolés. Or, ces informations étaient auparavant obtenues par restitution stéréoscopique par des opérateurs. En revanche, elles sont bien difficiles à extraire par la méthode proposée ici, dont le but visé était surtout d'avoir un fond OCS d'habillage de la carte : il s'agit en effet d'éléments relativement fins ou de surface peu importante, n'apparaissant souvent de manière flagrante ni sur l'ortho-image, ni dans le MNT.

[Gon09] présente une évaluation de l'ensemble de la chaîne réalisée au SDC sur une autre zone test, comportant une mission terrain. Cette évaluation reprend les problèmes déjà évoqués.

Il faut aussi garder à l'esprit que la méthode d'extraction avait surtout pour objectif de fournir un habillage d'occupation du sol pour le fond de carte. Aussi, il n'était pas prévu d'extraire automatiquement certains éléments fins.

En outre, il n'est pas toujours évident de séparer dans ces évaluations ce qui correspond à la qualité de l'extraction de l'occupation du sol de ce qui tient au rendu cartographique des thèmes détectés. Or ce rendu cartographique est également concerné par d'autres éléments (courbes de niveau, estompage, ...) eux aussi différents de ceux de la carte actuelle.

Par ailleurs, ces évaluations ont consisté en une comparaison avec la carte actuelle. Or, la qualité de la carte actuelle peut varier d'une zone à l'autre de manière assez importante (voir exemples en section). La zone d'étude de Modane était couverte par une carte d'excellente qualité et de beau rendu visuel, en comparaison de laquelle le prototype paraissait de moindre qualité ; mais qu'en il en aurait peut-être été différemment ailleurs.

Quatrième partie

Mise en œuvre opérationnelle - évaluation - bilan

18 Processus mis en œuvre

Pour mémoire, la processus complet mise en œuvre peut se résumer par le schéma suivant (figure 109) :

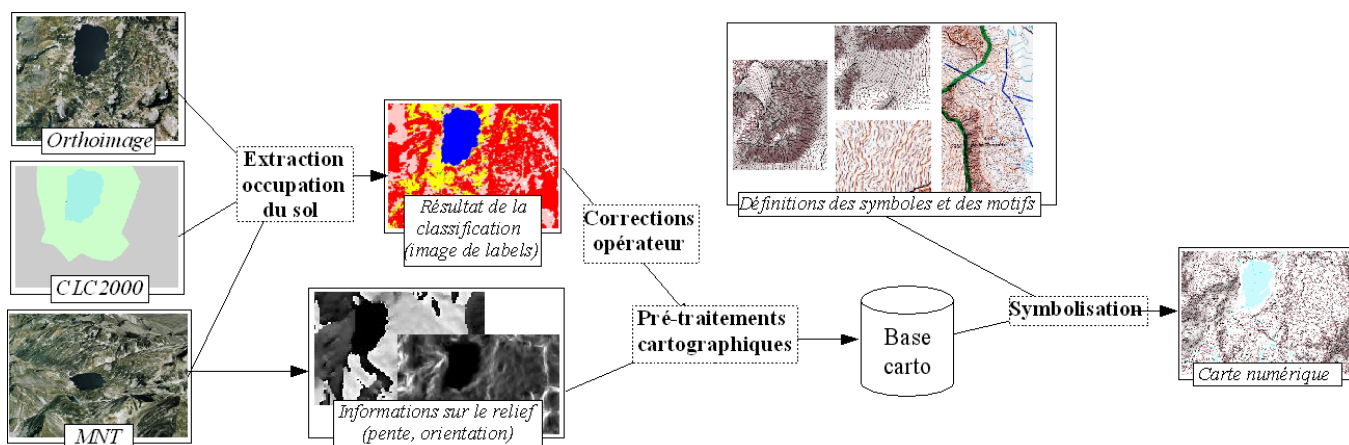


FIGURE 109 – Vue d’ensemble du processus complet

19 Mise en œuvre opérationnelle et scénarii d’industrialisation envisagés

19.1 Corrections interactives

L’extraction automatique de l’occupation du sol n’est pas parfaite et comporte des erreurs, des confusions. Par conséquent, une étape de corrections interactives par des opérateurs doit être prévue à l’issue de l’extraction automatique de l’occupation du sol, juste après le post-traitement visant à supprimer les zones trop petites pour avoir une signification cartographique et avant l’extraction d’éléments pour la représentation cartographique.

19.2 Sous-échantillonnage

Le travail d’extraction de l’occupation du sol s’effectue sur des dalles de la BDOrtho (50cm) sous-échantillonnées d’un facteur 4. Le travail s’effectue donc sur des ortho-images de résolution 2m.

Le fait de travailler sur ces images sous-échantillonnées permet d’une part de bien réduire les temps de calcul et d’autre part d’éviter certains problèmes de sursegmentation tout en restant parfaitement compatible avec le niveau de généralisation souhaité initialement.

Par ailleurs, le fait de travailler à plus forte résolution n’améliorait pas nécessairement le résultat, la résolution du MNT étant de toutes manières plus faible.

Travailler à pleine résolution aurait pu présenter un intérêt pour prendre en compte la texture, mais cette notion est apparue difficile à exploiter au vu de tests effectués :

- texture aussi variable que la radiométrie au sein d’une même classe (par exemple pour les éboulis : tantôt très linéaire, tantôt lisse ou tantôt en pointillé (blocs épars))
- texture parfois parasitée par d’autres éléments.

En conséquence, la première tâche à effectuer consiste à sous-échantillonner les images.

19.3 Temps de calcul et parallélisation

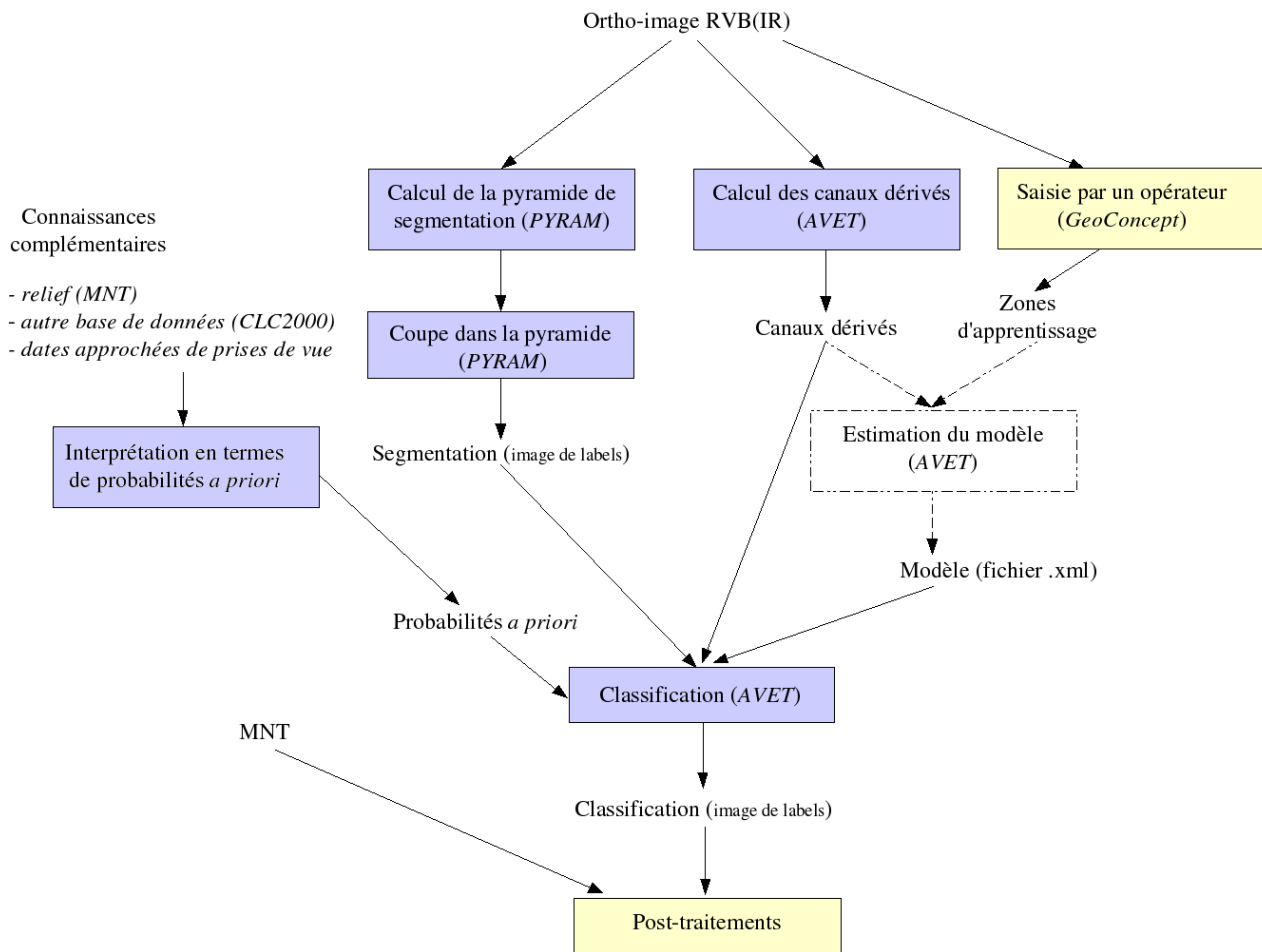


FIGURE 110 – Chaîne de traitement complète (en violet, tâches effectuées dalle par dalle, et donc parallélisables ; en jaune, tâches interactives nécessitant l'intervention d'un opérateur)

Les tâches les plus longues sont la segmentation et la classification. Il faut en moyenne 3 minutes pour segmenter une dalle kilométrique BDOrtho (50cm) sous-échantillonnée d'un facteur 4, et moins d'une minute pour la classifier. Or, excepté lors de l'étape d'estimation du modèle, les logiciels *AVET* et *SXS/PYRAM* permettent de travailler dalle par dalle. Les autres outils développés (pour le sous-échantillonnage des images et le calcul des probabilités *a priori*) travaillent également dalle par dalle.

Ceci permet de traiter plusieurs dalles en parallèle. Il est donc possible de réduire le temps de calcul en effectuant du calcul distribué :

- soit grâce à des outils comme *condor* [TTL05, Con09a, Con09b], permettant de réquisitionner toute machine disponible et d'y lancer des traitements
- soit plus simplement, en lançant les traitements en parallèle sur les différentes cpus d'une même machine, en utilisant des outils du type "*make.exe -f Makefile -j nb_cpus*" permettant de lancer simplement des calculs parallèles sans avoir à modifier le code en profondeur.

Les nouveaux PCs disponibles étant généralement équipés d'au moins 4 cpus, c'est cette seconde solution qui a été retenue, car amplement suffisante, au vu de la taille des chantiers à traiter (feuille carto).

19.4 Industrialisation - choix d'une interface

L'industrialisation des outils devrait donc consister en la réalisation d'une interface de gestion de chantier permettant de générer les fichiers de configuration adéquats et de lancer les exécutables, ainsi que d'un outil de saisie de zones d'apprentissage.

Plusieurs possibilités existent :

— **Géoview : suite du portage sous Géoview :**

Dans le cadre d'une collaboration entre la MATIS et IGN Espace, *AVET* et *SXS/PYRAM* ont été industrialisés dans Géoview par E. Collet

Le menu "classification" ajouté dans Géoview donne accès à un ensemble d'interfaces permettant de régler les différents paramètres d'*AVET* et de *SXS* et de générer automatiquement les fichiers de configuration correspondants, puis de lancer les exécutables.

Un outil de saisie de la vérité terrain (zones d'apprentissage et zones témoins) a également été développé dans Géoview. Il prend en entrée une ortho-image ainsi qu'une ou plusieurs segmentations de cette image (i.e. des images de labels correspondant à des coupes à différents niveaux dans la pyramide de segmentation hiérarchique) et permet à l'opérateur d'attribuer d'un simple clic sa classe à une région de la segmentation. On obtient en sortie une image de label pouvant être lu par *AVET*. Les opérations de saisie sont donc simplifiées par rapport à l'utilisation de GéoConcept, puisqu'il n'est plus nécessaire de saisir le contour de la zone. Une fois cette vérité terrain saisie, le modèle, puis la classification peuvent être calculés.

Il faudrait ajouter à cet outil une gestion des probabilités *a priori*.

Géoview ne fonctionne que sous MACOS, ce qui constitue une limite dans ce contexte où les autres outils de la chaîne Nouvelle Carte de Base fonctionnent sous Windows.

— **Reprise de l'outil SEVE du SBV :**

L'outil SEVE du SBV a été initialement développé afin de réaliser la saisie de la couche arborée de la BD TOPO. Il comporte un outil de saisie interactive qui prend en entrée des dalles d'ortho-image ainsi que plusieurs segmentations de cette images (i.e. des images de labels correspondant à des coupes à différents niveaux dans la pyramide de segmentation hiérarchique). Cet outil permet alors à l'opérateur d'attribuer d'un simple clic sa classe à une région de la segmentation.

Un tel outil serait très pratique à la fois pour saisir les zones d'apprentissage et surtout pour effectuer les corrections interactives de la classification obtenue.

Néanmoins, l'utilisation de SEVE induirait la contrainte de se placer dans une structure de chantier pouvant peut-être s'avérer contraignante.

Un autre problème concerne les problèmes actuels liés à la maintenance de cet outil. Or, l'utiliser dans notre contexte impliquerait sans doute quelques évolutions.

— **Développement d'une interface sous GéoConcept :**

GéoConcept est l'outil utilisé pour la première partie de la rédaction cartographique. Par ailleurs, c'est également à l'aide de ce SIG que l'acquisition de la vérité terrain a été réalisée dans la présente étude. Les zones d'apprentissage et les zones témoin étaient saisies à la main, puis exportées dans un fichier texte (.txt ou .gxt) pouvant être lu par *AVET*.

Cet outil peut donc constituer à la fois une interface permettant la saisie de zones d'apprentissage, la visualisation des résultats obtenus (en superposition avec l'ortho-image), la correction interactive de ces résultats, l'affichage des éléments linéaires extraits automatiquement pour la représentation cartographique sur fond d'ortho-image et le lancement des outils de rendu cartographique (menus existants). Un autre avantage de cette solution réside dans le fait que les opérateurs sont déjà familiarisés à l'utilisation de cet outil.

Il s'agirait alors de développer une interface de gestion de chantier permettant l'importation des ortho-images, le choix de certains paramètres d'*AVET* ou de *SXS/PYRAM* et la création automatique des fichiers de configuration correspondants puis le lancement des exécutables.

La seule limite à l'utilisation de Géoconcept concerne la phase de correction interactives. Il est en effet plus long et plus difficile de modifier/corriger des objets devant constituer une partition du terrain sous forme vecteur en modifiant la position des points de leur contour que sous forme raster avec un outil comme SEVE.

C'est la solution GéoConcept qui a finalement été retenue.

20 Evaluation - bilan

20.1 Evaluation par les utilisateurs de la carte

Ainsi que cela a déjà été dit plus haut, les prototypes de carte (surtout sur la zone de Modane) ont été soumis à un panel d'utilisateurs "experts" de la carte de base (Peloton de Gendarmerie de Haute Montagne, Ecole Nationale de Ski et d'Alpinisme, Centre National d'Instruction de Ski et d'Alpinisme de la Gendarmerie, Guides de Haute Montagne). L'évaluation qu'ils en ont faite est synthétisée dans [DL08].

Les principaux reproches concernaient une représentation trop "floue" du relief, ne le faisant pas assez ressortir (perte de la perception 3D qu'on peut avoir à la lecture de la carte actuelle). Certaines zones très pentues ne le semblent pas sur la carte : elles ne paraissent pas assez dangereuses. Par ailleurs, les zones rocheuses tendent à ne pas être assez visibles du fait de leur représentation, noyées au milieu des éboulis. Ces critiques concernaient un premier prototype de carte.

Un second prototype (amélioré de manière à mieux faire ressortir le relief) a reçu un meilleur accueil, notamment sur le fait que les blocs rocheux importants y ressortent désormais plus nettement, du fait du tracé de leur bordure inférieure, même si une partie des critiques ont été de nouveau formulées.

Un autre reproche récurrent lors de l'évaluation par les utilisateurs "experts" de la carte [DL08] par comparaison à la carte actuelle concerne l'absence ou la disparition d'un certain nombre d'éléments plus détaillés, comme par exemples les barres rocheuses, les dolines, les rochers isolés. Or ces informations présentent une certaine importance car elles signalent des zones potentiellement dangereuses. Ces éléments étaient auparavant obtenus par restitution stéréoscopique par des opérateurs. En revanche, ils sont bien difficiles à extraire par la méthode proposée ici, dont le but visé était surtout d'avoir un fond OCS d'habillage de la carte : il s'agit en effet d'éléments relativement fins ou de surface peu importante, n'apparaissant souvent de manière flagrante ni sur l'ortho-image (comme par exemple un défilé rocheux masqué par de la végétation), ni dans le MNT. En outre, ils sont parfois bien détectés mais tendent à ne pas apparaître clairement (noyés parmi les éboulis) du fait de la représentation choisie.

D'autres critiques concernaient en réalité le rendu cartographique de manière plus générale (courbes de niveau, estompage, ...). On pourrait ainsi remarquer que sur la carte actuelle, les courbes de niveaux sont plus resserrées, donnant l'impression que les zones de forte pente sont colorées en orange-marron, et accentuant ainsi l'impression de relief. L'estompage y est également plus marqué. Par conséquent, une possible solution pour augmenter l'impression de relief à la lecture de la carte pourrait consister à se doter d'un estompage un peu différent dans les zones de rochers ou plus généralement les zones de forte pente (par exemple en s'inspirant des méthodes présentées dans [Jen01, HJDH01, Hur08]).

Il faut donc garder à l'esprit que la méthode d'extraction présentée dans cette étude avait surtout pour objectif de fournir un habillage d'occupation du sol pour le fond de carte. Aussi, il n'était pas prévu d'extraire automatiquement certains éléments fins. Or, il n'est pas toujours évident de séparer dans ces évaluations ce qui correspond à la qualité de l'extraction de l'occupation du sol de ce qui tient au rendu cartographique des thèmes détectés. Or ce rendu cartographique est également concerné par d'autres éléments (courbes de niveau, estompage, ...) indépendants des éléments extraits ici.

Par ailleurs, ces évaluations ont en partie consisté en une comparaison avec la carte actuelle. Or, la qualité de la carte actuelle peut varier d'une zone à l'autre de manière assez importante (voir exemples en section). La zone d'étude de Modane était couverte par une carte d'excellente qualité et de beau rendu visuel, en comparaison de laquelle le prototype paraissait de moindre qualité ; mais il aurait pu en être différemment ailleurs.

20.2 Evaluation IGN/SDC

[Gon09] présente une évaluation de l'ensemble de la chaîne réalisée au SDC sur une autre zone test, comportant une mission terrain. Cette évaluation reprend les problèmes déjà évoqués, notamment pour la partie extraction de l'occupation du sol. Elle fait en particulier un bilan des reprises interactives et de leur difficulté. Dans la plupart des cas, elles améliorent grandement la situation, dans d'autres cas, l'opérateur ne peut rien faire, notamment dans le cas de zones d'ombre, ou de barres rocheuses cachés par de la végétation. [Gon09] suggère de s'aider également d'un estompage (ou de l'ancienne carte) lors des corrections interactives.

20.3 Perspectives

Quelques autres pistes d'amélioration sont proposés dans [Gon09] au sujet des corrections interactives, et aussi sur l'importance pour l'opérateur effectuant ces corrections d'avoir une assez bonne connaissance du milieu montagneux.

Pour améliorer la lisibilité de la carte et l'impression de relief dans les zones de rochers ou plus généralement les zones de plus forte pente, il serait possible de s'y doter d'un estompage un peu différent du reste de la carte (par exemple en s'inspirant des méthodes présentées dans [Jen01, HJDH01, Hur08]). Il faut aussi avoir à l'esprit que sur les cartes actuelles, la forte densité des courbes de niveau de couleur orange-marron-ocre dans ces zones y donne l'impression d'un bloc coloré qui se détache du reste de la carte.

Plus de lignes de structure (et en particulier de lignes de crête) faciliterait également la compréhension du relief.

Les détails importants manquants (dolines, barres rocheuses, rochers isolés, ...) sont ainsi qu'il a déjà été dit difficiles à extraire par l'approche proposée (peu visible en tant que tels sur l'ortho-image, voire dans le MNT). Il pourrait par conséquent être intéressant de voir si l'utilisation de MNS de corrélation faciliterait leur détection automatique.

Une autre question restée ouverte concerne la représentation de lignes de ruptures (crevasses, séracs) au niveau des glaciers. Est-il souhaitable de le faire, et dans ce cas, est-il possible de les détecter de manière automatique ?

Cinquième partie

Annexes

A Calcul des canaux utilisés lors de la classification

AVET permet de calculer différents canaux radiométriques et de texture à partir des canaux rouge-vert-bleu-infrarouge d'une image.

Le canal NDVI (Normalized Difference Vegetation Index..vérifier le nom du canal) se calcule à partir des canaux rouge et infrarouge. Il s'agit avant tout d'un indice permettant de séparer les zones de végétation des autres zones (rochers, sol nu, bâtiments, ...).

La formule utilisée est la suivante :

$$NDVI = \frac{IR - R}{IR + R}$$

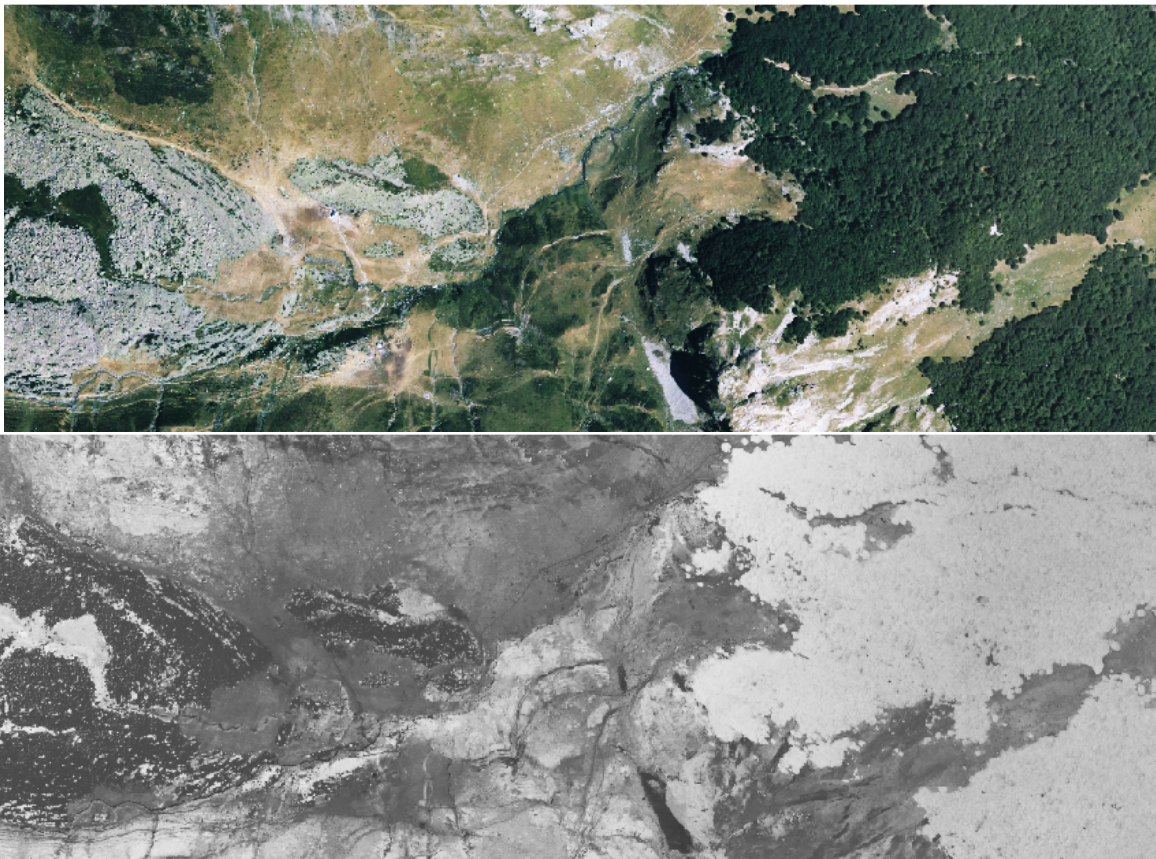


FIGURE 111 – Image rouge-vert-bleu ; Canal NDVI

B Glossaire

AVET *Automatic Vegetation Extraction Tool* : outil de classification utilisé dans cette étude. Son fonctionnement est décrit dans la section 4.2.1. [TS06, TSB05]

SXS et PYRAM : outils de segmentation hiérarchique (voir section 4.1) [Gui04, GLMC01, GCLM06].

MAP ou *Maximum A Posteriori* : désigne ici une méthode de classification (prise en compte de probabilités *a priori* de rencontrer les différentes classes).

ML ou *Maximum Likelihood* ou maximum de vraisemblance : désigne ici une méthode de classification (pas de probabilités *a priori* de rencontrer les différentes classes).

MNS : Modèle Numérique de Surface (sol+sursol)

MNT : Modèle Numérique de Terrain

CLC2000 : Corine Land Cover 2000. Base de données européenne d'occupation du sol. [BFO00]

OCS : OCcupation du Sol

C Présentation de l'utilisation de *PYRAM*

PYRAM est un outil de segmentation hiérarchique : il permet à la fois de calculer une pyramide de segmentation et d'y effectuer des coupes. C'est un outil sans interface qui se lance en ligne de commande en lui fournissant un fichier de paramètres :

```
./PYRAM adresse_fichier_parametres
```

Le fichier de paramètres est un fichier texte commençant par :

ACTION *pyramide* ou *cut* ou *pyramide-and-cut*

On a ensuite trois cas de figure :

- Si *ACTION* vaut *pyramide*, alors *PYRAM* calcule la pyramide de segmentation et l'enregistre mais n'y effectue pas de coupe. Le reste du fichier de paramètres a alors la structure suivante :

```
IMAGEFILE nom-du-fichier-image
[ SOUSECH facteur-de-sous-échantillonnage ] (défaut : 1)
[ ALPHA alpha-du-deriche ] (défaut : 1)
[ VERBOSE niveau-de-verbosité ] (défaut : 0)
[ ISSFILE nom-du-fichier-iss ] (défaut : nom-du-fichier-image.iss)
[ MODEBORD mode-bord (val-bord = 1 si prise en compte des bords, 0 sinon) ] (défaut : 0)
```

- Si *ACTION* vaut *cut*, alors on se limite à couper à un ou plusieurs niveaux dans une pyramide de segmentation calculée et enregistrée au préalable. La suite du fichier de paramètres est donc la suivante :

```
ISSFILE nom-du-fichier-iss
[ SOUSECH facteur-de-sous-échantillonnage ] (défaut : 1)
[ MODESEVE mode-seve ] (défaut : 0) (suréchantillonnage de l'image de label)
CUTS valeur nom-du-fichier
[ CUTS valeur nom-du-fichier ]
[ CUTS valeur nom-du-fichier ]
[ ... ]
```

On aura une ligne "*CUTS valeur nom-du-fichier*" par coupe souhaitée. Avec cette syntaxe, le champ "*valeur*" contient la valeur de l'"échelle" à laquelle on souhaite effectuer une coupe dans la pyramide tandis que le champ "*nom-du-fichier*" est l'adresse à laquelle on souhaite enregistrer la segmentation obtenue à cette échelle. Rappelons au passage que cette segmentation est une image de labels et doit donc être sauvegardée dans un format adéquat (.tif, .rle, ...).

- Si *ACTION* vaut *pyramide-and-cut*, alors on va effectuer les deux actions précédente, i.e. à la fois calculer la pyramide de segmentation et y effectuer des coupes. La structure du fichier de paramètres est alors :

```
IMAGEFILE nom-du-fichier-image
[ SOUSECH facteur-de-sous-échantillonnage ] (défaut : 1)
[ ALPHA alpha-du-deriche ] (défaut : 1)
[ VERBOSE niveau-de-verbosité ] (défaut : 0)
[ ISSFILE nom-du-fichier-iss ] (défaut : pas de sauvegarde)
[ MODESEVE mode-seve ] (défaut : 0)
[ MODEBORD mode-bord (val-bord = 1 si prise en compte des bords, 0 sinon) ] (défaut : 0)
CUTS valeur nom-du-fichier
[ CUTS valeur nom-du-fichier ]
[ CUTS valeur nom-du-fichier ]
[ ... ]
```

Le fichier .iss est un des fichiers enregistrés lors de la sauvegarde de la pyramide. Les noms des autres fichiers sont bâtis sur le même modèle. Ainsi, à l'issue d'une segmentation, on obtient les fichiers ????.iss, ???_base.rle (sur-segmentation à la base de la pyramide) et ????.sxs ("plan" de pyramide).

Sous-échantillonnage des images : *SOUSECH* et *MODESEVE* Les temps de calcul sont loin d'être linéaires par rapport à la taille des images à traiter, et peuvent rapidement exploser. Une manière d'aller plus vite est de travailler sur une image sous-échantillonnée, ce qui permet par ailleurs en particulier dans le cadre d'une chaîne d'extraction de l'occupation du sol d'obtenir des régions un peu plus généralisées. Le facteur de

sous-échantillonnage est défini par le champ *SOUSECH*. L'image fournie à *pyram* est donc préalablement sous-échantillonnée de ce facteur, le calcul de segmentation s'effectuant ensuite sur l'image réduite obtenue.

Le paramètre *MODESEVE* permet quant à lui de préciser ce que l'on souhaite récupérer. S'il vaut 1, les images de labels obtenues à l'issue d'une coupe dans la pyramide sont sur-échantillonnées du facteur donné par le champ *SOUSECH* : il s'agit en effet ici simplement de compenser les effets du sous-échantillonnage effectué lors du calcul de la pyramide.

Exemple Dans le cas de la chaîne d'extraction de l'occupation du sol présentée précédemment, c'est cette dernière action (*pyramide-and-cut*) qui est utilisée. Les fichiers de paramètres sont donc du même type que celui de l'exemple suivant :

```
ACTION pyamide-and-cut
IMAGEFILE ortho.tif
SOUSECH 2
MODESEVE 1
CUTS 10 ortho-seg.rie
```

Cela signifie que l'on segmente l'image "ortho.tif" en calculant la pyramide de segmentation (sans la sauvegarder) avant d'y effectuer une coupe à l'échelle correspondant à la valeur 10.

D Présentation de l'utilisation d'*AVET*

D.1 Présentation générale

AVET est un outil sans interface graphique qui se lance en ligne de commande en lui fournissant un certain nombre de paramètres (qui sont des options mais également les actions à effectuer). La syntaxe générale est du type :

```
./AVET --parametre_1 Param_1 ... --parametre_n Param_n Action_1 ... Action_m
```

AVET est accompagné d'un fichier de configuration nommé *salade.conf* qui doit toujours se trouver dans le répertoire duquel on lance *AVET*. Ce fichier contient différents paramètres (canaux utilisés, emplacement du chantier et des images, méthode de classification...) dont a besoin le logiciel. Ces paramètres peuvent toutefois également être définis en ligne de commande parmi les arguments et options fournies à *AVET* à l'aide de l'option "*--define*". Il est aussi possible de créer un autre fichier de paramètres (ne contenant que quelques paramètres sur lesquels on souhaite jouer) et d'indiquer à *AVET* d'utiliser ce nouveau paramétrage à l'aide de l'option "*--appendconfig*". Dans le cas où un paramètre est défini à la fois dans le fichier de paramétrage et en ligne de commande, c'est la version fournie en ligne de commande qui prime.

Le fonctionnement originel d'*AVET* était le suivant :

- **Calcul de la mosaïque** : *AVET* calcule une mosaïque de toutes les images disponibles
- **Découpage en dalles** : *AVET* découpe la mosaïque en dalles de même taille (définie dans le fichier de configuration)
Des modifications ont été effectuées dans *AVET* afin de ne plus être obligé de passer par ces deux premières étapes ; on peut désormais travailler directement sur les images.
- **Sous-échantillonnage** : Les différentes dalles sont sous-échantillonnées d'un facteur défini dans le fichier de configuration. Le fait de travailler sur des images sous-échantillonnées présente notamment l'avantage de réduire le temps de calcul (principalement lors de la phase de segmentation) et de manipuler un volume moindre de données.
- **Calcul des canaux dérivés** : Ils sont calculés pour chaque dalle à partir des canaux rouge - vert - bleu (- infra-rouge) de l'image originale.
- **Estimation du modèle** radiométrique à partir de zones d'apprentissage saisies par un opérateur.
- **Classification** de chaque dalle
- **Evaluation** de la classification obtenue en la comparant à des données témoin.
- **Rassemblement** des classifications (images de label) de toutes les dalles en une grande image.

Actuellement, dans l'optique d'une industrialisation, *AVET* n'intervient plus que pour les 3 étapes suivantes :

- Calcul des canaux dérivés
- Estimation du modèle

- Classification

D.2 Paramétrage

Intéressons nous maintenant aux différents paramètres d'*AVET*. Parmi les paramètres de *salade.conf*, on peut citer ceux qui sont utilisés lors de plusieurs étapes. Il s'agit notamment des emplacements de différents fichiers en entrée ou en sortie du processus :

- *global.data_path* : Il s'agit de l'emplacement du répertoire chantier dans lequel vont se trouver toutes les données (en entrée et en sortie) qui nous intéressent. Cet emplacement doit impérativement se terminer par un “/”.

Exemple : *global.data_path=/home/chantier64/*

Au cas, où *salade.conf* est placé dans un sous-répertoire particulier (duquel *AVET* est lancé) dans le répertoire chantier, il est possible de simplement indiquer le chemin de ce dernier en relatif.

On a alors : *global.data_path=../*

- *cc_crop.save_prefix* et *cc_crop.downsample_save_prefix* donnent respectivement les adresses (chemin complet ou chemin relatif au répertoire chantier défini dans *global.data_path*) des répertoires contenant les images à pleine résolution et les images sous-échantillonnées.

Exemple : *cc_crop.save_prefix=RVBIR/*

Dans l'utilisation actuelle d'*AVET*, on travaille exclusivement sur des images qui ont été préalablement sous-échantillonnées par un autre outil. Pour *AVET*, cela revient en fait à considérer que l'on travaille sur des images sans les sous-échantillonner. Dans ce cas de figure, les deux paramètres *cc_crop.save_prefix* et *cc_crop.downsample_save_prefix* doivent avoir la même valeur.

- *classification.source.labelimage.file* : Il s'agit de l'adresse à laquelle *AVET* va trouver la segmentation correspondant à une dalle donnée.

Exemple : *classification.source.labelimage.file=segmentation/%s-seg.rle*

AVET remplace *%s* par le nom de la dalle courante

- *segment.channel_save_prefix* : Il s'agit du répertoire (chemin complet ou chemin relatif au répertoire chantier défini dans *global.data_path*) dans lequel doivent se trouver les canaux dérivés.

Exemple : *segment.channel_save_prefix=channels/*

Au sein de ce répertoire, les canaux portent un nom normalisé du type *%s-nomcanal.tif* (avec *%s* désignant le nom de la dalle).

- *segment.calc_a* indique quels canaux “dérivés” doivent être calculés par *AVET*.

Exemple : *segment.calc_a=value/hue/ndvi/kl1/kl2/kl3*

(Dans cet exemple, on a calculé les canaux intensité, teinte, *ndvi* ainsi que les trois canaux de Karhunen-Loève.

- *classification.channels.sources* indique quels canaux doivent être utilisés lors de l'apprentissage.

Exemple : *classification.channels.sources=red/blue/ndvi*

Ce sont les canaux rouge, bleu et *ndvi* qui vont être utilisés.

Les noms des canaux utilisés lors de l'apprentissage sont conservés dans le fichier modèle généré. Lors de la classification, ce sont donc les canaux précisés dans le modèle qui vont être utilisés (et non ceux de *salade.conf* en cas de désaccord).

- *classification.model.path* : Il s'agit de l'adresse à laquelle *AVET* va enregistrer le modèle radiométrique lors d'un apprentissage ou à laquelle il va lire le modèle lors de l'étape de classification.

Exemple : *classification.model.path=classif/model.xml*

- *classification.estimation.algorithm* permet de choisir quel type d'apprentissage on souhaite effectuer et de limiter le choix des modèles.

Exemple : *classification.estimation.algorithm=simple-9* pour des modèles “simples” paramétriques (gaussienne, laplaciennes, ...) ou non (histogrammes)

Exemple : *classification.estimation.algorithm=simple-8* pour des modèles non paramétriques (histogrammes kde)

- *classification.default_algorithm* permet de définir la méthode de classification souhaitée (par pixel ou par région, méthode *MAP,ML,KL,Chi2*)

Exemple : méthode *ML* par région dans le cas d'un modèle simple :

classification.default_algorithm=req_s_ml

- *classification.classification.path* indique l'adresse à laquelle enregistrer le résultat de la classification obtenu pour une dalle donnée.

Exemple : *classification.classification.path=classif/%s-%s-*

AVET remplace le premier %s par le nom de la dalle traitée et le second %s par celui de l'algorithme de classification utilisé (défini par *classification.default_algorithm*)

- *classification.source.maskcadbuilt.file* donne l'adresse à laquelle trouver pour la dalle courante un masque indiquant les régions à ne pas classer.

Exemple : *classification.source.maskcadbuilt.file=cadbuilt/%s-cadbuilt.tif*

AVET remplace %s par le com de la dalle traitée.

Plusieurs paramètres sont nécessaires pour indiquer à AVET comment lire les données d'apprentissage (ou les données d'évaluation :

classification.estimation.source permet d'indiquer si ces données sont fournies sous format vecteur (regionfile) ou raster (labelimage)

- Si *classification.estimation.source=labelimage*, alors l'apprentissage est fourni sous la forme d'images de label (label 0 = pas d'information) (géoréférencée). Le chemin vers ces images de label est alors donné par *classification.eval.labelimage.file*.

Exemple : *classification.eval.labelimage.file=apprentissage/%s-train.rle* indique que l'apprentissage associé (s'il existe) à une dalle donnée se trouvera dans le sous-répertoire *apprentissage* du répertoire chantier et portera le même nom que cette dalle suivi de *-train.rle*.

- Si *classification.estimation.source=regionfile*, alors l'apprentissage est fourni sous la forme d'un fichier export geoconcept. Il faut alors indiquer l'adresse à laquelle se trouve ce chantier :

classification.eval.regionfile.file=cadastre/apprentissage_L1.txt.

Par ailleurs, ce fichier peut contenir à la fois la vérité terrain pour l'apprentissage que celle pour l'évaluation. Cette distinction se fait sur le type associé aux différents objets de ce fichier, leur sous-type désignant la classe à laquelle ils appartiennent. Les champs *classification.eval.regionfile.type_str_train* et *classification.eval.regionfile.type_str_test* permettent donc d'indiquer quel est le type respectif des données d'apprentissage et de validation.

Exemple : *classification.eval.regionfile.type_str_train=Apprentissage* et *classification.eval.regionfile.type_str_test=Temoin*

Définition des classes Plusieurs champs sont mis en œuvre pour la définition des classes.

- *region_statistics.type_label_xlat.canonicalize* permet de faire le lien entre le nom de la classe dans avet et son nom dans le fichier .gxt d'apprentissage.
- *region_statistics.type_label_xlat.numerical* permet de faire le lien entre le nom de la classe (indiqué dans le champ précédent) et le label qui lui est attribué. *classification.color.lut* permet de définir la légende, c'est-à-dire d'attribuer une couleur de représentation à chacune de ces classes *classification.eval.aggregation* permet d'indiquer que certaines sous-classes seront fusionnées en classes agrégées.

Certaines classes doivent toujours être définies, avec pour certaines un label fixe. Il s'agit de <unset> avec le label 0, <undef> avec le label 1, OffMask avec le label 2 et CadBuilt (label au choix).

Dans le cas des chantiers d'extraction de l'occupation du sol en montagne, on a la paramétrage suivant :

region_statistics.type_label_xlat.canonicalize=<unset> :<unset>,<undef> :<undef>,OffMask :OffMask,

CadBuilt :CadBuilt,WaterLumiere :WaterLumiere,ForestLumiere :ForestLumiere,PastureLumiere :

PastureLumiere,RocksLumiere :RocksLumiere,ScreesLumiere :ScreesLumiere,GlaciersLumiere :GlaciersLumiere,

WaterOmbre :WaterOmbre,ForestOmbre :ForestOmbre,PastureOmbre :PastureOmbre,RocksOmbre :RocksOmbre,ScreesOmbre :

sOmbre,GlaciersOmbre :GlaciersOmbre,Water :Water,Forest :Forest,Pasture :Pasture,

Rocks :Rocks,Screes :Screes,Glaciers :Glaciers

region_statistics.type_label_xlat.numerical=<unset> :0,<undef> :1,OffMask :2,WaterLumiere :3,

ForestLumiere :4,PastureLumiere :5,RocksLumiere :6,ScreesLumiere :7,GlaciersLumiere :8,WaterOmbre :9,

ForestOmbre :10,PastureOmbre :11,RocksOmbre :12,ScreesOmbre :13,GlaciersOmbre :14,CadBuilt :15,Water :16,

Forest :17,Pasture :18,Rocks :19,Screes :20,Glaciers :21

classification.color.lut=<unset>,0,0,0;<undef>,0,0,0;OffMask,0,0,0;CadBuilt,255,139,215;WaterLumiere,

0,0,255;ForestLumiere,0,255,0;PastureLumiere,255,255,0;RocksLumiere,255,0,0;ScreesLumiere,255,200,197;

GlaciersLumiere,255,255,255;WaterOmbre,255,0,255;ForestOmbre,177,255,173;PastureOmbre,255,165,0;

RocksOmbre,179,0,255;ScreesOmbre,255,139,215;GlaciersOmbre,0,255,255;Water,0,0,255;Forest,0,255,0;

Pasture,255,255,0;Rocks,255,0,0;Screes,255,200,197;Glaciers,255,255,255

classification.eval.aggregation=Water :WaterLumiere+WaterOmbre,Forest :ForestLumiere+ForestOmbre,

Pasture :PastureLumiere+PastureOmbre,Rocks :RocksLumiere+RocksOmbre,Screes :ScreesLumiere+ScreesOmbre,

Glaciers :GlaciersLumiere+GlaciersOmbre

classification.sauvervb=true/false permet d'indiquer si l'on souhaite (à l'issue de la classification) sauvegarder les résultats obtenus sous forme d'images couleur RVB (*true*) ou simplement d'images de label (*false*).

Probabilités a priori Les probabilités a priori et les poids qui leur sont attribués sont définis respectivement par les deux champs *classification.probaapriori.path* et *classification.probaapriori.ponderation*.

Exemple :

classification.probaapriori.path=priorprob/%s.priorprobMNT.tif,priorprob/%s.priorprobCLC.tif

AVET remplace le %s par le nom de la dalle courante.

classification.probaapriori.ponderation=0.75,0.25 Un poids de 0.75 sera attribué à *priorprobMNT* et un poids de 0.25 à *priorprobCLC* .

D.3 Utilisation

Voyons maintenant l'utilisation d'*AVET* pour les différentes tâches qu'il doit accomplir :

- **Calcul des canaux dérivés** : Ces canaux dérivés sont calculés pour chaque dalle à partir des canaux originaux rouge - vert - bleu (- infra-rouge). La commande pour calculer les canaux intensité/teinte/saturation et les 3 canaux de Karhunen-Loève de la dalle *nom_dalle* est la suivante :
./AVET --cc nom_dalle --define segment.calc_a=value/hue/ndvi/kl1/kl2/kl3 CalculateChannels
- **Estimation du modèle** : Il s'agit ici d'estimer le modèle radiométrique à partir de zones d'apprentissage acquises par un opérateur sur les ortho-images. Cela se lance de la manière suivante :
./AVET --input adresse_liste_dalles --define classification.channels.sources=canal1/.../canaln --define classification.estimation.algorithm=type_modelisation EstimateModel
adresse_liste_dalles désigne un fichier texte contenant la liste des noms des dalles à utiliser pour l'apprentissage. Il est possible de remplacer *--input adresse_liste_dalles* par *--cc nom_dalle_1,nom_dalle_2,nom_dalle_n*.
- **Classification** : Pour chaque dalle *nom_dalle* à classifier, on lance la commande suivante : *./AVET --cc nom_dalle --define classification.default_algorithm=algo_classification Classify*

Sixième partie

Bibliographie

Publications parues dans le cadre de cette étude

- L. GONDOL, A. LE BRIS et F. LECORDIX. Cartographie des zones de haute montagne : essais de cartographie numérique des rochers. *Le Monde des Cartes*, 193 :7–13, septembre 2007.
mountainous areas using external information.
- A. LE BRIS et D. BOLDO. Extraction of landcover themes out of aerial orthoimages in mountainous areas using external information. In *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, volume 36(3/W49A), pages 123–128, Munich, Allemagne, septembre 2007. ISPRS.
- L. GONDOL, A. LE BRIS et F. LECORDIX. Cartography of high mountain areas : testing of a new digital cliff drawing method. In *6th ICA Mountain Cartography Workshop Mountain Mapping and Visualisation*, pages 71–80, Lenk, Suisse, février 2008. ACI/ICA.
- L. GONDOL, A. LE BRIS et F. LECORDIX. A new approach for mountain areas cartography. In Gold C. Ruas A., editor, *Headway in Spatial Data Handling : 13th International Symposium on Spatial Data Handling*, Lecture Notes in Geoinformation and Cartography, pages 315–333, Montpellier, France, juin 2008. Springer Berlin Heidelberg.
- A. LE BRIS et D. BOLDO. Extraction of land cover themes from aerial ortho-images in mountainous areas using external information. *The Photogrammetric Record*, 23(124) :387–404, décembre 2008.

Références

- [Ber91] M.-O. BERGER : *Les contours actifs : modélisation, comportement et convergence*. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, 1991.
- [BFO00] M. BOSSARD, J. FERANEC et J. OTAHEL : CORINE Land Cover technical guide - addendum 2000. technical report no 40. Rapport technique, European Environment Agency, 2000.
- [BMP07] C. BRIESE, G. MANDLBURGER et N. PFEIFER : Airborne laser scanning - high quality digital terrain modelling. In *Proc. of the 3rd International Scientific Conference "GEO-Sibirien-2007"*, pages 79–92, Novosibirsk, Russie, 2007.
- [Car95] J. CARVAHLO : *Extraction automatique d'informations géomorphométriques (réseaux et surfaces enveloppes) à partir de MNT*. Thèse de doctorat, Université Paris 7, Paris, France, 1995.
- [CD01] J. CHARLEUX-DEMARGNE : *Qualité des modèles numériques de terrain pour l'hydrologie : application à la caractérisation du régime de crues des bassins versants*. Thèse de doctorat, Université de Marne-la-Vallée, Marne-la-Vallée, France, 2001.
- [Col02] E. COLLEU : Etude et développement d'un outil d'extraction des éléments caractéristiques du relief à partir de modèles numériques de terrain. Mémoire de D.E.A., Ecole Nationale des Sciences Géographiques (ENSG), 2002.
- [Con09a] CONDOR TEAM : Condor, high throughput computing. <http://www.cs.wisc.edu/condor/>, septembre 2009.
- [Con09b] CONDOR TEAM : *Condor Version 7.2.4 Manual*. University of Wisconsin-Madison, août 2009.
- [DL08] J.E. DAVID et F. LEMONNIER : Perception de la représentation du rocher dans la carte au 1 :25.000ème, étude auprès des professionnels : Guides, ENSA, PGHM, CNISAG. Rapport d'étude, IGN/DC/SMK, février 2008.
- [Duf85] H.-M. DUFOUR : MNT-Recherche automatique de points et lignes remarquables. *XYZ, Revue de l'Association Française de Topographie*, (24), 1985.
- [EKDO06] M. ERDENETUYA, P. KHISHIGSUREN, G. DAVAA et M. OTGONTOGS : Glacier change estimation using LANDSAT TM data. In *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (IAPRS)*, volume 36 (6), Tokyo, Japon, février 2006.
- [Elh68] H. ELHAI : *Biogéographie*. Armand Colin, 1968.

- [G04] GÜLGEN, F. AND GÖKGÖZ, T. : Automatic extraction of terrain skeleton lines from digital elevation model. In *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (IAPRS)*, volume 35 (B3), 2004.
- [GCLM06] L. GUIGUES, J-P. COCQUEREZ et H. LE MEN : Scale sets image analysis. *International Journal of Computer Vision*, 68(3):289–317, 2006.
- [Gil01] P. T. GILES : Remote sensing and cast shadow in mountainous terrain. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 67(7):833–839, jul 2001.
- [GLMC01] L. GUIGUES, H. LE MEN et J-P. COCQUEREZ : Segmentation d'image par minimisation d'un critère mdl dans une pyramide de segmentations. In *Proc. GRETSI Symposium on Signal and Image Processing*, Toulouse, France, septembre 2001.
- [Gon09] L. GONDOL : Nouvelle méthode de détection et de représentation de l'occupation du sol en montagne. Réalisation de la maquette de Megève. Rapport technique SDC/09.557, IGN/SDC, Saint-Mandé, octobre 2009.
- [Gui04] L. GUIGUES : *Modèles multi-échelles pour la Segmentation d'Images*. Thèse de doctorat, École Doctorale Sciences et Ingénierie de l'Université de Cergy-Pontoise, 2004.
- [HB99] C. C. HARDY et R. E. BURGAN : Evaluation of NDVI for monitoring moisture in three vegetation types of the western U.S. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 65(5):603–610, 1999.
- [HJDH01] L. HURNI, B. JENNY, T. DAHINDEN et E. HUTZLER : Interactive analytical shading and cliff drawing : advances in digital relief presentation for topographic mountain maps. In *Proc. of the 20th International Cartographic Congress Beijing*, pages 3384–3391, Beijing, Chine, 2001.
- [HKH⁺02] C. HUGGEL, A. KÄÄB, W. HAEBERLI, P. TEYSSEIRE et F. PAUL : Remote sensing based assessment of hazards from glacier lake outbursts : a case study in the Swiss Alps. *Canadian Geotechnical Journal*, 39(2):316–330, 2002.
- [HRS95] D. K. HALL, G. A. RIGGS et V. V. SALOMONSON : Development of methods for mapping global snow cover using moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS) data. *Remote Sensing of Environment*, 53:127–140, 1995.
- [Hur08] L. HURNI : Cartographic mountain relief presentation - 150 years of tradition and progress at eth zurich. In *Proc. of the 6th ICA Mountain Cartography Workshop*, pages 85–91, Lenk, Suisse, 2008.
- [Jam95] O. JAMET : Extraction du réseau des thalwegs sur un MNT. *Bulletin d'Information de l'Institut Géographique National*, 64:11–18, 1995.
- [Jen01] B. JENNY : An interactive approach to analytical relief shading. *Cartographica*, 38(1 & 2):67–75, 2001.
- [Lac01] A. LACAMBRE : *Aléas et risques naturels en milieu montagnard; apport et limites d'un système d'information géographique*. Thèse de doctorat, Université Paris 4, Paris, France, mars 2001.
- [LMTB02] H. LE MEN, J. TREVISAN et D. BOLDO : Automatic extraction of landcover themes on digital orthophotos in mountainous area for mapping at 1/25k. In *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (IAPRS)*, volume 34(4), Xi'an, Chine, août 2002.
- [Mon97] P. MONIER : *Caractérisation du terrain en vue de son traitement numérique. Application à la généralisation de l'orographie*. Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur, Strasbourg, France, 1997.
- [Pau00] F. PAUL : Evaluation of different methods for glacier mapping using LANDSAT TM. In *Proc. EARSeL-SIG-Workshop Land Ice and Snow*, Dresde, Allemagne, juin 2000.
- [Pau03] F. PAUL : *The New Swiss Glacier Inventory 2000 : Application of remote sensing and GIS*. Thèse de doctorat, Université de Zürich, Zürich, Suisse, 2003.
- [PHK⁺02] F. PAUL, C. HUGGEL, A. KÄÄB, T. KELLENBERGER et M. MAISCH : Comparison of TM-derived glacier areas with higher resolution data sets. In *Proc. EARSeL-LISSIG-Workshop Observing our Cryosphere from Space*, Berne, Suisse, mars 2002.
- [Ria89] S. RIAZANOFF : *Extraction et analyse automatiques de réseaux à partir de MNT : contribution à l'analyse d'images en télédétection*. Thèse de doctorat, Université Paris 7, Paris, France, 1989.
- [Rie92] W. RIEGER : Automated river line and catchment area extraction from DEM data. In *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (IAPRS)*, volume 29 (4), pages 642–649, Washington, USA, 1992.

- [SW99] R. W. SIDJAK et R. D. WHEATE : Glacier mapping of the Illecillewaet icefield, British Columbia, Canada, using Landsat TM and digital elevation data. *International Journal of Remote Sensing*, 20(2):273–284, 1999.
- [Tra06] T. T. H. TRAN : *Etude de lignes d'intérêt naturelles pour la représentation d'objets en vision par ordinateur*. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, Grenoble, France, 2006.
- [TS06] R. TRIAS-SANZ : *Semi-automatic high-resolution rural land cover classification*. Thèse de doctorat, Université Paris 5, Paris, France, mars 2006.
- [TSB05] R. TRIAS-SANZ et D. BOLDO : A high-reliability, high-resolution method for land cover classification into forest and non-forest. In Heikki KALVIAINEN, Jussi PARKKINEN et Arto KAARNA, éditeurs : *Proc. of the Scandinavian Conference on Image Analysis (SCIA)*, volume 3540 de *Lecture Notes in Computer Science*, pages 831–840, Joensuu, Finlande, juin 2005. Springer.
- [TTL05] D. THAIN, T. TANNENBAUM et M. LIVNY : Distributed computing in practice : the Condor experience. *Concurrency - Practice and Experience*, 17(2-4):323–356, 2005.
- [YBS05] S. YOSHIKAWA, A. BELYAEV et H.-P. SEIDEL : Fast and robust detection of crest lines on meshes. In *Proceedings of the 2005 ACM Symposium on Solid and Physical Modeling*, 2005.



Laboratoire **MATIS**

Méthodes d'Analyse et de Traitement d'Images pour la Stéréorestitution

Institut Géographique National,

73 Avenue de Paris, 94165 Saint-Mandé Cedex (France)

<http://recherche.ign.fr/labs/matis>
