

# CARTOGRAPHIE DES ZONES DE HAUTE MONTAGNE

## Essais de cartographie numérique des rochers

par Loïc Gondol, Arnaud Le Bris, François Lecordix

Institut géographique national

2-4 avenue Pasteur

94165 Saint-Mandé Cédex

E-mail : loic.gondol@ign.fr, arnaud.le-bris@ign.fr, francois.lecordix@ign.fr

---

*Disposant désormais d'une base de données topographiques vecteur sur toute la France, la BD TOPO®, l'Institut géographique national a décidé de dériver toute sa carte de base au 1 : 25 000 et au 1 : 50 000 sur l'ensemble du territoire à partir de cette base de données. Les zones de haute montagne présentent une difficulté particulière pour la cartographie numérique, en particulier avec la problématique de représentation des rochers. Réalisées à la main par des dessinateurs expérimentés sous forme de dessins "à l'effet" en exploitant les photos aériennes, les zones rocheuses nécessitent un double travail : d'une part une reconnaissance des zones concernées et d'autre part une représentation de ces zones. Cet article présente les premiers résultats obtenus sur ces deux problématiques afin d'aboutir à une cartographie de haute montagne numérique la plus automatique possible pour diminuer les coûts de réalisation, mais aussi expressive que précédemment, bien que différente, afin de conserver la qualité cartographique de la carte de base au 1 : 25 000 et au 1 : 50 000.*

### 1 CONTEXTE

#### 1.1 La BD TOPO®

Depuis plusieurs années, l'Institut géographique national a entrepris de constituer une base de données topographiques, la BD TOPO®. Cette base de données vecteur fournit de l'information géographique, avec une précision métrique, sur les réseaux routiers, ferrés, électriques et hydrographiques, les bâtiments, les limites administratives, la toponymie, l'occupation du sol et l'orographie. La première version de la BD TOPO®, dite "standard", obtenue principalement par photorestitution, contenait toute l'information présente sur la carte au 1 : 25 000, mais nécessitait une charge de travail très conséquente et donc un délai de réalisation important. L'IGN a opté en 2000 pour une nouvelle spécification allégée de la BD TOPO® permettant d'achever sa réalisation sur tout le territoire métropolitain français au début de l'année 2007.

Outre les diverses applications liées aux SIG, la BD TOPO® doit permettre aussi de dériver la carte de base, carte topographique au 1 : 25 000 et au 1 : 50 000, réalisée et diffusée par l'IGN. Depuis 1993, sur les 1800 cartes de la série complète au 1 : 25 000, 450 feuilles ont déjà été réalisées numériquement par l'IGN à partir de la BD TOPO® "standard" sur différentes zones du territoire, en réfectionnant complètement la carte de base réalisée précédemment par des procédés de dessin traditionnel.

Pourtant, jusqu'à maintenant, aucune feuille de haute montagne n'a été réfectionnée à partir de la BD TOPO® car la représentation cartographique de ces zones présente des difficultés particulières pour une réalisation numérique. Toutes les éditions actuelles de la carte de base en haute montagne sont donc uniquement des révisions des éditions précédentes qui avaient été réalisées par dessin il y a de nombreuses années et ne sont pas issues de la BD TOPO®, conduisant à deux processus différents de collecte de l'infor-

mation et de mise à jour de la base de données et de la carte topographique.

#### 1.2 Le projet Nouvelle carte de base

En 2004, l'IGN a décidé de lancer le projet Nouvelle carte de base afin de dériver la carte de base à partir de la BD TOPO®, sous ses nouvelles spécifications, sur l'ensemble du territoire - et donc sur les zones de haute montagne -, et de diminuer les coûts de mise à jour des éditions suivantes de la carte de base.

Ce projet doit notamment fournir des solutions pour récupérer l'information nécessaire pour la carte et absente de la BD TOPO® dans ses nouvelles spécifications, en particulier pour l'occupation du sol. Cette problématique de récupération d'informations est particulièrement sensible en haute montagne où une part prépondérante de l'information de la carte concerne l'occupation du sol de la montagne elle-même, avec les thèmes de rochers, éboulis, glaciers... En l'absence d'une telle information, les feuilles de haute montagne auraient un rendu très appauvri et ne pourraient pas satisfaire les divers utilisateurs de la carte.

Mais l'extraction de l'information nécessaire en haute montagne n'est pas suffisante car apparaît alors une deuxième problématique que doit résoudre le projet Nouvelle carte de base : elle concerne la représentation numérique de ces thèmes spécifiques afin d'avoir un rendu le plus expressif possible des zones concernées.

#### 1.3 Du traditionnel au numérique

Pour la représentation cartographique des zones de montagne sur les cartes topographiques, de nombreuses solutions ont été expérimentées au cours de l'histoire de la cartographie pour fournir le rendu le plus expressif possible pour le lecteur de la carte. Dans (E. Imhof, 1982), un état de l'art de ces solutions est présenté. Le rendu du relief sur les

cartes topographiques est souvent obtenu par une combinaison de différentes techniques : estompage, rochers à l'effet, courbes de niveau avec rendu colorimétrique changeant suivant les zones (glaciers, rochers..., etc.). Mais les solutions mises en œuvre et les meilleurs rendus observés ont été obtenus actuellement uniquement par des méthodes traditionnelles de dessin. La figure 1 permet d'avoir un exemple de ce rendu cartographique sur un extrait d'une carte topographique alpine au 1 : 25 000 de l'IGN.

Au début des années 2000, l'IGN a lancé les premières études pour examiner s'il était envisageable de remplacer ces procédés traditionnels par des solutions numériques (H. Le Men et al., 2002). Ces travaux se sont concentrés sur la problématique d'extraction automatique de l'information à représenter (zones de rochers, éboulis, glaciers) et ont fourni les premières pistes pour des solutions de représentation. Les résultats obtenus automatiquement pour l'extraction et la représentation cartographique sont illustrés en figure 2, sur la même région alpine que l'illustration fournie en figure 1 obtenue de façon manuelle.

Dans la continuité de ces premiers travaux, le projet Nouvelle Carte de Base a cherché à améliorer les résultats, en particulier au niveau du rendu cartographique final. Pour la partie extraction de l'information, l'étude a été confiée au laboratoire de recherche en traitement d'image MATIS de l'IGN.

## 2 EXTRACTION DE L'INFORMATION

### 2.1 Présentation du problème et des solutions proposées

Deux approches ont été envisagées pour la récupération des informations sur l'occupation du sol, absentes de la BD TOPO® et nécessaires à la réalisation de la carte : il s'agissait soit de les extraire à partir des fonds de carte actuels par des techniques de détamage, soit de les obtenir à partir d'ortho-photographies par classification automatique ou semi-automatique. Du fait de l'ancienneté de la saisie des zones de rochers, d'éboulis ou de glaciers figurant sur certaines cartes actuelles, la première stratégie a été abandonnée. La méthode retenue consiste donc à extraire l'information sur l'occupation du sol à partir d'ortho-images de la BD ORTHO® par classification semi-automatique. Les seuls thèmes d'occupation du sol nécessaires pour réaliser la carte et absents de la BD TOPO® sont les rochers, les éboulis et les glaciers. Cependant, d'autres classes doivent être définies afin d'effectuer la classification semi-automatique de l'occupation du sol d'une zone de montagne. Dans le cas présent, la légende de la classification comporte les six classes suivantes : rochers, éboulis, glaciers, forêts, alpages et surfaces d'eau.

Dans les zones de haute montagne, l'extraction de l'occupation du sol à partir d'images aériennes est gênée par plusieurs éléments :

- Les zones d'ombre y sont importantes. La radiométrie d'un même thème peut fortement varier d'une partie de l'image à une autre. Ces variations peuvent être causées

par des variations d'éclairement liées au relief, mais aussi de manière artificielle par des traitements radiométriques appliqués aux différentes images constituant l'ortho-image. Elles peuvent également être naturelles, causées par exemple par des variations de la nature de la roche.

- Certains thèmes d'occupation du sol ont des radiométries assez proches : ils se ressemblent. Ainsi, les éboulis (et même plus précisément les pierriers des lits de torrents) sont parfois presque aussi clairs que les glaciers. On peut aussi citer les ressemblances entre rochers et éboulis, ou encore entre zones d'ombre et surfaces d'eau... Ce phénomène est encore accentué par le phénomène de variation de la radiométrie décrit précédemment.

Par conséquent, l'information apportée par les images n'est pas suffisante pour une extraction de l'occupation du sol par classification semi-automatique. Il est donc nécessaire d'introduire des connaissances complémentaires dans le processus de classification. Ces informations externes vont être de deux types :

- Il va s'agir de connaissances décrivant relief. En effet, en montagne, le type d'occupation du sol dépend de l'altitude, de la pente et de l'orientation, informations facilement obtenues à partir d'un modèle numérique de terrain.

- Il est aussi possible d'utiliser des connaissances issues d'une autre base de données. Dans le cas présent, la base de données européenne CORINE Land Cover 2000 (CLC2000) sur l'occupation du sol a été utilisée. Cette base de donnée est plus généralisée (fig. 3) que la carte de base (la surface minimale cartographiée dans CLC2000 est de 25 hectares et son échelle d'utilisation est le 1 : 100 000). Sa légende est également différente : elle est plus précise dans certains cas (on y distingue par exemple différents types de forêt), moins précise dans d'autres (rochers et éboulis y sont regroupés dans une même classe), et comporte des items correspondant à des situations intermédiaires entre plusieurs de nos thèmes (comme par exemple l'item "Forêt et végétation arbustive en mutation" entre forêt et alpage).

Deux solutions sont possibles pour régler le problème des ombres : il est possible soit de détecter les zones d'ombre et d'y corriger la radiométrie, soit de dédoubler chaque classe d'occupation du sol "c" en deux classes distinctes "c à l'ombre" et "c à la lumière", ces deux classes étant bien entendu agrégées à l'issue de la classification. Cette seconde solution a été retenue. En effet, une correction des ombres serait confrontée aux imprécisions du modèle numérique de terrain ainsi qu'à des incertitudes liées au fait que l'ortho-image est une mosaïque obtenue par fusion de clichés aériens orthorectifiés. Il n'est en effet plus possible de connaître avec précision l'heure de prise de vue en tout point de l'ortho-image. De plus, les images utilisées pour réaliser l'ortho-image ont subi différents traitements radiométriques parfois manuels. Signalons qu'une méthode utilisant la correction de la radiométrie dans les zones d'ombre a néanmoins été mise en œuvre dans (H. Le Men et al., 2002) pour les premières études sur ces sujets.

Il est toutefois possible de prendre en compte une connaissance approchée sur les zones d'ombre. En effet, bien que l'on ne connaisse pas avec précision la date de prise de vue en tout point de l'ortho-image, on connaît l'intervalle de temps au cours duquel les clichés utilisés pour l'ortho-image ont été acquis. Il est donc possible de calculer en tout point de l'image une probabilité de se trouver à l'ombre connaissant le modèle numérique de terrain et l'intervalle d'acquisition des clichés constituant l'ortho-image. Cette probabilité de se trouver à l'ombre peut ensuite être introduite dans le processus de classification.

## 2.2 Méthode mise en oeuvre

La méthode d'extraction de l'occupation du sol s'effectue en deux temps. La première étape consiste à segmenter l'image en régions homogènes (fig. 4). L'outil utilisé est présenté dans (L. Guigues, 2004) et (L. Guigues et al., 2006). La seconde étape est la classification proprement dite : chaque région de la segmentation se voit alors affecter une classe. L'intérêt d'une classification par régions est d'éviter d'obtenir des résultats bruités (comme ceux d'une classification par pixels). La méthode de classification mise en oeuvre dans le cas présent est une méthode de classification de type MAP par région présentée dans (R. Trias-Sanz, 2006) et (R. Trias-Sanz et D. Boldo, 2005). Les différentes informations y sont interprétées en terme de probabilités, la classe attribuée à une région étant donc sa classe la plus probable.

La manière dont l'information issue de l'image est prise en compte dans le processus de classification est présentée en détail dans (R. Trias-Sanz et D. Boldo, 2005). On dispose d'un modèle radiométrique (n-dimensionnel avec n désignant le nombre de canaux utilisés) calculé au préalable à partir de données d'entraînement (i.e. de zones d'apprentissage définies sur l'image préalablement par un opérateur). Au cours de la détermination de ce modèle, on a calculé pour chaque classe, à partir des données d'apprentissage, sa distribution radiométrique (i.e. son histogramme) que l'on a ensuite modélisé par différentes distributions statistiques paramétriques (gaussien, laplacien, uniforme...) ou non paramétriques (histogramme brut, histogramme avec "Kernel Density Estimation"...). Finalement, le modèle retenu pour chaque classe a été choisi en fonction 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 ; il risquera alors de parfaitement correspondre à ces données particulières, mais de moins bien modéliser la réalité du terrain que ne l'aurait fait un modèle plus simple. On dispose dès lors pour chaque classe c d'un modèle donnant la probabilité pour un pixel s d'avoir pour radiométrie I s'il appartient à c. On en déduit alors la probabilité d'appartenance d'un pixel à la classe c connaissant sa radiométrie I(s), et, de là, la probabilité d'appartenance d'une région r à la classe c connaissant la radiométrie de ses pixels.

Précisons ici que les canaux utilisés lors de la classification ne sont pas nécessairement les canaux originaux de l'image (à savoir rouge-vert-bleu-proche infrarouge) mais des canaux dérivés, comme l'intensité, la teinte et l'indice de

végétation "ndvi" ou encore les trois canaux de l'espace colorimétrique de Karhunen-Loève. Le choix d'une combinaison de canaux dérivés peut améliorer les résultats : certains canaux vont en effet permettre de mieux discriminer certaines classes qui se ressemblent dans d'autres canaux.

Les connaissances externes sont introduites sous forme de probabilités a priori, une fois connue la radiométrie (A. Le Bris et D. Boldo, 2007). En montagne, l'occupation du sol est liée au relief : elle dépend donc des paramètres altitude, pente et orientation. Il est donc possible de modéliser ces relations en terme de probabilités : connaissant l'altitude, l'orientation et la pente en un lieu donné, on aura une certaine probabilité d'y rencontrer les différents thèmes. La modélisation utilisée est présentée dans (H. Le Men et al., 2002). Elle a été proposée à partir de connaissances de géographie physique présentées dans (H. Elhai, 1968) et (A. Lacambre, 2001). Elle consiste en deux fonctions dépendant respectivement de l'altitude et de la pente, représentées sur les figures 5 et 6. L'influence de l'orientation s'exerce de manière importante uniquement sur les forêts et les glaciers. Elle n'est donc prise en compte que pour ces deux thèmes.

L'information issue de CORINE Land Cover 2000 doit elle aussi être intégrée dans la classification sous forme de probabilités. Il s'agit cette fois de modéliser le fait que cette base de données est plus généralisée que ce que l'on cherche à obtenir (une zone CLC2000 risque de contenir plusieurs thèmes différents de notre classification) et que sa légende est différente (à un item de la légende de CLC2000 vont parfois correspondre plusieurs thèmes de la classification et inversement). Un modèle empirique a été proposé : il associe à chaque thème de CLC2000 une probabilité de correspondre à chaque thème de la classification. Par exemple, dans une zone CLC2000 "Forêt et végétation arbustive en mutation (arbres épars)", on aura une probabilité de 0% de rencontrer des surfaces d'eau, 77% de la forêt, 20% des alpages, 1% des rochers, 2% des éboulis et 0% des glaciers.

Les connaissances sur les ombres sont également introduites sous forme de probabilités de se trouver à l'ombre connaissant le relief (modèle numérique de terrain) ainsi que l'intervalle de temps au cours duquel les clichés de l'ortho-image ont été acquis.

Une pondération est appliquée entre les différentes sources d'information. Cette pondération permet de doser l'importance qui leur est donnée mais aussi de jouer sur le degré de généralisation du résultat : plus le poids attribué à CLC2000 est important et plus le résultat est généralisé. En résumé, la classe attribuée à une région est la classe qui maximise le produit des probabilités que la région en fasse partie, les différentes sources d'information étant connues.

## 2.3 Résultats

La méthode a été testée dans deux cas de figures différents. La première zone test se situait dans les Alpes et correspondait à la zone des travaux préliminaires de (Le Men et al, 2002). Les différents thèmes de la classification

étaient présents, mais les seules données disponibles alors sur cette zone étaient des ortho-images réalisées à partir de clichés argentiques scannés rouge-vert-bleu. Du fait de très fortes variations de la radiométrie au sein de l'image, il était parfois difficile, même pour un opérateur, d'y reconnaître les différentes classes.

La seconde zone d'étude est localisée dans les Pyrénées, autour du pic d'Ossau. Des ortho-images produites à partir de clichés numériques rouge-vert-bleu-infrarouge y sont disponibles. Tous les thèmes de la classification, à l'exception de véritables glaciers, sont présents. Les résultats obtenus ont été évalués visuellement sur l'ensemble de la zone, ne révélant pas d'erreurs majeures (fig. 7 et 8). La plupart des régions de la classification sont d'ailleurs de taille suffisante pour avoir une signification cartographique. Les résultats ont également été évalués de manière numérique par le calcul de matrices de confusion à partir de données témoin saisies par un opérateur. Les résultats obtenus sont présentés dans tableau 1 avec près de 88% de pixels bien classés (contre 75% sans connaissances complémentaires). *Us-ac* y désigne la probabilité qu'un pixel classé dans une certaine classe en fasse réellement partie tandis que *pr-ac* est la

probabilité qu'un pixel appartenant sur le terrain à une certaine classe soit effectivement bien classé.

Différents paramètres ont été testés lors de la classification. Ces essais ont notamment montré que plusieurs combinaisons de canaux donnent des bons résultats sensiblement équivalents : on peut notamment citer l'association intensité-teinte-indice de végétation *ndvi* ou encore les trois canaux de l'espace colorimétrique de Karhunen-Loève. Les tests ont également démontré l'importance de l'apport d'informations complémentaires dans le processus de classification. La pondération entre les différentes sources d'information a également fait l'objet de réglages.

À l'issue de la classification, les classes dédoublées "c à l'ombre" et "c à la lumière" sont agrégées en une seule classe "c". On ne conserve ensuite que les thèmes absents de la BD TOPO®, à savoir les rochers, les éboulis et les glaciers : les informations sur les autres thèmes étant en effet déjà disponibles et ayant été acquises par des opérateurs. Toutes les informations sur l'occupation du sol nécessaires à la carte sont donc disponibles. Néanmoins, il reste à les représenter, ainsi que les informations sur le relief sous-jacent.

	Pyrénées		Alpes	
	us-ac	pr-ac	us-ac	pr-ac
	avec connaissances externes			
	us-ac	pr-ac	us-ac	pr-ac
Eau	100,0	76,4	/	/
Forêt	89,0	95,8	81,9	65,2
Alpage	96,3	85,1	71,1	52,2
Rochers	71,0	87,2	76,4	69,9
Eboulis	88,0	83,1	54,7	73,3
Glaciers	98,3	72,2	58,6	69,5
Pixels bien classés	87,4 %		67,0 %	
	Information radiométrique seule			
Pixels bien classés	75 %		55%	

Tableau 1: Pourcentage de pixels bien classés dans des zones témoins

## 2.4 Post-traitements en vue de la représentation cartographique

Des traitements supplémentaires ont été mis en place pour simplifier et enrichir les données en fonction des besoins relatifs à leur cartographie. Ainsi, de façon classique, un traitement de filtrage sur la taille des zones extraites est effectué afin d'éliminer les trop petites régions qui nuiraient à la lisibilité de la carte à une échelle donnée (ici au 1 : 25 000).

Inversement, des traitements visant à extraire, à partir de la classification précédente et du relief, différentes informations supplémentaires ont été déduites pour améliorer la représentation cartographique souhaitée : orientation des lignes des éboulis, lignes de haut de rochers, zones de pente forte et orientation des pentes. Chacune de ces informations sont obtenues par des traitements spécifiques :

- On souhaite représenter les lignes d'éboulis par leurs lignes de pente dans les zones d'éboulis de pente supérieure à 50%. Il s'agit donc de récupérer ces lignes en respectant des contraintes sur leur densité. Ainsi, en simplifiant, on

procède de la manière suivante : on commence par se donner un maillage de la zone dont on parcourt ensuite chaque noeud. Le noeud sur lequel on se trouve est alors considéré comme le point de départ d'une ligne de pente que l'on va suivre en la descendant jusqu'à se trouver hors de la zone d'éboulis ou jusqu'à se trouver au voisinage d'une autre ligne de pente déjà tracée.

- On souhaite représenter les lignes de hauts de rochers les plus pentus (pour lesquelles la pente est supérieure à 100%). Afin d'améliorer la lisibilité de la carte, il est intéressant de récupérer la partie la plus haute du contour des zones de rochers. Ces lignes s'obtiennent en ne conservant que les tronçons du contour des zones de rochers pour lesquels la pente est dirigée vers l'intérieur de la zone, dont l'altitude est supérieure à celle d'au moins la moitié de ses voisins et dont la longueur est supérieure à un certain seuil.

- Pour les zones et orientation des pentes : l'orientation des zones de rochers de pente supérieure à 100% est prise en compte de manière spécifique pour la représentation.

Pour ce faire, on effectue un surdécoupage des zones de rochers en fonction de leur orientation, avec un pas de 20°. On obtient ainsi différents thèmes rochers d'orientation comprise entre  $n \times 20^\circ$  et  $(n+1) \times 20^\circ$ , auxquels une symbolisation différente est affectée.

## 3 REPRÉSENTATION CARTOGRAPHIQUE

### 3.1 Données et outils utilisés

Pour effectuer les essais de cartographie numérique, plusieurs sources de données ont été nécessaires. Elles ont toutes été extraites grâce aux outils développés par le laboratoire MATIS et présentés dans le paragraphe précédent.

Parmi les différentes zones d'occupation du sol détectées sur les photos aériennes, les zones d'éboulis et de rochers sont à la base de la représentation cartographique. Elles délimitent les parties qui nous intéressent dans cette étude. Notons au passage que la zone test cartographiée, située dans le massif des Pyrénées, aux alentours du pic d'Ossau, ne contient pas de glaciers d'une surface significative pour être pris en compte dans les essais et comportant des problématiques spécifiques de représentation cartographique.

Grâce aux modèles numériques de terrain (MNT), il est possible de croiser ces zones d'occupation du sol avec une information de pente (fournie par le MNT). Ceci permet de dissocier en particulier les zones d'éboulis et de rochers situées en pente raide ou abrupte, de celles qui sont en terrain plus favorables. Cette distinction a pour conséquence de pouvoir associer des symbolisations différentes suivant ces zones. Le seuil limite de valeur de pente a été fixé empiriquement. Il est de 100% pour les zones rocheuses, et de 50% pour les éboulis. Il s'agit d'une interprétation, parmi d'autres possibles, des caractéristiques du terrain.

Avec la même optique de différencier les symbolisations suivant les zones, une classification des zones de rochers a été établie suivant le critère d'orientation des pentes. Cette classification doit être à la fois suffisamment fine pour refléter au mieux la diversité, la complexité du terrain et ne pas le caricaturer, mais elle doit, d'un autre côté, fournir des zones suffisamment grandes et représentatives pour pouvoir figurer sur une carte au 1 : 25 000. Après plusieurs essais, la distinction de 18 classes d'intervalles réguliers de 20° s'est avérée être le choix le plus adapté dans notre cas. Il ne peut cependant pas être généralisé aveuglément à d'autres types de zones, au risque de ne pas respecter les critères énoncés ci-dessus.

Au final, les surfaces rocheuses se trouvent donc séparées en 36 classes différentes, suivant l'orientation des versants et le pourcentage de la pente. À l'intérieur de ces zones d'occupation du sol, des données de type linéaire complètent l'ensemble des données utilisées. Les lignes suivant la plus grande pente dans les zones d'éboulis en terrain escarpé serviront de support à la représentation. Quant aux lignes de haut de rocher, elles ont pour rôle de marquer les ruptures de pente, voire les zones abruptes induites par le terrain.

Pour combiner les données précédentes et obtenir une carte papier, deux logiciels ont été utilisés. Le premier est le système d'information géographique Geoconcept® de la société Geoconcept SA qui permet entre autres d'importer, de géoréférencer et de préparer toutes les données. Celles-ci sont ensuite exportées et intégrées dans un logiciel de symbolisation cartographique, autorisant la gestion de tout ce qui concerne la symbolisation des données, mais aussi le travail avec différentes couches en vue d'impressions sur papier. Le logiciel utilisé pour ces tests est le logiciel Mercator de la société Star-Apic, qui dispose de nombreuses fonctionnalités puissantes en matière de cartographie. C'est ce même outil qui gère la fin de chaîne de production des cartes topographiques produites à l'IGN, jusqu'à leur sortie sur papier.

### 3.2 Méthode

Les données jugées nécessaires ou utiles à la cartographie des zones montagneuses ont été passées en revue dans le paragraphe précédent. Il s'agit désormais de leur affecter une symbolisation, pour aboutir à ce qu'on lira réellement sur la carte. L'enjeu est de taille, puisqu'il s'agit de retranscrire au plus juste la réalité que représente le terrain. Il ne faut pas laisser de place à une mauvaise interprétation de la carte, qui pourrait engendrer de graves conséquences si des utilisateurs se rendent dans des zones à risque. La carte topographique à grande échelle est souvent un outil qui inspire confiance à de nombreux utilisateurs. Elle se doit de conserver cet atout majeur.

En plus de refléter au mieux la réalité, la représentation se devait d'être la plus automatisée possible, avec l'objectif d'avoir un moindre coût de production. Les rochers ont, jusqu'à présent, été restitués à la main à partir de photos aériennes, et dessinés « à l'effet » par des cartographes dotés d'une certaine expérience en la matière. Mais pour obtenir ces résultats d'excellente qualité graphique, la technique s'avère très coûteuse. (L. Hurni et al., 2001), conscient de cette problématique, présente des méthodes à l'étude pour automatiser au mieux la représentation cartographique. Il préconise toutefois la conservation de certaines tâches manuelles afin de maintenir la très bonne qualité graphique des cartes suisses. Nous avons nous-mêmes recherché des méthodes de représentation numérique, reproduisant au plus près ce qu'il est possible de faire manuellement. Ce double enjeu de réduction des coûts et de conservation de la qualité cartographique était au cœur de la réflexion sur les choix de symbolisation, détaillés ci-dessous.

L'étude de différentes cartes réalisées en zone montagneuses a montré que la représentation des rochers par des hachures se révélait pertinente, à la fois en ce qui concerne la perception du relief, mais aussi le rendu graphique. Cette technique est dérivée d'une autre méthode, plus générale, et utilisée anciennement pour représenter le relief. En général, celles-ci étaient tracées dans le sens de la plus grande pente, laissant à l'observateur le soin de se représenter mentalement monts et vallées. Dans le cas qui nous intéresse de la représentation du rocher, des lignes de structure du rocher sont le complément essentiel des hachures pour un bon rendu et

une lisibilité de l'ensemble. Les cartes topographiques suisses de l'Office fédéral de topographie sont une illustration de cette manière de représenter le rocher. De fines hachures sont tracées à la main dans les zones de rochers, et sont orientées soit suivant la plus grande pente dans les zones abruptes ou très raides, soit suivant la courbe de niveau. L'appréciation de la pente est faite par un opérateur, à partir de photos aériennes à grande échelle. L'œil étant un instrument subjectif, il n'y a par conséquent pas de seuil limite fixe.

Cette philosophie de la représentation des zones de rochers a été reprise dans cette étude, en essayant de l'intégrer dans un processus numérique. Un motif surfacique de hachures a donc été conçu pour être appliqué aux zones de rochers situées en forte pente (d'une valeur supérieure à 100%). (E. Imhof, 1982) énonce en particulier certains conseils concernant la conception et le paramétrage des hachures pour un bon rendu visuel. Ils ont été pris en compte lors de l'élaboration du motif. Suivant les classes d'exposition des pentes, celui-ci est orienté différemment, afin de toujours suivre la plus grande pente. Par exemple, pour la classe de rochers dont les pentes sont orientées entre 0 et 20°, l'orientation du motif de hachures est fixée à 10°. La possibilité d'avoir à disposition une classification d'orientation des pentes trouve ici tout son intérêt; elle est nécessaire pour que le motif de hachures suive la plus grande pente (voisine), quelle que soit l'exposition du versant.

Un second motif de hachures a été défini pour les zones de rochers situées en terrain moins abrupt. Les hachures sont moins denses que pour le premier motif et sont accompagnées de formes ponctuelles et surfaciques placées aléatoirement, qui signifient la présence éventuelle de blocs rocheux isolés. Le fait que les hachures soient plus espacées suggère un terrain moins pentu. Le motif est orienté suivant la tangente à la courbe de niveau « moyenne » pour chaque classe. La logique de l'espacement des hachures se rapproche quelque peu de la définition même des courbes de niveau. Plus celles-ci sont serrées, plus le terrain est pentu, et inversement.

Les hachures sont volontairement irrégulières, afin de mieux coller à la réalité terrain. En effet, les lignes de structure et la texture générale des rochers sont rarement régulières et géométriques. Par conséquent, lors de la conception des motifs, une attention particulière a été portée à la possibilité de les reproduire dans l'espace sans laisser de discontinuités visibles, car un décalage dans les hachures, aux limites du motif, produit un mauvais effet visuel, surtout lorsqu'il n'y a pas de lignes de structure pour le combler.

À la base de la représentation des éboulis, on trouve des symboles ponctuels ou surfaciques. Il s'agit de petits points ronds ou de formes arrondies irrégulières suggérant mentalement des cailloux, des rochers instables. Dans les terrains caractérisés par une pente raide, les éboulis ont tendance à former des coulées, du fait de l'instabilité des roches. Visuellement, ces éboulements laissent des traces linéaires que l'on peut observer sur des photos aériennes. Pour reproduire au plus près ces caractéristiques, une distinction a été opérée dans la cartographie des éboulis, suivant l'incli-

naison de la pente sur laquelle ils se trouvent. Les lignes de plus grande pente, extraites uniquement dans les zones d'éboulis en pente supérieure à 50%, servent de support à la représentation en terrain escarpé. En effet, des symboles ponctuels de forme circulaire sont calculés et positionnés à intervalle régulier le long des lignes. Le diamètre de ces symboles est croissant de façon linéaire suivant que l'on parcourt la ligne en descente. Visuellement, l'effet d'éboulement est rendu par le support linéaire. Celui-ci n'apparaît pas sur la carte, mais on l'imagine aisément.

Pour symboliser les zones d'éboulis en terrain relativement plat, un motif surfacique suggérant des rochers positionnés aléatoirement a été conçu. Il est composé de ponctuels en surfaces arrondies irrégulières. Contrairement aux motifs appliqués en zones rocheuses, ce motif n'est pas orienté, afin de respecter le caractère aléatoire de la structure de ces zones.

Afin de compléter la cartographie des zones montagneuses et de structurer davantage l'ensemble, les bordures supérieures de zones rocheuses abruptes apparaissent pour marquer les cassures du terrain, les hauts de falaises. Elles sont symbolisées par un double bandeau noir et gris foncé – pour souligner d'une part la rupture de pente et d'autre part l'ombre, qui est une caractéristique fréquente de ces zones. Le linéaire noir est d'une largeur variable, pour éviter d'avoir une symbolisation trop géométrique. En plus de structurer la carte en zone montagneuse, ces lignes avertissent d'un danger potentiel, d'un passage risqué sur le terrain, qui n'apparaissait peut-être pas aussi clairement avec les hachures.

Les éléments précédents sont associés aux éléments déjà fréquemment utilisés en cartographie de montagne, aussi bien en traditionnel qu'en numérique : courbes de niveau et estompage.

### 3.3 Résultats

À l'heure actuelle, les tests ont été limités à la seule zone entourant le pic d'Ossau, dans le massif des Pyrénées. Toutefois, les résultats obtenus semblent prometteurs (fig. 9 et 10). La carte est dotée d'une bonne lisibilité globale. La cohérence d'ensemble est satisfaisante, aucun thème cartographié n'évinçant l'autre. Les différents types de zones représentées sont facilement distinguables. La logique de représentation utilisée et la texture des motifs permettent d'associer mentalement le type de terrain symbolisé. Tout ceci est encourageant, d'autant plus que cette cartographie a été entièrement réalisée de façon automatique – ce qui constituait l'un des objectifs. Une comparaison avec la carte obtenue manuellement permet d'identifier une faiblesse au niveau de l'estompage numérique créé qui s'avère beaucoup moins expressif que celui obtenu par dessin et doit faire l'objet d'un nouvel axe d'expérience, sachant que les recherches sont nombreuses dans le domaine.

Bien entendu, cette méthode est appelée à être reproduite sur d'autres zones géographiques, en vue d'avoir une représentation homogène des zones rocheuses. Actuellement, ce n'est pas le cas sur la France : le résultat

diffère suivant les époques et les cartographes ayant produit le rocher à l'effet. Il convient par conséquent d'étendre ce type de test à d'autres zones de montagne, pour juger de l'extensibilité de la méthode. Il est prévu de cartographier prochainement la région de Modane et du Parc national de la Vanoise, dans les Alpes. Cet essai permettra entre autres de juger du rendu visuel de zones rocheuses très étendues dans l'espace. Il permettra aussi d'examiner les problématiques spécifiques liées aux glaciers.

## CONCLUSION

Afin d'obtenir une cartographie numérique automatique des zones de haute montagne, qui tente de rivaliser en qualité avec celle obtenue autrefois par des procédés de dessin, le projet Nouvelle carte de base a lancé des études spécifiques concernant aussi bien le domaine du traitement d'image que de la cartographie. En combinant de façon probabiliste différentes sources de données (ortho-images,

MNT, données exogènes), une extraction automatique des zones de rochers, éboulis et glaciers est obtenue, ainsi que différentes informations complémentaires liées au relief. Ces données permettent de réaliser une symbolisation automatique visant à exprimer au mieux les thèmes et le relief des zones de haute montagne.

Les premiers résultats obtenus dans les Pyrénées sont apparus suffisamment prometteurs pour envisager d'étendre le test à une zone plus étendue des Alpes. On pourrait aller jusqu'à une expérimentation auprès des utilisateurs finaux des cartes de haute montagne. Il est probable que le retour client permettra d'affiner encore le procédé et d'améliorer certaines représentations, notamment l'estompage, pour aboutir à l'utilisation complète de la solution en production. On pourra enfin remplacer certaines cartes devenues vétustes.

## BIBLIOGRAPHIE

ELHAI H., 1968, *Biogéographie*, Paris, Armand Colin.

GUIGUES L., 2004, *Modèles multi-échelle pour la segmentation d'images*, Cergy-Pontoise, École doctorale Sciences et ingénierie de l'Université de Cergy-Pontoise, 302p.

GUIGUES L., COQUEREZ J.-P., LE MEN H., 2006, « Scale sets image analysis », *International Journal of Computer Vision*, n°68 (3), p. 289-317.

HURNI L., DAHINDEN T., HUZTLER E., 2001, « Digital Topographic Drawing for Topographic Maps: Traditional Representations by Means of new Technologies », *International Publications on Cartography*, vol.38, Zurich, Institute of Cartography, Swiss Federal Institute of Technology, 10p.

IMHOF E., 1982, *Cartographic Relief Presentation*, W. De Gruyter.

LACAMBRE A., 2001, *Aléas et risques naturels en milieu montagnard; apport et limite d'un système d'information géographique*, Paris, Université Paris 4.

LE BRIS A., BOLDO D., 2007, « Extraction of landcover themes out of aerial orthoimages in mountainous areas using external information », dans *Proceedings of the ISPRS Conference Photogrammetric Image Analysis (PIA)*, Munich, 6p.

LE MEN H., TREVISAN J., BOLDO D., 2002, « Automatic extraction of landcover themes on digital orthophotos in mountainous area for mapping at 1/25k », dans *Proceedings of the ISPRS Commission II*, Xi'an, Chine, 8p.

TRIAS-SANZ R., 2006, *Semi-automatic high-resolution rural landcover classification*, Paris, Université Paris 5, 374p.

TRIAS-SANZ R., BOLDO D., 2005, « A high-reliability, high resolution rural land cover classification into forest and non forest », dans H. Kalviainen, J. Parkkinen et A. Kaarna, *Proceedings of the Scandinavian Conference on Image Analysis (SCIA), Lecture notes on computer science*, vol. 3540, Springer, Joensuu, Finlande, p. 831-840.



Figure 1 : Cartographie manuelle d'une zone des Alpes au 1:25 000

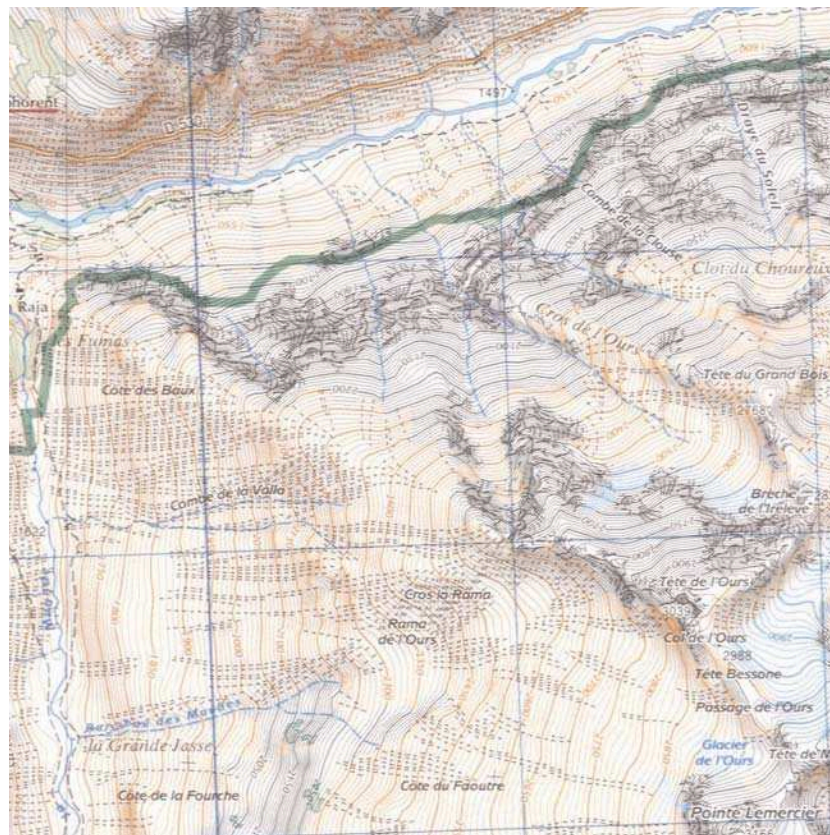


Figure 2 : Premier essai de cartographie numérique de la même zone des Alpes  
(H. Le Men et al, 2002)

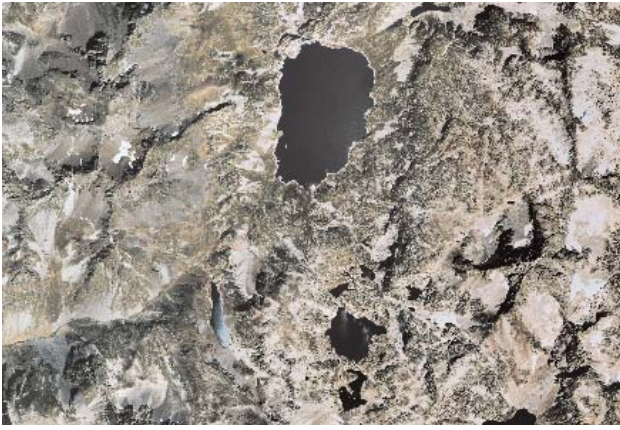


Figure 3a : Extrait d'ortho-image utilisé dans le processus

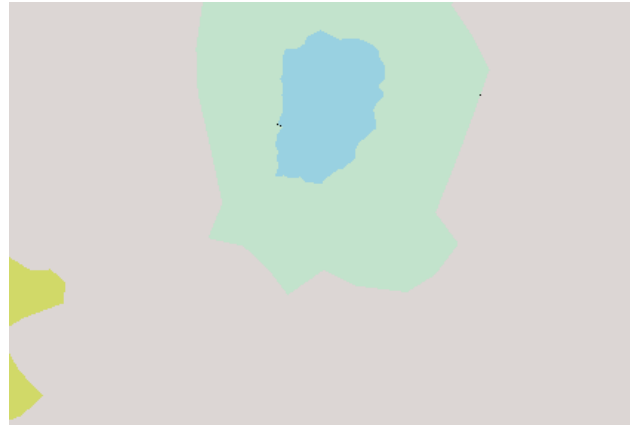


Figure 3b : Extrait d'occupation du sol généralisée de Corinne Land Cover sur la même zone

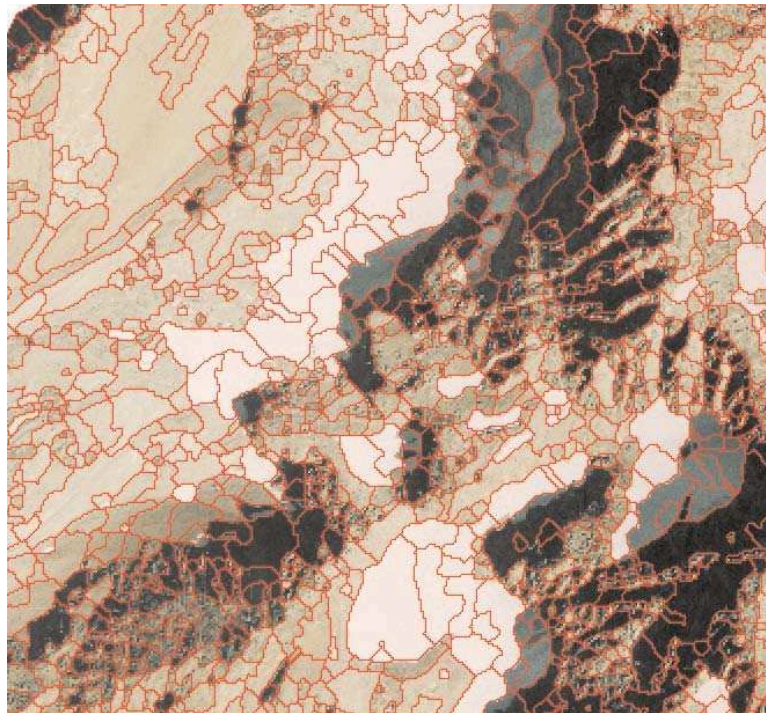


Figure 4 : Exemple de segmentation de l'ortho-image en régions homogènes fournie par le processus de (L. Guiges, 2004)

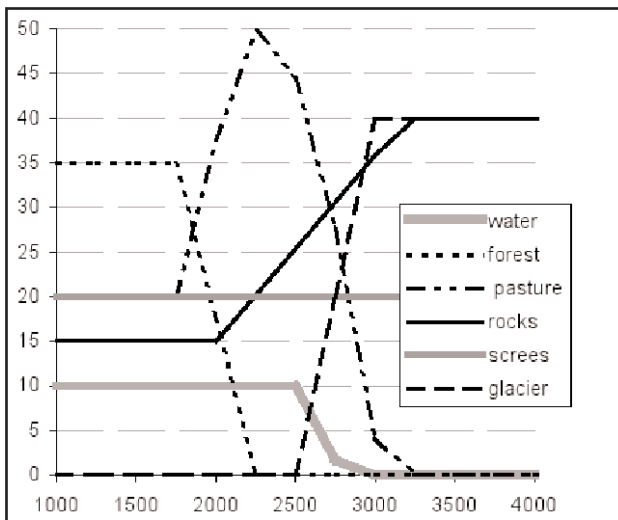


Figure 5 : Probabilité de présence des différents thèmes en fonction de l'altitude

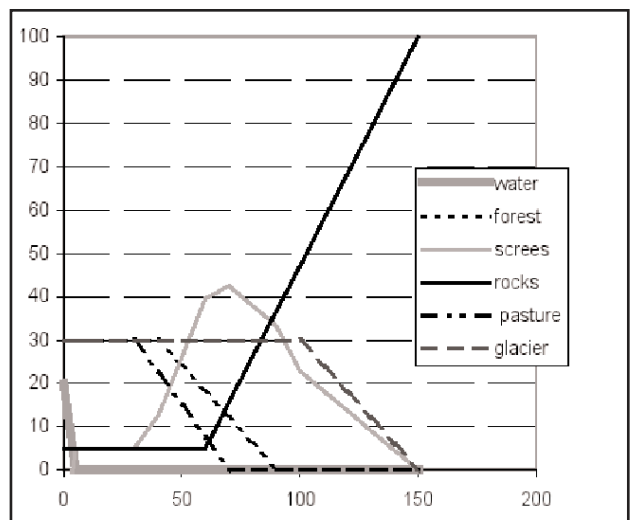


Figure 6 : Probabilité de présence des différents thèmes en fonction de la pente

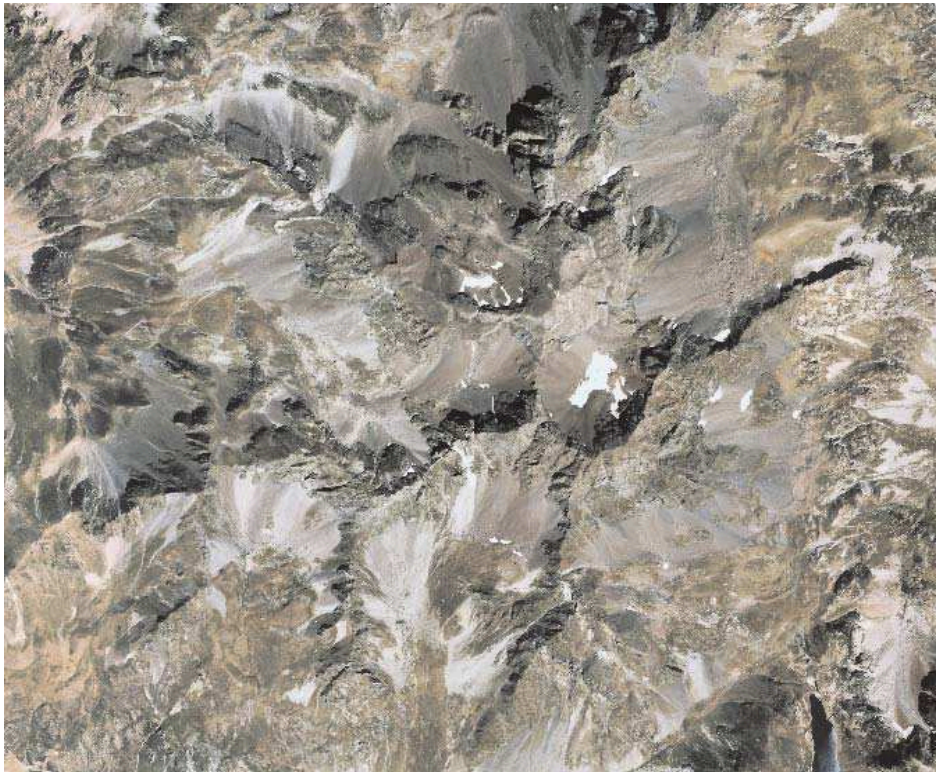


Figure 7a : Ortho-image dans les Pyrénées (région du Lurien)

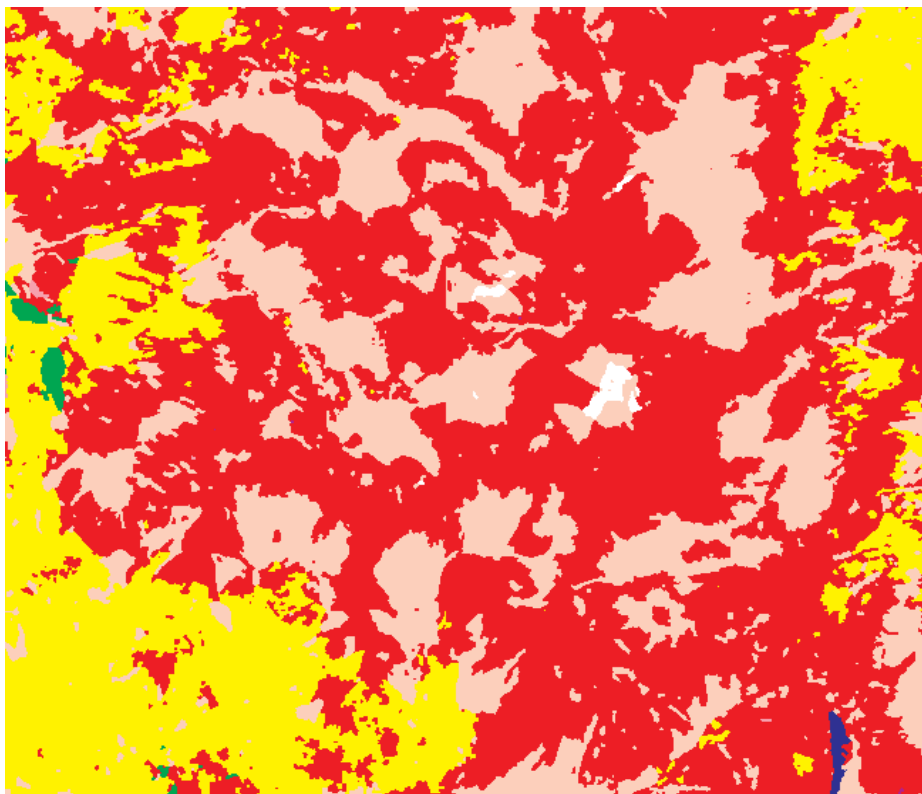
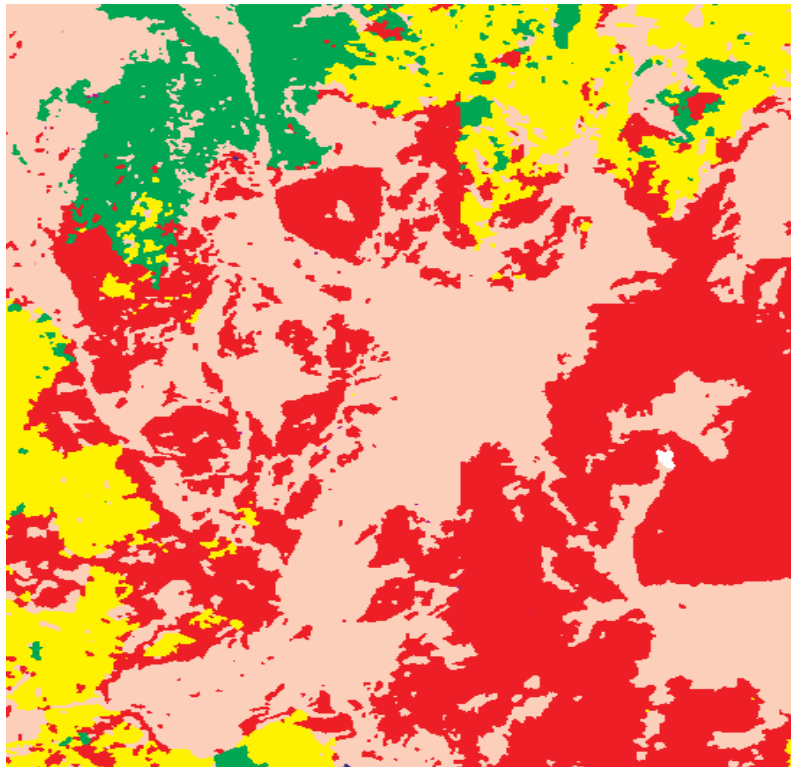


Figure 7b : Classification obtenue dans les Pyrénées (région du Lurien)  
(Bleu = Surfaces d'eau ; Rouge = Rochers; Vert = Forêts ; Jaune = Alpages ; Rose = Eboulis)

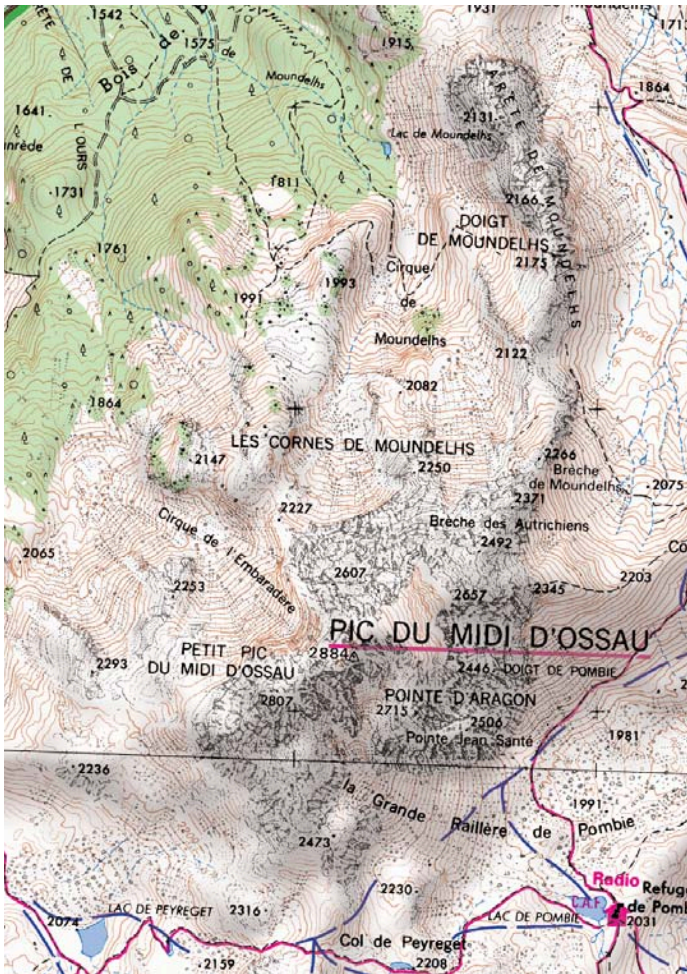


(a)



(b)

Figure 8 (a) et (b) : Ortho-image (a) et classification (b) dans les Pyrénées (région du Pic d'Ossau)



(a) (b)  
 Figure 9 : Représentation manuelle (a) et nouvelle représentation numérique (b)  
 dans les Pyrénées (région du Pic d'Ossau) au 1:25 000

