

*Mémoire de Master 2 Recherche,
mention Géosciences, Environnement et Risques,
spécialité Risques Technologiques et Naturels,
parcours Risques Naturels*

**Inventaire et caractérisation de glissements de terrain à partir
de données images aériennes et satellites par une méthode
semi-automatique**

**Application au bassin de Barcelonnette (Alpes-de-Haute-Provence,
France)**

Monique Moine

Septembre 2008

Structure d'accueil : Laboratoire Image et Ville (UMR 7011), Faculté de Géographie et d'Aménagement, Université Louis Pasteur, Strasbourg I

Maîtres de stage : Anne Puissant (maître de conférence, Laboratoire Image et Ville (UMR 7011), Faculté de Géographie et d'Aménagement, Université Louis Pasteur, Strasbourg I)

Jean-Philippe Malet (chargé de recherches au CNRS, Institut de Physique du Globe de Strasbourg (UMR 7516), Ecole et Observatoire des Sciences de la Terre, Université Louis Pasteur, Strasbourg I)

Jury : Anne-Véronique Auzet (professeur, Faculté de Géographie et d'Aménagement, Université Louis Pasteur, Strasbourg I)

Michel Granet (professeur, Institut de Physique du Globe de Strasbourg (UMR 7516), Ecole et Observatoire des Sciences de la Terre, Université Louis Pasteur, Strasbourg I)

Jean-Philippe Malet (chargé de recherches au CNRS, Institut de Physique du Globe de Strasbourg (UMR 7516), Ecole et Observatoire des Sciences de la Terre, Université Louis Pasteur, Strasbourg I)

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier Jean-Philippe Malet et Anne Puissant de m'avoir donné l'opportunité de faire ce stage enrichissant et de m'avoir fait confiance pour la réalisation de cette recherche. Je les remercie pour m'avoir fait découvrir un peu plus le monde de la recherche et les méthodes de mise en oeuvre d'une recherche scientifique. Merci pour leur encadrement et pour leur aide tout au long de ce stage.

Merci à Anne Puissant pour m'avoir intégrée au Laboratoire Image et Ville et pour m'avoir transmis avec bonne humeur ses connaissances en ce qui concerne les logiciels de SIG et de télédétection. Merci aussi pour ses corrections au fur et à mesure de l'écriture de ce mémoire.

Merci à Jean-Philippe Malet pour m'avoir permis de découvrir les beaux paysages de la vallée de Barcelonnette et de participer à la réalité du travail de terrain tout en enrichissant mes connaissances sur les glissements de terrain et sur les techniques de mesure. Merci à toute l'équipe présente sur le terrain, chercheurs, doctorants, stagiaires, pour cette semaine sympathique passée ensemble à Barcelonnette.

Mes remerciements vont aussi à Christiane Weber et au Laboratoire Image, Ville et Environnement pour m'avoir accueillie dans leurs locaux et pour avoir pourvu à mes besoins matériels pour la réalisation de cette recherche. Merci à mes collègues de bureau et aux autres stagiaires, doctorants, chercheurs, maîtres de conférence côtoyés au laboratoire pour la convivialité et l'entraide.

Merci à Yannick Thiery pour ses conseils tout au long du stage et les données SIG transmises. Le temps passé pour répondre à mes questions et m'éclairer dans un domaine qui m'était peu familier, les glissements de terrain, a été bénéfique à l'avancée du projet.

Enfin, merci à tous les stagiaires de première et deuxième année de master 'Risques Naturels' et 'Géographie Environnementale' côtoyés au LIVE, à la faculté de géographie ou à l'IPGS pendant ces six mois de stage pour le soutien mutuel et les moments de détente pendant les pauses de midi.

Sommaire

Liste des figures	4
Liste des tableaux	5
Avant-propos	6
Introduction	7
Première partie : Contexte, état de l'art, objectifs de travail et site d'étude	9
1.1. Etat de l'art : utilisation de la télédétection optique pour l'analyse des mouvements de terrain	9
1.1.1. Etat général de la question	9
1.1.2. Techniques de télédétection, méthodes de traitement d'images et applications à l'étude des mouvements de terrain.....	11
1.2. Présentation de l'objet d'étude et des objectifs de travail	16
1.3. Présentation du site d'étude	17
1.3.1. Contexte géographique, géologique, géomorphologique et hydrologique.....	17
1.3.2. L'aléa mouvement de terrain dans le bassin de Barcelonnette.....	18
Deuxième partie : méthodologie générale et étape de photo-interprétation	20
2.1. Présentation générale de la démarche méthodologique	20
2.1.1. Données source.....	20
2.1.2. Hypothèses de départ et méthodologie générale.....	20
2.1.3. Sélection des échantillons analysés	22
2.2. Méthodologie détaillée de l'étape de photo-interprétation (étape 1)	24
2.2.1. Recensement d'indices de glissements de terrain dans la littérature	24
2.2.2. Photo-interprétation des glissements de terrain.....	28
2.3. Résultats de l'étape de photo-interprétation	30
2.3.1. Indices de glissements de terrain retenus et grilles de photo-interprétation	30
2.3.2. Typologies 'pi' et sélection des 50 glissements représentatifs (échelle régionale)	33
Troisième partie : inventaire semi-automatique des glissements de terrain à l'échelle régionale par analyse 'orientée objet'	34
3.1. Principes de l'analyse 'orientée objet'	34
3.2. Etape de calcul des paramètres quantitatifs (étape 2)	35
3.2.1. Traduction quantitative des indices qualitatifs (cf. tableau 3.1.).....	35
3.2.2. Calcul des paramètres 'eCognition'	36
3.3. Etape de classification (étape 3)	38
3.3.1. Méthodologie de l'étape de classification	38
3.3.2. Résultats et validation des classifications	39
3.4. Discussion et perspectives	Erreur ! Signet non défini.
Conclusion	46
Bibliographie	47
Index des sigles	50
Annexes	51

Liste des figures

Figure 1.1. : Les différentes composantes de l'évaluation du risque à travers l'exemple du glissement-coulée de La Valette.....	7
Figure 1.2. : Identification visuelle de glissements de terrain à partir d'un couple stéréoscopique de photographies aériennes.....	12
Figure 1.3. : Organigramme de la méthode semi-automatique experte de classification du paysage en unités géomorphologiques mise en place par Van Asselen et Seijmonsbergen (2006).....	13
Figure 1.4. : Représentation schématique du programme d'identification automatique d'unités géomorphologiques et de mouvements de terrain réalisé par Molenaar (2005)	14
Figure 1.5. : Organigramme de la méthode semi-automatique d'extraction des cônes de déjection établie par Argialas et Tzotsos (2006).....	14
Figure 1.6. : Bloc-diagramme et photographie d'un glissement de terrain avec présentation des principales entités géomorphologiques	16
Figure 1.7. : Carte géomorphologique simplifiée du bassin de Barcelonnette montrant les principales zones de localisation des mouvements de versant.....	18
Figure 2.1. : Schéma de présentation de la méthodologie.....	21
Figure 2.2. : Schéma explicatif de la sélection des échantillons.....	22
Figure 2.3. : Localisation 'experte' des glissements de terrain visualisés sur l'orthophotographie de 2004.....	23
Figure 2.4. : Distribution statistique des 217 glissements de terrain en fonction de leur surface.	24
Figure 2.5. : Exemple du shapefile 'expert' et de la table attributaire d'un glissement de terrain sur l'orthophotographie de 2004.....	28
Figure 2.6. : Comparaison d'éléments descripteurs de glissements de terrain observés sur l'orthophotographie de 2004 et observés sur le terrain.....	29
Figure 2.7. : Exemple du shapefile 'expert' et de la table attributaire d'un grand glissement (glissement-coulée de Poche) vu sur l'orthophotographie de 2004	30
Figure 3.1. : Définition de l'hétérogénéité dans une segmentation multirésolution.....	34
Figure 3.2. : Différence entre une classification conventionnelle et une classification utilisant la logique floue.....	35
Figure 3.3. : Les quatre niveaux de segmentation réalisés pour l'extraction des paramètres et pour la classification.	36

Liste des tableaux

Tableau 1.1. : Tableau récapitulatif des techniques de télédétection et des méthodes de traitement recensées dans la littérature en fonction des types d'application.	10
Tableau 2.1. : Données sources utilisées.....	20
Tableau 2.2. : Indices de repérage des glissements de terrain recensés dans la littérature	25
Tableau 2.3. : Indices de caractérisation des 'grands glissements' recensés dans la littérature.....	27
Tableau 2.4. : Extrait de la grille de photo-interprétation des 217 glissements de terrain.	31
Tableau 2.4. : Extrait de la grille de photo-interprétation des 'grands glissements'	32
Tableau 2.5. : Typologie des glissements de terrain par photo-interprétation	33
Tableau 3.1. : Mise en correspondance des indices qualitatifs des grilles de photo-interprétation et des indicateurs quantitatifs utilisables en traitement d'image.	35
Tableau 3.2. : Exemple de résultats des statistiques des paramètres extraits pour les glissements de terrain de type 1.....	37
Tableau 3.3. : Paramètres 'eCognition' retenus pour être utilisés pour les classifications.	37
Tableau 3.4. : Protocole de tests.....	39

Avant-propos

Les structures d'accueil

Ce stage a été effectué au sein du **Laboratoire Image, Ville et Environnement de Strasbourg** (LIVE). Le LIVE est une unité de recherche du CNRS (UMR 7011) et de l'Université Louis Pasteur qui travaille depuis une dizaine d'années sur l'utilisation des techniques de télédétection dans l'étude du fonctionnement de l'écosystème urbain. Le laboratoire se diversifie depuis quelques années en orientant certaines de ses recherches sur les aspects connaissances et processus des écosystèmes anthropiques et des risques, ainsi que sur les dimensions spatiales et temporelles (historique et prospective) de ceux-ci. C'est dans ce cadre de recherche qu'a pu se réaliser cette étude, sous la direction de Madame Anne Puissant, maître de conférence à la Faculté de Géographie et d'Aménagement de Strasbourg.

Par ailleurs, ce stage s'est fait en collaboration avec l'**Institut de Physique du Globe de Strasbourg** (IPGS). L'IPGS est une unité de recherche du CNRS (UMR 7516) et de l'Université Louis Pasteur qui développe des recherches dans différents domaines des sciences de la terre en tectonique, sismologie, dynamique globale, géophysique de sub-surface. L'IPGS est actuellement impliqué dans l'étude des risques gravitaires dans le bassin de Barcelonnette à travers plusieurs projets de recherche. C'est dans ce contexte d'étude que s'est faite la collaboration avec l'IPGS sous la direction de Monsieur Jean-Philippe Malet, chargé de recherche au CNRS, ainsi que la semaine d'études de terrain réalisée sur les glissements de terrain de la vallée de Barcelonnette.

Le contexte scientifique

Ce stage s'inscrit dans le cadre du projet de recherche européen **Mountain Risks** auquel collaborent 20 unités de recherche de 8 pays européens pour étudier tous les aspects de l'analyse, de la gestion et de la prévention des risques hydro-gravitaires en milieu montagneux. Le but de ce réseau est de développer des connaissances sur le fonctionnement hydro-géomorphologique des processus en milieu montagneux pour aider à une meilleure gestion des risques à long terme de ces milieux.

Le cadre plus précis de ce stage a été celui de l'étude de l'aléa mouvement de terrain dans la **vallée de Barcelonnette**. Les recherches concernant ce site d'étude ont impliqué des chercheurs de différentes spécialités (géophysiciens, géomorphologues, hydrogéologues, géographes...) depuis une trentaine d'années et ont donné lieu à de nombreuses publications scientifiques, mémoires et thèses comme par exemple les thèses de Weber (2001), Malet (2003), Remaître (2006) ou Thiery (2007).

D'un point de vue méthodologique, le stage s'inscrit dans l'utilisation des méthodes de **télédétection** et de traitement d'images pour l'étude de l'environnement et la gestion des risques naturels. C'est dans ce contexte que le stage s'est effectué au sein du LIVE.

Introduction

Le risque se définit comme la conjonction entre l'aléa, le phénomène naturel potentiel, dans le cas des risques naturels, et la vulnérabilité des milieux et des sociétés exposés à ce phénomène (cf. figure 1.1.).

La gestion des risques naturels nécessite une **connaissance précise de l'aléa**, ce qui implique de prendre en compte plusieurs éléments : le type de processus et ses caractéristiques, son occurrence temporelle et son intensité (Van Westen, 2002 ; cf. figure 1.1.).

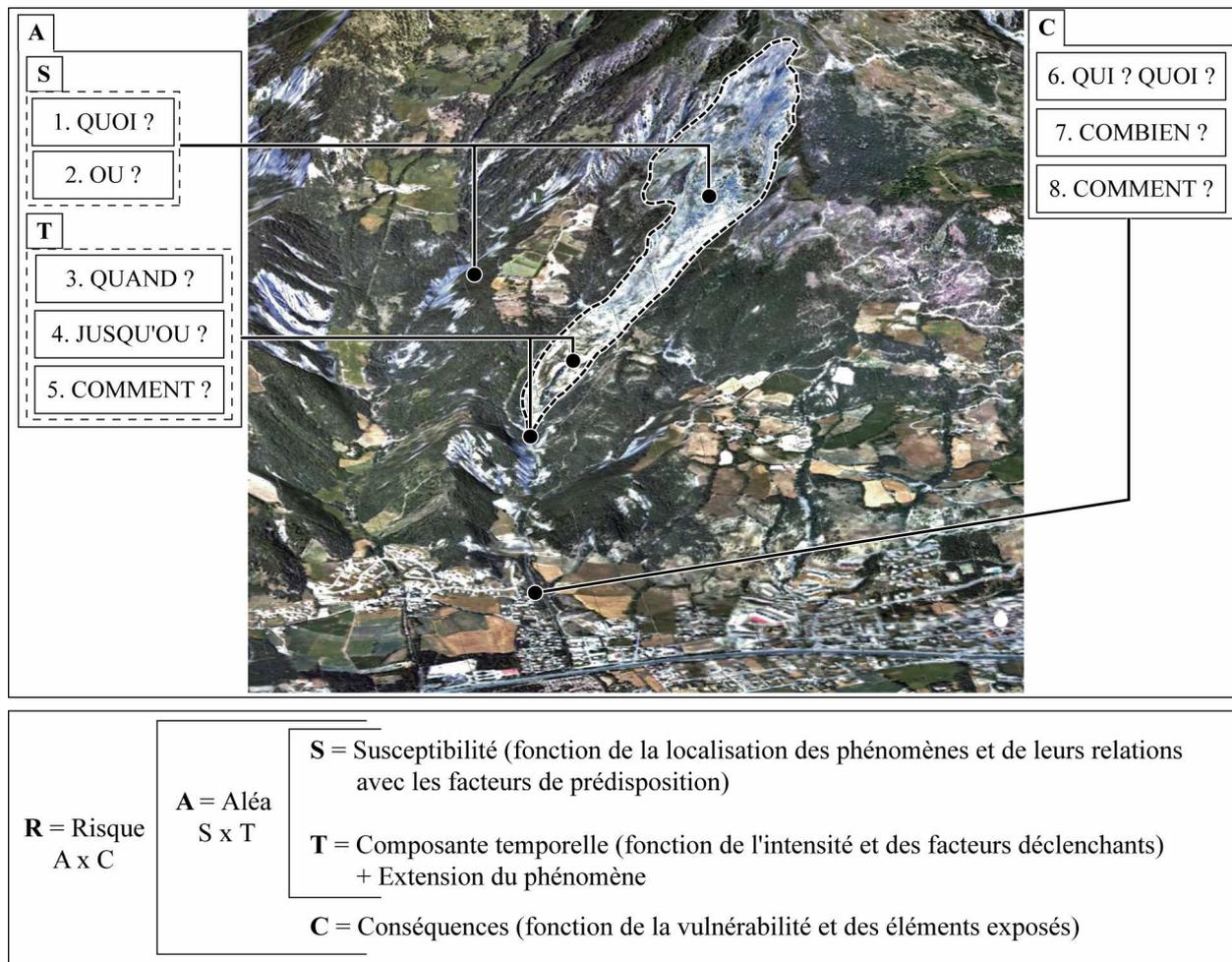


Figure 1.1. : Les différentes composantes de l'évaluation du risque à travers l'exemple du glissement-coulée de La Valette (bassin de Barcelonnette, Alpes-de-Haute-Provence, France) (Thiery, 2007).

Dans ce contexte, les **techniques de télédétection** (i.e. photo-interprétation, photogrammétrie, traitement d'images aériennes et satellite, modèles numériques de terrain, imagerie radar) constituent un moyen intéressant pour caractériser l'aléa. Les avantages qu'offre la télédétection sont multiples. Principalement, elle permet l'acquisition d'une vision globale de l'état du paysage et de son évolution et limite ainsi les prospections de terrain et permet un gain de temps et d'argent. C'est une source commode à consulter et relativement facile d'accès. De plus, elle permet la fixation de l'information à une date donnée et le suivi temporel de changements. Les domaines du risque dans lesquels la télédétection est utilisée pour l'évaluation de l'aléa sont variés : risque d'inondation, risque sismique, risque volcanique, risque mouvement de terrain, risque de feux de forêt, risques environnementaux divers (Van Westen, 2002).

Les **mouvements de terrain** représentent une menace sérieuse pour les vies et les activités humaines en milieu montagnard (cf. annexe 1). Collecter des données sur l'occurrence et l'activité des mouvements de terrain sur de grandes zones constitue un point crucial pour la gestion des risques liés aux mouvements de terrain (Hervas, 2003). Dans un contexte de montagnes, les mouvements de terrain sont particulièrement difficile à localiser, présents en grand nombre, sur de larges étendues et souvent situés dans des endroits difficiles d'accès. L'apport de la télédétection apparaît donc tout à fait intéressant pour aider à la caractérisation de l'aléa. La photo-interprétation permet par exemple d'identifier les indices précurseurs, les formes caractéristiques et les facteurs de prédisposition des glissements de terrain à une échelle pertinente pour localiser et cartographier les événements passés, les mouvements déclarés et les zones de stabilité incertaine (MATE, LCPC, 1999).

Jusqu'à présent, les techniques de télédétection utilisées pour l'étude des aléas naturels ont été principalement la photo-interprétation visuelle de photographies aériennes et les classifications d'images satellite basées sur le pixel (Girard et Girard, 1999). Les recherches s'orientent aujourd'hui vers le développement de **techniques semi-automatiques ou automatiques d'inventaire et de caractérisation de l'aléa**, notamment avec les techniques d'analyse d'images dite 'orientées objets' (e.g. Argialas et Tzotsos, 2006). Cependant, l'applicabilité de ces méthodes d'analyse à la cartographie et à la caractérisation des mouvements de terrain n'a été que peu développée jusqu'à présent.

C'est dans ce contexte qu'il est apparu intéressant et utile de tester la **mise au point d'une méthode permettant la reconnaissance semi-automatique des mouvements de terrain**. Le site d'étude choisi est le bassin de Barcelonnette (Alpes-de-Haute-Provence, France), affecté par de nombreux mouvements de terrains (562 phénomènes recensés) de tous types (Thiery, 2007). La bonne connaissance du site et la disponibilité de nombreuses données sur les mouvements de terrain constituent des conditions favorables à la mise au point de la méthode.

Ce rapport s'articule en trois parties :

- (1) un état de l'art de l'utilisation de la télédétection dans l'étude des mouvements de terrain et une présentation des objectifs et du site d'étude,
- (2) une présentation de la méthodologie générale mise en place suivie de la méthodologie détaillée et des résultats de la première étape (étape de photo-interprétation),
- (3) une présentation de la méthodologie détaillée des deux étapes de traitement d'image suivie des résultats et de leur interprétation et discussion.

Première partie : Contexte, état de l'art, objectifs de travail et site d'étude

Les applications de la télédétection dans le domaine de l'environnement sont nombreuses et concernent, entre autre, la cartographie de l'occupation du sol (e.g. CORINE Land Cover (Girard et Girard, 1999)), la classification des agropaysages, la détection des zones humides, la pédologie, la géologie, le suivi de l'évolution du littoral (Girard et Girard, 1999). En ce qui concerne les **risques naturels** plus particulièrement, la télédétection est utilisée pour l'aide à la gestion de tous types de risques : inondations, séismes, éruptions volcaniques, mouvements de terrain, feux de forêts, cyclones, risques environnementaux (e.g. érosion des sols, pollution de l'air, des sols et des eaux) (Van Westen, 2002). Les techniques de télédétection utilisées sont de deux types : **imagerie optique** (i.e. imagerie aérienne et imagerie satellite) et **imagerie radar** (e.g. interférométrie radar (InSAR), altimétrie laser (LiDAR)). Ce travail s'inscrit dans **la cartographie de l'aléa par des méthodes de télédétection optiques**.

1.1. Etat de l'art : utilisation de la télédétection optique pour l'analyse des mouvements de terrain

1.1.1. Etat général de la question

Jusqu'à présent, la méthode de télédétection la plus utilisée pour l'étude des mouvements de terrain a été la **photo-interprétation visuelle d'orthophotographies** pour localiser les mouvements déclarés ou des zones susceptibles d'avoir été affectées. Du fait du développement de nouvelles techniques d'observation par télédétection, de la disponibilité d'images satellites à très haute résolution (VHR, Very High Resolution) proposées par les nouveaux satellites tels que Ikonos (1999, résolution de 1m), SPOT 5 (2002, résolution optimale de 2,5m) ou Quickbird (2001, résolution optimale de 0,61m) et du développement de nouvelles méthodes de traitement d'images (e.g. méthode d'analyse 'orientée objet'), **les recherches visant à développer de nouvelles méthodes d'étude des mouvements de terrain se sont multipliées** ces dernières années. Par exemple, en Europe, le projet SLAM (Service for Landslides Monitoring), lancé en 2003 par l'ESA (European Space Agency) a pour objectif de développer l'intégration des données d'observation de la terre aux documents utilisés classiquement pour le suivi des mouvements de terrain (cf. Farina et al., 2006). Aux Etats-Unis, l'USGS (United States Geological Survey) a fait plusieurs rapports de recherche sur l'utilisation de l'imagerie LiDAR pour la cartographie des mouvements de terrain (cf. Schulz, 2004). Par ailleurs, quelques essais d'application des méthodes de traitement 'orientées objet' dans le cadre de la **détection d'unités géomorphologiques** ont déjà été réalisés (cf. § 1.1.2.).

Les **types de supports de télédétection optique** utilisés actuellement pour la détection des mouvements de terrain sont diverses : orthophotos (noir et blanc, couleur, infrarouges) uni- et multi-temporelles, images satellites classiques PAN ou XS (e.g. images Landsat TM, SPOT) uni- et multi-temporelles, images satellites à très haute résolution (e.g. Ikonos, Quickbird), ondes infrarouges thermiques (e.g. capteur ASTER du satellite Terra). On remarque cependant que les techniques radar sont aussi utilisées dans l'étude des mouvements de terrain mais pour des applications différentes (cf. § 1.1.2.).

Les techniques de télédétection, les supports images et les méthodes de traitement utilisés pour l'étude des glissements de terrain vont dépendre du **domaine d'application** (cf. annexe 2). On relève trois grands domaines d'application de l'utilisation de la télédétection pour l'étude des mouvements de terrain :

- (1) la localisation et l'inventaire,**
- (2) la caractérisation,**
- (3) le suivi des déplacements et des volumes.**

Le tableau 1.1. présente un résumé des techniques de télédétection et des méthodes de traitement recensées pour chaque type d'application dans la littérature scientifique publiée ces 10 dernières années par Wiley InterScience, Elsevier, Pergamon, USGS, ESA, International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS) et American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS). Les types d'application et les techniques de télédétection et de traitement qui leurs correspondent sont explicités dans le paragraphe 1.1.2.

Type d'application	Technique de télédétection	Site d'étude	Support image	Méthode de traitement	Article
Localisation et inventaire	Optique	Mouvements de terrain de la région de Taïwan	Images satellites Quickbird, MNT, données vecteurs (routes, rivières)	Réseau de neurones (automatique)	Chang et Liu, 2004
		Unités géomorphologiques et mouvements de terrain, région de Montafon, Autriche	MNT, photos aériennes (vraies couleurs et infrarouges), images satellites Ikonos et Landsat, cartes topographique et géomorphologiques, données SIG (vecteurs)	Création d'un algorithme de détection automatique	Molenaar, 2005
		Unités physiographiques et cônes de déjection, Nevada, USA	Image satellite ASTER, MNT	Analyse d'image 'orientée objet' (semi-automatique)	Argialas et Tzotsos, 2006
	Radar	Mouvements de terrain de la région de Seattle, Washington, USA	LiDaR, observations de terrain	Cartographie manuelle à partir d'un LiDaR	Schultz, 2004
		Unités géomorphologiques, région de Montafon, Autriche	MNT (1 m de résolution), LiDaR, carte géomorphologique, connaissance experte	Méthode semi-automatique experte	Van Asselen et Seijmonsberg en, 2006
Caractérisation	/	Mouvements de terrain de la zone de Higashikubiki, Japon	MNT, carte d'inventaire des mouvements de versant, carte géologique	Analyse de la morphologie des composantes (escarpement, fissures, partie stable)	Iwahashi et al., 2000
	Radar	Complexe de glissements de terrain de Coringa, Nouvelle Zélande	LiDaR	Caractérisation de la topographie par analyses statistiques du LiDaR (non automatisé)	McKean et Roering, 2003
Suivi spatial et temporel	GPS	Glissement-coulée de Super-Sauze, Alpes-de-Haute-Provence, France	GPS	Traitement des données GPS	Malet et al., 2002
	Optique	Glissement de La Clapière, Mercantour, France	Photos aériennes multi-temporelles, MNT	Corrélation d'images	Casson et al., 2003
		Glissement de Tessina, Italie	Imagerie optique	Corrélation automatique d'images	Hervas et al., 2003
		Glissement de Tessina, Italie	Photos aériennes	Photo-interprétation visuelle	Van Westen et Getahun, 2003
		Glissement de La Clapière, Mercantour, France	Photos aériennes stéréoscopiques, images satellites Quickbird	Corrélation d'images	Delacourt et al., 2004
		Glissements de terrain de la région de Hong Kong	Images satellites SPOT et Ikonos multi-temporelles	Corrélation d'images	Nichol et Wong, 2004
		Radar	Glissement de Tessina, Italie	Linear SAR (LISA)	Mesure du déplacement des pixels
	Glissement-coulée de La Valette, Alpes-de-Haute-Provence, France		Interférométrie SAR (satellites ERS-1, ERS-2)	Traitement d'interférogrammes différentiels	Squarzoni et al., 2003
	Glissement de La Clapière, Mercantour, France		MNTs multi-temporels	Soustraction de MNTs	Casson et al., 2005
	Glissements de terrain du bassin de la rivière Arno, Italie		Interférométrie SAR, photos aériennes, images satellites, carte topographique, MNT	Technique des points de repère permanents (<i>Permanent Scatterers processing</i>)	Farina et al., 2006

Tableau 1.1. : Tableau récapitulatif des techniques de télédétection et des méthodes de traitement recensées dans la littérature en fonction des types d'application.

1.1.2. Techniques de télédétection, méthodes de traitement d'images et applications à l'étude des mouvements de terrain

1.1.2.1. Localisation et inventaire

Les cartes d'inventaire des mouvements de terrain sont le fondement de la plupart des techniques de zonage de l'aléa mouvement de terrain. Selon Mantovani et al. (1996), la cartographie des mouvements de terrain comprend deux étapes : (1) l'**identification** qui consiste à déterminer si une zone détectée correspond à un mouvement de terrain ou non en se basant sur la taille, le contraste de la réponse spectrale (différence avec la réponse spectrale de l'environnement) et la forme d'une zone détectée et (2) le **classement** qui consiste à déterminer le type de mouvement de terrain (création d'une typologie). Dans cette étude, nous allons nous focaliser sur l'identification des mouvements de terrain. Suivant les types d'images utilisés et leurs résolutions spatiales, la **taille des mouvements** pouvant être identifiés, et donc l'**échelle** de la cartographie finale, vont différer.

Les techniques de télédétection les plus utilisées et les plus adaptées à la localisation et à la caractérisation des mouvements de terrain sont les techniques d'**imagerie optique à très haute résolution** (THR ; orthophotographies de résolution 50 cm, images satellites de résolution < 2,5 m), les techniques radar étant plus adaptées au suivi (cf. 1.1.2.3.).

On recense deux grands types de méthodes d'inventaire des mouvements de terrain :

- la **méthode géomorphologique** associant relevés de terrain et photo-interprétation visuelle,
- les **méthodes par traitement informatique** combinant plusieurs types de données (orthophotographies, images satellites, modèles numériques de terrain, images radar).

** Méthode géomorphologique (dite 'experte')*

La méthode d'inventaire des glissements de terrain la plus classique est la **méthode dite 'experte'** consistant à faire des **prospections de terrain** dans les zones les plus susceptibles d'être touchées par des instabilités de versant pour y repérer les signes géomorphologiques de la présence de glissements de terrain. Cela nécessite une connaissance experte des caractéristiques spécifiques des mouvements de terrain et beaucoup de temps ainsi que des financements. Cependant, avec l'arrivée des premières photographies aériennes, les prospections de terrain ont été combinées à l'analyse d'orthophotographies, celles-ci permettant de repérer les zones d'instabilités à l'avance et ainsi de cibler les sites à prospecter.

Ainsi, jusque dans les années 90, la technique de télédétection la plus utilisée pour la cartographie et le suivi des caractéristiques (e.g. distribution et classification) et des facteurs de déclenchement (e.g. pente, lithologie, structure géologique et géomorphologique, occupation du sol, anomalies géologiques) des glissements de terrain était l'**interprétation visuelle de photographies aériennes**, et plus particulièrement l'interprétation de photographies aériennes par stéréoscopie (Metternicht et al., 2005 ; cf. figure 1.2.). Mantovani et al. (1996) mentionnent que l'utilisation de l'imagerie stéréoscopique est très importante pour la détection de morphologies caractéristiques créées par les glissements de terrain et qu'à ces unités géomorphologiques peuvent être associées des éléments caractéristiques tels que les escarpements, les discontinuités du couvert végétal, les perturbations de l'humidité des sols ou des conditions de drainage. MATE et LCPC (1999), dans leur guide d'utilisation de la photo-interprétation dans l'établissement des plans de prévention des risques liés aux mouvements de terrain, remarquent que le simple examen visuel d'une photographie aérienne fournit une multitude d'informations permettant le repérage et l'analyse des mouvements de terrain. Ils donnent ainsi des indices observables sur les documents photographiques pour l'analyse des mouvements de terrain en fonction de leur type (i.e. écroulements, glissements, tassements, écoulements...). La stéréoscopie permet ainsi de délimiter manuellement très clairement les instabilités à une échelle de 1/25000 à 1/10000 mais nécessite une connaissance experte, ce qui implique aussi une grande part de subjectivité.

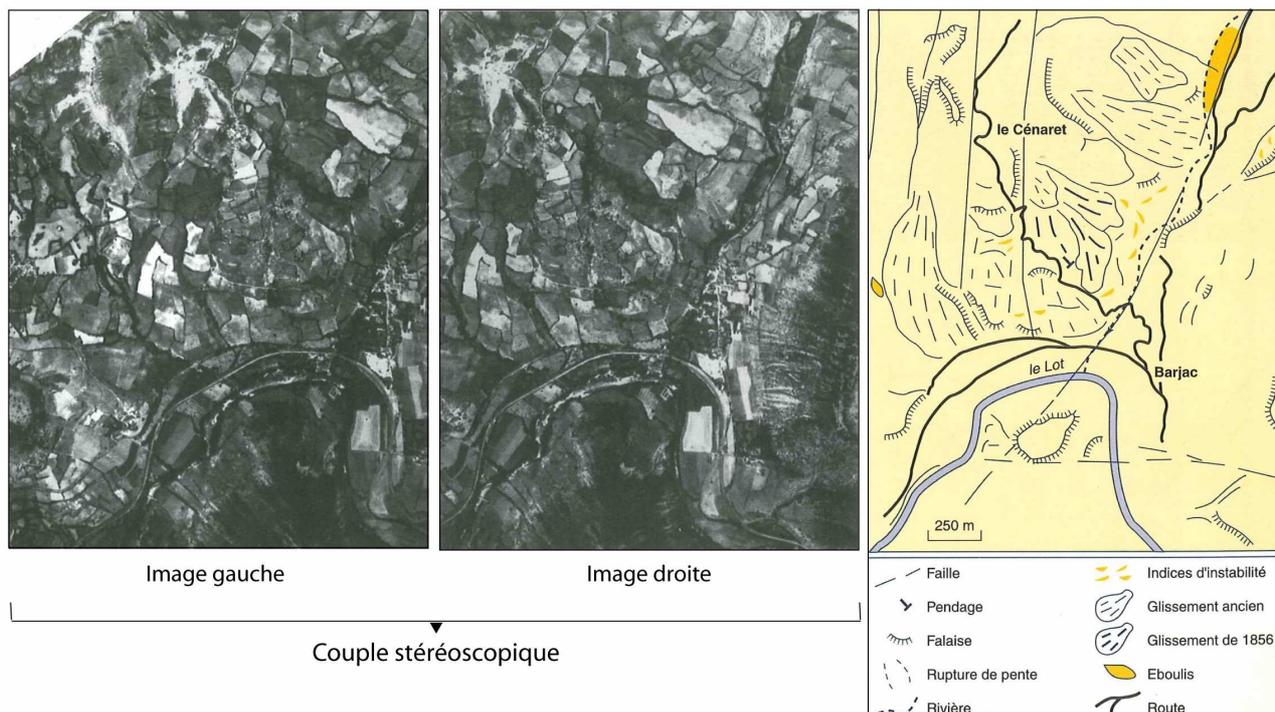


Figure 1.2. : Identification visuelle de glissements de terrain à partir d'un couple stéréoscopique de photographies aériennes. Exemple des glissements de terrain du versant rive droite de la Ginèse au niveau de Barjac (Lozère) (modifié de MATE, LCPC, 1999).

* Méthodes de traitement d'images semi-automatiques et automatiques

Un des grands avantages des méthodes d'identification semi-automatiques est qu'elles permettent de **s'affranchir de la subjectivité** imposée par les méthodes expertes. De plus, elles apportent un gain de temps considérable par rapport aux méthodes manuelles longues à mettre en œuvre.

Les méthodes semi-automatiques de classification d'images satellites à moyenne résolution basées sur le pixel, très utilisées pour les analyse d'occupation des sols par exemple, n'ont pas, ou très peu, été appliquées à l'identification des mouvements de terrain.

Ces techniques de traitements d'images classiques basées sur les valeurs spectrales des pixels et qui ont fait leurs preuves sur des images satellites à moyenne résolution (> à 5 m) se trouvent remises en cause avec l'avènement d'images à très haute résolution spatiale (50 cm à 2,5 m) (Boulaassal, 2008). En effet, la classification d'images THR, du fait de la précision et du grand nombre de pixels, engendre un effet 'poivre et sel' qui enlève tous ses avantages à la classification supervisée.

Cependant, l'avènement de **nouvelles techniques de traitement dites 'orientées objets'** donne de nouvelles perspectives en ce qui concerne la classification des images THR. Ces nouvelles méthodes d'extraction automatique passent par une étape de segmentation, c'est-à-dire un découpage de l'image en zones homogènes de pixels selon un critère spectral appelées régions. Ces régions peuvent être ensuite utilisées comme 'régions d'intérêt' dans une classification classique de type supervisée (par exemple selon la méthode du plus proche voisin). Elles peuvent également être caractérisées par différents critères (taille, forme, texture, contexte, etc.) et être utilisées comme règles de classification dans un processus fondé sur des opérateurs de logiques floues.

L'avantage de ce type de méthode est qu'il permet de former des régions homogènes qui serviront de base à la classification. Cela permet d'occulter l'effet 'poivre et sel' engendré par les classifications par pixels sur les images THR et est beaucoup plus adapté à la localisation des mouvements de terrain.

Plusieurs essais de mise au point de méthodes de reconnaissance semi-automatique d'unités géomorphologiques en utilisant la méthode d'analyse 'orientée objet' ont déjà été réalisés : Chang et Liu, 2004 ; Molenaar, 2005 ; Moretti, 2005 ; Argialas et Tzotsos, 2006 ; Van Asselen et Seijmonsbergen, 2006. Dans tous les cas, la méthode a été appliquée en utilisant le logiciel eCognition. Les données source utilisées sont de trois types :

- (1) données externes, i.e. cartographiques (e.g. carte géomorphologique) ou topographiques (e.g. MNT, LiDaR)) (cf. Van Asselen et Seijmonsbergen, 2006),
- (2) orthophotographies (cf. Molenaar, 2005),
- (3) images satellite (cf. Argialas et Tzotsos, 2006).

Trois exemples de travaux de recherche utilisant chacun un de ces types de données source sont présentés ci-dessous :

(1) Van Asselen et Seijmonsbergen (2006) ont utilisé l'analyse 'orientée objet' (Van Asselen et Seijmonsbergen, 2006) pour tester une méthode semi-automatique d'identification d'éléments du paysage (i.e. terrasses fluviales, cônes de déjection, versant touché par des mouvements de terrain, talus de versant, falaise rocheuse, formes glaciaires, chenaux) d'une région montagneuse d'Autriche à partir d'une carte géomorphologique, d'un MNT LiDaR et d'une carte des pentes dérivée du MNT LiDaR. La méthode a consisté en **5 étapes** (cf. figure 1.3.) :

1. délimiter les unités géomorphologiques à détecter sur une carte géomorphologique,
2. faire une analyse statistique des caractéristiques d'élévation et de pente de chaque type d'unité à partir de la carte géomorphologique et d'un MNT LiDaR,
3. segmenter l'image des pentes extraites du LiDaR,
4. classifier l'image segmentée par une classification par règles guidée par les statistiques de l'étape 2 et la connaissance experte et,
5. comparer la carte des unités géomorphologiques produite par la méthode semi-automatique à la carte géomorphologique experte de base.

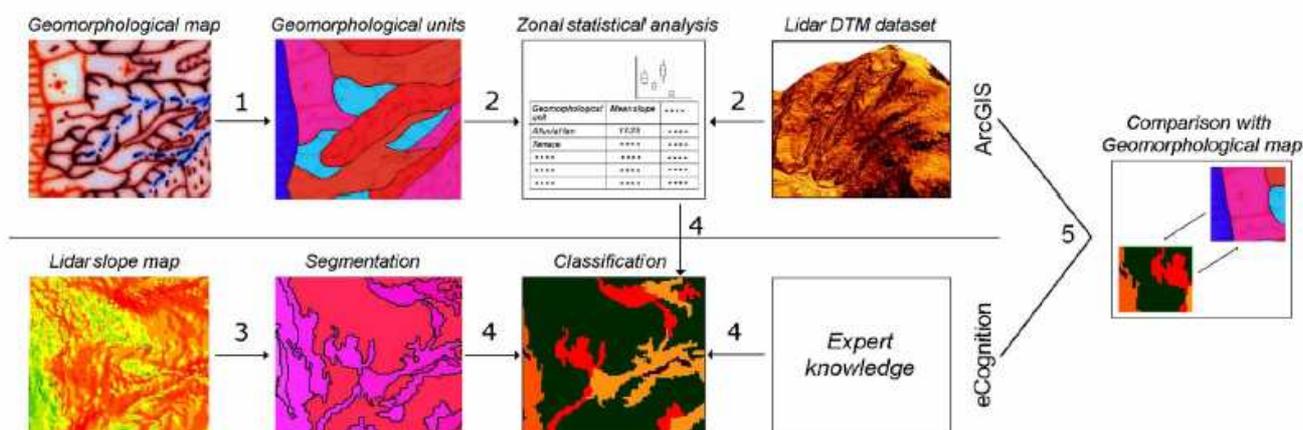


Figure 1.3. : Organigramme de la méthode semi-automatique experte de classification du paysage en unités géomorphologiques mise en place par Van Asselen et Seijmonsbergen (2006) (Van Asselen et Seijmonsbergen, 2006).

(2) Molenaar (2005) a tenté de mettre au point un programme informatique de reconnaissance automatique d'unités géomorphologiques et de mouvements de terrain. Sa méthode a consisté à créer **un algorithme informatique à partir de paramètres tels que le couvert végétal, la rugosité, la présence de fissures, le réseau de drainage, la pente**, ces paramètres étant calculés à partir de données images aériennes (orthophotographies couleur et IR), satellites (Ikonos, Landsat), topographiques (MNT et données dérivées, LiDaR), vecteurs (réseau de drainage, réseau routier) et cartographiques (carte géomorphologique au 1/10000). La reconnaissance automatique passe ici par deux étapes : une étape de détection des 'sites potentiels', i.e. zones pouvant potentiellement contenir des mouvements de terrain (e.g. toutes les zones ayant une pente > 10%), et une étape de détection des 'objets potentiels', i.e. éléments compris dans les 'sites potentiels' dont les caractéristiques correspondent à celles d'un mouvement de terrain (e.g. rugosité > 3 m, présence de fissures, végétation caractéristique) (cf. figure 1.4.).

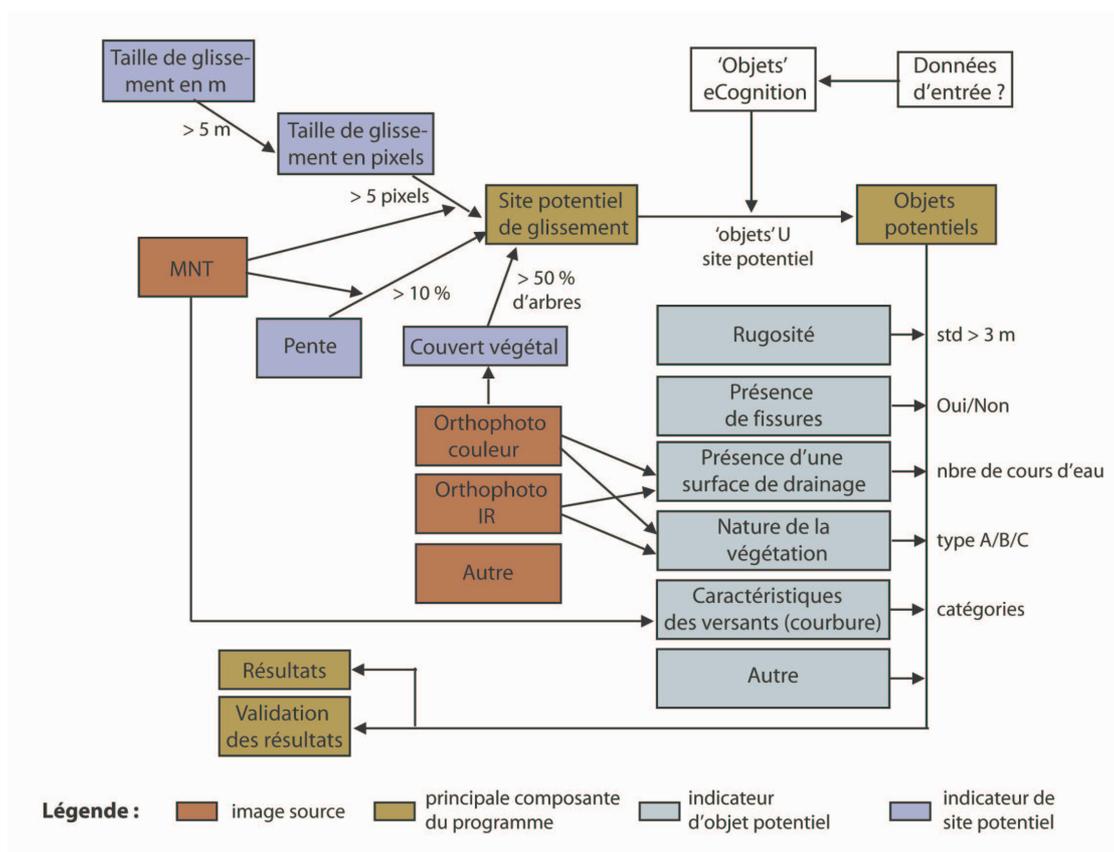


Figure 1.4. : Représentation schématique du programme d'identification automatique d'unités géomorphologiques et de mouvements de terrain réalisé par Molenaar (2005) (traduit et modifié de Molenaar, 2005).

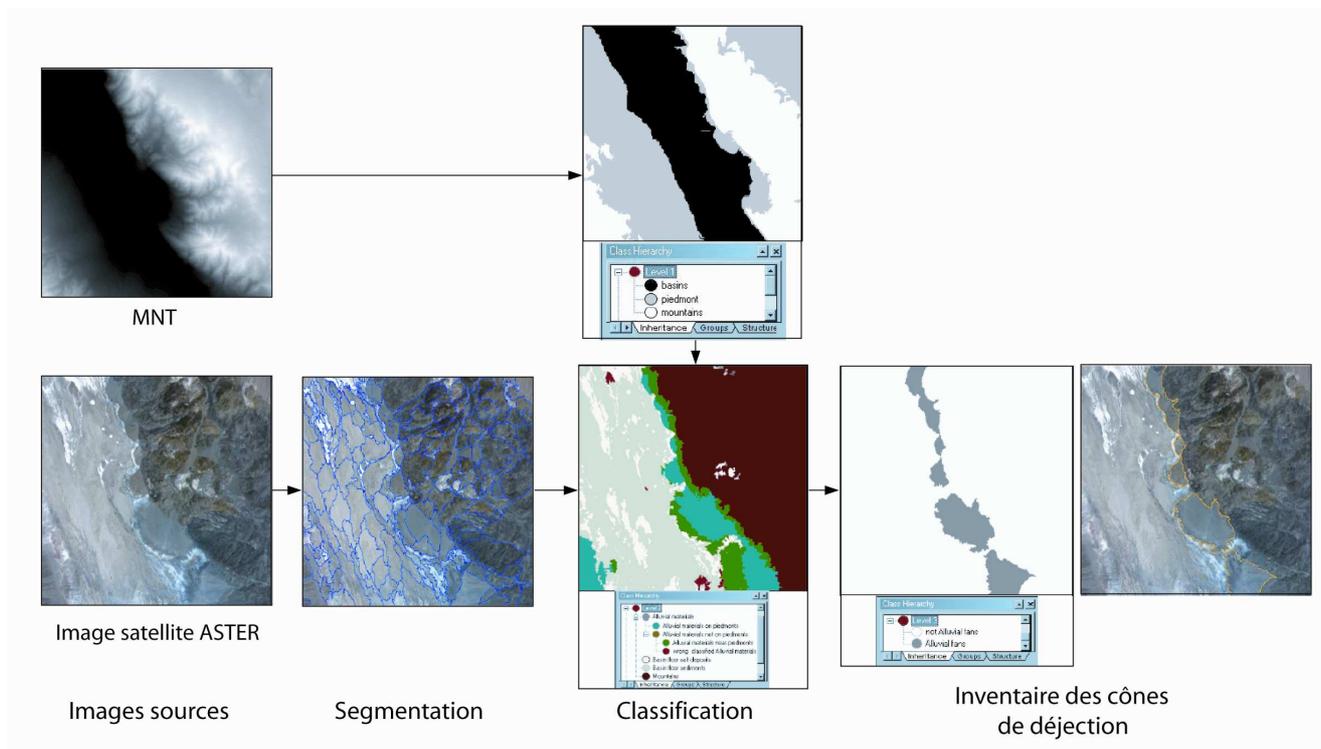


Figure 1.5. : Organigramme de la méthode semi-automatique d'extraction des cônes de déjection établie par Argialas et Tzotsos (2006) (modifié de Argialas et Tzotsos, 2006).

(3) Argialas et Tzotsos (2006) ont utilisé la méthode 'orientée objet' (eCognition) pour **extraire des unités physiographiques et des cônes de déjection à partir d'un MNT et d'une image satellite ASTER** (cf. figure 1.5.). La méthode utilisée pour ce travail s'est organisée en 4 étapes :

1. la segmentation (a) et la classification du MNT suivant des critères de pente et d'élévation pour en extraire 3 types d'unités physiographiques : les fonds de vallées (basins), les piémonts et les montagnes,
2. la segmentation de l'image ASTER (b),
3. la classification par méthode des plus proches voisins de l'image ASTER en utilisant des échantillons spectraux avec la création de 4 classes : matériaux alluviaux, montagnes, dépôts salins du fond de vallée et dépôts sédimentaires du fond de vallée,
4. la classification par règles de l'image ASTER utilisant les relations spatiales entre les objets de la segmentation (a) et les objets de la segmentation (b) (e.g. les matériaux alluviaux situés dans une zone de piémont sont classés comme cône de déjection).

1.1.2.2. Caractérisation

La caractérisation des mouvements de terrain correspond à la description en détail des éléments qui le composent (e.g. escarpement, zone d'accumulation, état de dégradation des fissures ; cf. § 1.3.). Les méthodes classiques de caractérisation des mouvements de terrain passent par une observation directe des caractéristiques sur le terrain et/ou par l'interprétation de photographies par stéréoscopie (cf. annexe 3).

Singhroy, Molch (2004a) et Singhroy (2002) mentionnent une approche complémentaire à l'approche par photo-interprétation visuelle, quantitative, en estimant les dimensions (e.g. longueur, largeur, épaisseur et pente, vitesse de déplacement, et distribution des débris) le long et en travers du glissement en utilisant le stereo SAR, l'interférométrie SAR et les profils topographiques (e.g. par altimétrie LASER) (Metternicht et al., 2005).

Mais aucun travail de caractérisation des mouvements de terrain par des traitements manuels ou automatiques d'images optiques, que ce soit des images à moyenne ou à très haute résolution, n'a encore été réalisé.

1.1.2.3. Suivi des déformations

Le **suivi d'un mouvement de terrain** peut se définir comme la comparaison des conditions tels que l'extension surfacique, la vitesse de déplacement, la topographie de surface ou l'humidité à différentes périodes pour caractériser l'activité d'un mouvement de terrain (Mantovani et al., 1996).

La technique classique de détection des changements morphologiques est la **corrélation d'images** aériennes et/ou satellites multi-temporelles. Elle peut se faire de manière visuelle : Van Westen et Getahun (2003) ont créé des cartes géomorphologiques détaillées multi-temporelles du glissement de Tessina par photo-interprétation de photographies aériennes prises à différentes dates (cf. aussi MATE et LCPC (1999) ; annexe 4). Elle peut aussi se faire en utilisant l'outil informatique de manière non automatisée : Delacourt et al. (2004) ont utilisé la corrélation optique entre des images aériennes et des images satellites (Quickbird) de dates différentes pour créer des cartes à haute résolution spatiale des déplacements du glissement de La Clapière (Mercantour). L'activité d'un glissement peut également être suivie et cartographiée par **détection automatique des changements** : les pixels ayant changé de caractéristiques entre deux images optiques de deux dates différentes peuvent être classifiés automatiquement (cf. Hervas et al. (2003)).

A présent, les techniques de télédétection **radar** s'avèrent être le moyen le plus adapté au suivi des mouvements de terrain. Elles permettent une grande précision de suivi (de l'ordre du cm) à une résolution temporelle élevée. L'interférométrie SAR (InSAR), satellite ou terrestre, est la technique qui a été la plus étudiée durant la dernière décennie pour le suivi de la déformation des versants (Metternicht et al., 2005). Squarzonni et al. (2003) ont testé l'efficacité de l'utilisation des interférogrammes SAR pour suivre l'évolution spatiale et temporelle du glissement-coulée de La Valette (vallée de Barcelonnette, Alpes-de-Haute-Provence). Ils concluent que, malgré certaines limitations, l'interférométrie SAR est une technique potentiellement utile pour enregistrer les déplacements de mouvements de terrain ayant une vitesse de déplacement de quelques centimètres par jour. Dans le cadre de son programme SLAM, l'ESA a testé une méthode utilisant les 'permanent

squatterers', points de repères permanents installés sur un glissement de terrain pour permettre le suivi en continu de celui-ci à partir de mesures SAR (cf. Farina et al., 2006). Pour finir, un autre exemple de l'utilisation des données radar pour le suivi des glissements est celui de la création de **cartes multi-temporelles de déformations de surface** d'un grand glissement en utilisant un radar SAR linéaire (LISA, pour Linear SAR) (cf. Tarchi et al.).

Par rapport aux différents types d'application de la télédétection à l'étude des mouvements de terrain présentés dans ce paragraphe 1.1.2., notre travail se situe plus particulièrement dans le domaine de la localisation et de l'inventaire des mouvements de terrain par des méthodes semi-automatiques à partir d'images THR optiques. La spécificité de notre approche, par rapport aux trois exemples de méthodes d'identification semi-automatique présentés dans le paragraphe 1.1.1.2., est que nous cherchons à :

- (1) identifier des **glissements de terrain**, et non pas des unités géomorphologiques,
- (2) utiliser des **données externes vecteurs** combinées à des **orthophotographies** pour le calage de la méthode, sans utiliser de données de relief (i.e. données radar ou MNT),
- (3) appliquer la méthode à **différents types d'images**.

Au vu de ces considérations, nous allons maintenant présenter les objectifs de cette étude plus en détails.

1.2. Présentation de l'objet d'étude et des objectifs de travail

Parmi les différents types de mouvements de terrain existants (cf. annexe 5), nous avons choisi d'analyser plus particulièrement les mouvements de type **glissements** car ils constituent les mouvements de terrain les plus fréquents sur notre zone d'étude.

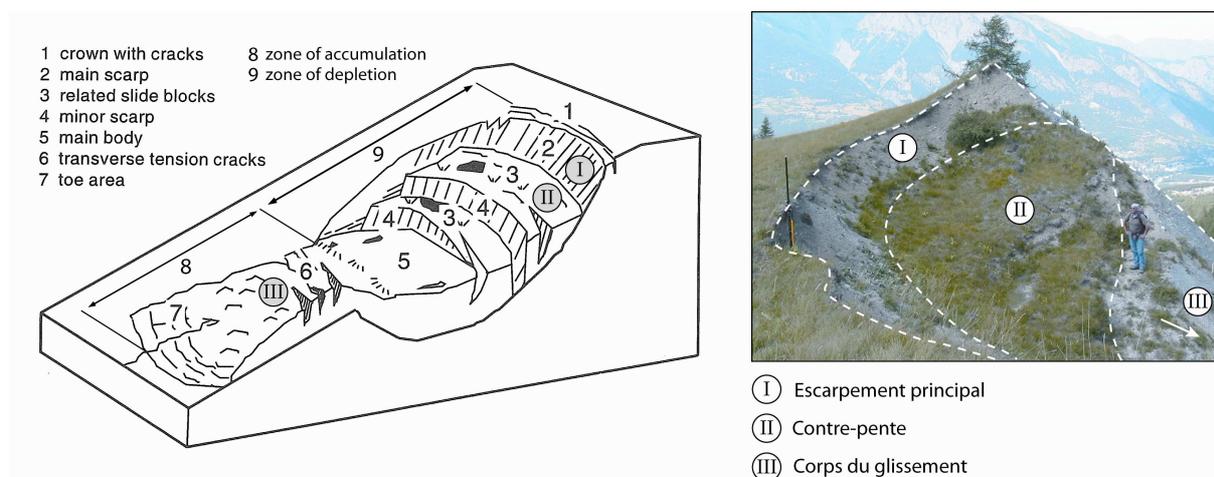


Figure 1.6. : Bloc-diagramme et photographie d'un glissement de terrain avec présentation des principales entités géomorphologiques (1. couronne avec fissures de régressions, 2. escarpement principal, 3. blocs basculés, 4. escarpement mineur, 5. corps principal, 6. fissures de tension transversales, 7. pied, 8. zone d'accumulation, 9. zone d'ablation) (complété de Dikau et al., 1996 ; modifié de Thiery, 2007).

Un glissement de terrain est constitué de deux entités principales : une zone d'ablation et une zone d'accumulation (cf. figure 1.6.). Chacune de ces entités est caractérisée par des 'indices' géomorphologiques particuliers. **La zone d'ablation** est la zone de départ du matériau. Elle comprend la couronne (limite amont du glissement), l'escarpement principal, qui correspond à la zone mise à nue par le déplacement de matériau (haut de la surface de rupture), les escarpements secondaires et le matériau. **La zone d'accumulation** est la zone de dépôt du matériau déplacé. Elle démarre à la fin de la surface de rupture et se fini par le pied du glissement, lui-même délimité à l'aval par un bourrelet terminal. La zone d'accumulation est souvent bosselée et marquée à l'amont par des fissures de tension latérales. Son profile en long est convexe.

Ainsi, les **indices morphologiques** signalant la présence de glissements de terrain sont nombreux. Comme nous l'avons vu plus haut (cf. § 1.1.1.2.), certains de ces indices peuvent être repérés visuellement à partir de photographies aériennes et confirmés par des prospections de terrain. Cependant, les méthodes de repérage des mouvements de terrain utilisées jusqu'à présent restent très subjectives et fastidieuses. De plus, toutes les ressources contenues dans les images aériennes et satellites et toutes les possibilités offertes par les nouvelles techniques de traitement d'images sont loin d'être exploitées.

Pour cette recherche, nous avons donc formulé la problématique suivante : est-il possible de mettre en place une **méthode semi-automatique d'inventaire et de caractérisation des glissements de terrain** à partir d'images aériennes et/ou satellites en utilisant les ressources proposées par une analyse de type 'orientée objet' ?

L'objectif général du stage est donc la mise en place et le test d'une méthodologie semi-automatique permettant, à terme, d'inventorier et de caractériser certains types de glissements de terrain à partir d'une ou de plusieurs données image (aérienne ou satellite).

Les objectifs principaux sont :

- (1) d'inventorier et de caractériser les **indices** observables sur des images aériennes et satellites qui permettent d'identifier et de caractériser les glissements de terrain,
- (2) d'associer ces indices qualitatifs à des **descripteurs quantitatifs** utilisés en traitement d'image,
- (3) de définir une base de règles pour l'**identification automatique** des glissements de terrain.

Deux autres objectifs de la méthode sont qu'elle puisse être appliquée :

- (4) à deux échelles spatiales différentes :
 - à une **échelle régionale** (e.g. inventaire des glissements pour un versant) afin d'identifier les glissements de terrain de taille moyenne et spatialement très fréquents,
 - à une **échelle locale**, celle de grands glissements de terrain (dont la surface est supérieure à 100000 m²) comme les glissements-coulées de Poche, la Valette et Super-Sauze, afin de les caractériser,
- (5) à **différents produits images** de caractéristiques **spectrales** (noir & blanc, infrarouge couleur, couleur naturelle), **spatiales** (métrique et inframétrique) et **temporelles** (différentes dates : 1974, 2000, 2004) différentes.

Le **site d'application** choisi pour la mise en place et le test de la méthode est le bassin de Barcelonnette. Le grand nombre et la variété des glissements qui y sont présents et le nombre de données déjà disponibles concernant ceux-ci expliquent ce choix.

1.3. Présentation du site d'étude

1.3.1. Contexte géographique, géologique, géomorphologique et hydrologique

Le bassin de Barcelonnette est situé dans les Alpes du Sud et limité par les massifs des Ecrins et du Queyras au nord-ouest et au nord-est, et par les massifs de l'Argentera et du Mercantour au Sud (cf. annexe 6). La vallée de Barcelonnette, drainée d'Est en Ouest par la rivière Ubaye, s'étend sur 22 km de long et mesure de 8 à 15 km de large. L'altitude moyenne de l'Ubaye y est de 1130 m en moyenne et les lignes de crêtes y avoisinent les 3000 m d'altitude. Les deux versants de la vallée y sont drainés par de nombreux torrents.

Une des grandes caractéristiques de la vallée est d'être une **fenêtre géologique** dégagée par l'érosion différentielle et mettant à nu les terrains autochtones sédimentaires (cf. figure 1.7.). Ces terrains sont principalement composés des '**Terres noires**' du **Callovo-Oxfordien** épaisses de 300m. Ces formations de marnes noires sont caractérisées par leurs structures tendres et feuilletées qui font d'elles des formations meubles, mal consolidées, friables, relativement imperméables et sensibles au ruissellement concentré et au ravinement (Thiery, 2007). Elles sont aussi caractérisées par leur susceptibilité aux mouvements de terrain. On les retrouve surtout en dessous de 1800 m sur des pentes de 20-25° (Etienne, 2007) où leur susceptibilité au ruissellement concentré se manifeste localement par un paysage en 'badlands'. Ces marnes noires du Callovo-Oxfordien sont en majorité recouvertes par des dépôts quaternaires d'épaisseur variable (moraines, colluvions, éboulis) et sont surmontées au dessus de 1800-2000 m par des formations résistantes de **flyschs** (formation allochtone) formant des pentes fortes (supérieures à 45°).

D'un point de vue morphologique, la vallée de Barcelonnette présente une forte **dissymétrie** de son profil en large avec un **versant adret** (rive droite de l'Ubaye) aux pentes fortes (30° en moyenne) et un **versant ubac** (rive gauche de l'Ubaye) aux pentes plus douces (25° en moyenne). On remarque aussi une différence de morphologie des vallées torrentielles : les torrents du versant ubac présentent des vallées peu encaissées aux pentes régulières alors que les torrents du versant adret y ont entaillé des vallées profondes et étroites (Thiery, 2007). On observe une **activité torrentielle** très forte sur le versant adret, avec des cônes de déjection bien développés en fond de vallée. Le versant ubac est, lui, beaucoup plus touché par les phénomènes de type **mouvements de terrain**.

1.3.2. L'aléa mouvement de terrain dans le bassin de Barcelonnette

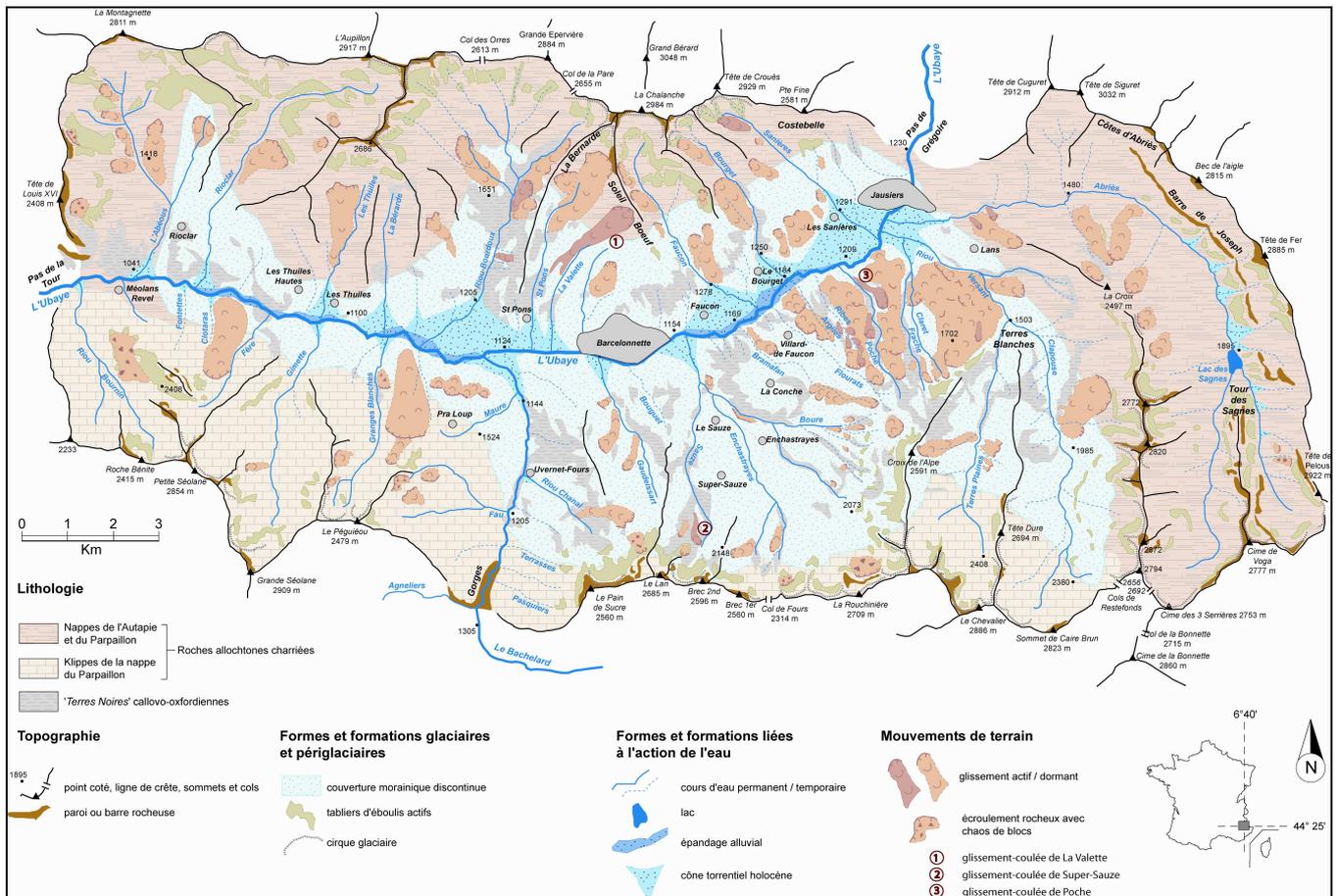


Figure 1.7. : Carte géomorphologique simplifiée du bassin de Barcelonnette montrant les principales zones de localisation des mouvements de versant (complétée de Remaître, 2006).

17 % de la surface du bassin de Barcelonnette est affectée par des mouvements de terrain (d'après la carte géologique au 1/50 000 du BRGM (1974)). On remarque que plus de la moitié de ces instabilités se sont déclenchées dans les 'Terres Noires' du Callovo-Oxfordien. Certains secteurs du bassin sont réputés pour leur forte instabilité et la présence de nombreux mouvements de terrain. C'est le cas de la zone de Bois noir, au sud-est de la ville de Jausiers, ou de la zone du Riou des Ribes, à l'ouest du torrent de Poche, par exemple. Mais la plupart des mouvements du bassin sont stabilisés et/ou dormants (cf. figure 1.7. ; Thiery, 2007). Deux grandes catégories de mouvements peuvent être distingués dans le bassin : les mouvements profonds, qui correspondent aux glissements-coulées actifs ou aux grands mouvements translationnels complexes ou rocheux fossiles qui se déclarent dans les nappes de charriage, les marnes noires ou les couvertures morainiques, et les mouvements superficiels, plus nombreux et localisés sur les interfluvés et le long des berges, affectant les marnes noires et les dépôts morainiques et/ou détritiques (Thiery, 2007).

Le bassin de Barcelonnette est caractérisé par la présence de **trois grands glissements-coulées** : le glissement de La Valette sur le versant adret et les glissements de Super-Sauze et de Poche sur le versant ubac (cf. figure 1.7.). Les glissements de Poche et de Super-Sauze ne présente aucune menace directe mais le scénario d'un barrage partiel de l'Ubaye par le glissement de Poche est envisageable, avec possibilité d'inondation à l'amont et de dommages à l'aval en cas de rupture (Le Mignon et Cojean, 2002). Ces deux grands glissements (120000 et 150000 m²) sont cependant très actifs : vitesse d'avancée de l'ordre de 0,01 m par an pour Poche (Le Mignon et Cojean, 2002), et de 0,01 à 0,4 m par jour pour Super-Sauze (Malet et al., 2005). Le glissement de La Valette (250000 m²) avance en moyenne de 1 à 0,4 cm par jour et menace, lui, une zone d'habitat pavillonnaire et une route départementale (Squarzoni et al., 2003).

Les mouvements de versant présents dans le bassin de Barcelonnette ont été inventoriés à plusieurs reprises de manière subjective, par des méthodes différentes et à des échelles diverses. Les **documents d'inventaire** qui existent pour le bassin de Barcelonnette sont :

- la carte géologique de Barcelonnette au 1/50 000 par le BRGM en 1974,
- la carte des 'mouvements de versant' levée au 1/25 000 par analyse de photographies aériennes par Quintlé en 1995,
- la carte géomorphologique levée au 1/25 000 par analyse de photographies aériennes et observations de terrain par Salomé et Beukenkamp en 1988,
- la carte géomorphologique levée au 1/10 000 par Thiery en 2007.

Le document d'inventaire des mouvements de terrain du bassin de Barcelonnette le plus récent est la carte morphodynamique levée au 1/10 000 par analyse de photographies aériennes et observations de terrain par Thiery (2007) ('carte expert' utilisées comme référence pour ce travail). **Sept types géomorphologiques de mouvements de terrain** y ont été répertoriés (cf. annexe 7) : les écroulements, les glissements banc sur banc, les glissements translationnels rocheux, les glissements complexes et composites, les glissements translationnels (de berge ou d'interfluve), les glissements rotationnels (de berge ou d'interfluve) et la solifluxion. Cette typologie s'est basée sur des critères de forme, d'épaisseur, de type de matériau affecté, et de localisation.

Pour l'ensemble du bassin de Barcelonnette, 562 phénomènes d'instabilités ont été repérés dont **482 mouvements de versant de type 'glissements'** (glissements banc sur banc, glissements translationnels rocheux, glissements complexes et composites, glissements translationnels, glissements rotationnels). La surface totale couverte par ces 482 glissements est de 13,14 km², dont 74,2% sur le versant ubac et 25,2% sur le versant adret.

La taille des glissements répertoriés va de 752 723,4 m² pour le plus grand glissement à 71,9 m² pour le plus petit. La majorité des glissements répertoriés (68,5%) sont de petite taille (< 10 000 m²) (cf. annexe 6). 82% des glissements sont actifs continus et intermittents et se localisent sur des pentes moyennes à fortes (10-40°). Plus de la moitié des glissements sont de type 'translationnels' (61,2% des glissements) et plus du quart sont de type 'rotationnels' (29% des glissements), le restant étant représenté par les glissements banc sur banc (6,4%), les glissements translationnels rocheux (2,3%) et les glissements complexes et composites (1%).

Les différentes analyses réalisées par Thiery (2007) concernant les mouvements de terrain de la vallée de Barcelonnette montrent clairement que **le versant ubac est le plus sensible aux instabilités**. Il cumule 370 des 492 mouvements de terrain répertoriés et 10% de sa surface est affecté par des glissements, pour la plupart actifs (81,6%), intermittents (35,9%) ou permanents (45,7%). Le secteur ubac comporte aussi la plus grande diversité de phénomènes, dont les glissements translationnels superficiels et complexes et les glissements rotationnels superficiels représentent une large majorité (78,8%), avec deux tiers de glissements translationnels.

Nous venons de voir dans quel contexte thématique, méthodologique et géographique se situe ce travail et ses objectifs. Nous allons maintenant présenter et justifier les **choix méthodologiques** qui ont été faits en fonction de l'état de l'art dans le domaine de la télédétection, des objectifs de travail et des caractéristiques du site d'étude présenté dans cette première partie puis nous présenterons la méthodologie détaillée qui a été suivie pour la première étape du travail (étape de photo-interprétation) et les résultats qui en sont ressortis.

Deuxième partie : méthodologie générale et étape de photo-interprétation

2.1. Présentation générale de la démarche méthodologique

2.1.1. Données source

Plusieurs sources de données ont été utilisées pour ce travail, dont la liste est indiquée dans le tableau 2.1.

Type de donnée	Nom	Date	Résolution/ échelle	Secteur géographique
Image	Orthophotographie infrarouge	1974	0,5 m	Vallée
	Orthophotographie couleur	2000	0,5 m	Vallée
	Orthophotographie couleur	2004	0,5 m	Vallée
	Image SPOT 5 noir et blanc	2004	2,5 m	Vallée
	Orthophotographie d'une acquisition LiDaR	2007	0,5 m	Glissement-coulée de La Valette
SIG	Inventaire 'expert' des 370 mouvements de terrain du versant ubac (contours des mouvements sous format SIG avec une délimitation des zones d'ablation et des zones d'accumulation)	2007	1/10000	Versant ubac
	Base de données des caractéristiques morphométriques des mouvements de terrain et de leurs zones d'ablation et d'accumulation pour le versant ubac	2007		Versant ubac
	Carte d'occupation du sol	2000	1/10000	Vallée
	MNT issu de la digitalisation des courbes de niveaux	2007	10 m	Vallée
	MNT LiDaR	2007	0,5 m	Glissement-coulée de La Valette

Tableau 2.1. : Données sources utilisées.

Les trois orthophotographies combinées à l'inventaire 'expert' ont servi de base à l'étape de photo-interprétation. L'orthophotographie de 2004 et l'inventaire expert ont servi de base au calcul des paramètres d'identification automatique. Les orthophotographies de 1974 et 2004 ainsi que l'image satellite SPOT ont été testées pour l'inventaire automatique. Le lèvé LiDar (MNT et orthophotographie couleur) n'a pas été utilisé dans le cadre de ce mémoire ; il pourra être utilisé à l'occasion d'un autre travail reprenant la même méthodologie à l'échelle locale.

La carte distinguant les types d'occupation du sol ainsi que des données dérivées du MNT (i.e. valeurs de pentes, courbures des versants) ont été intégrées à la fin de l'analyse pour restreindre l'identification automatique.

2.1.2. Hypothèses de départ et méthodologie générale

Un **postulat** et deux **hypothèses** de départ ont été établis pour guider les choix méthodologiques :

Postulat : Les indices de reconnaissance sont les mêmes quelle que soit la taille du glissement.

Hypothèse 1 : Les indices de reconnaissance ne sont pas les mêmes suivant les types de glissements. En vertu de cette hypothèse, nous avons mis en place une typologie 'par photo-interprétation' ('pi') des glissements de terrain.

Hypothèse 2 : Les indices de reconnaissance sont différents pour les glissements en entier que pour les zones d'ablation et d'accumulation. Nous avons donc choisi d'analyser trois types d'entités géomorphologiques à l'échelle régionale : les glissements de terrain en eux-mêmes, les zones d'ablation et les zones d'accumulation.

La démarche méthodologique générale est présentée dans la **figure 2.1**.

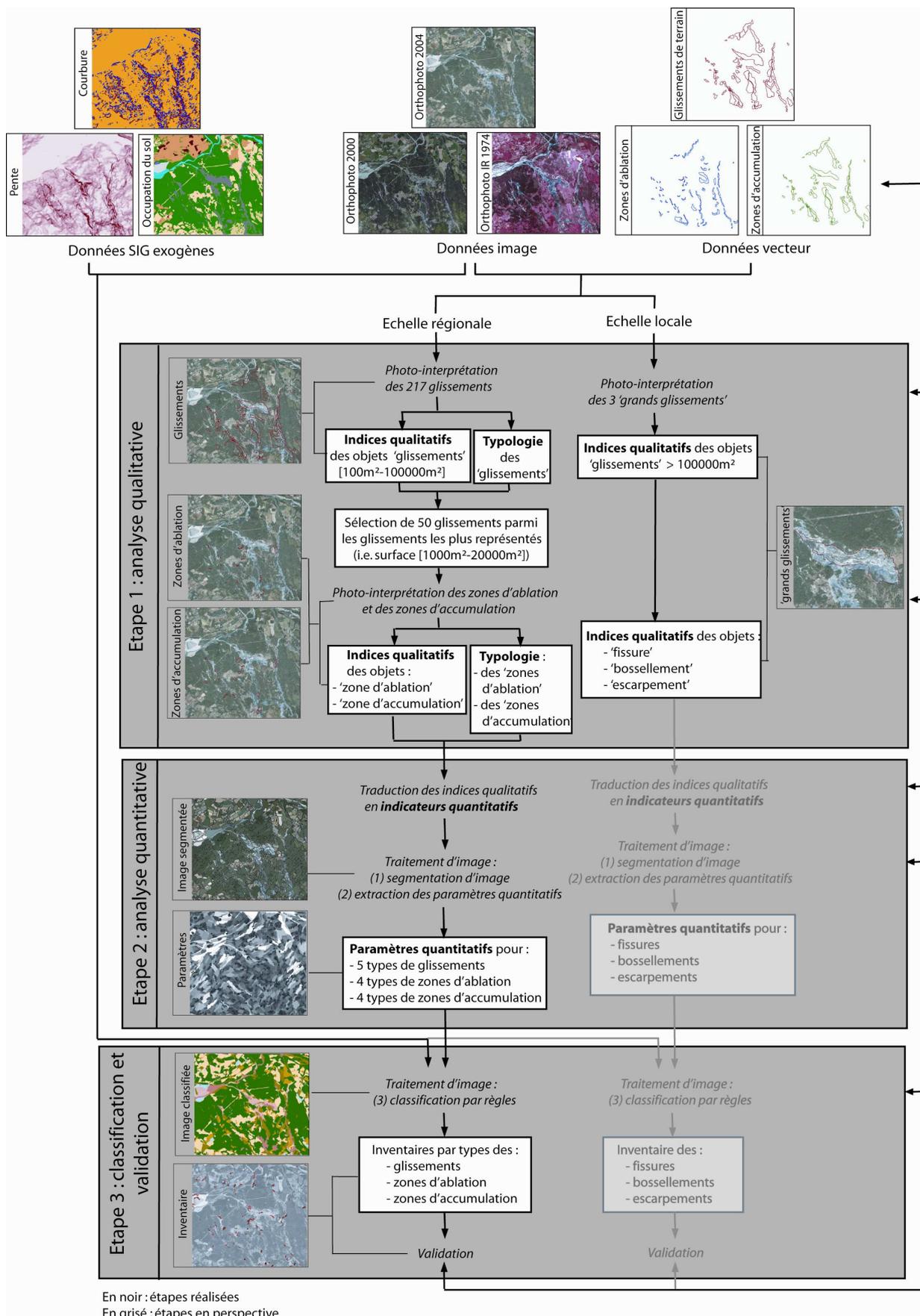


Figure 2.1. : Schéma de présentation de la méthodologie.

- (2) Les mouvements de terrain de type 'écroulements' et 'solifluxions' ont été écartés de l'analyse car les objectifs de départ visaient plus particulièrement les mouvements de type '**glissements**'.
- (3) Seuls les glissements **actifs** ont été pris en compte car ils présentent les signes de déformation les plus nets et sont donc les plus visibles.
- (4) **Les plus petits glissements de terrain** (d'une surface inférieure à 100m²), trop petits pour apparaître clairement sur des images d'une résolution minimale de 0,5m, ont été éliminés de l'analyse.

Ainsi, des 562 mouvements de terrain inventoriés par la carte 'expert' sur la totalité du bassin de Barcelonnnette (Thiery, 2007), **217 glissements de terrain** du versant ubac ont été retenus pour cette étude (cf. figure 2.3.).

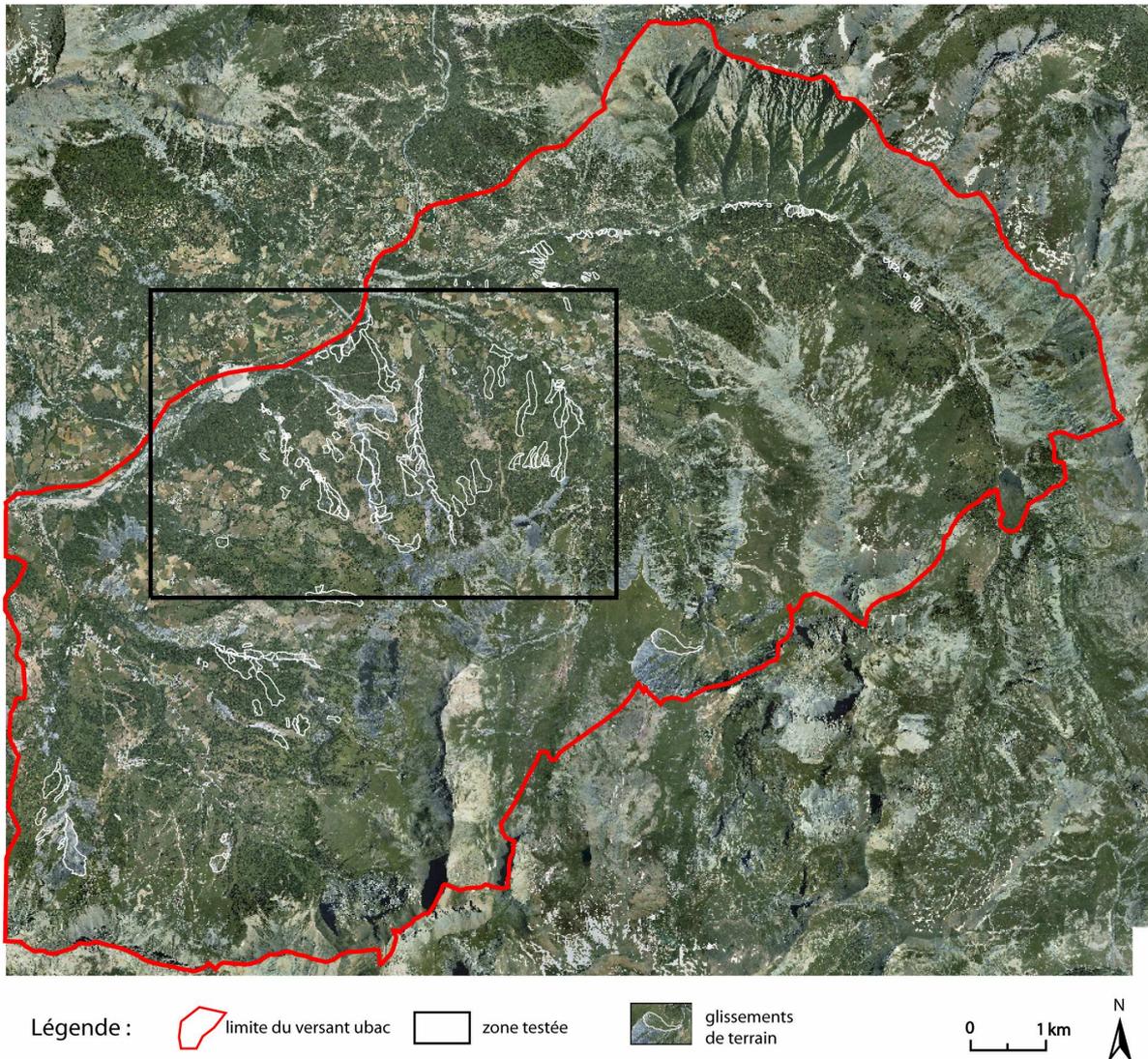


Figure 2.3. : Localisation 'experte' des glissements de terrain visualisés sur l'orthophotographie de 2004.

A partir de cette population de 217 glissements, des sélections ont été réalisées au cours de l'étape 1 pour obtenir un **échantillon de calage** et un **échantillon de validation**. Au vu du postulat de départ (cf. § 2.1.2.), une première sélection a été réalisée en se fondant sur les statistiques de surface des glissements. La figure 2.4. présente la distribution des 217 glissements en fonction de leur surface. On remarque que 70% des glissements ont une surface comprise entre 1000 et 20000m². Une classe < 1000 m² a été définie car la photo-interprétation des 217 glissements a révélé que les glissements de cette taille étaient trop petits pour être caractérisés sur des images d'une résolution de 0,5 m.

Pour l'analyse à l'échelle régionale, nous avons donc considéré les 156 glissements ayant une surface comprise entre 1000 et 20000 m² comme glissements les plus représentés sur le versant ubac et avons sélectionné parmi ceux-ci 50 glissements considérés comme représentatifs (au cours de l'étape 1, cf. § 2.2.3.). Les zones d'ablation et les zones d'accumulation n'ont été analysées que pour ces 50 glissements représentatifs. Cet échantillon a aussi été utilisé pour la phase d'extraction des paramètres lors de l'étape 2.

Pour l'échelle locale, nous avons choisi d'analyser lors de l'étape 1 les 3 plus grands glissements (de surface > 100000 m²) du bassin de Barcelonnette, les glissements-coulées de Super-Sauze et de Poche sur le versant ubac et le glissement-coulée de La Valette sur le versant Adret.

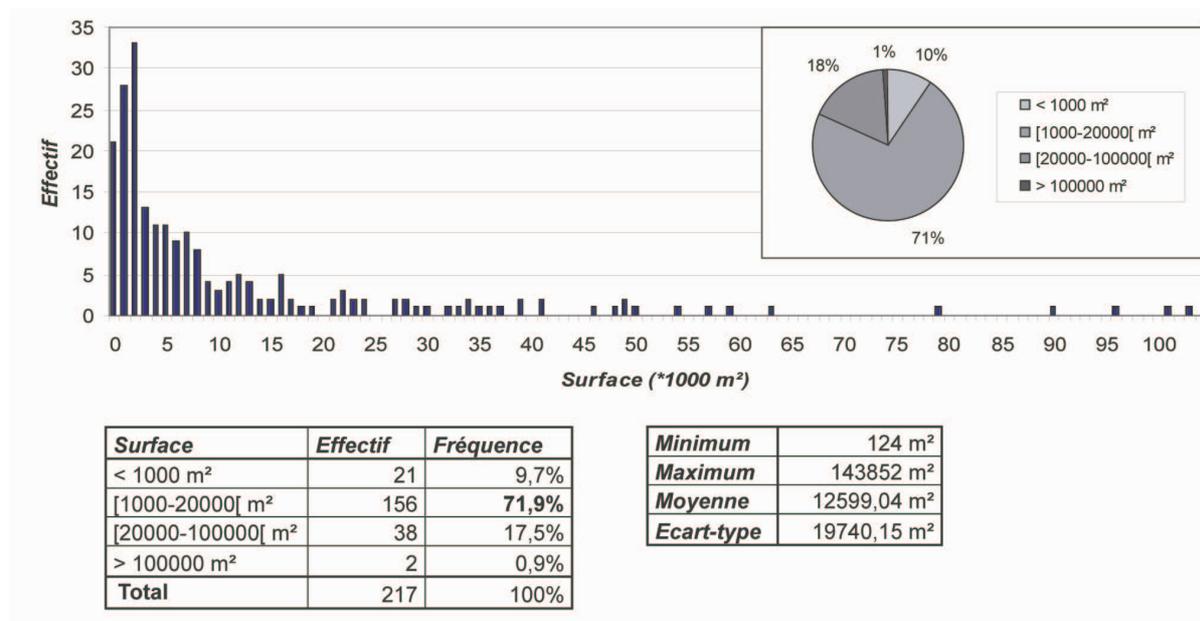


Figure 2.4. : Distribution statistique des 217 glissements de terrain en fonction de leur surface.

2.2. Méthodologie détaillée de l'étape de photo-interprétation (étape 1)

L'étape 1 a consisté à déterminer des **indices qualitatifs** de reconnaissance et de caractérisation des glissements de terrain à partir (1) des **indices descriptifs** des mouvements de terrain recensés dans la littérature scientifique et (2) de la **photo-interprétation** des glissements de terrain sur les orthophotographies couleur IGN de 2004 et 2000 et infrarouge de 1974. A l'échelle régionale (au vue de l'hypothèse n²) trois types d'objets ont été analysés : les '**glissements de terrain**' dans leur totalité, les '**zones d'ablation**' et les '**zones d'accumulation**'.

Cette étape de photo-interprétation et de recensement d'indices a donné lieu à la mise en place :

- (1) de **4 grilles de photo-interprétation** permettant de décrire, à l'échelle régionale, soit 'l'objet' 'glissement de terrain' dans son ensemble, soit 'l'objet' 'zone d'ablation', soit 'l'objet' 'zone d'accumulation', et à l'échelle locale, les 'grands glissements' (> 100000m²),
- (2) de **3 typologies par photo-interprétation**, une pour chaque objet d'étude à l'échelle régionale, permettant de classer les glissements de terrain selon leur aspect visuel sur les orthophotographies (typologies 'pi').

2.2.1. Recensement d'indices de glissements de terrain dans la littérature

2.2.1.1. A l'échelle régionale

Pour définir des indices descriptifs des glissements de terrain, une synthèse des travaux de Molenaar (2005), Thiery (2007), Dikau et al. (1996), Flageollet (1988), MATE, LCPC (1999), Iwahashi et al. (2000), Chang et Liu (2004), Kalbermatten (2004), McKean et Roering (2004), Argialas et Tzotsos (2006), Van Asselen et Seijmonsbergen (2006) et Lehre (2003) a été réalisée. Les principaux indicateurs recensés sont présentés dans le tableau 2.2.

	Indices	Indicateurs	Supports	Référence
Site	Zone de convexité-concavité	Courbure en profil	MNT	Kalbermatten, 2004 Iwahashi et al., 2000
	Pente (> 10°; < 45°)	Pente	MNT	Thiery, 2007 MATE, LCPC, 1999
	Occupation du sol (pas de cultures)	Occupation du sol	SIG	MATE, LCPC, 1999
	Sol/roche nu(e)	Réponse spectrale	image	Dikau et al., 1996 Lehre, 2003
	Proximité à un cours d'eau/une route	Proximité à	SIG	Thiery, 2007
Objet	Escarpement de tête Niche d'arrachement Escarpements mineurs	Courbure en plan Courbure en profil	MNT	Kalbermatten, 2004 Lehre, 2003 MATE, LCPC, 1999
		Forme semi-circulaire	MNT + image	
		Réponse spectrale (couleur marnes noires, sol nu)	image	
	Contre-pente (corps de glissement rotationnel)	Profil, courbure	MNT	Dikau et al., 1996 Thiery, 2007
	Dépressions	Courbure	MNT	Dikau et al., 1996
	Rugosité (perturbation de la surface, irrégularité du relief) Bossellement	Texture	image	McKean et Roering, 2004 MATE, LCPC, 1999
		Discontinuités, variabilité de pente et d'aspect (texture)	MNT	
	Lobes, bourrelets		Image MNT	Dikau et al., 1996 MATE, LCPC, 1999
	Fissures : - sur le glissement - de régression Orientation des fissures	Réponse spectrale (couleur marnes noires, sol nu)	image	Dikau et al., 1996 Flageollet, 1988 Thiery, 2007 MATE, LCPC, 1999
		Discontinuités	MNT	
	Végétation : - type (zones humides) - dégradation - densité - différence avec végétation environnante	Réponse spectrale (type + densité)	Image	Dikau et al., 1996 Thiery, 2007 Lehre, 2003 MATE, LCPC, 1999
		Texture (densité)		
	Humidité (présence de sources, de sagnes ou de flaques)	Réponse spectrale	Image	Dikau et al., 1996 Thiery, 2007 MATE, LCPC, 1999
	Tracé des cours d'eau (déviation)	Forme	MNT + image	Dikau et al., 1996 Thiery, 2007 Lehre, 2003 MATE, LCPC, 1999
Forme (en arc de cercle à l'amont, étalée à l'aval, allongée dans le sens de la pente)	Forme	image	Mantovani et al. 1996 Chang et Liu, 2004	
Situation : - berge - interfluve	Proximité à	SIG	Thiery, 2007	

Tableau 2.2. : Indices de repérage des glissements de terrain recensés dans la littérature, indicateurs pouvant permettre de les repérer par télédétection, types de supports images appropriés et références bibliographiques.

Les indices de glissements de terrain recensés sont de deux types :

- soit ils indiquent un **site potentiellement occupé par un glissement de terrain** (e.g. champs non cultivé, versant à courbure convexo-concave, versant à pente comprise entre 15 et 45°),
- soit ils indiquent directement **“l'objet” glissement de terrain** (e.g. fissures, bossellement).

Les principaux indices de repérage des glissements de terrain actifs sont :

1. **L'escarpement de tête**, qui représente la zone d'arrachement du matériau déplacé. Pour un glissement de terrain actif, la forme est fraîche (Thiery, 2007) et laisse apparaître le sol/la roche dénudée de la surface de glissement. Cette surface de glissement apparaît lissée et striée (Dikau et al., 1996). Les rebords de l'escarpement sont nets et ouverts (Dikau et al., 1996). L'escarpement est souvent marqué à l'amont par des fissures de régressions et peut être dégradé par des fissures perpendiculaires. Des **escarpements secondaires** peuvent être présents à l'aval de l'escarpement de tête, à l'intérieur du matériau déplacé.
2. L'escarpement principal ou les escarpements secondaires, qui peuvent être suivi d'une **contre-pente**, surtout dans le cas de glissements de type rotationnel (Thiery, 2007, Dikau et al., 1996), ou d'une **zone de dépression**.
3. **Le corps des glissements** de terrain, dont la surface peut être **irrégulière** (forte rugosité) du fait de la déformation du sol. Le relief est chaotique (MATE, LCPC, 1999) et peut être perturbé par la présence de **nombreux blocs** provenant de la désagrégation du matériau déplacé (Dikau et al., 1996). La surface est aussi marquée par du **bossellement**, principalement à l'aval, où le matériau s'accumule. La texture du corps du glissement apparaît de ce fait plutôt **hétérogène**.
4. Les **fissures**, qui sont un indice de la présence d'un glissement de terrain. Elles indiquent qu'il y a eu mouvement/déformation. Elles peuvent être de deux types : **fissures de traction** ou **fissures de compression** (cf. annexe 8). Le type de fissure observé dépend de la partie du glissement : les fissures de traction sont localisées surtout dans la partie supérieure du glissement où le matériau emmené vers l'aval provoque une force de traction étirant le matériau à l'amont, les fissures de compression (crevasses fermées) se forment au pied du glissement par accumulation du matériau à l'aval. L'orientation des fissures indique quelle partie du glissement elles occupent (Dikau et al., 1996). Les fissures **longitudinales** sont localisées préférentiellement sur les bords du glissement contrairement aux fissures **transversales** qui marquent la zone d'arrachement et la zone de transition entre la zone d'ablation et la zone d'accumulation (Flageollet, 1988). Des **fissures de régression** témoignant de la traction infligée par le déplacement de matériau sont observables à l'arrière du glissement (Dikau et al., 1996).
5. Les glissements actifs peuvent être trop actifs pour permettre le développement de la végétation. De ce fait, **la végétation y est souvent dégradée**, ou peu dense. On peut y observer des 'forêts ivres' avec des arbres penchés dans tous les sens (Thiery, 2007) mais plutôt allongés vers l'amont sur la partie haute du glissement (typique des contre-pente des glissements rotationnels) et vers l'aval sur le pied du glissement (Dikau et al., 1996). La végétation sur les glissements peut aussi être de nature différente de la végétation environnante (e.g. de type hydrophile (roseaux) ou zone à feuillus) et ainsi délimiter la zone de glissement. Une limite de végétation peut également adopter la forme des caractères du glissement (comme les fissures) du fait de la modification des conditions (lumière et/ou nutriments) à cet endroit (Molenaar, 2005).
6. La présence de **sources**, de **sagnes** (zones humides) (Thiery, 2007) ou de **flaques** (Dikau et al., 1996) peut signaler un glissement de terrain. En effet, d'une part, les processus liés à l'eau sont des facteurs déclenchant des glissements de terrain (Flageollet, 1999) et l'**humidité** signale donc les zones à forte susceptibilité de glissements, d'autre part, les dépressions et contre-pentes modelant le corps du glissement favorisent la formation de flaques.
7. Un glissement peut être à l'origine d'une **perturbation du réseau de drainage** (i.e. modification du tracé d'un cours d'eau) ou d'une **route** (Molenaar, 2005 ; Thiery, 2007).
8. **La forme** d'un élément du paysage peut signaler un glissement de terrain : forme géométrique (i.e. en arc de cercle à l'amont, étalée à l'aval), rapport longueur/largeur et orientation (i.e. les glissements sont typiquement allongés dans le sens de la pente) (Mantovani et al. 1996 ; Chang and Liu, 2004).

Les sites potentiellement occupés par les glissements de terrain peuvent avoir quatre caractéristiques :

1. une **pente** forte ($> 10^\circ$) pour permettre le déclenchement du glissement, mais pas trop ($< 45^\circ$) pour ne pas passer à des processus de type écroulements rocheux (MATE, LCPC, 1999),

2. un **profil en long** de type convexo-concave correspondant à la succession zone d'ablation-zone d'accumulation (Molenaar, 2005),
3. un **type d'occupation du sol** autre que urbanisé ou cultivé car la présence d'un glissement de terrain dissuade la mise en place de ce type d'occupation (MATE, LCPC, 1999),
4. une **proximité à un cours d'eau** (berges) ou une route (talus) car ces éléments sont des facteurs favorisant le déclenchement d'un glissement (Thiery, 2007).

Le même type d'opération de recensement a été réalisé pour préciser les indices descriptifs des zones d'ablation (cf. annexe 9) et des zones d'accumulation (cf. annexe 10).

2.2.1.2. A l'échelle locale

A l'échelle des '**grands glissements**', les indices ont été recensés dans la thèse et les articles suivants, traitant de la caractérisation des **trois glissements-coulées de la vallée de Barcelonnette** : Malet (2003), Le Mignon et Cojean (2002) et Grandjean et al. (2006). Un exemple de description du glissement de Poche est présenté dans l'annexe 11.

Type d'éléments	Éléments de description
Escarpe principal	Couronne
	Surface de rupture
	Glissement banc sur banc
	Cône torrentiel
	Tablier d'éboulis
Éléments du relief	Escarpe secondaires : < 5m > 5m
	Surfaces de rupture secondaires
	Replats
	Glissements
	Glissements banc sur banc
	Crêtes, échines <i>in-situ</i> , arêtes : - nues (saillantes ou émoussées) - recouvertes
	Ravines : - ravineaux (' <i>rills</i> ') - ravines intra-coulée (' <i>main intra-flowing gullies</i> ') - ravines mixtes coulée/ <i>in-situ</i>
	'Bad-lands'
	Bourrelet terminal
	Levées latérales
	Dégradation de la surface
Zone de cisaillement, stries, griffures	
Bossellement lié à la compression	
Blocs de roche disloqués, blocs morainiques , panneaux de matériaux remaniés	
Formations de surface	Dépôts de lave torrentielle
	Marnes <i>in-situ</i>
	Moraines de couverture
	Marnes blanchies par la cristallisation
Couvert végétal	Couvert herbacé continu/discontinu
	Arbres couchés
	Végétation hygrophile
Hydrologie	Écoulement superficiel
	Torrents
	Sources
	Sagnes

Tableau 2.3. : Indices de caractérisation des '**grands glissements**' recensés dans la littérature.

Six grandes catégories d'éléments permettant de caractériser les grands glissements ont été recensées (cf. tableau 2.3.) :

1. Des indices de caractérisation de l'**escarpement principal** comme l'état de dégradation de la couronne, la présence de tabliers d'éboulis ou la texture de la surface de rupture.
2. Des indices liés aux éléments du **relief** : la présence d'escarpements secondaires, de glissements secondaires, la dégradation des crêtes *in-situ*, la présence et la nature des ravines, la présence de relief de 'bad lands', la dégradation des levées latérales ou du bourrelet terminal.
3. Des indices de **dégradation de la surface** comme la densité et la nature des fissures, la présence de blocs rocheux, la présence de zones de bossellement ou de cisaillement.
4. La nature et le taux de présence des **formations/dépôts sédimentaires de surfaces** telles que les marnes, les moraines ou les dépôts de laves torrentielles.
5. La nature et la densité du **couvert végétal** (e.g. végétation hygrophile, couvert herbacé discontinu, arbres penchés).
6. Le **réseau de drainage** : présence d'écoulements superficiels, de torrents, de sources ou de sagnes.

Nous pouvons remarquer que ces éléments de description correspondent globalement aux éléments recensés à l'échelle régionale. Ils restent cependant beaucoup plus précis et peuvent donc servir à une caractérisation des glissements de terrain. Il est ainsi possible de décrire l'état de dégradation d'un glissement à partir des différents indices. Ils peuvent aussi être utile à la détermination du niveau d'activité d'un glissement (cf. Thiery, 2007).

2.2.2. Photo-interprétation des glissements de terrain

2.2.2.1. A l'échelle régionale

Sur la base des indices recensés, nous avons déterminé les indices repérables par photo-interprétation lors d'une première observation des 217 glissements de terrain sur les orthophotographies de 1974, 2000 et 2004. A partir de la sélection des indices visibles, une **grille de photo-interprétation des glissements de terrain** a été définie (cf. § 2.3.1.). Cette grille a été testée et validée avec la photo-interprétation au 1/2500 des 217 glissements sur les orthophotographies de 1974, 2000 et 2004. Celle-ci a donné lieu à la création d'une table attributaire du *shapefile* 'expert' contenant les valeurs de chaque indice pour chaque glissement de terrain (cf. figure 2.5.).

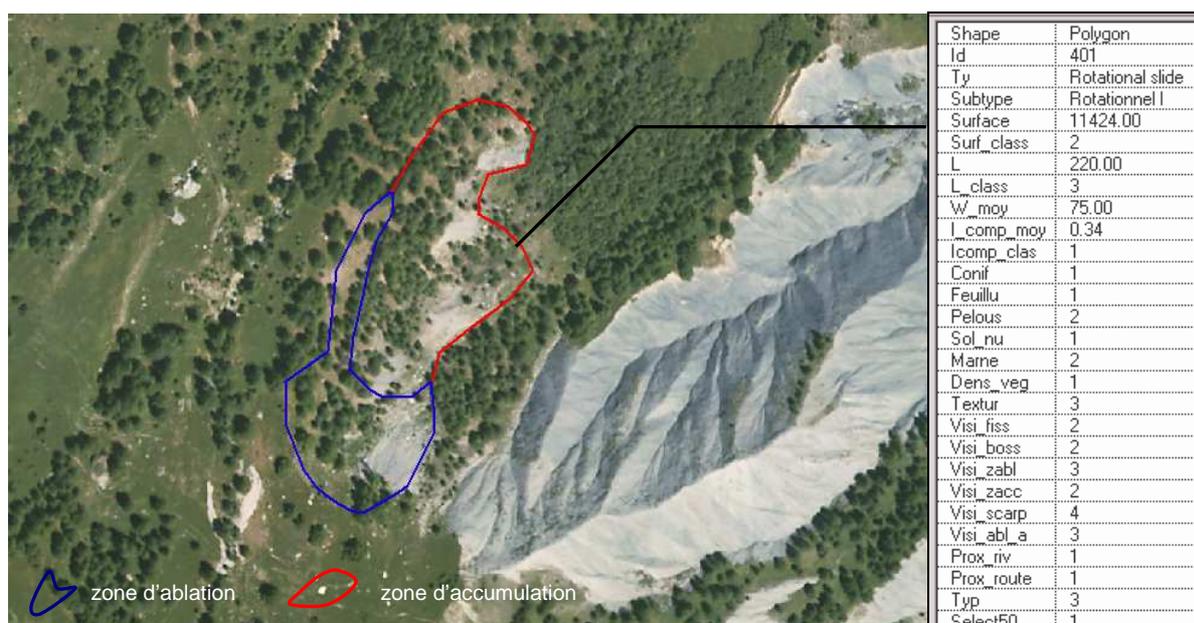


Figure 2.5. : Exemple du *shapefile* 'expert' et de la table attributaire d'un glissement de terrain sur l'orthophotographie de 2004 (les codes de la table sont explicités dans la grille de photo-interprétation, cf. § 2.3.1.1).

Des **observations de terrain** ont été réalisées pour comparer les indices repérés sur les orthophotographies à leur aspect sur le terrain et pour confirmer l'identité de certains indices repérés sur les orthophotographies (cf. figure 2.6.).

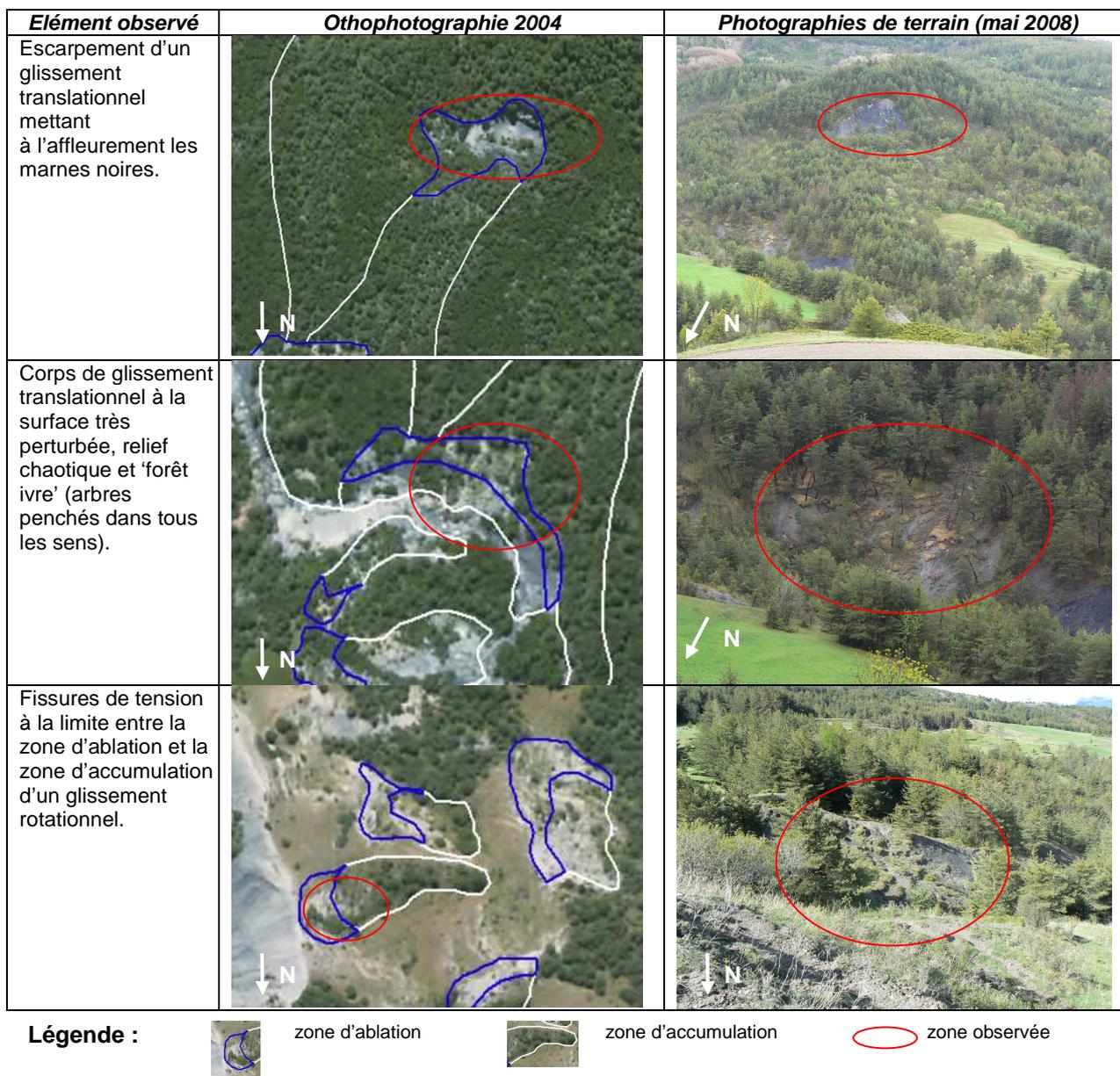


Figure 2.6. : Comparaison d'éléments descripteurs de glissements de terrain observés sur l'orthophotographie de 2004 et observés sur le terrain.

La photo-interprétation des 217 glissements a par ailleurs servi à la recherche d'une **typologie par photo-interprétation** (typologie 'pi') des glissements de terrain. La démarche a consisté à dégager des ensembles de glissements de terrain ayant les mêmes caractéristiques visuelles sur les orthophotographies observées.

Des statistiques concernant la distribution des types 'pi' et des types géomorphologiques ont été utilisées pour guider la **sélection des 50 glissements 'représentatifs'** de la population (i.e. représentatifs des glissements les plus fréquents, c'est à dire ayant une surface comprise entre 1000 et 20000 m²). La sélection a été faite en sorte que chaque type 'pi' soit représenté selon les mêmes proportions dans l'échantillon représentatif que dans la population totale.

A la suite de cette sélection, les zones d'ablation et les zones d'accumulation des 50 glissements 'représentatifs' ont également été observées pour mettre en place deux grilles de photo-interprétation et deux tables attributaires.

2.2.2.2. A l'échelle locale

La mise en place de la grille de photo-interprétation à l'échelle locale s'est fondée sur l'observation des trois 'grands glissements' de Super-Sauze, Poche et La Valette au 1/1500 sur les orthophotographies de 1974, 2000 et 2004. Elle a donné lieu à la création de trois tables attributaires : une pour la **zone d'ablation**, une pour le **corps** et une pour le **pied du glissement** (cf. figure 2.7.).



Figure 2.7. : Exemple du shapefile 'expert' et de la table attributaire d'un grand glissement (glissement-coulée de Poche) vu sur l'orthophotographie de 2004 (les codes de la table sont explicités dans la grille de photo-interprétation, cf. § 2.3.1.2).

2.3. Résultats de l'étape de photo-interprétation

2.3.1. Indices de glissements de terrain retenus et grilles de photo-interprétation

2.3.1.1. A l'échelle régionale

Deux types d'indices ont été distingués sur chaque grille : des indices quantitatifs, récupérés de la base de donnée des caractéristiques morphométriques des glissements et de leurs zones d'ablation et d'accumulation (i.e. surface, longueur, largeur, indice de compacité), et des indices qualitatifs.

Les **indices qualitatifs** retenus peuvent être répertoriés en plusieurs catégories :

- des indices **d'occupation du sol** : pourcentage de couverture de la surface du glissement par un type d'occupation du sol (i.e. conifères, feuillus, pelouse, sol nu ou marnes noires) et densité de la végétation,
- des indices descriptifs de **l'état de dégradation de la surface** (i.e. présence de fissures, bossellement) et de **texture** (homogénéité/hétérogénéité de la réponse spectrale de la surface),
- des indices de **visibilité de composantes** des glissements de terrain (i.e. zone d'ablation, zone d'accumulation, escarpement de tête, escarpement mineur, bourrelets) ou des limites avec l'environnement ou entre composantes (i.e. limite zone d'ablation/zone d'accumulation, limite amont de la zone d'ablation, limite avale de la zone d'accumulation),
- des indices de **proximité** (i.e. proximité à un cours d'eau, proximité à une route).

Les indices les plus facilement identifiables visuellement ont été les indices **d'occupation du sol**. L'orthophotographie IR a permis de distinguer les conifères des feuillus. Certains glissements du versant ubac ont pu être clairement identifiés car correspondaient à une zone de feuillus apparaissant au milieu d'une forêt de conifères. Les glissements les plus clairement distinguables sont caractérisés par la présence d'une zone de sol/roche nu(e) au milieu d'une zone de végétation. Mais de nombreux glissements de terrain (60 sur 217) sont entièrement couverts par la végétation. La typologie 'pi' détaille les différents types d'occupation du sol des glissements observés (cf. § 2.3.2.).

L'état de perturbation de surface a pu être assez bien caractérisé car signalé par une texture hétérogène de l'image et par une occupation du sol mélangeant sol/roche nu(e) et végétation. Quelques zones de **bossellement** ont pu être repérées sur les zones d'accumulation, avec la présence de zones de stries parallèles, mais rarement (21 fois sur 217 observations) car trop petites par rapport à la résolution de l'image.

Les **lobes et bourrelets** sont difficilement décelables sur les glissements de taille < 100000 m². De même, les **fissures** ont rarement été observées (42 fois sur 217 observations) car elles ne sont visibles qu'à partir de 1 m d'épaisseur.

Il est à noter que certains indices recensés dans la littérature (cf. tableau 2.1.) n'ont pas été retenus pour la photo-interprétation :

- les indices de type **contre-pente** ou **dépressions** ont été écartés de l'étude car ne peuvent être repérés que sur de l'imagerie donnant des informations sur le relief (i.e. images radar, MNT). Or notre étude s'appuie sur de l'imagerie optique. De ce fait, la rugosité n'a pu être déterminée que par des observations de texture.
- les indices liés à l'**humidité** ont également été mis de côté car le type d'image disponible n'était pas approprié (i.e. une seule orthophotographie IR, pas d'image à bande IR thermique).
- l'indice de **déformation du tracé des cours d'eau** n'a pas été pris en compte car trop fastidieux à repérer et peu fiable.

La photo-interprétation des 217 glissements a permis de remarquer une bonne **différenciation entre la zone d'ablation et la zone d'accumulation**. Assez souvent (91 fois sur 217 observations), les types d'occupation du sol de la zone d'ablation et de la zone d'accumulation sont différents, ce qui permet d'identifier la limite entre ces deux secteurs.

Trois grilles de photo-interprétation ont ainsi été réalisées à l'échelle régionale : une pour la photo-interprétation des glissements de terrain dans leur ensemble (cf. tableau 2.4. et annexe 12), une pour les zones d'ablation (cf. annexe 13) et une pour les zones d'accumulation (cf. annexe 14).

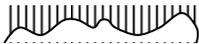
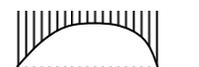
Présence de conifères	(1) < 30% (2) [30%-70%[(3) >= 70%	
Fissures	(1) absence (2) non visibles (3) visibles	(fissures non signalées par la reconnaissance de terrain) (fissures signalées par la reconnaissance de terrain mais non visibles sur l'image) (fines saignées de sol nu visibles sur le glissement, généralement perpendiculaires à la pente)
Escarpement	(1) non visible (2) irrégulier (3) rectiligne (3) en arc de cercle	(escarpement entièrement masqué par la végétation ou non différenciable de l'entourage) (zone de sol nu ou saignée de forme irrégulière visible à la limite amont de la zone d'ablation)  (zone de sol nu ou saignée de forme rectiligne visible à la limite amont de la zone d'ablation)  (zone de sol nu ou saignée en arc de cercle visible à la limite amont de la zone d'ablation) 
Limite zone d'ablation / zone d'accumulation	(1) non visible (2) visible (3) bien visible	(aucune différenciation possible entre les deux zones (même occupation du sol, même texture, même densité de végétation...)) (différenciation possible entre les deux zones (différence d'occupation du sol, de densité de végétation...) mais pas de limite nette) (limite nette entre les deux zones, marquée soit par une zone de sol nu dans la végétation, soit par un net changement d'occupation du sol d'une zone à l'autre)
Proximité cours d'eau	(1) non (2) oui	(aucun cours d'eau à proximité) (glissement situé à moins de 10m d'un cours d'eau)

Tableau 2.4. : Extrait de la grille de photo-interprétation des 217 glissements de terrain.

2.3.1.2. A l'échelle locale

Le tableau 2.5. présente un extrait de la grille de photo-interprétation des 'grands glissements'. Les six grandes catégories d'indices recensés dans les articles y ont été utilisées (cf. annexe 15) :

1. Pour la **description de l'escarpement de tête**, la dégradation de la couronne, la forme de la couronne et la présence de cônes d'éboulis ont pu être observés à l'échelle 1/2000 sur les orthophotographies.
2. Les **éléments du relief** que nous avons retenus pour la grille de photo-interprétation sont le type et la visibilité des ravines (i.e. 'rills' ou 'bad lands'), la dégradation et la densité des crêtes 'in-situ', la présence d'escarpements secondaires, de glissements secondaires et la présence et l'état de dégradation des levées latérales.
3. **L'état de surface** est décrit par la présence et la densité de blocs, la présence et la densité de fissures transversales et longitudinales, la présence et la densité des zones de bossellement.
4. Les **formations et dépôts de surfaces** sont décrits par les pourcentages de marnes, de marnes blanchies et de couvert morainique et par la visibilité de dépôts de laves torrentielles.
5. Nous avons pu décrire le **couvert végétal** par des pourcentages de couvert herbacé discontinu et de couvert moyennement dense à dense.
6. Pour le **réseau de drainage**, la présence d'écoulements superficiels est visualisable.

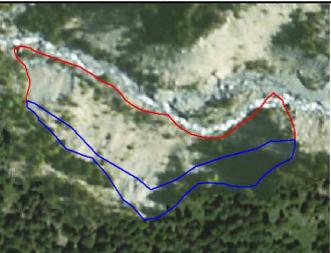
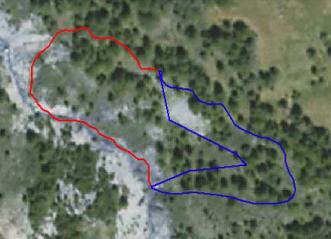
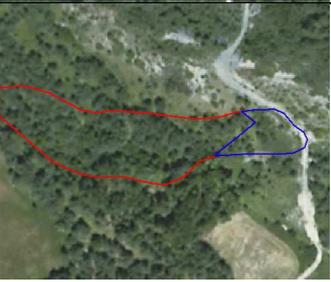
Indice	Description des classes	Exemple
Ravines de type 'rills'	(1) absence (2) non visibles (3) visibles, densité faible (4) visibles, densité moyenne (5) visibles, densité forte	
Crêtes (1) : dégradation	(1) absence (2) recouvertes (présence de crêtes dans la zone d'ablation ou émergeant de la coulée dans la zone d'accumulation (in-situ), recouvertes par de la végétation) (3) nues, émoussées (crêtes dénudées dégradées, de texture hétérogène) (4) nues, saillantes (crêtes dénudées lisses, de texture homogène)	
Fissures transversales	(1) absence (2) non visibles (3) visibles, densité faible (4) visibles, densité moyenne à forte (saignées noires ou beiges ouvertes dans les marnes ou dans les formations de surface, allongées perpendiculairement à la pente)	
Bossellements	(1) absence (2) non visible (3) visible, densité faible (4) visible, densité moyenne à forte (zones striées correspondant à des successions de petites bosses allongées)	
Bourrelets latéraux (levées)	(1) absence (2) non visibles (3) visibles, émoussées (zones bombées en rebord du glissement, de texture hétérogène montrant un mélange de matériaux, colonisées par la végétation) (4) visibles, frais (zones bombées en rebord du glissement, de texture hétérogène montrant un mélange de matériaux, dénudées)	

Tableau 2.4. : Extrait de la grille de photo-interprétation des 'grands glissements' (surface > 100000m²).

Cependant, la photo-interprétation révèle que ces indices sont difficiles à observer avec précision sur des orthophotographies à l'échelle locale. Il apparaît nécessaire de combiner ces observations d'images optiques à des traitements d'images radar permettant une meilleure précision au niveau du relief. Ceci permettrait de mieux repérer les éléments du relief et l'état de surface.

2.3.2. Typologies 'pi' et sélection des 50 glissements représentatifs (échelle régionale)

La photo-interprétation des 217 glissements a révélé que quatre grands paramètres permettraient de classer les glissements de terrain par photo-interprétation : la surface, la forme, l'occupation du sol et la texture. Du fait du postulat de départ, nous avons choisi de ne pas utiliser le paramètre surface. Les indices '**occupation du sol**' et '**texture**' ont été utilisés pour mettre en place les trois typologies par photo-interprétation avec 4 types 'pi' de glissements de terrain (cf. tableau 2.5.), 4 types 'pi' de zones d'ablation et 4 types 'pi' de zones d'accumulation (cf. annexes 16 et 17). Le tableau 2.5. montre la typologie 'pi' des glissements choisie. La proportion de glissements pour chaque type 'pi' est consultable en annexe 18.

	Orthophotographie 2000	Orthophotographie 2004	Description
Type 'pi' 1			Sol nu hétérogène dépourvu de toute végétation ou comportant quelques zones de végétation peu dense à moyennement dense (couvrant moins de 30% de la surface du glissement).
Type 'pi' 2			Couvert végétal arboré et de type pelouse, moyennement dense à dense comportant des zones de sol nu.
Type 'pi' 3			Couvert arboré moyennement dense à dense comportant des zones de sol nu (couvrant moins de 50% de la surface du glissement).
Type 'pi' 4			Couvert arboré dense couvrant la totalité du glissement pouvant comporter des zones de pelouse.

Légende :  Zone d'ablation  Zone d'accumulation

Tableau 2.5. : Typologie des glissements de terrain par photo-interprétation réalisée à partir de l'observation des 217 glissements.

Troisième partie : inventaire semi-automatique des glissements de terrain à l'échelle régionale par analyse 'orientée objet'

3.1. Principes de l'analyse d'images 'orientée objet'

Le traitement d'images 'orienté objet' proposé par le logiciel 'eCognition' (® Definiens Imaging) se déroule en trois étapes principales (Boulaassal, 2008) :

- (1) **L'étape de segmentation multirésolution** : elle subdivise l'image en régions homogènes. La taille et la forme des 'régions' issues de la segmentation vont dépendre de deux paramètres : un **paramètre d'échelle** (*scale*) et un **paramètre d'hétérogénéité** (*heterogeneity*). L'échelle va déterminer la taille moyenne des 'régions' à segmenter. L'hétérogénéité se divise en un paramètre de **couleur** (*color*) et un paramètre de **forme** (*shape*), lui-même divisé en un paramètre de **compacité** (*compactness*) et un paramètre de **lissage** (*smoothness*) (cf. figure 3.1.). La grandeur d'un paramètre détermine son influence lors de la segmentation. Par exemple, plus le paramètre de couleur sera grand et plus la segmentation délimitera les 'régions' en fonction de leur homogénéité de couleur. Il peut y avoir différents **niveaux** (*levels*) de segmentation en fonction des valeurs des paramètres d'échelle et d'hétérogénéité choisis.

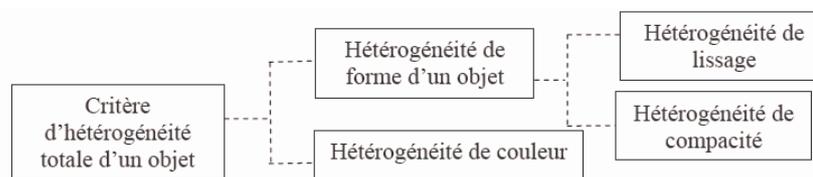


Figure 3.1. : Définition de l'hétérogénéité dans une segmentation multirésolution (Boulaassal, 2008).

- (2) **L'étape de caractérisation des 'régions'** : elle consiste à identifier des critères de reconnaissance des 'régions' par la recherche de leurs propriétés intrinsèques (couleur, forme, texture), topologiques et contextuelles. Cette recherche passe par le calcul de paramètres descriptifs de ces propriétés pour chaque 'région' de l'image.

Le logiciel eCognition propose une large palette de paramètres permettant de décrire les 'régions' segmentées et utilisables pour une classification à base de règles. Trois catégories de caractéristiques de 'régions' sont renseignées par ces paramètres (Boulaassal, 2008) :

1. Les **caractéristiques intrinsèques** des 'régions' :

- les caractéristiques **spectrales** (e.g. luminosité, moyenne des valeurs des pixels pour chaque bande spectrale, ratio entre la moyenne d'une bande spectrale et la somme des moyennes des autres bandes spectrales) incluant des paramètres de **voisinage** qui décrivent les rapports entre une 'région' et la (les) 'région'(s) adjacente(s) comme par exemple leurs différences de valeurs spectrales pour chaque bande spectrale.
- les caractéristiques de **forme** (e.g. aire, longueur, compacité, direction principale)
- les caractéristiques de **texture** (e.g. homogénéité, contraste, entropie)

2. Les **caractéristiques topologiques** décrivant les **rapports géométriques** entre 'régions' ou avec la scène entière tels que le fait qu'une 'région' se situe à gauche, à droite, ou à une certaine distance de certaines 'régions', ou se situe dans un secteur particulier à l'intérieur de l'image.

3. Les **caractéristiques contextuelles** qui proviennent de la mise en relation des différents niveaux de segmentation. Ces paramètres décrivent les rapports entre une 'région' et ses sous-'régions' ou sa sus-'région', c'est-à-dire les 'régions' qu'il contient à un niveau inférieur de segmentation ou la 'région' qui le contient à un niveau supérieur de segmentation.

- (3) **L'étape de classification** : il existe deux grandes méthodes de classification :

- la classification par la **méthode du plus proche voisin**, qui passe par la sélection d'échantillons contenant des 'régions' caractérisants chaque classe thématique et par la classification des autres 'régions' en fonction de leur ressemblance spectrale, texturale et de forme avec les échantillons,
- la classification **à base de règles**, où on définit chaque classe thématique selon des règles de valeurs correspondant aux caractéristiques de la classe. Ce type de classification a été choisi pour notre travail.

La mise en place d'une **classification à base de règles** sous eCognition est caractérisée par une série de **fonctions d'appartenance** : chaque classe thématique est caractérisée par une série de paramètres. Pour chaque paramètre, un intervalle de valeurs caractéristiques de la réponse de la classe recherchée est défini (fonction d'appartenance).

Le principe de la **logique floue** est que les limites entre les classes ne sont pas absolues. Dans la logique de classification classique, on ne peut avoir comme résultat que 0 ou 1 (il n'y a pas d'intersection entre les classes et un objet appartient ou n'appartient pas à une classe). Par contre, avec la logique floue, une région peut appartenir à 60% à une classe et 40% à une autre. Il peut y avoir intersection entre les différentes classes (cf. figure 3.2.). Le logiciel eCognition permet de choisir la fonction qui va caractériser le passage d'une classe à l'autre.

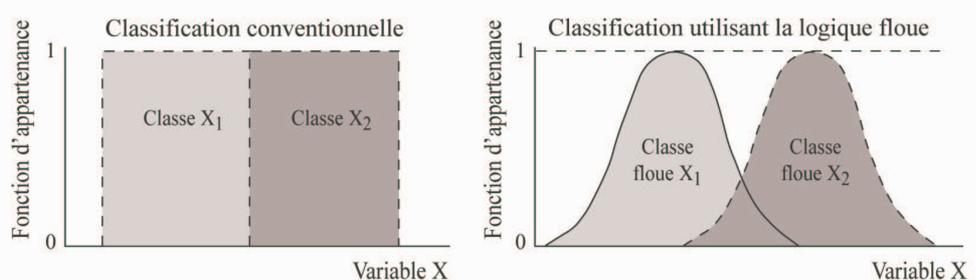


Figure 3.2. : Différence entre une classification conventionnelle et une classification utilisant la logique floue (modifié de Weber et al.,2005).

3.2. Etape de calcul des paramètres quantitatifs (étape 2)

L'étape 2 a compris deux tâches :

- (1) la traduction des indices qualitatifs déterminés dans l'étape 1 en **indicateurs quantitatifs**,
- (2) le **calcul** de paramètres utilisés par le logiciel 'eCognition' correspondants aux indicateurs quantitatifs pour les 50 glissements de terrain 'représentatifs'.

3.2.1. Traduction quantitative des indices qualitatifs (cf. tableau 3.1.)

L'indice 'occupation du sol', utilisé pour la photo-interprétation et la typologie lors de l'étape 1, a été caractérisé par des **indicateurs spectraux**, la couleur permettant le mieux de différencier les types d'occupation du sol.

Pour les indices de texture, de densité de végétation et d'état de surface, des **indicateurs texturaux** nous sont apparus adaptés pour la reconnaissance automatique. La taille des fissures et des zones de bossellement étant trop petite par rapport à la résolution des orthophotographies, nous les avons classés comme des indices d'hétérogénéité et donc aussi caractérisés par des indicateurs de texture.

Indices de photo-interprétation	Indicateurs quantitatifs
Surface	Forme
Longueur	
Indice de compacité	
Occupation du sol	Caractéristiques spectrales
Densité de végétation	Texture
Texture	
Fissures	
Bossellement	
Etat de perturbation de la surface	Paramètres de voisinage (différence entre l'objet et son environnement)
Visibilité de la zone d'ablation	
Visibilité de la zone d'accumulation	
Visibilité limite zone d'ablation/zone d'accumulation	Caractéristiques topologiques
Proximité à un cours d'eau	
Proximité à une route	

Tableau 3.1. : Mise en correspondance des indices qualitatifs des grilles de photo-interprétation et des indicateurs quantitatifs utilisables en traitement d'image.

Les indices de surface, de longueur et l'indice de compacité des grilles de photo-interprétation ont été représentés par des indicateurs de **forme**.

L'utilisation de **critères de voisinage** a été choisie pour faire ressortir les indices concernant la visibilité des zones d'ablations et d'accumulation.

3.2.2. Calcul des paramètres 'eCognition'

Nous avons choisi de réaliser toutes les étapes de calage sur **l'orthophotographie de 2004** car la visibilité des glissements de terrain lors de la photo-interprétation y est apparue la meilleure par rapport aux images de 1974 et 2000.

Deux étapes ont été suivies pour le calcul des paramètres :

- (1) détermination des paramètres de segmentation et segmentation de l'image,
- (2) calcul des paramètres pour les régions issus de la segmentation correspondant aux 50 glissements représentatifs.

3.2.2.1. La segmentation

La segmentation de l'image a été contrainte par les données vecteur (i.e. contours des glissements, des zones d'ablation et des zones d'accumulation) et nous avons testé les paramètres de segmentation pour retrouver des régions de forme (1) et de taille (2) correspondants aux 50 glissements représentatifs :

(1) les paramètres **de couleur et de forme** ont été testés de manière empirique en maintenant le paramètre d'échelle pour déterminer les valeurs les plus adaptées à la segmentation de l'orthophotographie de 2004. Les résultats ont montré que la segmentation donnant les régions les plus proches de la réalité utilisait un paramètre couleur très faible (0,1) laissant beaucoup d'importance à la forme (0,9) et plus particulièrement au lissage (0,9) par rapport à la compacité (0,1). Ceci évite d'avoir uniquement des formes rondes.

(2) **quatre niveaux de segmentation** ont été appliqués en augmentant le **paramètre d'échelle** et en conservant les mêmes paramètres de forme et de couleur. Il a fallu trouver un paramètre d'échelle délimitant des régions de taille adaptée aux contours des glissements. Ainsi, l'extraction des paramètres s'est finalement faite à partir du **niveau 2** de segmentation **pour les zones d'ablation et d'accumulation**, et à partir du **niveau 4 pour les glissements**. Les régions du niveau 1 étaient trop petites par rapport à la taille moyenne des zones d'ablation et d'accumulation et des glissements (cf. figure 3.3.).

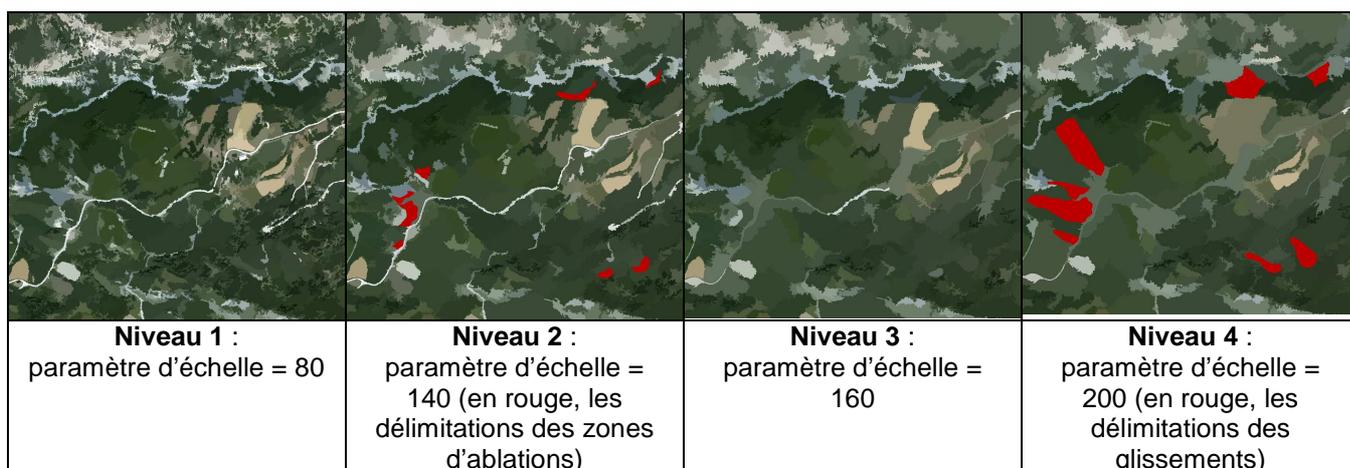


Figure 3.3. : Les quatre niveaux de segmentation réalisés pour l'extraction des paramètres et pour la classification.

3.2.2.2. Calcul et interprétation des paramètres

** Calcul des paramètres*

Dans un premier temps, nous avons calculé tous les paramètres proposés par eCognition pouvant correspondre aux indicateurs quantitatifs déterminés plus haut (cf. § 3.2.1.). Nous avons choisi de nous focaliser sur les paramètres décrivant les **caractéristiques intrinsèques** et de proximité des objets. **Les caractéristiques topologiques et contextuelles** ont été mises de côté mais pourraient cependant être utiles pour la détection des glissements (e.g. caractérisation de la proximité d'un glissement à un cours d'eau ou à une route, détection d'une zone d'ablation en fonction de son appartenance à un glissement de terrain entier déjà détecté).

Les paramètres eCognition suivants ont donc été calculés pour chaque région correspondant à un glissement de terrain, à une zone d'ablation ou à une zone d'accumulation pour chaque type 'pi' :

- **paramètres spectraux** : moyennes spectrales, écarts types, ratios et différences avec les caractéristiques spectrales des objets voisins pour chaque bande spectrale.
- **paramètres de texture** : homogénéité, contraste, dissymétrie, entropie, moyenne, écart type, corrélation.
- **paramètres de forme** : surface, longueur, largeur, densité, direction principale, compacité, arrondissement.

Les résultats ont été exportés sous SIG sous forme de tables attributaires et ont été soumis à des analyses statistiques de base (i.e. moyenne, écart-type, minimum, maximum) pour avoir les intervalles de valeurs correspondants aux objets à détecter (cf. tableau 3.2.).

	Paramètres spectraux			Paramètres de forme			Paramètres de texture	
	Brightness	Mean_Layer1	Ratio_Layer1	Area	Length/Width	Compactness	Homogénéité	Contraste
Minimum	108,48	97,41	0,3	1317	1,24	1,48	0,14	75,76
Maximum	163,18	159,86	0,33	2237,25	2,62	2,07	0,18	169,66
Moyenne	146,26	139,7975	0,3175	1964,4375	1,88	1,705	0,15	133,1975
Ecart-type	25,386	28,571	0,0125	436,966	0,583	0,256	0,02	40,212
Etendue	54,7	62,45	0,03	920,25	1,38	0,59	0,04	93,9

Tableau 3.2. : Exemple de résultats des statistiques des paramètres extraits pour les glissements de terrain de type 1.

Dans un second temps, à partir de l'analyse des résultats statistiques, seuls les paramètres les plus discriminants ont été retenus pour être utilisés lors des classifications. Le tableau 3.3. présente les paramètres retenus. Le détail des formules utilisées pour le calcul de paramètres est donné en annexe 19.

Types d'indicateurs quantitatifs	Paramètres eCognition
Caractéristiques spectrales	Luminosité (<i>brightness</i>)
	Moyennes des bandes spectrales (<i>mean layers</i>)
	Ratios (<i>ratios</i>)
	Maximum de différence (<i>maximum difference</i>)
Forme	Aire (<i>area</i>)
	Longueur/largeur (<i>length/width</i>)
	Index de forme (<i>shape index</i>)
	Compacité (<i>compactness</i>)
	Arrondissement (<i>roundness</i>)
Texture	Contraste GLCM* (<i>GLCM contrast</i>)
	Entropie GLCM (<i>GLCM entropy</i>)
	Moyenne GLCM (<i>GLCM mean</i>)
	Corrélation GLCM (<i>GLCM correlation</i>)
Voisinage	Différence moyenne au voisin (<i>mean difference to neighbor</i>)

* Les textures GLCM (Grey Level Co-occurrence Matrix) sont calculées à partir d'une matrice présentant l'occurrence de différents combinaisons de pixels en niveaux de gris dans une image.

Tableau 3.3. : Paramètres 'eCognition' retenus pour être utilisés pour les classifications.

* Analyse des paramètres calculés

(1) **Concernant l'occupation du sol et les types 'pi'** (cf. hypothèse 1) :

- les paramètres spectraux luminosité (*brightness*), moyenne de bandes spectrales (*mean layers*), maximum de différence (*max.diff*) (différence entre la valeur moyenne de bande spectrale maximale et la valeur moyenne de bande minimale d'un objet divisée par sa luminosité) et ratios (*ratio 1*, *ratio 2*, *ratio 3*) permettent de différencier les types 'pi'.
- les caractéristiques spectrales des types 'pi' des glissements entiers sont similaires à celles des zones d'ablation et à celles des zones d'accumulation.

(2) **Concernant la différenciation entre glissements, zones d'ablation et zones d'accumulation** (cf. hypothèse 2) :

- les caractéristiques spectrales, de texture et de forme (hors surface) ne permettent pas de différencier les trois types d'objets étudiés.
- la surface permet de différencier les glissements des zones d'ablation, des zones d'accumulation. En effet, elle s'étend entre 352 et 7116,5 m² pour les zones d'ablations, entre 635 et 13287,75 m² pour les zones d'accumulation et entre 1191,5 à 17139,25 m² pour les glissements en entier.

(3) **Concernant la différenciation entre glissements et non glissement, zone d'ablation et non zone d'ablation et zone d'accumulation et non zone d'accumulation :**

- les paramètres spectraux ne permettent pas de différencier glissement/non glissement, zone d'ablation/non zone d'ablation et zone d'accumulation/non zone d'accumulation.
- les paramètres de texture et de forme permettent de différencier glissements/non glissement, zone d'ablation/non zone d'ablation et zone d'accumulation/non zone d'accumulation.

3.3. Etape de classification (étape 3)

Lors de l'**étape 3**, la connaissance quantitative fournie par l'étape 2 est utilisée pour établir une classification à base de règles permettant d'**extraire automatiquement** les objets 'glissement de terrain', 'zone d'ablation' et 'zone d'accumulation' suivant leur type 'pi' sur la totalité de la vallée. Différentes combinaisons de paramètres ont été testées en fonction des résultats de l'analyse des paramètres calculés lors de l'étape 2. Des données SIG exogènes ont été intégrées dans l'analyse (masques restreignant la zone suivant les valeurs de pente, courbure des versants, type d'occupation du sol) pour guider la détection automatique. Chaque classification est alors validée en superposant la carte établie par la méthode automatique à la carte 'expert' de base et en quantifiant les différences.

3.3.1. Méthodologie de l'étape de classification

Pour réduire les temps de traitement des données, la classification à base de règles a d'abord été testée sur une portion de l'**orthophotographie de 2004** et délimitant les secteurs de Bois Noir et de Poche qui concentrent le plus de glissements (cf. figure 2.3.). La segmentation et les classifications ont ensuite été appliquées à l'**orthophotographie IR de 1974** et à l'**image SPOT 5**.

* *Segmentation de l'image*

L'image a été segmentée avec les mêmes paramètres de segmentation que lors de l'étape 2 (cf. tableau 3.2.). Ceci était nécessaire pour retrouver des objets de même taille et de même forme que lors du calcul des paramètres et appliquer les intervalles de valeurs calculés. Les mêmes niveaux de segmentation ont été utilisés pour l'identification des différents objets.

* *Protocole de tests*

Trois étapes de classification (suivant les trois points relevés lors de l'analyse des paramètres, cf. § 3.2.2.2.) ont été suivies pour parvenir au résultat final (étape (3)) et répondre aux hypothèses de départ :

Etape (1) : nous avons établi des règles permettant de faire ressortir les types d'occupation du sol correspondant aux 4 types 'pi' de glissements, de zones d'ablations et de zones d'accumulation (cf. § (1) du § 3.2.2.2.). Ceci a été fait en utilisant les **paramètres spectraux** (cf. exemple en annexe 20) conformément aux remarques faites lors de l'analyse des paramètres (cf. § (1) du § 3.2.2.2.).

Etape (2) : nous avons établi des règles de distinction entre glissements, zones d'ablation et zones d'accumulation. Les paramètres spectraux pour les trois types d'objets étant les mêmes, la texture et la forme également (cf. § (2) § 3.2.2.2.), le seul paramètre permettant de les distinguer était la **taille**. Nous avons donc réalisé trois types de classification :

- pour l'identification des glissements, la classification s'est faite au niveau 4 de segmentation et en restreignant la recherche aux régions de surface comprise entre 800 et 25000 m²,
- pour l'identification des zones d'ablation, la classification s'est faite au niveau 3 de segmentation et en restreignant la recherche aux régions de surface comprise entre 200 et 9000 m²,
- pour l'identification des zones d'accumulation, la classification s'est faite au niveau 3 de segmentation et en restreignant la recherche aux régions de surface comprise entre 400 et 15000 m².

Etape (3) : pour différencier les objets quelconques des objets glissement, zone d'ablation et zone d'accumulation nous avons utilisé les paramètres de **forme**, de **texture** et de **voisinage** conformément aux conclusions de l'analyse des paramètres (cf. § (3) du § 3.2.2.2.). Différentes classifications combinant ces 3 types de paramètres ont été testées et appliquées à chaque type 'pi' et à chaque type d'objet (glissement, zone d'ablation, zone d'accumulation) en suivant un protocole de tests (cf. tableau 3.4. et annexe 21).

	Paramètres de forme	Paramètres de texture	Paramètre de voisinage
Test 1	X		
Test 2		X	
Test 3	X	X	
Test 4			X
Test 5		X	X
Test 6	X		X
Test 7	X	X	X

Tableau 3.4. : Protocole de tests.

* Traitements post-classification

La classification peut être améliorée par des traitements post-classification consistant en la création de 'masques' restreignant les recherches aux zones de glissements de terrain potentiels. Trois types de données nous semblent potentiellement utilisables :

- les **valeurs de pente** : les glissements de terrain de la vallée de Barcelonnette affectent des versants à pentes comprises entre 15 et 45° (Thiery, 2007),
- les **courbures de versant** : les glissements de terrain provoquent des profils en long de versants convexo-concaves (Molenaar, 2005),
- les **types d'occupation du sol** : les zones cultivées et urbanisées sont peu probables de contenir un glissement de terrain (cf. étape 1).

Trois masques ont été réalisés : un masque contenant les pentes comprises entre 15 et 45°; un masque contenant les profils en long concaves et convexes et un masque contenant tous les types d'occupation du sol en dehors des cours d'eau, des zones urbanisées et des zones cultivées. Une fois les classifications effectuées, les résultats ont été exportés sous SIG pour y appliquer les masques et éliminer les 'régions' classées comme glissements de terrain mais étant en dehors des zones de glissement de terrain potentiels.

* Validation

La validation des résultats a consisté à calculer le pourcentage de glissements de terrain identifiés par chaque classification en superposant la carte établie par la méthode automatique à la carte 'expert' de base. Pour la validation de la classification par types 'pi' basée sur l'occupation du sol, la carte obtenue automatiquement a été comparée à la carte d'occupation du sol manuelle de 2000.

3.3.2. Résultats et validation des classifications

Conformément aux objectifs de départ, les classifications ont été appliquées à 3 types de données images :

- une orthophotographie couleur de 2004,
- une orthophotographie infrarouge de 1974,
- une image satellite en noir et blanc SPOT 5 de 2004.

3.3.2.1. Application à l'orthophotographie couleur de 2004

* Etape (1) : Classification des types 'pi'

La figure 3.5. présente la classification des types d'occupation du sol réalisée sous 'eCognition'. Elle comprend 6 classes (sol nu-marnes noires, marnes noires foncées, pelouse, pelouse-forêt, forêt-sol nu et forêt) qui permettent de retrouver les 4 types 'pi' définis lors de l'étape 1.

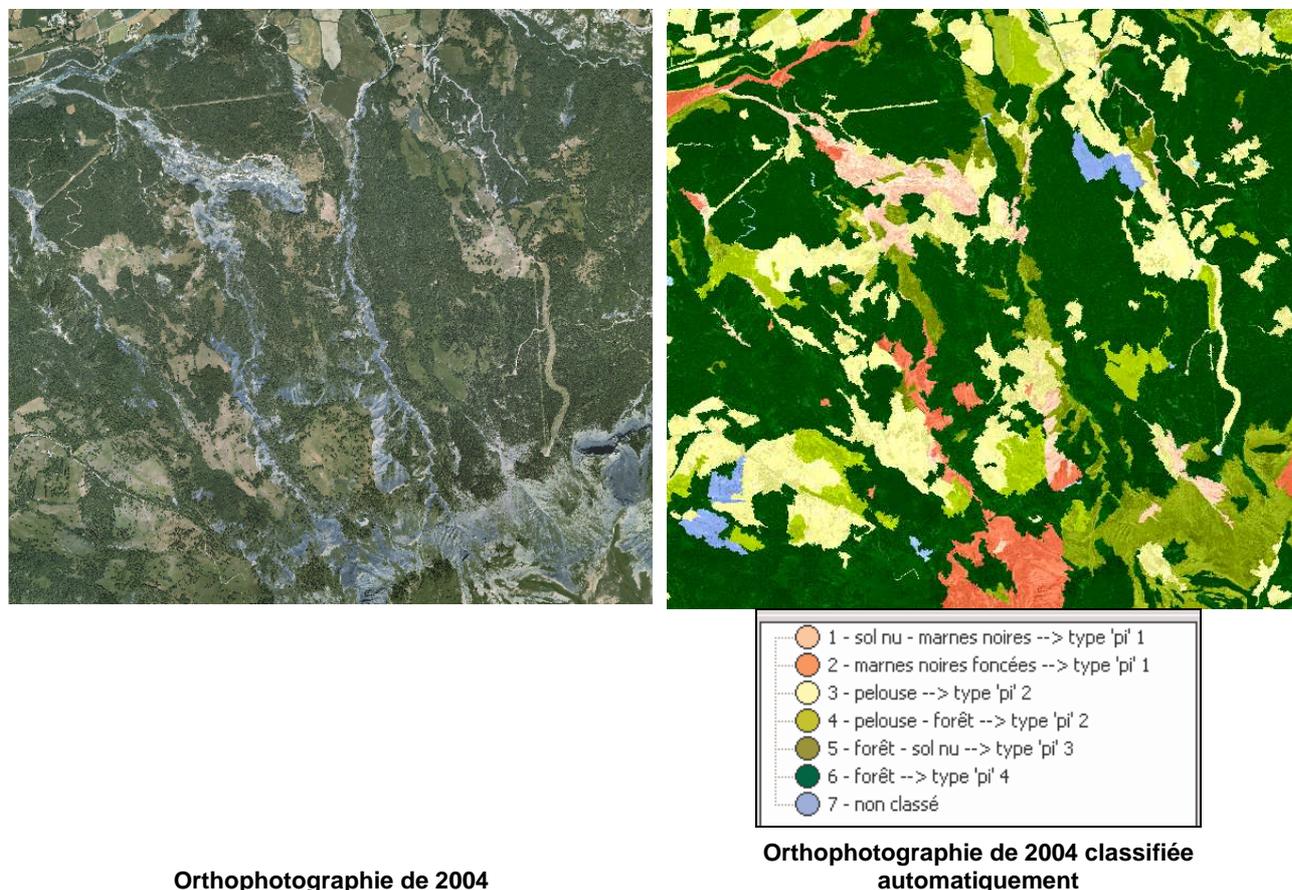


Figure 3.5. : Classification automatique des types d'occupation du sol des glissements de terrain par le logiciel eCognition appliquée à l'orthophotographie de 2004 et correspondance avec les types 'pi'.

Occupation du sol	Surface sur la carte de 2000 (ha)	Surface identifiée automatiquement sur l'orthophotographie de 2004 (ha)	Surface commune (ha)	Pourcentage identifié automatiquement
Sol nu - marnes noires (type 'pi' 1)	254,415	133,655	93,833	36,9%
Pelouse (type 'pi' 2)	720,173	618,712	429,447	59,6%
Forêt (types 'pi' 3 et 4)	1361,812	1605,337	1182,108	86,8%
Autre	74,025	42,281	6,429	8,7%

Tableau 3.6. : Validation de l'occupation du sol par rapport à la carte d'occupation du sol de 2000.

La validation (cf. tableau 3.6.) montre que les surfaces identifiées pour chaque type d'occupation du sol sont proches des surfaces calculées sur la carte de 2000, mais la surface commune n'est pas toujours élevée. Dans l'ensemble, en dehors de la classe 'autre', les pourcentages d'identification sont assez bons : de 37% pour les sol nus – marnes noires à 87% pour la forêt en passant par 60% pour la pelouse.

* *Etape (2) : Différenciation glissements-zones d'ablation-zones d'accumulation*

Le tableau 3.7. montre que les surfaces des régions issues de la segmentation correspondent à celles des glissements, des zones d'ablations et des zones d'accumulation (cf. (1) du § 3.2.2.2.). Ainsi, les régions trop grandes et trop petites pour être des glissements, des zones d'ablations ou des zones d'accumulation ont pu être éliminées.

	Moyenne	Minimum	Maximum
Surface des régions identifiées comme ayant la taille d'un glissement (m²)	4162,32	764,40	22610,35
Surface des régions identifiées comme ayant la taille d'une zone d'ablation (m²)	2370,55	189,15	8178,50
Surface des régions identifiées comme ayant la taille d'une zone d'accumulation (m²)	2976,61	355,63	13670,50

Tableau 3.7. : Taille des régions segmentées pour chaque type d'objet recherché.

Cependant, nous avons pu remarquer, lors de l'observation visuelle des résultats (cf. § suivant), que les régions identifiées comme zones d'ablation ou d'accumulation correspondent souvent à un glissement entier (cf. figure 3.6.), ce qui montre qu'il y a une confusion entre les différents types d'objets. Ainsi, **le critère de taille ne permet pas, à lui seul, de distinguer les glissements des zones d'ablation, des zones d'accumulation.**

Le critère de taille est cependant nécessaire pour l'identification automatique : (1) lors de la segmentation pour avoir des régions de taille adaptée à la taille des objets recherchés, (2) lors de la classification pour éliminer les régions demeurant trop grandes ou trop petites pour correspondre à un glissement de terrain ou à une zone d'ablation ou d'accumulation.

* *Etape (3) : Distinction des glissements de terrain, zones d'ablation et zones d'accumulation des objets quelconques (identification automatique des objets recherchés)*

Le tableau de validation des classifications (cf. annexe 22 et tableau 3.8.) montre que tous les tests, excepté le test 1, enregistrent un pourcentage d'identification maximal (avec des valeurs comprises entre 3 et 7%) pour les objets de type 'pi' 1 (i.e. peu recouverts par la végétation, correspondant aux types 1 et 2 de la typologie présentée dans le § 2.3.2.), que ce soit pour les glissements entiers, les zones d'ablations ou pour les zones d'accumulation. Les tests 3, 5, 6 et 7 n'ont identifié aucun objet de types 2, 3 et 4. Le test 1 a permis une identification de 6 à 9% de tous les types de glissements.

Le test 4 a permis un fort pourcentage d'identification des glissements et des zones d'ablation de type 4 (20% du *shapefile* 'expert' identifié) et une bonne identification des types 1, 2 et 3 pour les objets glissement (de 6 à 10%). Cependant, ce pourcentage est lié à un fort taux de surfaces classifiées à tort comme glissements (environ 99%). Pour les glissements de type 4 par exemple, la surface totale identifiée est de 277 ha pour une surface correctement identifiée de 2 ha. Ceci nous fait supposer que les bons résultats d'identification sont biaisés par le grand nombre de régions identifiées.

Dans l'ensemble, on remarque une large surestimation de la classification automatique par rapport au *shapefile* 'expert'. En effet, dans tous les cas, excepté le test 1 appliqué aux glissements de type 1 avec seulement 23% de la surface identifiée ne correspondant pas au *shapefile* 'expert', au moins 96% des régions identifiées ne sont pas des glissements.

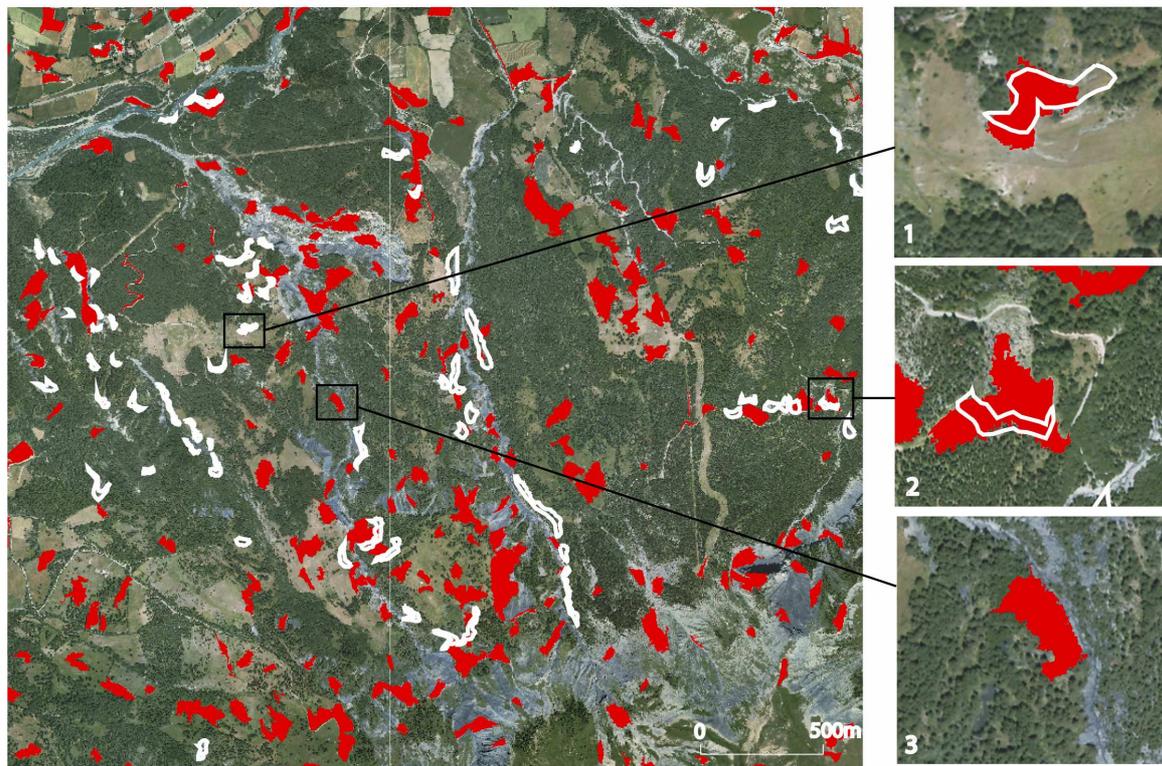
Nous pouvons aussi constater que les surfaces bien identifiées sont un peu plus élevées pour les glissements (de 5 à 7% pour le type 1) que pour les zones d'ablation et d'accumulation (aux alentours de 3%). Ceci peut être lié à la taille des glissements : comme les glissements occupent une surface plus grande que les zones d'ablation et d'accumulation, les possibilités d'en identifier sont plus fortes.

Par ailleurs, en comparant les objets délimités par le *shapefile* 'expert' et les régions identifiées comme objets par la classification, nous avons pu observer trois types de résultats (cf. figure 3.6., annexe 23 et tableau 3.9.) :

- **sous-estimation** : la région identifiée automatiquement comme un glissement correspond en partie au glissement du *shapefile* 'expert',
- **surestimation** : la région identifiée automatiquement comme glissement est plus grande que le glissement *shapefile* 'expert',
- **apparition** : la région identifiée automatiquement comme glissement ne correspond à aucun glissement *shapefile* 'expert'.

Objet	Type 'pi'	Surface du shapefile 'expert' (ha)	Surface identifiée automatiquement (ha)	Surface commune (ha)	Surface mal identifiée (ha)	% de la surface du shapefile 'correctement' identifiée	% de la surface classifiée ne correspondant pas au shapefile	
Test1	Glissements	1	5,285	0,479	0,371	0,108	7,02	22,53
		2	15,262	63,878	1,381	62,497	9,05	97,84
		3	16,808	62,297	1,086	61,211	6,46	98,26
		4	11,965	4,355	0,000	4,355	0,00	100,00
		tous	49,320	131,009	2,838	128,171	5,75	97,83
	Zones d'ablation	1	0,646	20,022	0,043	19,979	6,66	99,79
		2	5,281	36,542	0,221	36,321	4,18	99,40
		3	4,197	14,810	0,004	14,806	0,10	99,97
		4	4,157	39,411	0,129	39,282	3,10	99,67
		tous	14,281	110,785	0,397	110,388	2,78	99,64
	Zones d'accumulation	1	1,629	23,097	0,120	22,977	7,37	99,48
		2	6,020	48,771	0,000	48,771	0,00	100,00
		3	11,311	21,873	0,159	21,714	1,41	99,27
		4	16,062	48,180	0,000	48,180	0,00	100,00
		tous	35,022	141,921	0,279	141,642	0,80	99,80

Tableau 3.8. : Tableau de validation du test 1.



Légende :  Contour de zone d'ablation sur le shapefile 'expert'  Zone identifiée comme zone d'ablation par la classification automatique

1. Zone d'ablation sous-estimée par la classification automatique
2. Zone d'ablation surestimée par la classification automatique
3. Zone d'ablation rajoutée par la classification automatique



Figure 3.6. : Résultat du test 1 appliqué aux zones d'ablations (tous types 'pi' confondus).

		% d'objets sous-estimés	% d'objets surestimés	% total d'objets sous ou sur-estimés
Test 1	Glissements	13,7	1,4	15,1
	Zones d'ablation	5,5	4,1	9,6
	Zones d'accumulation	2,7	2,7	5,5
Test 2	Glissements	6,8	1,4	8,2
	Zones d'ablation	11,0	1,4	12,3
	Zones d'accumulation	12,3	0,0	12,3
Test 3	Glissements	1,4	0,0	1,4
	Zones d'ablation	1,4	0,0	1,4
	Zones d'accumulation	2,7	0,0	2,7
Test 4	Glissements	24,7	1,4	26,0
	Zones d'ablation	17,8	5,5	23,3
	Zones d'accumulation	19,2	1,4	20,5
Test 5	Glissements	2,7	0,0	2,7
	Zones d'ablation	2,7	0,0	2,7
	Zones d'accumulation	4,1	0,0	4,1

Tableau 3.9. : Extrait du tableau de validation par pourcentages d'objets sous ou sur-estimés par rapport aux 73 glissements, zones d'ablation et zones d'accumulations repérés sur le shapefile 'expert' pour l'orthophotographie de 2004.

Le tableau 3.9. confirme que les tests 1 et 4 donnent les meilleurs résultats d'identification avec par exemple 15% des glissements sur ou sous-estimés par le test 1 ou 26% des glissements identifiés par le test 4. Il révèle aussi que le test 2 permet également de bonnes identifications, spécialement pour les zones d'ablation et d'accumulation avec 12% d'identification. Par ailleurs, on remarque qu'il y a plus d'objets sous-estimés que d'objets surestimés.

* En résumé : validation des hypothèses de départ

Au vu des résultats des trois étapes de classifications appliqués à l'orthophotographie couleur de 2004, nous pouvons faire les remarques suivantes :

- (1) **l'hypothèse 1** est validée car nous avons pu constater une différence dans les pourcentages d'identification selon les types 'pi' de glissements de terrain (i.e. type 1 mieux identifié que les autres),
- (2) **l'hypothèse 2** n'est pas validée car la taille n'a pas permis de différencier les objets glissement, zones d'ablation et zones d'accumulation. De plus, les critères spectraux utilisés pour la classification d'occupation du sol ne permettent pas non plus de faire la distinction car les mêmes types 'pi' ont été observés pour les trois types d'objets (cf. (1) du § 3.2.2.2.),
- (3) **les indicateurs les plus adaptés** à la distinction entre les glissements de terrain et les objets quelconques sont la forme (test 1) et le critère de voisinage (test4). En dehors de ça, tous les tests ont enregistré environ les mêmes pourcentages d'identification.

3.3.2.2. Application à l'orthophotographie infrarouge de 1974

* Segmentation

Lors de la segmentation de l'orthophotographie de 1974, il est apparu que, pour l'application des mêmes paramètres, les régions définies sur l'orthophotographie de 1974 étaient de taille supérieure à celle définies pour l'orthophotographie de 2004. Ceci peut s'expliquer par le fait que les paramètres de forme et de couleur ont joué différemment du fait des caractéristiques spectrales différentes. De nouveaux paramètres de segmentation ont donc été définis pour retrouver des régions de taille adaptées à la taille des glissements et des zones d'ablation et d'accumulation, i.e. niveau 1 : échelle 50 ; niveau 2 : échelle 80 (échelle des zones d'ablation et d'accumulation) ; niveau 3 : échelle 100 (échelle des glissements).

* *Etape (1) : Classification des types 'pi'*

La classification de l'occupation du sol réalisée à partir de l'orthophotographie de 2004 n'a pas donné de résultats lors de son application à l'orthophotographie de 1974. Ceci est dû au fait que l'orthophotographie de 2004 est une orthophotographie couleur alors que l'orthophotographie de 1974 est en infrarouge. Les valeurs utilisés pour la classification ne correspondant donc plus aux bonnes bandes spectrales. Une nouvelle classification de l'occupation du sol (en changeant les intervalles de valeurs des paramètres spectraux) a été réalisée pour permettre de continuer les tests en différenciant les types 'pi'.

* *Etape (2) : Différenciation glissements – zones d'ablation – zones d'accumulation*

Les mêmes critères de taille que pour l'orthophotographie de 2004 ont été utilisés pour la différenciation glissements – zones d'ablation – zones d'accumulation.

* *Etape (3) : Distinction des glissements de terrain, zones d'ablation et zones d'accumulation des objets quelconques (identification automatique des objets recherchés)*

Seuls les tests ayant donné les meilleurs résultats pour l'orthophotographie de 2004 (i.e. tests 1 et 4) ont été appliqués à l'orthophotographie de 1974. Tous les résultats pour 1974 sont présentés en annexes 24 et 25. Les pourcentages montrent que, pour le test 1, les surfaces 'correctement' identifiées sont plus grandes pour 1974 que pour 2004. Cela peut s'expliquer par le fait que les régions identifiées pour 1974 sont plus nombreuses que pour 2004 : 767 ha au total pour 2004 contre 1921 ha pour 1974 (cf. tableau 3.10.). Il y a donc une plus grande surestimation avec l'orthophotographie de 1974. Pour le test 4, la surface totale identifiée est la même que pour 2004 (i.e. environ 2900 ha) mais les pourcentages de superposition entre les régions identifiées automatiquement et les glissements du *shapefile* 'expert' restent plus élevés.

	Surface totale identifiée* sur l'orthophotographie 2004 (ha)	Surface totale identifiée* sur l'orthophotographie 1974 (ha)
Test 1	767,4298	1920,880
Test 4	2965,5780	2926,730

* somme des surfaces des régions identifiées comme glissements, zones d'ablation ou zones d'accumulation, tous types 'pi' confondus

Tableau 3.10. : Comparaison des surfaces totales d'objets identifiés sur l'orthophotographie de 2004 et sur l'orthophotographie de 1974 pour les tests 1 et 4.

Les différences d'identification entre l'orthophotographie de 1974 et celle de 2004 peuvent s'expliquer par des **changements d'occupation du sol entre ces deux années**, e.g. augmentation du couvert végétal et baisse des surfaces de sol nu de 1974 à 2004 qui pourraient expliquer la baisse des surfaces 'correctement' identifiées entre ces deux années. Ces différences peuvent également être expliquées par les différences de caractéristiques spectrales : une photographie en IR permet de faire ressortir la végétation beaucoup plus qu'une image couleur, ce qui peut aussi expliquer le plus grand nombre de régions correctement identifiées que l'orthophotographie de 1974. Pour finir, les différences d'identification entre 1974 et 2004 par le test 4 peuvent être expliquées par le fait que ce test utilise le critère de voisinage qui est un critère spectral. Ses valeurs caractéristiques doivent donc varier selon le type spectral d'image (i.e. couleur ou infrarouge).

3.3.2.3. Application à l'image satellite noir et blanc SPOT 5 de 2004

Les paramètres de segmentation utilisés pour les orthophotographies n'étant pas adaptés à la segmentation de l'image SPOT, des paramètres d'échelle beaucoup plus petits ont du être appliqués (échelle 20). Malgré cela, les régions délimitées sont de taille supérieure à la taille correspondant aux glissements de terrain cf. annexe 26). Ceci s'explique par la résolution spatiale moins élevée pour l'image SPOT (2,5 m) que pour les orthophotographie (50 cm). En résumé, **une résolution de 2,5 m ne convient donc pas à l'extraction automatique des glissements de terrain**. De ce fait, nous n'avons pas appliqué les différentes étapes de test à cette image.

3.3.2.4. Traitements post-classification

La comparaison entre la carte des profils en long et la disposition des glissements du versant ubac sur le *shapefile* 'expert' nous a montré que les glissements de terrain se retrouvent indifféremment sur les versants concave, convexes ou plans. Le masque des profils en long a donc été mis de côté pour les tests sur cette zone d'étude.

Après superposition du masque des pentes et du *shapefile* 'expert', nous avons pu remarquer que le masque éliminait des zones où des glissements de terrain étaient repérés sur le *shapefile* 'expert'. De ce fait, nous n'avons finalement pas utilisé le masque des pentes dans notre cas.

Le masque d'occupation du sol a été appliqué à l'ensemble des tests car la zone testée contenait plusieurs zones cultivées où aucuns glissements de terrain n'étaient présents (cf. annexe 27). En effet, en éliminant les régions identifiées dans les zones cultivées, urbanisées ou dans les cours d'eau, le nombre de régions faussement identifiées comme glissements de terrain par la classification automatique a été réduit. La surface totale des régions identifiées comme glissements par le test 2 est par exemple passée de 205,7 à 175,9 ha.

Le masque d'occupation du sol a permis d'améliorer l'extraction automatique. Nous avons choisi de l'appliquer en traitement post-classification, mais il est tout à fait possible de l'introduire avant de commencer la classification automatique pour restreindre la zone de traitement dès le départ.

Conclusion et perspectives

Au cours de ce stage, des indices de description des glissements de terrain par photo-interprétation ont été recensés et validés par observation de 217 glissements de terrain du versant ubac de la vallée de Barcelonnette sur trois orthophotographies de dates et de caractéristiques spectrales différentes. Des grilles de photo-interprétation et une typologie des glissements de terrain, des zones d'ablation et des zones d'accumulation basée sur l'occupation du sol ont été mises en places. Les indices descriptifs ont été transcrits en des indicateurs quantitatifs. Ces indicateurs ont ensuite été utilisés dans un traitement d'image de type 'orienté objet' et différentes classifications ont été testées sur l'orthophotographie couleur de 2004 et l'orthophotographie IR de 1974 pour essayer d'identifier les glissements de terrain, les zones d'ablation et les zones d'accumulation de manière automatique. Un traitement post-classification utilisant un masque d'occupation du sol a été appliqué et a permis une restriction des classifications.

La classification par typologie 'pi', basée sur des indicateurs spectraux, a permis de mettre en avant que **les glissements de terrain les mieux identifiables automatiquement sont ceux les plus faiblement couverts par la végétation. Le critère de taille** est apparu insuffisant pour la différenciation entre glissements, zones d'ablation et zones d'accumulation mais a permis de restreindre les classifications. Par ailleurs, nous avons pu constater que **les indicateurs de forme et les critères de voisinages, combinés aux critères spectraux** (pour la distinction des types 'pi'), **sont les plus adaptés** à l'identification des glissements de terrain du bassin de Barcelonnette. Cependant, les classifications testées surestiment beaucoup le nombre de glissements de terrain identifiés par la méthode experte. L'utilisation d'autres paramètres de traitement d'images et la recherche d'intervalles de valeurs plus précis pourrait permettre d'affiner la classification et d'avoir une identification moins surestimée.

Le test **d'images de résolutions spatiales et de caractéristiques spectrales différentes** a montré que les paramètres de segmentation doivent être adaptés en fonction de l'image pour retrouver des régions de taille adaptée aux objets à identifier. Une résolution trop faible (2,5 m) ne permet pas l'identification des glissements de terrain. De plus, les critères spectraux intervenants dans certaines étapes de la méthode (i.e. classification des types 'pi', critère de voisinage), les résultats changent selon que l'image soit en couleur ou en infrarouge et les intervalles de valeurs doivent être adaptés.

L'utilisation de **caractéristiques topologiques et contextuelles** (jeu entre les différentes échelles de segmentation) pourrait également apporter beaucoup à la méthode. Il nous semble donc intéressant de continuer la recherche en testant des méthodes prenant en compte ce genre de critères.

Un autre point de recherche à continuer serait la **distinction entre glissements, zones d'ablation et zones d'accumulation**. En effet, les résultats de nos tests montrent que la taille ne suffit pas à distinguer ces trois éléments. En affinant les recherches de paramètres de forme, il pourrait être possible, à terme, d'obtenir une classification automatique classifiant les objets en glissements, zones d'ablation et zones d'accumulation avec plus de précision.

Il serait intéressant de faire des prospections en ce qui concerne la classification automatique des glissements selon leur type géomorphologique, par exemple en essayant d'établir des correspondances entre **types géomorphologiques** de glissements et types 'pi'. Le paramètre de forme pourrait également intervenir pour l'identification des types géomorphologiques de glissements (e.g. les glissements translationnels sont plutôt allongés, de forme qui se rapproche plus d'un rectangle, les glissements rotationnels sont plus compacts et plus arrondis).

En plus des perspectives de recherche énoncées ci-dessus (i.e. utilisation d'autres paramètres, affinement des intervalles de valeurs, utilisation de caractéristiques topologiques et contextuelles, distinction entre glissements, zones d'ablation et zones d'accumulation, exploitation de la multirésolution, identification des types géomorphologiques de glissements) l'application des étapes 2 et 3 **à l'échelle locale** en utilisant l'image LiDaR disponible pour le glissement-coulée de La Valette reste à réaliser et permettrait peut être de meilleurs résultats quand à la caractérisation car demande une résolution spatiale moins précise.

Bibliographie

- Argialas D.P., Tzotsos A.**, 2006. Automatic extraction of physiographic features and alluvial fans in Nevada, USA, from digital elevation models and satellite imagery through multiresolution segmentation and object-oriented classification. *Proceedings of ASPRS 2006 Annual Conference*, Reno, Nevada, May 1-5, 2006, 10 p.
- Boulaassal H.**, 2008. Classification orientée objets des images satellites. Approche adoptée par le logiciel eCognition. *Cours de Master 2, Faculté de Géographie et d'Aménagement, Université Louis Pasteur, Strasbourg*, 17 p.
- Casson B., Delacourt C., Baratoux D., Allemand P.**, 2003. Seventeen years of the "La Clapière" landslide evolution analysed from ortho-rectified aerial photographs. *Engineering Geology*, 68 (2003), pp. 123-139.
- Casson B., Delacourt C., Allemand P.**, 2005. Contribution of multi-temporal remote sensing images to characterize landslide slip surface – Application to the La Clapière landslide (France). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 5 (2005), pp. 425-437.
- Chang K.T., Liu J.K.**, 2004. Landslide features interpreted by neural network method using a high-resolution satellite image and digital topographic data. *Geo-Imagery Bridging Continents*, 20th ISPRS Congress, 12-23 July 2004 Istanbul, Turkey, Commission 7, 6 p.
<http://www.isprs.org/istanbul2004/comm7/papers/114.pdf>
- Chondroyannis P.**, 1992. Ubaye, la forêt reconstruite. Le sentier de découverte du Riou-Bourdoux. *Office National des Forêts, Syndicat Intercommunal à Vocation Multiple de la Vallée de l'Ubaye, Destination Ubaye*, 112p.
- Definiens Imaging**, 2006. Definiens Professionnal 5 Reference Book. *Definiens AG*, 122 pg.
- Delacourt C., Allemand P., Casson B., Vadon H.**, 2004. Velocity field of the "La Clapière" landslide measured by the correlation of aerial and QuickBird satellite images. *Geophysical Research Letters*, 31 (2004), L15619, 5 p.
- Dikau R., Brunsten D., Schrott L., Ibsen M.-L.**, 1996 (edited by). Landslide recognition. Identification, movement and causes. *Wiley*, 251 p.
- Etienne D.**, 2007. Evaluation quantitative et cartographie du risque « glissement de terrain ». Application au Bassin de Barcelonnette (Alpes de Haute Provence, France). *Mémoire de Master 2 Recherche Géosciences, Environnement, Risques, Université Louis Pasteur, Strasbourg*, 45 p.
- Farina P., Colombo D., Fumagalli A., Marks F., Moretti S.**, 2006. Permanent scatterers for landslide investigations: outcomes from the ESA-SLAM project. *Engineering Geology*, 88 (2006), pp. 200-217.
- Flageollet**, 1988. Les mouvements de terrain et leur prévention. *Masson*, 224 p.
- Girard M.-C., Girard C.M.**, 1999. Traitement des données de télédétection. *Dunod*, 530 p.
- Grandjean G., Pennetier C., Bitri A., Meric O., Malet J.-P.**, 2006. Caractérisation de la structure interne et de l'état hydrique de glissements argilo-marneux par tomographie géophysique : l'exemple du glissement-coulée de Super-Sauze. *C.R. Science*, 338 (2006), 9p.
- Hervas J., Barredo J.I., Rosin P.L., Pasuto A., Mantovani F., Silvano S.**, 2003. Monitoring landslides from optical remotely sensed imagery: the case history of Tessina landslide, Italy. *Geomorphology*, 54 (2003), pp. 63-75.
- Iwahashi J., Watanabe S., Furuya T.**, 2001. Landform analysis of slope movements using DEM in Higashikubiki area, Japan. *Computers and Geosciences*, 27 (2001), pp. 851-865.

Kalbermatten M., 2004. Détermination d'indicateurs géomorphologiques à partir de données altimétriques laser. *Travail de diplôme, hiver 2003-2004, Laboratoire de Systèmes d'Information Géographique*, 56 p. + annexes.

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement, 1999. L'utilisation de la photo-interprétation dans l'établissement des plans de prévention des risques liés aux mouvements de terrain. *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*, 128 p.

Lehre A., 2003. Landslide recognition and mapping. *Geomorphology lab, Humboldt State University Department of Geology*, 5 p.

Le Mignon G., Cojean R., 2002. Rôle de l'eau dans la remobilisation de glissements-coulées (Barcelonnette, France). *Landslides*, 2002, pp. 239-244.

Malet J.-P., 2003. Les 'glissements de type écoulement' dans les marnes noires des Alpes du Sud. Morphologie, fonctionnement et modélisation hydro-mécanique. *Thèse de Doctorat, Université Louis Pasteur, Strasbourg I*, 363 p.

Malet J.-P., Maquaire O., Calais E., 2002. The use of Global Positioning System techniques for the continuous monitoring of landslides: application to the Super-Sauze earthflow (Alpes-de-Haute-Provence, France). *Geomorphology*, 43 (2002), pp. 33-54.

Mantovani F., Soeters R., Van Westen C.J., 1996. Remote sensing techniques for landslide studies and hazard zonation in Europe. *Geomorphology*, 15 (1996), pp. 213-225.

Maquaire O., 2002. Aléas géomorphologiques (mouvements de terrain). Processus, fonctionnement, cartographie. *Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches, Université Louis Pasteur, Strasbourg*, 219 p.

McKean J., Roering J., 2004. Objective landslide detection and surface morphology mapping using high-resolution airborne laser altimetry. *Geomorphology*, 57 (2004), pp. 331-351.

Metternicht G., Hurni L., Gogu R., 2005. Remote sensing of landslides : An analysis of the potential contribution to geo-spatial systems for hazard assessment in mountainous environments. *Remote Sensing of Environment*, 98 (2005) pp. 284-303.

Molenaar H., 2005. Automatic recognition of geomorphologic features. A process-based approach for the classification of landslides using remote-sensing data sources. *Thesis, IBED-Physical Geography, Section Computational Bio- and Physical Geography, Universiteit van Amsterdam*, 31 p.

Moretti S., Catani F., Bartolomei A., Kukavcic M., Tofani V., Farina P., Marks F., 2005. Landslide hazard mapping at a basin scale using remote-sensing data and artificial neural networks. *FRINGE 2005*, 2p.

Nichol J., Wong M.S., 2005. Detection and interpretation of landslides using satellite images. *Land Degradation & Development*, 16 (2005), pp. 243-255.

Schulz W.H., 2004. Landslides mapped using LIDAR imagery, Seattle, Washington. *U.S. Geological Survey Open-File Report 2004-1396, U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey*, 11 p. <http://pubs.usgs.gov/of/2004/1396/>

Squarzoni C., Delacourt C., Allemand P., 2003. Nine years of spatial and temporal evolution of the La Valette landslide observed by SAR interferometry. *Engineering Geology*, 68 (2003), pp. 53-66.

Tarchi D., Casagli N., Fanti R., Leva D.D., Luzi G., Pasuto A., Pieraccini M., Silvano S., 2003. Landslide monitoring by using ground-based SAR interferometry: an example of application to the Tessina landslide in Italy. *Engineering Geology*, 68 (2003), pp. 15-30.

Thiery Y., 2007. Susceptibilité aux « mouvements de versant » dans la Bassin de Barcelonnette (Alpes du Sud, France) : cartographie morphodynamique, analyse spatiale et modélisation probabiliste. *Thèse de Doctorat, Université de Caen/Basse-Normandie*, 442 p.

Van Asselen S., Seijmonsbergen A.C., 2006. Expert-driven semi-automated geomorphological mapping for a mountainous area using a laser DTM. *Geomorphology*, 78 (2006), pp 309-320.

Van Westen C.J., 2002. Remote sensing and geographic information systems for natural disaster management in Skidmore A. (ed.), 2002. *Environmental modelling with GIS and remote sensing*. Taylor & Francis, London, pp. 200-226.

Van Westen C.J., Getahun F.L., 2003. Analyzing the evolution of the Tessina landslide using aerial photographs and digital elevation models. *Geomorphology*, 1347 (2003), pp. 1-13.

Weber C., Puissant A., Evelpidou N., Lobry J., 2005. Assessing large scale erosion susceptibility by combining remote sensing data and fuzzy logic modelling. Application to the Syros Island, Cycladic Archipelagos, Greece. *Proceedings of the 25th EARSEL Symposium 2005*, 6-9 juin 2005, Porto, Portugal, 329-337.

www.slamservice.info (site officiel du projet SLAM de l'ESA)

www.definiens.com (site officiel de Definiens Imaging, promoteur du logiciel eCognition)

Index des sigles

ASTER :	Advanced Spaceborne Thermal Emission and reflection Radiometer
ASPRS :	American Society for Photogrammetry and Remote Sensing
CEOS :	Committee on Earth Observation Satellites
EARSeL :	European Association of Remote Sensing Laboratories
ERS :	European Remote Sensing satellite system
ESA :	European Space Agency
GLCM :	Grey Level Co-occurrence Matrix
GPS :	Global Positioning System
HazNETH :	natural Hazards research Network at ETH Zurich
IGARSS :	International Geoscience and Remote Sensing Symposium
InSAR :	Interférométrie SAR
IPGS :	Institut de Physique du Globe de Strasbourg
IR :	InfraRouge
ISPRS :	International Society for Photogrammetry and Remote Sensing
LCPC :	Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
LiDAR :	Light Detection and Ranging
LISA :	Linear SAR
LIVE :	Laboratoire Image, Ville et Environnement
MATE :	Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement
MNT :	Modèle Numérique de Terrain
PAN :	Panchromatique
PPRN :	Plan de Prévention des Risques Naturels prévisibles
RTM :	service de Restauration des Terrains en Montagne
SAR :	Synthetic Aperture Radar
SIG :	Système d'Information Géographique
SLAM :	Service for Landslide Monitoring
SPOT :	Satellite Pour l'Observation de la Terre
USGS :	United States Geological Survey
VHR :	Very High Resolution
XS :	MultiSpectral

Annexes

Annexe 1 : Evaluation et gestion des risques naturels en milieu montagnard : contexte législatif et scientifique.....	52
Annexe 2 : Contribution des techniques de télédétection à l'évaluation de l'aléa en montagne	53
Annexe 3 : Caractérisation d'un glissement de terrain à partir d'un couple stéréoscopique de photographies aériennes	54
Annexe 4 : Suivi de l'évolution d'un glissement de terrain à partir de photographies aériennes.....	54
Annexe 5 : Classification des mouvements de terrain	55
Annexe 6 : Localisation et principaux traits morphostructuraux du bassin de Barcelonnette	56
Annexe 7 : Typologie, caractéristiques et distribution par taille des mouvements de terrain du bassin de Barcelonnette	57
Annexe 8 : Types de fissures ou crevasses dans un glissement.....	58
Annexe 9 : Indicateurs de zone d'ablation recensés dans la littérature.	59
Annexe 10 : Indicateurs de zone d'accumulation recensés dans la littérature.	59
Annexe 11 : Schéma descriptif d'un grand glissement	60
Annexe 12 : Grille de photo-interprétation des glissements de terrain pour le bassin de Barcelonnette	61
Annexe 13 : Grille de photo-interprétation des zones d'ablation pour le bassin de Barcelonnette.....	63
Annexe 14 : Grille de photo-interprétation des zones d'accumulation pour le bassin de Barcelonnette	65
Annexe 15 : Grille de photo-interprétation des glissements actifs ayant une surface supérieure à 100000m ² pour le bassin de Barcelonnette.....	67
Annexe 16 : Typologie des zones d'ablation par photo-interprétation pour le bassin de Barcelonnette	70
Annexe 17 : Typologie des zones d'accumulation par photo-interprétation pour le bassin de Barcelonnette.....	71
Annexe 18 : Répartition des 217 glissements de terrains et des 50 zones d'ablation et zones d'accumulation par type 'pi'.	72
Annexe 19 : Paramètres 'eCognition' retenus pour être utilisés pour les classifications.....	73
Annexe 20 : Exemple d'attribution de paramètres et d'une fonction d'appartenance à la classe d'occupation du sol 'sol nu – marnes noires' avec le logiciel eCognition.....	74
Annexe 21 : Intervalles de valeurs et fonctions d'appartenances des paramètres de forme, de texture et de voisinage utilisés pour les tests.	74

Annexe 1 : Evaluation et gestion des risques naturels en milieu montagnard : contexte législatif et scientifique.

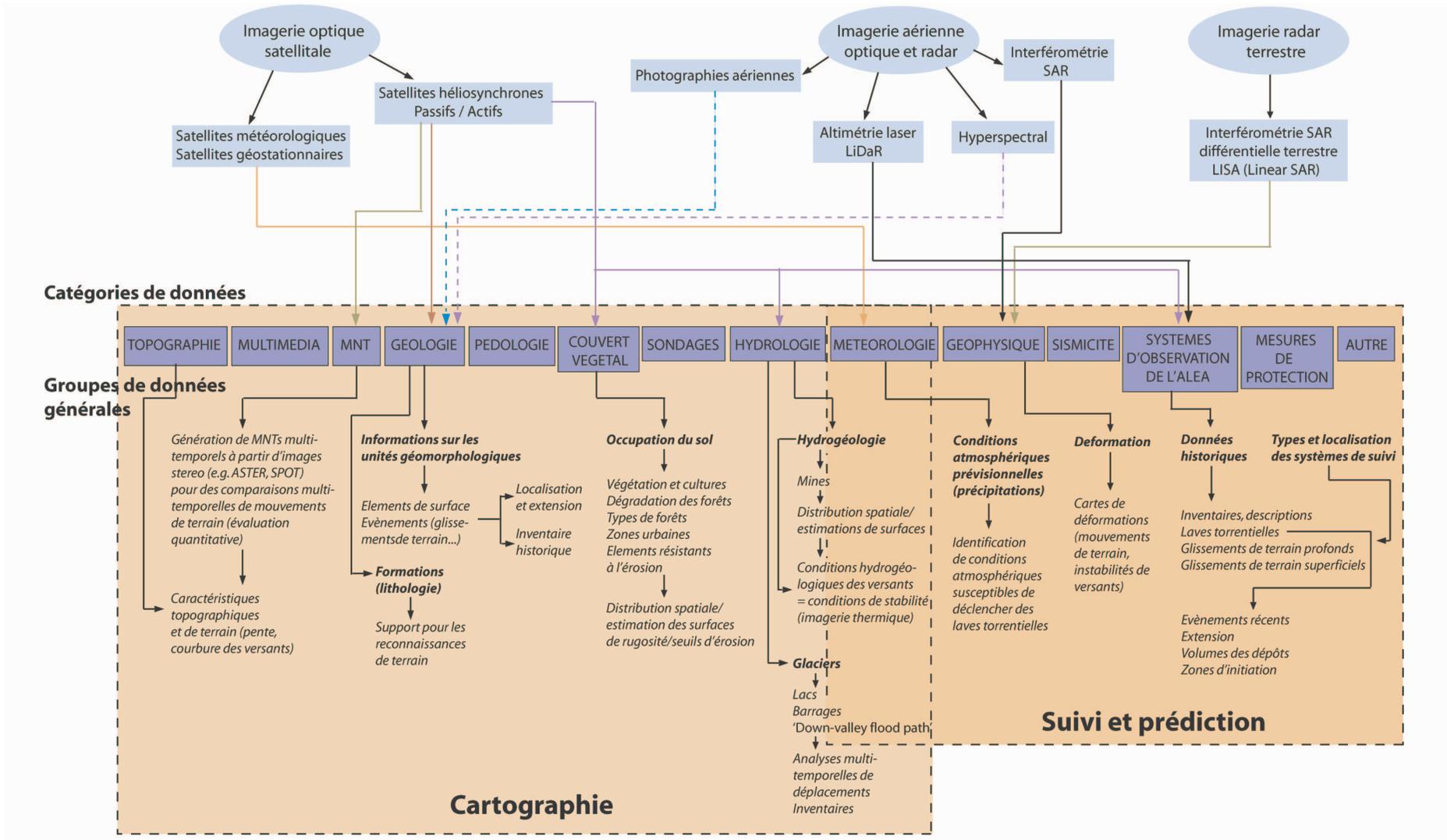
Contexte législatif français

Le milieu montagnard est fortement affecté par des risques naturels variés allant des crues torrentielles aux avalanches, ou par tous types de mouvements de terrain (écroulements, chutes de blocs, glissements de terrain, laves torrentielles). Dans les Alpes françaises, la gestion du risque en montagne s'est développée de manière forte au courant du siècle dernier en commençant par les travaux de correction torrentielle entrepris par le Service de Restauration des Terrains en Montagne (RTM) au début du 20^{ème} siècle (Chondroyannis, 1992), puis avec une prise de conscience de l'importance des risques en montagne à la suite de catastrophes majeures, comme par exemple l'avalanche de Val d'Isère en 1970. En 1995, la loi Barnier établit des **Plans de Prévention des Risques Naturels prévisibles** (PPRN) fondés sur la mise en place de cartes de zonation du risque (MATE, LCPC, 1999). Ces cartes, qui déterminent si le risque dans une zone est faible, moyen ou fort, s'appuient en grande partie sur l'évaluation de l'aléa par des **cartes d'inventaire**. Ces cartes d'inventaire recensent les événements ayant eu lieu ou existant actuellement (e.g. laves torrentielles ayant eu lieu ou glissements de terrain actifs, dans le cas des risques gravitaires) et occupent une place particulièrement importante dans les Plans de Prévention des Risques.

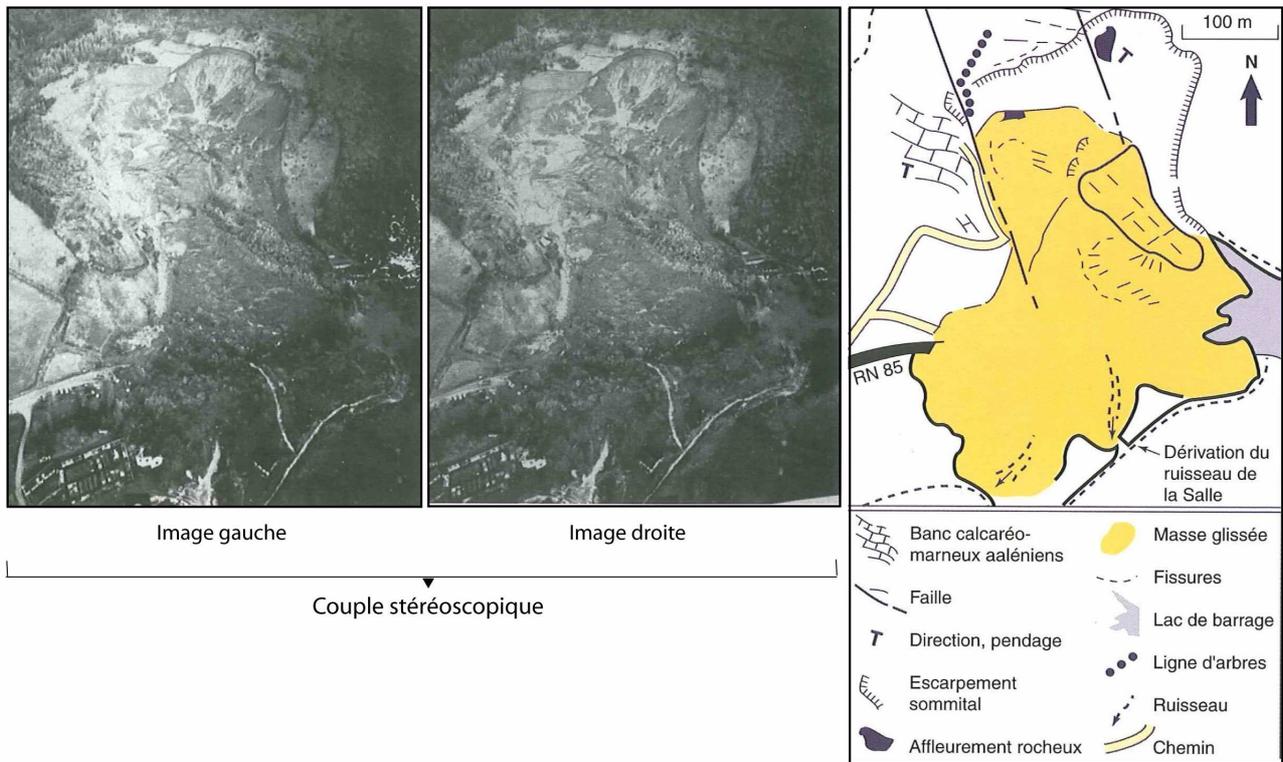
Contexte scientifique

Les recherches actuelles concernant les risques naturels en montagne sont nombreuses et touchent beaucoup de domaines scientifiques. Pour les Alpes françaises, plusieurs projets de recherche européens se sont penchés sur la question ces 30 dernières années. Deux exemples sont les projets ALARM (2001-2004) et Mountain Risks (2007-2010). Un des grands buts de ces recherches est de faire avancer les connaissances sur le **fonctionnement complexe des processus physiques en milieu montagnard** et de développer de **nouvelles techniques de cartographie et d'analyse de l'aléa**.

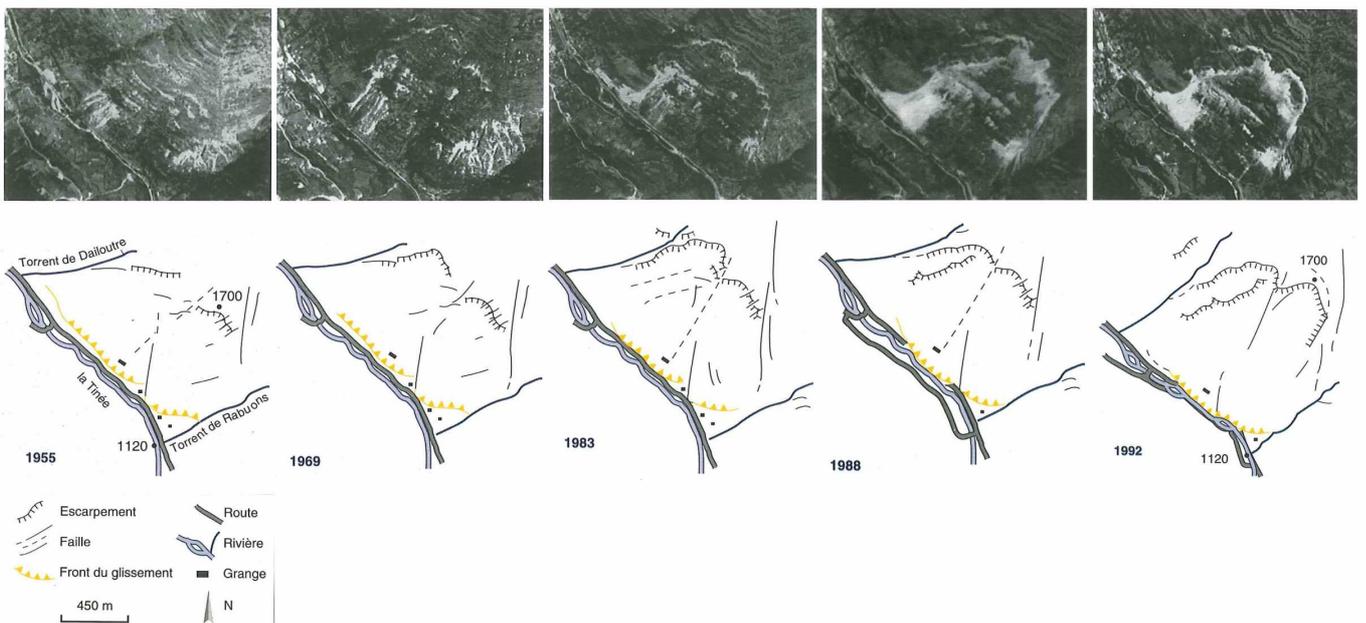
Annexe 2 : Contribution des techniques de télédétection à l'évaluation de l'aléa en montagne (exemple des techniques utilisées pour le projet HazNETH ; traduit et modifié de Metternicht et al., 2005).



Annexe 3 : Caractérisation d'un glissement de terrain à partir d'un couple stéréoscopique de photographies aériennes. Exemple du glissement de terrain de la Salle-en-Beaumont (Isère) (modifié de MATE, LCPC, 1999).



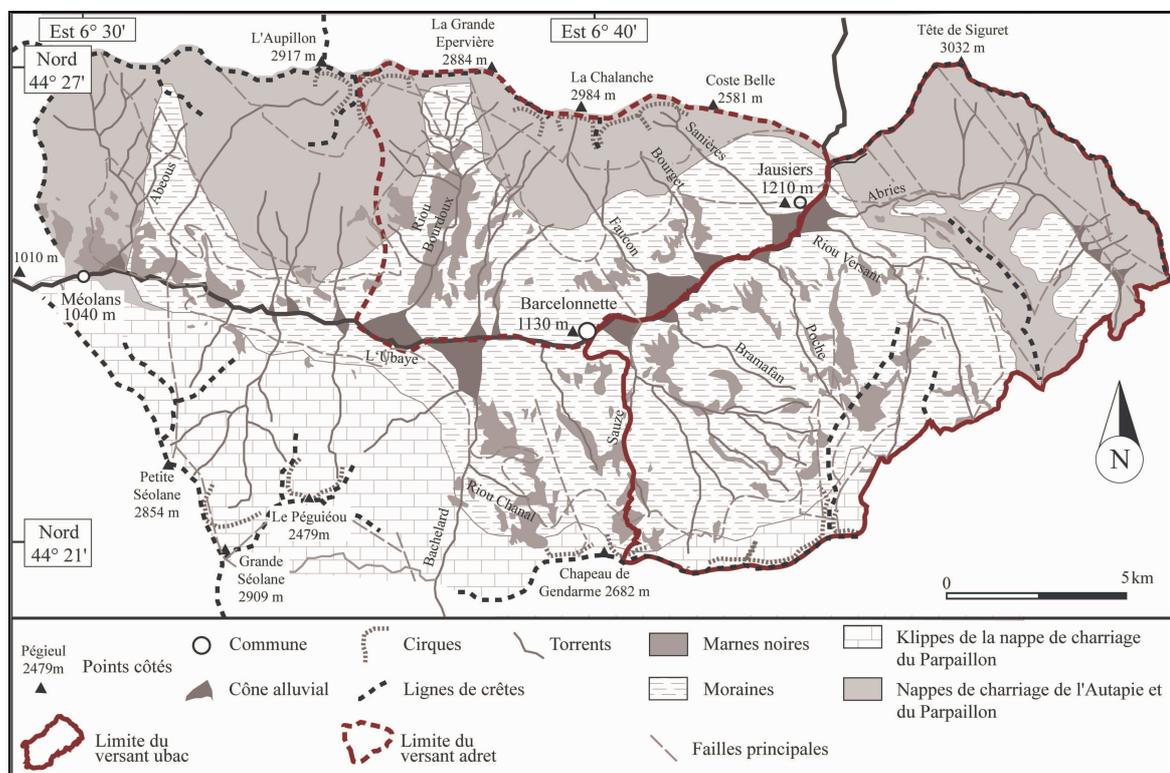
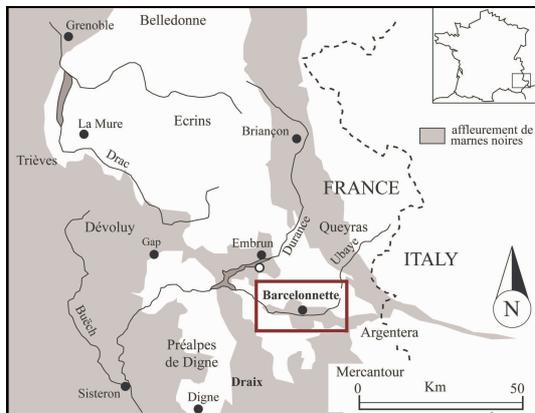
Annexe 4 : Suivi de l'évolution d'un glissement de terrain à partir de photographies aériennes. Exemple du glissement de la Clapière (Saint-Etienne-de-Tinée, Alpes-Maritimes) de 1955 à 1992. Photographies IGN et croquis de photo-interprétation (modifié de MATE, LCPC, 1999)



Annexe 5 : Classification des mouvements de terrain (Maquaire, 2002, adapté de Dikau et al. (1997)).

N°	FRANÇAIS	English
1	Chute (de bloc, de pierre, de débris, de sol) Écroulement rocheux	Fall (stone, pebble, boulder, debris, soil)
2	Basculement (de roche, de débris, de sol)	Topple (rock, soil, tilting)
3a	Glissement rotationnel : - Glissement simple (rotationnel), - Glissements emboîtés, - Glissements successifs	Slide (rotational): - Single slide: slump (popular), rotational slip, rotational slide, - Multiple slide: multiple rotational landslide, multiple slump, - Successive slide: successive rotational landslide, successive slumping.
	Glissement translationnel : - Glissement de bloc, <i>glissement banc sur banc</i> - Glissement de sol, - Glissement rocheux, - Glissement de débris, - Glissement évoluant en coulée boueuse (foirage)	Slide (translational): - Block slide: planar rock slide (rock block slide), slab slide (for soil/earth), - Slab slide: debris block slide, soil block slide, earth block slide, sheet slide, flake slide, - Rock slide, - Debris slide: shallow translational slides, sheet slides, soil slips, - Mudslide:
4	Déplacement latéral : - Déplacement latéral de roches, - Déplacement latéral de sol	Lateral spreading: - Rock spreading: lateral spreading, gravitational spreading, gravity faulting, block-type slope movement, cambering and valley bulging, - Soil (Debris) spreading: sudden spreading failure, lateral soil spreading, quick clay sliding, bottle-necked flow (Canadian usage), quick clay flow, soil liquefaction sliding.
5	Écoulement : - Déformation lente de versant rocheux, fauchage, - Coulées boueuses, coulées de sable - <i>Laves torrentielles</i> - <i>Coulées de débris</i>	Flow: - Rock flow (sackung): sagging, rock creep, deep seated gravitational creep, - Soil flow (mudflow): mudflow, alpine mudflow, sandflow. - Debris flow: mudflow (old usage), lahar (volcanic mudflow), - Debris avalanche
6	Phénomène complexe et composite : - Eboulement, écroulement de grande ampleur (d'extension catastrophique), - Glissement-coulée très rapide - <i>Glissement-coulée lent</i>	Complex and compound: - Rock avalanche: rockfall avalanche, rock-slide avalanche, rockfall-debris avalanche, - Flow slide - <i>Earthflow</i>

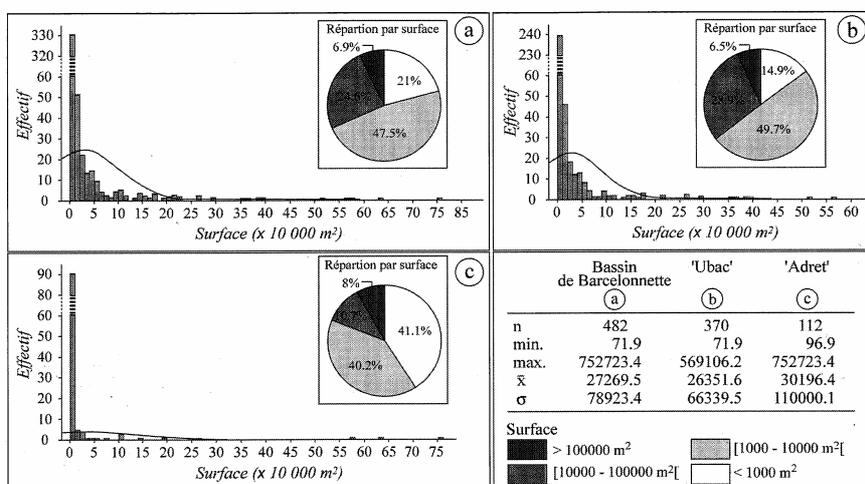
Annexe 6 : Localisation et principaux traits morphostructuraux du bassin de Barcelonnette (Thiery, 2007)



Annexe 7 : Typologie, caractéristiques et distribution par taille des mouvements de terrain du bassin de Barcelonnette (Thiery, 2007)

Ab. = Abréviation ; α = pentes généralement observées sur le terrain ; Ep. = Classes d'épaisseur ; n.d = non déterminé ; TS= Très superficiel (< 2m) ; S = Superficiel (2-6 m) ; P = Profond (6-10 m) ; Très profond (> 10m) ; Ac = Activité estimée : F = Fossile ; L= Latent ; AI = Actif intermittent ; AC = Actif continu ; *** = Observé sur la totalité du bassin de Barcelonnette ; ** = Observé essentiellement sur le versant Ubac ; * = observé essentiellement sur le versant Adret ; ^d = observé à Draix.

Type de 'mouvement de versant'	Ab.	Caractéristiques principales	α (°)	Ep.	Ac.	
(i) Ecoulement (Rock-fall)**	EC	Déclenchement dans les flyschs, proche des failles, la zone de déclenchement est verticale de forme linéaire ou en dièdre, la zone d'accumulation comporte des blocs hétérométriques. Localisé principalement dans la vallée de l'Abriés.	> 30	n.d	AI-AC	
(ii) Glissement banc sur banc (rock block slide)*** ^d	GBB	Déclenchement dans les marnes noires dénudées, la zone de déclenchement est verticale de forme linéaire ou en dièdre, la zone d'accumulation est composée de blocs et de débris de marnes. Localisé dans les secteurs dénudés ou dans les 'badlands'.	30-40	TS-S	AI-AC	
(iii) Glissement translationnel rocheux (rock slide)**	GTR	Déclenchement dans les flyschs, la zone de déclenchement est de forme semi-circulaire, la zone d'accumulation est légèrement bosselée. Localisé principalement dans la vallée de l'Abriés.	15-20	TP	F	
(iv) Glissement complexe et composite (complex slide)***	GC	Déclenchement dans les marnes noires, l'escarpement est composé d'un GBB, la zone d'accumulation est composée d'une coulée Localisé dans les secteurs dénudés de marnes noires.	20-30	P-TP	F-L-AI-AC	
(v) Glissement translationnel (translational slide)	Superficiel de berge (débris slide)***	TSB	Déclenchement dans les moraines parfois à l'interface avec la roche sous-jacente, escarpement semi-circulaire ou rectangulaire. Localisé le long des berges de torrents.	15-50	TS-S	AI-AC
	Superficiel d'interfluve (débris slide)**	TSI	Déclenchement dans les moraines parfois à l'interface avec la roche sous jacente : escarpement semi-circulaire ou rectangulaire, localisé sur les interfluves.	15-40	TS-S	L-AI-AC
	Complexe (complex translational slide)***	TC	Déclenchement dans les moraines, à l'interface avec la roche sous jacente et/ou dans les marnes noires, se compose d'un glissement à composante verticale en amont (généralement un RI) et d'un mouvement à composante horizontale en aval (un glissement translationnel), la zone de déclenchement est semi-circulaire ou rectangulaire. Localisé sur les interfluves.	15-30	S-P	F-L-AI-AC
(vi) Glissement rotationnel (rotational slide)	De berge (rotational slide)**	RB	Déclenchement dans les moraines parfois dans les colluvions, escarpement semi-circulaire, une contre-pente caractéristique se situe sous l'escarpement principal, corps du glissement parfois composé d'une coulée. Localisé le long des berges de torrents.	10-40	TS-S	L-AI-AC
	D'interfluve (rotational slide)***	RI	Déclenchement dans les moraines, escarpement semi-circulaire, une contre-pente caractéristique se situe sous l'escarpement principal, corps du glissement parfois composé d'une coulée, peut être plus profond que les RI. Localisé sur les interfluves.	10-40	S-P	F-L-AI-AC
(vii) Solifluxion (solifluxion)**	S	Déclenchement dans les moraines, généralement au dessus de 1800 m d'altitude, pas de forme spécifique, très superficiel.	10-20	S	AI-AC	



n = nombre de 'mouvements de versant' ; Taille de l'objet en m² : min = valeur minimum ; max. = valeur maximum ; \bar{x} = moyenne ; σ = écart-type.

Annexe 8 : Types de fissures ou crevasses dans un glissement (Flageollet, 1988)

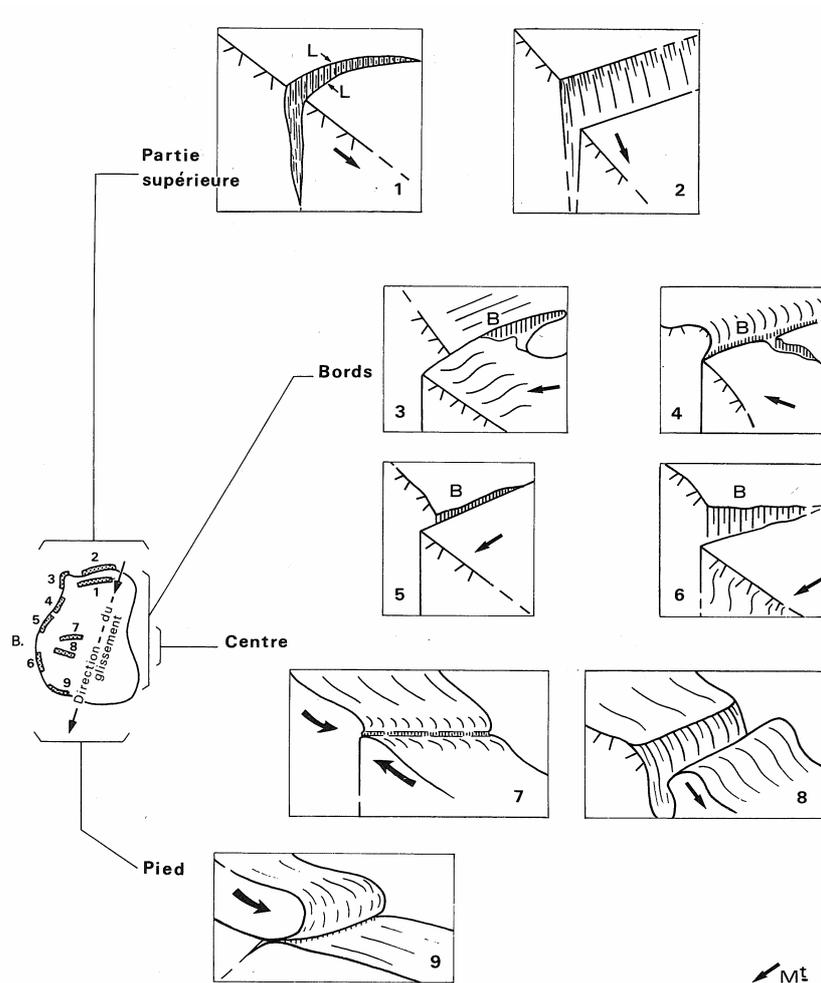


Fig. 87. — Types de fissures ou crevasses dans un glissement
(D'après J.-P. Bombard, 1968)

Fissures transversales : 1 : fissure de traction. L : lèvre (les deux lèvres sont à la même hauteur, l'écartement variable : fissure ou crevasse, disposition en arc de cercle). 2 : fissure de cisaillement, étendue, avec escarpement, lèvres décalées verticalement plus ou moins éloignées (crevasse). 3, 4, 5, 6 : **fissures longitudinales.** 3 : compression oblique. 4 : cisaillement et torsion. 5 : cisaillement et friction. 6 : crevasse de cisaillement. 7, 8 : **fissures transversales.** 7 : compression. 8 : traction. 9 : fissure et crevasse fermées (bourrelet). Mt : direction du mouvement.

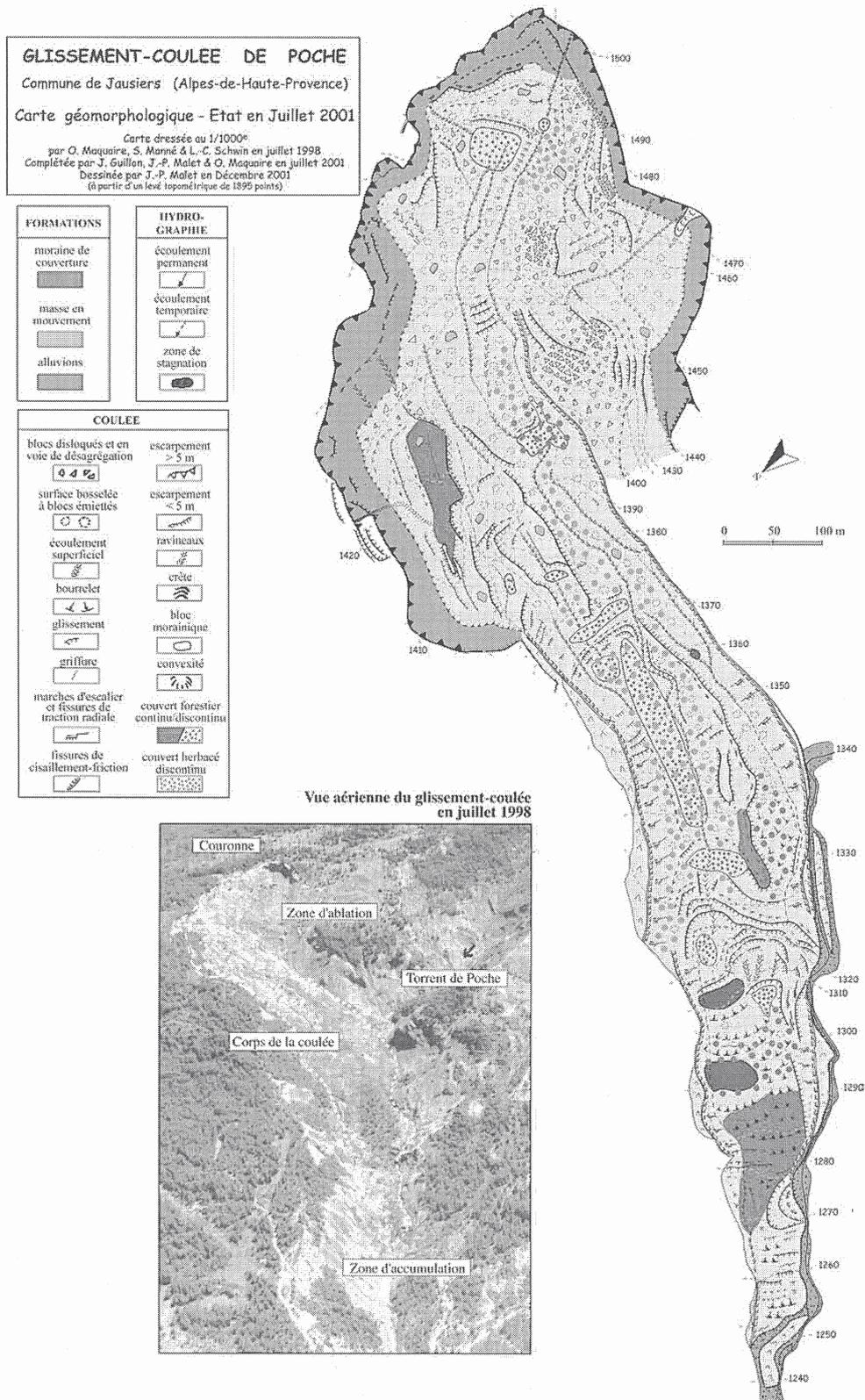
Annexe 9 : Indicateurs de zone d'ablation recensés dans la littérature.

	Indices	Indicateurs
Site	<i>Concavité</i> <i>Dépression</i>	Courbure
	<i>Sol dénudé</i>	Occupation du sol
	<i>Limite amont coïncide avec une route</i>	Situation
Objet	<i>En arc de cercle</i>	Forme
	<i>Escarpement de tête</i>	Forme incurvée vers l'amont Sol dénudé Texture homogène
	<i>Escarpements mineurs</i>	Forme incurvée vers l'amont Sol dénudé Sur le glissement Successifs
	<i>Fissures de régression</i>	Forme incurvée vers l'amont Sol dénudé A l'arrière du glissement
	<i>Fissures verticales et/ou transversales</i>	Verticales ou transversales Forme rectiligne Sol dénudé
	<i>Blocs, roches, débris, sol</i>	Perturbation de la surface Surface irrégulière en partie haute Surface plane en partie basse
	<i>Graben ou contre-pente sous l'escarpement</i>	Contre-pente
	<i>Présence de sources</i> <i>Zone humide en replat de glissement</i>	Humidité
	<i>Couvert végétal dégradé</i>	
	<i>Arbres allongés vers l'amont</i>	

Annexe 10 : Indicateurs de zone d'accumulation recensés dans la littérature.

	Indices	Indicateurs
Site	<i>Convexité</i>	Courbure
	<i>Surface perturbée</i>	Occupation du sol
	<i>Limite aval coïncide avec un cours d'eau ou une route</i>	Situation
Objet	<i>Étalée</i>	Forme
	<i>Lobes</i>	
	<i>Bourrelets frontaux</i>	Forme incurvée vers l'aval
	<i>Bossellement</i> <i>Bourrelets transversaux</i>	Perpendiculaires à la pente Stries de sol nu
	<i>Fissures latérales</i>	Sol dénudé Forme rectiligne Sens de la longueur
	<i>Fissures transversales au dessus de la limite aval</i>	Sol dénudé Forme rectiligne Sens de la largeur A la limite aval
	<i>Amas de blocs ou voile pierreux et pelouse alpine</i>	Texture hétérogène Blocs visibles Occupation du sol
	<i>Surface irrégulière, rugueuse, aspect chaotique</i>	Texture hétérogène Mélange sol/végétation
	<i>Petites flaques d'eau juste avant la pointe</i>	Humidité
	<i>Couvert végétal dégradé</i>	
<i>Arbres allongés vers l'aval</i>		

Annexe 11 : Schéma descriptif d'un grand glissement (exemple du glissement-coulée de Poche ; Malet, 2003)



Annexe 12 : Grille de photo-interprétation des glissements de terrain pour le bassin de Barcelonnette (réalisée à partir des 217 glissements actifs du versant ubac).

Type d'indice	Indice	Description des classes
Quantitatif	Surface	(1) < 1000 m ² (2)]1000m ² -20000m ² (3)]20000m ² -100000m ² (4) >100000m ²
	Longueur	(1) < 80 m (2) [80-200[m (3) >= 200 m
	Indice de compacité*	(1) <= 0,7 (glissement allongé dans le sens de la longueur (sens de la pente)) (2)]0,7-1,3] (glissement compact) (3) > 1,3 (glissement allongé dans le sens de la largeur (perpendiculairement à la pente))
Qualitatif	Présence de conifères	(4) < 30%** (5) [30%-70%[(6) >= 70%
	Présence de feuillus	(1) < 30% (2) [30%-70%[(3) >= 70%
	Présence de pelouse	(1) < 30% (2) [30%-70%[(3) >= 70%
	Présence de sol nu	(1) < 30% (2) [30%-70%[(3) >= 70%
	Présence de marnes noires	(1) < 30% (2) [30%-70%[(3) >= 70%
	Densité de végétation	(1) peu dense (présence de quelques arbres disséminés ou de quelques petits groupements d'arbres ou d'une pelouse ne couvrant le sol qu'à quelques endroits) (2) moyennement dense (sol visible au travers du couvert végétal) (3) dense (sol entièrement masqué par la végétation, arbres très rapprochés les uns des autres ou pelouse dense)
	Texture	(1) entièrement hétérogène (la totalité du glissement de texture hétérogène) (2) peu homogène (moins de 30% du glissement de texture homogène) (3) moyennement homogène (entre 30 et 70% du glissement de texture homogène) (4) très homogène (au moins 70% du glissement de texture homogène) (5) entièrement homogène (la totalité du glissement de texture homogène)
	Fissures	(1) absence (fissures non signalées par la reconnaissance de terrain) (2) non visibles (fissures signalées par la reconnaissance de terrain mais non visibles sur l'image) (3) visibles (fines saignées de sol nu visibles sur le glissement, généralement perpendiculaires à la pente)

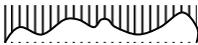
	Bossellement	(1) absence (2) non visible (3) visible	(bossellement non signalé par la reconnaissance de terrain) (bossellement signalé par la reconnaissance de terrain mais non visible sur l'image) (succession(s) de bosses allongées perpendiculairement à la pente, stries)
	Zone d'ablation	(1) non visible (2) visible (3) bien visible	(entièrement masquée par la végétation ou non différenciable de l'entourage (exemple : sol nu au sein d'une zone de sol nu, sans perturbation de la texture)) (présence d'au moins un signe de perturbation de la surface (zones de sol nu au sein d'une végétation dense, zones de texture perturbée, de mélange sol nu – végétation, zones au couvert végétal différent du couvert environnant) mais pas de délimitation nette de la zone) (zone entièrement démarquée de l'entourage (occupation du sol différente, texture différente), présence de zones de sol nu de texture homogène, escarpement visible)
	Zone d'accumulation	(1) non visible (2) visible (3) bien visible	(entièrement masquée par la végétation ou non différenciable de l'entourage (exemple : sol nu au sein d'une zone de sol nu, sans perturbation de la texture)) (présence d'au moins un signe rendant la zone visible (zones de sol nu au sein d'une végétation dense, zones de texture perturbée, de mélange sol nu – végétation, zones au couvert végétal différent du couvert environnant) mais pas de délimitation nette de la zone) (zone entièrement démarquée de l'entourage (occupation du sol différente, texture différente), forte perturbation de la surface (texture très hétérogène))
	Escarpement	(1) non visible (2) irrégulier (3) rectiligne (4) en arc de cercle	(escarpement entièrement masqué par la végétation ou non différenciable de l'entourage) (zone de sol nu ou saignée de forme irrégulière visible à la limite amont de la zone d'ablation) (zone de sol nu ou saignée de forme rectiligne visible à la limite amont de la zone d'ablation) (zone de sol nu ou saignée en arc de cercle visible à la limite amont de la zone d'ablation)
	Limite zone d'ablation / zone d'accumulation	(1) non visible (2) visible (3) bien visible	(aucune différenciation possible entre les deux zones (même occupation du sol, même texture, même densité de végétation...)) (différenciation possible entre les deux zones (différence d'occupation du sol, de densité de végétation...) mais pas de limite nette) (limite nette entre les deux zones, marquée soit par une zone de sol nu dans la végétation, soit par un net changement d'occupation du sol d'une zone à l'autre)
	Proximité cours d'eau	(1) non (2) oui	(aucun cours d'eau à proximité) (glissement situé à moins de 10m d'un cours d'eau)
	Proximité route	(1) non (2) oui	(aucune route à proximité) (glissement situé à moins de 10m d'une route)

* Indice de compacité : largeur moyenne du glissement / longueur du glissement

** Pourcentage du glissement couvert par le type d'occupation du sol mentionné (e.g. conifères).

Annexe 13 : Grille de photo-interprétation des zones d'ablation pour le bassin de Barcelonnette (réalisée à partir des 50 glissements représentatifs des glissements actifs les plus fréquents du versant ubac (i.e. ayant une surface comprise entre 1000 et 20000m²)).

Type d'indice	Indice	Description des classes
Quantitatif	Surface	(1) $\leq 1200 \text{ m}^2$ (2)]1200-2500] m^2 (3) $> 2500 \text{ m}^2$
	Longueur	(1) $\leq 30 \text{ m}$ (2)]30-75]m (3) $> 75\text{m}$
	Largeur	(1) $< 50\text{m}$ (2)]50-95[m (3) $\geq 95\text{m}$
	Indice de compacité de la zone d'ablation*	(1) $\leq 0,7$ (zone d'ablation allongée dans le sens de la longueur du glissement (sens de la pente)) (2)]0,7-1,3] (zone d'ablation compacte) (3) $> 1,3$ (zone d'ablation allongée dans le sens de la largeur du glissement (perpendiculairement à la pente))
Qualitatif	Présence de conifères	(1) $< 30\%^{**}$ (2)]30%-70%[(3) $\geq 70\%$
	Présence de feuillus	(1) $< 30\%$ (2)]30%-70%[(3) $\geq 70\%$
	Présence de pelouse	(1) $< 30\%$ (2)]30%-70%[(3) $\geq 70\%$
	Présence de sol nu	(1) $< 30\%$ (2)]30%-70%[(3) $\geq 70\%$
	Présence de marnes noires	(1) $< 30\%$ (2)]30%-70%[(3) $\geq 70\%$
	Densité de végétation	(1) peu dense (présence de quelques arbres disséminés ou de quelques petits groupements d'arbres ou d'une pelouse ne couvrant le sol qu'à quelques endroits) (2) moyennement dense (sol visible au travers du couvert végétal) (3) dense (sol entièrement masqué par la végétation, arbres très rapprochés les uns des autres ou pelouse dense)
	Texture	(1) hétérogène (moins de 30% du glissement de texture homogène) (2) moyennement homogène (entre 30 et 70% du glissement de texture homogène) (3) homogène (au moins 70% du glissement de texture homogène)
	Surface	(1) masquée (surface de la zone d'accumulation masquée par la végétation) (2) lisse (surface plane, non perturbée, sol nu ou pelouse de texture homogène) (3) perturbée (surface comportant des zones perturbées, de texture hétérogène, présence de blocs) (4) fortement perturbée (topographie chaotique, surface irrégulière, de texture très hétérogène, mélange entre sol nu et végétation)

Escarpement de tête	(1) non visible	(escarpement entièrement masqué par la végétation ou non différenciable de l'entourage)
	(2) partiellement visible	(escarpement visible à certains endroits par des zones de sol nu au sein de la végétation)
	(3) irrégulier	(zone de sol nu ou saignée de forme irrégulière visible à la limite amont de la zone d'ablation) 
	(4) rectiligne	(zone de sol nu ou saignée de forme rectiligne visible à la limite amont de la zone d'ablation) 
	(5) en arc de cercle	(zone de sol nu ou saignée en arc de cercle visible à la limite amont de la zone d'ablation) 
Escarpements mineurs	(1) absence	(escarpements mineurs non signalés par la reconnaissance de terrain)
	(2) non visibles	(escarpements mineurs signalés par la reconnaissance de terrain mais non visibles sur l'image)
	(3) visibles	(présence de fines zones de sol nu de forme arquée au sein de la zone d'ablation)
Fissures	(1) absence	(fissures non signalées par la reconnaissance de terrain)
	(2) non visibles	(fissures signalées par la reconnaissance de terrain mais non visibles sur l'image)
	(3) visibles	(présence de fines saignées de sol nu de forme rectilignes transversales sur la zone d'ablation ou longitudinales au niveau de la couronne)
Fissures de régression	(1) absence	(fissures non signalées par la reconnaissance de terrain)
	(2) non visibles	(fissures signalées par la reconnaissance de terrain mais non visibles sur l'image)
	(3) visibles	(présence de fines saignées de sol nu de forme arquée à l'arrière de la zone d'ablation)
Bossellement	(1) absence	(bossellement non signalé par la reconnaissance de terrain)
	(2) non visible	(bossellement signalé par la reconnaissance de terrain mais non visible sur l'image)
	(3) visible	(topographie ondulée, succession(s) de bosses allongées perpendiculairement à la pente formant des stries)
Limite englobantes	(1) non visible	(pas de différenciation possible entre l'entourage et la zone d'ablation)
	(2) visible	(limites de la zone d'ablation tout juste visibles mais pas nettes)
	(3) bien visible	(présence de limites nettes entre la zone d'ablation et l'entourage)
Route à la limite amont de la zone	(1) absence	
	(2) présence	

* Indice de compacité de la zone d'ablation : largeur de la zone d'ablation / longueur de la zone d'ablation.

** Pourcentage de la zone d'ablation couvert par le type d'occupation du sol mentionné (e.g. conifères).

Annexe 14 : Grille de photo-interprétation des zones d'accumulation pour le bassin de Barcelonnette (réalisée à partir des 50 glissements représentatifs des glissements actifs les plus fréquents du versant ubac (i.e. ayant une surface comprise entre 1000 et 20000m²)).

Type d'indice	Indice	Description des classes
Quantitatif	Surface	(1) <= 3000m ² (2)]3000-6000]m ² (3) > 6000m ²
	Longueur	(1) <= 40m (2)]40-80]m (3) > 80m
	Largeur	(1) < 60m (2) [60-110[m (3) >= 110m
	Indice de compacité de la zone d'accumulation*	(1) <= 0,7 (zone d'accumulation allongée dans le sens de la longueur du glissement (sens de la pente) (2)]0,7-1,3] (zone d'accumulation compacte) (3) > 1,3 (zone d'accumulation allongée dans le sens de la largeur du glissement (perpendiculairement à la pente))
Qualitatif	Présence de conifères	(1) < 30%** (2) [30%-70%[(3) >= 70%
	Présence de feuillus	(1) < 30% (2) [30%-70%[(3) >= 70%
	Présence de pelouse	(1) < 30% (2) [30%-70%[(3) >= 70%
	Présence de sol nu	(1) < 30% (2) [30%-70%[(3) >= 70%
	Présence de marnes noires	(1) < 30% (2) [30%-70%[(3) >= 70%
	Densité de végétation	(1) peu dense (présence de quelques arbres disséminés ou de quelques petits groupements d'arbres ou d'une pelouse ne couvrant le sol qu'à quelques endroits) (2) moyennement dense (sol visible au travers du couvert végétal) (3) dense (sol entièrement masqué par la végétation, arbres très rapprochés les uns des autres ou pelouse dense)
	Texture	(1) hétérogène (moins de 30% du glissement de texture homogène) (2) moyennement homogène (entre 30 et 70% du glissement de texture homogène) (3) homogène (au moins 70% du glissement de texture homogène)
	Surface	(1) masquée (surface de la zone d'accumulation masquée par la végétation) (2) lisse (surface plane, non perturbée, sol nu ou pelouse de texture homogène) (3) perturbée (surface comportant des zones perturbées, de texture hétérogène, présence de blocs) (4) fortement perturbée (topographie chaotique, surface irrégulière, de texture très hétérogène, mélange entre sol nu et végétation)

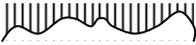
	Escarpelements mineurs	(1) absence (2) non visibles (3) visibles	(escarpements mineurs non signalés par la reconnaissance de terrain) (escarpements mineurs signalés par la reconnaissance de terrain mais non visibles sur l'image) (présence de fines zones de sol nu de forme arquée au sein de la zone d'ablation)
	Fissures	(1) absence (2) non visibles (3) visibles	(fissures non signalées par la reconnaissance de terrain) (fissures signalées par la reconnaissance de terrain mais non visibles sur l'image) (présence de fines saignées de sol nu sur la zone d'accumulation, latérales ou transversales juste au dessus de la limite avale)
	Bossellement	(1) absence (2) non visible (3) visible	(bossellement non signalé par la reconnaissance de terrain) (bossellement signalé par la reconnaissance de terrain mais non visible sur l'image) (topographie ondulée, succession(s) de bosses allongées transversales, stries)
	Bourrelets latéraux	(1) non visibles (2) visibles	(contour de la zone délimité par une zone très perturbée, de texture très hétérogène)
	Limite englobante	(1) non visible (2) visible (3) bien visible	(pas de différenciation possible entre l'entourage et la zone d'accumulation) (limites de la zone d'accumulation tout juste visibles mais pas nettes) (présence de limites nettes entre la zone d'accumulation et l'entourage)
	Limite amont	(1) non visible (2) visible (3) bien visible	(aucun indice) (passage de la zone d'accumulation à la zone d'ablation visible par des zones de sol nu mais pas nette) (changement d'occupation nette entre la zone d'accumulation et la zone d'ablation)
	Cours d'eau à la limite avale	(1) absence (2) présence	
	Route à la limite avale	(1) absence (2) présence	

* Indice de compacité de la zone d'accumulation : largeur de la zone d'accumulation / longueur de la zone d'accumulation.

** Pourcentage de la zone d'accumulation couvert par le type d'occupation du sol mentionné (e.g. conifères).

Annexe 15 : Grille de photo-interprétation des glissements actifs ayant une surface supérieure à 100000m² pour le bassin de Barcelonnette (réalisée à partir des 3 glissements-coulées de 'La Valette', 'Poche' et 'Super-Sauze').

A remplir pour : (1) la zone d'ablation, (2) la zone d'accumulation / de transition, (3) le pied.

Indice	Description des classes	Exemple
Présence de marnes noires	(1) < 30%** (2) [30%-70%[(3) >= 70%	
Présence de marnes blanchies	(1) < 30% (2) [30%-70%[(3) >= 70%	
Présence de couvert morainique	(1) < 30% (2) [30%-70%[(3) >= 70%	
Présence de couvert herbacé discontinu	(1) < 30% (2) [30%-70%[(3) >= 70%	
Présence de couvert végétal moyennement dense à dense	(1) < 30% (2) [30%-70%[(3) >= 70%	
Dépôts de lave torrentielle	(1) absence* (2) non visible** (3) visible	
Couronne (1) : dégradation	(1) non visible (2) émoussée (3) dégradée (4) fraîche	(bordure arrondie, en partie recouverte par la végétation) (bordure de structure hétérogène, caractérisée par un mélange sol/végétation, dégradée par des glissements et des fissures) (bordure saillante, soulignée par de la roche à l'affleurement ou du sol nu, pouvant comporter des fissures verticales, témoin d'une érosion régressive active)
Couronne (2) : forme	(1) non visible (2) irrégulière (3) rectiligne (4) en arc de cercle irrégulier (5) en arc de cercle régulier	   

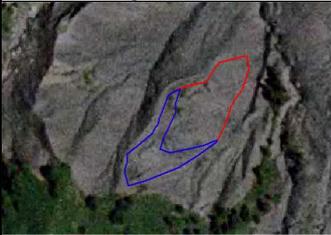
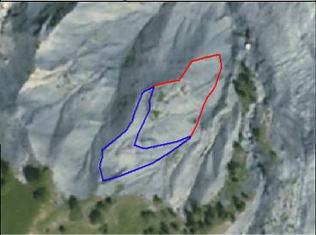
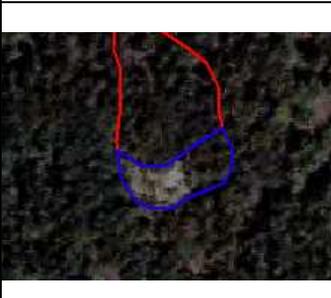
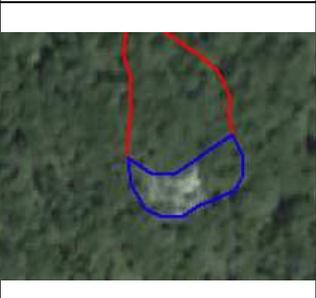
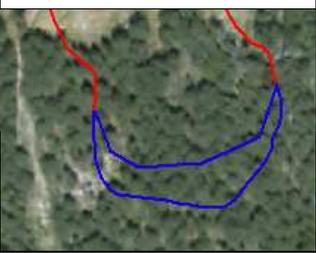
Tabliers d'éboulis	<p>(1) absence (2) non visible (3) visible</p> <p>(amas de cailloux, de texture hétérogène, de forme conique)</p>	
Ravines de type 'rills'	<p>(1) absence (2) non visibles (3) visibles, densité faible (4) visibles, densité moyenne (5) visibles, densité forte</p>	
Ravines de types 'bad-lands'	<p>(1) absence (2) non visibles (3) visibles, densité faible (4) visibles, densité moyenne (5) visibles, densité forte</p>	
Crêtes (1) : dégradation	<p>(1) absence (2) recouvertes</p> <p>(3) nues, émoussées</p> <p>(4) nues, saillantes</p> <p>(présence de crêtes dans la zone d'ablation ou émergeant de la coulée dans la zone d'accumulation (<i>in-situ</i>), recouvertes par de la végétation)</p> <p>(crêtes dénudées dégradées, de texture hétérogène)</p> <p>(crêtes dénudées lisses, de texture homogène)</p>	
Crêtes (2) : densité	<p>(1) faible (2) moyenne (3) forte</p> <p>(absence de crêtes ou présence de quelques crêtes)</p> <p>(les crêtes occupent moins de 30% de la surface)</p> <p>(les ravines occupent au moins 50% de la surface)</p>	
Blocs	<p>(1) absence (2) non visibles (3) visibles, densité faible (4) visibles, densité moyenne à forte</p> <p>(blocs de marnes ou blocs morainiques disloqués éparpillés sur la coulée ou regroupés à certains endroits)</p>	 

Fissures transversales	(1) absence (2) non visibles (3) visibles, densité faible (4) visibles, densité moyenne à forte	(saignées noires ou beiges ouvertes dans les marnes ou dans les formations de surface, allongées perpendiculairement à la pente)	
Fissures longitudinales	(1) absence (2) non visibles (3) visibles, densité faible (4) visibles, densité moyenne à forte	(saignées noires ou beiges ouvertes dans les marnes ou dans les formations de surface, allongées dans le sens de la pente)	
Escarpements secondaires	(1) absence (2) non visibles (3) visibles, densité faible (4) visibles, densité moyenne à forte		
Bossellements	(1) absence (2) non visible (3) visible, densité faible	(zones striées correspondant à des successions de petites bosses allongées)	
	(4) visible, densité moyenne à forte		
Bourrelets latéraux (levées)	(1) absence (2) non visibles (3) visibles, émoussées	(zones bombées en rebord du glissement, de texture hétérogène montrant un mélange de matériaux, colonisées par la végétation)	
	(4) visibles, frais	(zones bombées en rebord du glissement, de texture hétérogène montrant un mélange de matériaux, dénudées)	
Glissements secondaires (intra glissement-coulées)	(1) absence (2) non visibles (3) visibles, densité faible (4) visibles, densité moyenne à forte		
Écoulement de surface	(1) absence (2) non visible (3) visible		

* Absence : non signalé par la reconnaissance de terrain.

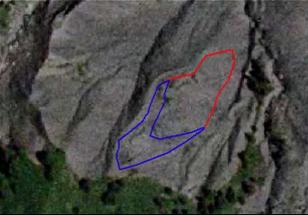
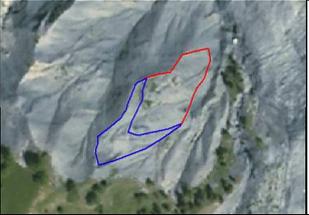
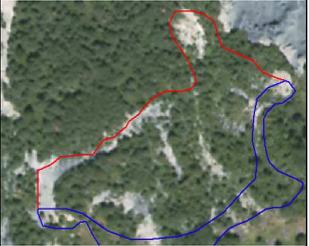
** Non visible : signalé par la reconnaissance de terrain mais non visible sur l'image.

Annexe 16 : Typologie des zones d'ablation par photo-interprétation pour le bassin de Barcelonnette, réalisée à partir de l'observation des 50 glissements représentatifs des glissements actifs les plus fréquents du versant ubac (i.e. ayant une surface comprise entre 1000 et 20000m²).

Type visuel	Exemple orthophoto 2000	Exemple orthophoto 2004	Description
Type 1			Zone d'ablation caractérisée par un sol nu ou des marnes noires à l'affleurement. La surface est lisse.
Type 2			Zone d'ablation très partiellement végétalisée facilement distinguable de l'entourage. L'escarpement de tête est visible.
Type 3			Zone d'ablation comportant des zones couvertes par la végétation (arborée et/ou pelouse) et des zones de sol nu à surface perturbée (mélange sol/végétation, texture hétérogène). Pas de limite nette entre la zone d'ablation et l'entourage. L'escarpement de tête est peu ou partiellement visible.
Type 4			Surface de la zone d'ablation totalement masquée par une végétation dense. Pas ou peu de différenciation possible entre la zone d'ablation et l'entourage. L'escarpement de tête n'est pas visible.

Légende :  Zone d'ablation  Zone d'accumulation

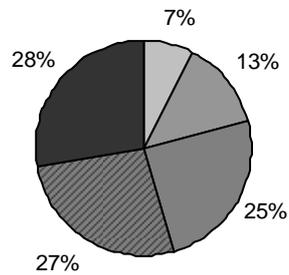
Annexe 17 : Typologie des zones d'accumulation par photo-interprétation pour le bassin de Barcelonnette, réalisée à partir de l'observation des 50 glissements représentatifs des glissements actifs les plus fréquents du versant ubac (i.e. ayant une surface comprise entre 1000 et 20000m²).

Type visuel	Exemple orthophoto 2000	Exemple orthophoto 2004	Description
Type 1			Zone d'accumulation caractérisée par un sol nu ou des marnes noires à l'affleurement. La surface est lisse.
Type 2			Zone d'accumulation majoritairement dénudée et présentant un fort mélange sol/végétation. La surface est très perturbée, de texture hétérogène. Les zones très perturbées présentes aux limites avales peuvent correspondre aux lobes.
Type 3			Zone d'accumulation comportant des zones couvertes par la végétation (arborée et/ou pelouse) et des zones de sol nu pouvant marquer une limite nette avec la zone d'ablation. Les zones de sol nu peuvent correspondre à des escarpements mineurs ou marquer une zone très perturbée à la limite aval du glissement.
Type 4			La surface de la zone d'accumulation est totalement masquée par une végétation dense. La différenciation entre la zone d'ablation et l'entourage n'est possible que si le couvert végétal est d'un autre type que celui de l'entourage (e.g. feuillus au sein de conifères).

Légende :  Zone d'ablation  Zone d'accumulation

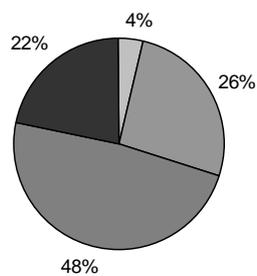
Annexe 18 : Répartition des 217 glissements de terrains et des 50 zones d'ablation et zones d'accumulation par type 'pi'.

(1) Répartition des 217 glissements



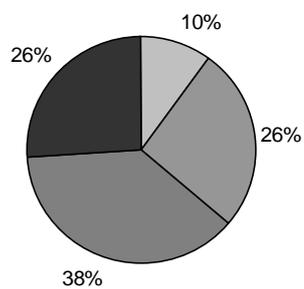
Légende : Type 1 Type 2 Type 3 Type 4 Type 5

(2) Répartition des 50 zones d'ablation



Légende : Type 1 Type 2 Type 3 Type 4

(3) Répartition des 50 zones d'accumulation



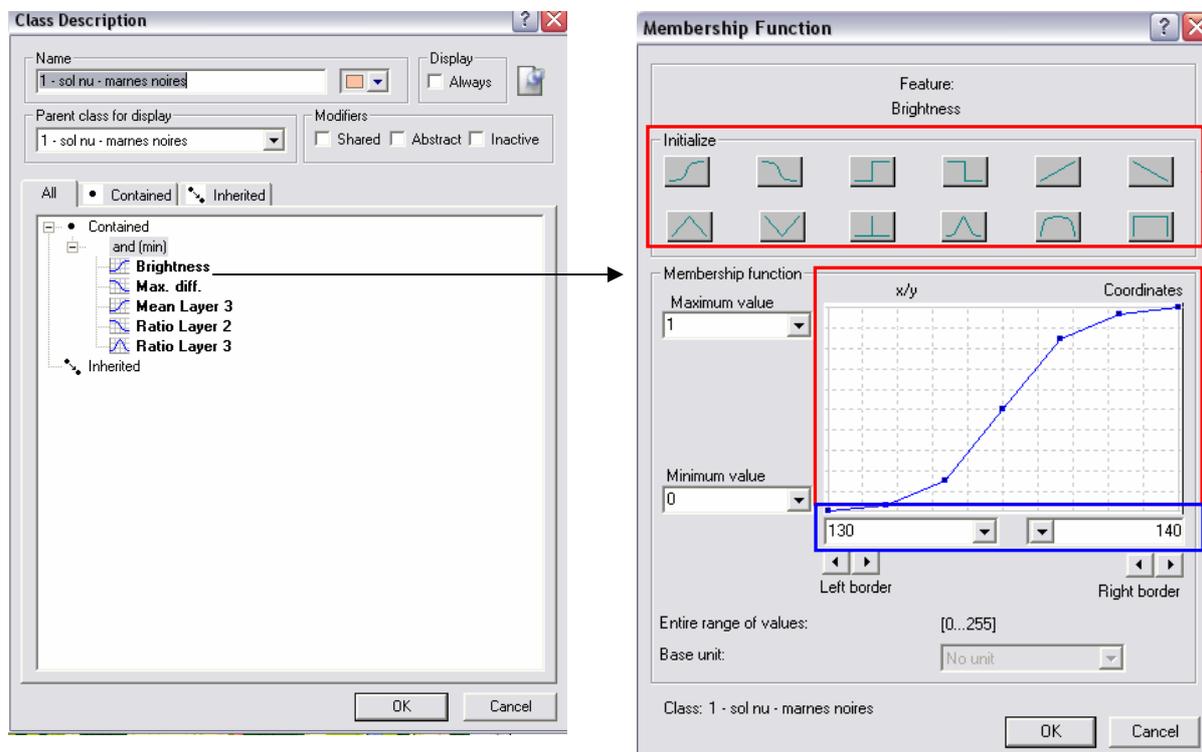
Légende : Type 1 Type 2 Type 3 Type 4

Annexe 19 : Paramètres 'eCognition' retenus pour être utilisés pour les classifications (formules récupérées de Definiens Imaging, 2006).

Types d'indicateurs quantitatifs	Paramètres eCognition	Formules
Caractéristiques spectrales	Luminosité (brightness)	$\bar{c}(v) = \frac{1}{W^B} \sum_{k=1}^K W_k^B \bar{c}_k(v)$ <p>W_k^B: poids de la luminosité de la bande k $\bar{c}_k(v)$: intensité moyenne de la bande k d'une région v</p>
	Moyennes des bandes spectrales (mean layers)	$\bar{c}_k(v) = \bar{c}_k(P_v) = \frac{1}{\#P_v} \sum_{(x,y) \in P_v} c_k(x,y)$ <p>P_v: échantillon de pixels d'une région v $P_v = \{(x,y) : (x,y) \in v\}$ $\#P_v$: nombre total de pixels contenus dans P_v $c_k(x,y)$: valeur de la bande spectrale au pixel (x,y) \bar{c}_k: intensité moyenne de la bande k</p>
	Ratios (ratios)	<p>Si $w_k^B = 1$ et $c(v) \neq 0$ alors $ratio = \frac{\bar{c}_k(v)}{\bar{c}(v)}$</p> <p>Si $w_k^B = 0$ ou $\bar{c}(v) = 0$ alors $ratio = 0$</p> <p>W_k^B: poids de la luminosité de la bande k $\bar{c}_k(v)$: intensité moyenne de la bande k d'une région v $\bar{c}(v)$: luminosité</p>
	Maximum de différence (maximum difference)	$\frac{\max_{i,j \in K_B} \bar{c}_i(v) - \bar{c}_j(v) }{\bar{c}(v)}$ <p>i, j: bandes spectrales $\bar{c}(v)$: luminosité $\bar{c}_i(v)$: intensité de la bande i $\bar{c}_j(v)$: intensité de la bande j c_k^{max}: luminosité possible de l'intensité de la bande k K_B: bandes avec un poids de luminosité positif $K_B = \{k \in K : w_k = 1\}$, w_k: poids de la bande</p>
Forme	Aire (area)	$\#P_v =$ nombre total de pixels formant la région \times superficie d'un pixel
	Longueur/largeur (length/width)	$\gamma_v^{EV} = \frac{\lambda_1(v)}{\lambda_2(v)}$ <p>λ_1, λ_2: eigenvalues γ_v^{EV}: rapport longueur/largeur de la région = rapport entre les eigenvalues de la matrice de covariance</p>
	Index de forme (shape index)	$\frac{b_v}{4\sqrt{\#P_v}}$ <p>b_v: périmètre de la région v $4\sqrt{\#P_v}$: périmètre d'un rectangle ayant la même aire que la région v</p>
	Compacité (compactness)	$\frac{l_v * w_v}{\#P_v}$ <p>l_v: longueur d'une région v w_v: largeur d'une région v $\#P_v$: nombre total de pixels contenus dans la région v</p>
	Arrondissement (roundness)	$e_v^{max} - e_v^{min}$ <p>e_v^{max}: rayon de la plus petite ellipse contenue dans la région e_v^{min}: rayon de la plus grande ellipse contenant la région</p>
Texture	Contraste GLCM* (GLCM contrast)	$\sum_{i,j=0}^{N-1} P_{i,j} (i - j)^2$ <p>P_{ij}: valeur normalisée dans la cellule i j</p>
	Entropie GLCM (GLCM entropy)	$\sum_{i,j=0}^{N-1} P_{i,j} (-\ln P_{i,j})$ <p>$P_{i,j} = \frac{V_{i,j}}{\sum_{i,j=0}^{N-1} V_{i,j}}$</p>
	Moyenne GLCM (GLCM mean)	$\frac{\sum_{i,j=0}^{N-1} P_{i,j}}{N^2}$ <p>i: nombre de lignes j: nombre de colonnes V_{ij}: valeur dans la cellule i j de la matrice N: nombre de lignes ou de colonnes</p>
	Corrélation GLCM (GLCM correlation)	$\sum_{i,j=0}^{N-1} P_{i,j} \left[\frac{(i - \mu_i)(j - \mu_j)}{\sqrt{(\sigma_i^2)(\sigma_j^2)}} \right]$ <p>μ_i: moyenne GLCM σ_i: écart type GLCM</p>
Voisinage	$\bar{\Delta}_k(v) = \frac{1}{W} \sum_{u \in N_v(d)} w_u (\bar{c}_k(v) - \bar{c}_k(u))$ <p>u,v: régions \bar{c}_k: intensité moyenne de la bande k d: distance entre les voisins w_u: poids de la région u w: poids de la bande spectrale $N_v(d)$: voisin direct de la région v à une distance d $N_v(d) = \{u \in V_r : d(v,u) \leq d\}$</p>	

* Les textures GLCM (Grey Level Co-occurrence Matrix) sont calculées à partir d'une matrice présentant l'occurrence de différents combinaisons de pixels en niveaux de gris dans une image.

Annexe 20 : Exemple d'attribution de paramètres et d'une fonction d'appartenance à la classe d'occupation du sol 'sol nu – marnes noires' avec le logiciel eCognition.



Choix des paramètres descriptifs de la classe (class description)

Attribution de l'intervalle de valeurs (entouré de bleu) et de la fonction d'appartenance floue (entouré de rouge) pour chaque paramètre (exemple du paramètres luminosité (brightness))

Annexe 21 : Intervalles de valeurs et fonctions d'appartenances des paramètres de forme, de texture et de voisinage utilisés pour les tests.

Types d'indicateurs quantitatifs	Paramètres eCognition	Intervalle de valeurs	Fonction d'appartenance	
Forme	Longueur/largeur (<i>length/width</i>)	0,5 – 5		
	Index de forme (<i>shape index</i>)	0,5 – 3		
	Compacité (<i>compactness</i>)	0,5 – 3		
	Arrondissement (<i>roundness</i>)	0 – 2,5		
Texture	Contraste GLCM* (<i>GLCM contrast</i>)	20 – 380		
	Entropie GLCM (<i>GLCM entropy</i>)	1 – 10		
	Moyenne GLCM (<i>GLCM mean</i>)	40 – 180		
	Corrélation GLCM (<i>GLCM correlation</i>)	0,80 – 1		
Voisinage	Différence moyenne au voisin (<i>mean difference to neighbor</i>)	Bande 1	-60 – 70	
		Bande 2	-60 – 70	
		Bande 3	-60 – 70	

**Annexe 22 : Tableau de validation des tests pour l'orthophotographie couleur de 2004
(1 : par surfaces classifiées).**

	Objet	Type 'pi'	Surface du shapefile 'expert' (ha)	Surface identifiée automatiquement (ha)	Surface commune (ha)	Surface mal identifiée (ha)	% de la surface du shapefile correctement identifiée	% de la surface classifiée ne correspondant pas au shapefile
Test1	Glissements	1	5,285	0,479	0,371	0,108	7,02	22,53
		2	15,262	63,878	1,381	62,497	9,05	97,84
		3	16,808	62,297	1,086	61,211	6,46	98,26
		4	11,965	4,355	0,000	4,355	0,00	100,00
		tous	49,320	131,009	2,838	128,171	5,75	97,83
	Zones d'ablation	1	0,646	20,022	0,043	19,979	6,66	99,79
		2	5,281	36,542	0,221	36,321	4,18	99,40
		3	4,197	14,810	0,004	14,806	0,10	99,97
		4	4,157	39,411	0,129	39,282	3,10	99,67
		tous	14,281	110,785	0,397	110,388	2,78	99,64
	Zones d'accumulation	1	1,629	23,097	0,120	22,977	7,37	99,48
		2	6,020	48,771	0,000	48,771	0,00	100,00
		3	11,311	21,873	0,159	21,714	1,41	99,27
		4	16,062	48,180	0,000	48,180	0,00	100,00
		tous	35,022	141,921	0,279	141,642	0,80	99,80
Test2	Glissements	1	5,285	20,914	0,275	20,639	5,20	98,69
		2	15,262	23,783	0,164	23,619	1,07	99,31
		3	16,808	15,444	0,000	15,444	0,00	100,00
		4	11,965	23,614	0,000	23,614	0,00	100,00
		tous	49,320	83,755	0,439	83,316	0,89	99,48
	Zones d'ablation	1	0,646	20,571	0,019	20,552	2,94	99,91
		2	5,281	29,652	0,048	29,604	0,91	99,84
		3	4,197	23,279	0,016	23,263	0,38	99,93
		4	4,157	23,279	0,003	23,276	0,07	99,99
		tous	14,281	96,781	0,086	96,695	0,60	99,91
	Zones d'accumulation	1	1,629	23,450	0,048	23,402	2,95	99,80
		2	6,020	42,234	0,000	42,234	0,00	100,00
		3	11,311	23,770	0,250	23,520	2,21	98,95
		4	16,062	42,692	0,000	42,692	0,00	100,00
		tous	35,022	132,146	0,298	131,848	0,85	99,77
Test3	Glissements	1	5,285	8,478	0,271	8,207	5,13	96,80
		2	15,262	0,000	0,000	0,000	0,00	/
		3	16,808	0,000	0,000	0,000	0,00	/
		4	11,965	0,000	0,000	0,000	0,00	/
		tous	49,320	8,478	0,271	8,207	0,55	96,80
	Zones d'ablation	1	0,646	10,206	0,018	10,188	2,79	99,82
		2	5,281	0,000	0,000	0,000	0,00	/
		3	4,197	0,000	0,000	0,000	0,00	/
		4	4,157	0,000	0,000	0,000	0,00	/
		tous	14,281	10,206	0,018	10,188	0,13	99,82
	Zones d'accumulation	1	1,629	8,304	0,045	8,259	2,76	99,46
		2	6,020	0,000	0,000	0,000	0,00	/
		3	11,311	0,000	0,000	0,000	0,00	/
		4	16,062	0,000	0,000	0,000	0,00	/

		tous	35,022	8,304	0,045	8,259	0,13	99,46
Test4	Glissements	1	5,285	41,662	0,355	41,307	6,72	99,15
		2	15,262	145,051	1,068	143,983	7,00	99,26
		3	16,808	59,782	1,070	58,712	6,37	98,21
		4	11,965	277,386	2,348	275,038	19,62	99,15
		tous	49,320	523,881	4,841	519,040	9,82	99,08
	Zones d'ablation	1	0,646	38,949	0,019	38,930	2,94	99,95
		2	5,281	117,983	0,484	117,499	9,16	99,59
		3	4,197	50,633	0,039	50,594	0,93	99,92
		4	4,157	220,464	0,834	219,630	20,06	99,62
		tous	14,281	428,029	1,376	426,653	9,64	99,68
	Zones d'accumulation	1	1,629	46,705	0,120	46,585	7,37	99,74
		2	6,020	149,442	0,000	149,442	0,00	100,00
		3	11,311	52,733	0,159	52,574	1,41	99,70
		4	16,062	281,999	0,000	281,999	0,00	100,00
		tous	35,022	530,879	0,279	530,600	0,80	99,95
Test5	Glissements	1	5,285	5,398	0,010	5,388	0,19	99,81
		2	15,262	0,000	0,000	0,000	0,00	/
		3	16,808	0,000	0,000	0,000	0,00	/
		4	11,965	0,000	0,000	0,000	0,00	/
		tous	49,320	5,398	0,010	5,388	0,02	99,81
	Zones d'ablation	1	0,646	15,104	0,019	15,085	2,94	99,87
		2	5,281	0,000	0,000	0,000	0,00	/
		3	4,197	0,000	0,000	0,000	0,00	/
		4	4,157	0,000	0,000	0,000	0,00	/
		tous	14,281	15,104	0,019	15,085	0,13	99,87
	Zones d'accumulation	1	1,629	16,467	0,048	16,419	2,95	99,71
		2	6,020	0,000	0,000	0,000	0,00	/
		3	11,311	0,000	0,000	0,000	0,00	/
		4	16,062	0,000	0,000	0,000	0,00	/
		tous	35,022	16,467	0,048	16,419	0,14	99,71
Test6	Glissements	1	5,285	9,116	0,272	8,844	5,15	97,02
		2	15,262	0,000	0,000	0,000	0,00	/
		3	16,808	0,000	0,000	0,000	0,00	/
		4	11,965	0,000	0,000	0,000	0,00	/
		tous	49,320	9,116	0,272	8,844	0,55	97,02
	Zones d'ablation	1	0,646	12,946	0,018	12,928	2,79	99,86
		2	5,281	0,000	0,000	0,000	0,00	/
		3	4,197	0,000	0,000	0,000	0,00	/
		4	4,157	0,000	0,000	0,000	0,00	/
		tous	14,281	12,946	0,018	12,928	0,13	99,86
	Zones d'accumulation	1	1,629	17,633	0,045	17,588	2,76	99,74
		2	6,020	0,000	0,000	0,000	0,00	/
		3	11,311	0,000	0,000	0,000	0,00	/
		4	16,062	0,000	0,000	0,000	0,00	/
		tous	35,022	17,633	0,045	17,588	0,13	99,74
Test7	Glissements	1	5,285	8,478	0,271	8,207	5,13	96,80
		2	15,262	0,000	0,000	0,000	0,00	/
		3	16,808	0,000	0,000	0,000	0,00	/
		4	11,965	0,000	0,000	0,000	0,00	/
		tous	49,320	8,478	0,271	8,207	0,55	96,80
	Zones d'ablation	1	0,646	10,206	0,018	10,188	2,79	99,82
		2	5,281	0,000	0,000	0,000	0,00	/

		3	4,197	0,000	0,000	0,000	0,00	/
		4	4,157	0,000	0,000	0,000	0,00	/
		tous	14,281	10,206	0,018	10,188	0,13	99,82
	Zones d'accumulation	1	1,629	2,436	0,040	2,396	2,46	98,36
		2	6,020	0,000	0,000	0,000	0,00	/
		3	11,311	0,000	0,000	0,000	0,00	/
		4	16,062	0,000	0,000	0,000	0,00	/
		tous	35,022	2,436	0,040	2,396	0,11	98,36

Annexe 23 : Tableau de validation des tests pour l'orthophotographie couleur de 2004 (2 : par nombres (a) et pourcentages (b) de glissements sous ou sur-estimés).

(a)	Objet	Type 'pi'	Nombre d'objets sous-estimés	Nombre d'objets surestimés	Nombre total d'objets identifiés
Test1	Glissements	1	0	1	1
		2	5	0	5
		3	5	0	5
		4	0	0	0
		tous	10	1	11
	Zones d'ablation	1	0	1	1
		2	3	1	4
		3	1	0	1
		4	0	1	1
		tous	4	3	7
	Zones d'accumulation	1	0	2	2
		2	0	0	0
		3	2	0	2
		4	0	0	0
		tous	2	2	4
Test2	Glissements	1	2	0	2
		2	3	1	4
		3	0	0	0
		4	0	0	0
		tous	5	1	6
	Zones d'ablation	1	2	0	2
		2	3	1	4
		3	2	0	2
		4	1	0	1
		tous	8	1	9
	Zones d'accumulation	1	3	0	3
		2	3	0	3
		3	3	0	3
		4	0	0	0
		tous	9	0	9
Test3	Glissements	1	1	0	1
		2	0	0	0
		3	0	0	0
		4	0	0	0
		tous	1	0	1
	Zones d'ablation	1	1	0	1
		2	0	0	0
		3	0	0	0
		4	0	0	0
		tous	1	0	1
	Zones d'accumulation	1	2	0	2
		2	0	0	0
		3	0	0	0
		4	0	0	0
		tous	2	0	2

Test4	Glissements	1	3	0	3
		2	5	1	6
		3	4	0	4
		4	6	0	6
		tous	18	1	19
	Zones d'ablation	1	1	1	2
		2	4	2	6
		3	3	0	3
		4	5	1	6
		tous	13	4	17
	Zones d'accumulation	1	3	0	3
		2	2	0	2
		3	3	0	3
		4	6	1	7
		tous	14	1	15
Test5	Glissements	1	2	1	3
		2	0	0	0
		3	0	0	0
		4	0	0	0
		tous	2	0	2
	Zones d'ablation	1	2	0	2
		2	0	0	0
		3	0	0	0
		4	0	0	0
		tous	2	0	2
	Zones d'accumulation	1	3	0	3
		2	0	0	0
		3	0	0	0
		4	0	0	0
		tous	3	0	3
Test6	Glissements	1	2	1	3
		2	0	0	0
		3	0	0	0
		4	0	0	0
		tous	2	1	3
	Zones d'ablation	1	0	1	1
		2	0	0	0
		3	0	0	0
		4	0	0	0
		tous	0	1	1
	Zones d'accumulation	1	2	0	2
		2	0	0	0
		3	0	0	0
		4	0	0	0
		tous	2	0	2
Test7	Glissements	1	1	1	2
		2	0	0	0
		3	0	0	0
		4	0	0	0
		tous	1	0	1

Zones d'ablation	1	0	1	1
	2	0	0	0
	3	0	0	0
	4	0	0	0
	tous	0	1	1
Zones d'accumulation	1	1	0	1
	2	0	0	0
	3	0	0	0
	4	0	0	0
	tous	1	0	1

(b)

		% d'objets sous-estimés	% d'objets surestimés	% total d'objets sous ou sur-estimés
Test 1	Glissements	13,7	1,4	15,1
	Zones d'ablation	5,5	4,1	9,6
	Zones d'accumulation	2,7	2,7	5,5
Test 2	Glissements	6,8	1,4	8,2
	Zones d'ablation	11,0	1,4	12,3
	Zones d'accumulation	12,3	0,0	12,3
Test 3	Glissements	1,4	0,0	1,4
	Zones d'ablation	1,4	0,0	1,4
	Zones d'accumulation	2,7	0,0	2,7
Test 4	Glissements	24,7	1,4	26,0
	Zones d'ablation	17,8	5,5	23,3
	Zones d'accumulation	19,2	1,4	20,5
Test 5	Glissements	2,7	0,0	2,7
	Zones d'ablation	2,7	0,0	2,7
	Zones d'accumulation	4,1	0,0	4,1
Test 6	Glissements	2,7	1,4	4,1
	Zones d'ablation	0,0	1,4	1,4
	Zones d'accumulation	2,7	0,0	2,7
Test 7	Glissements	1,4	0,0	1,4
	Zones d'ablation	0,0	1,4	1,4
	Zones d'accumulation	1,4	0,0	1,4

**Annexe 24 : Tableau de validation des tests pour l'orthophotographie IR de 1974
(1 : par surfaces identifiées).**

	Objet	Type 'pi'	Surface du shapefile 'expert' (ha)	Surface identifiée automatiquement (ha)	Surface commune (ha)	Surface mal identifiée (ha)	% de la surface du shapefile correctement identifiée	% de la surface classifiée ne correspondant pas au shapefile
Test1	Glissements	1	5,285	108,546	0,661	107,885	12,51	99,39
		2	15,262	430,611	3,804	426,807	24,92	99,12
		3	16,808	38,894	0,004	38,890	0,02	99,99
		4	11,965	382,389	4,221	378,168	35,28	98,90
		tous	49,320	960,440	8,690	951,750	17,62	99,10
	Zones d'ablation	1	0,646	77,536	0,001	77,535	0,15	100,00
		2	5,281	252,569	0,506	252,063	9,58	99,80
		3	4,197	16,850	0,244	16,606	5,81	98,55
		4	4,157	213,954	0,642	213,312	15,44	99,70
		tous	14,281	560,909	1,393	559,516	9,75	99,75
	Zones d'accumulation	1	1,629	109,527	0,571	108,956	35,05	99,48
		2	6,020	408,976	1,139	407,837	18,92	99,72
		3	11,311	23,776	0,842	22,934	7,44	96,46
		4	16,062	342,250	4,286	337,964	26,68	98,75
		tous	35,022	884,529	6,838	877,691	19,52	99,23
Test4	Glissements	1	5,285	169,117	1,900	167,217	35,95	98,88
		2	15,262	534,396	5,204	529,192	34,10	99,03
		3	16,808	45,594	0,831	44,763	4,94	98,18
		4	11,965	714,258	9,479	704,779	79,22	98,67
		tous	49,320	1463,365	17,414	1445,951	35,31	98,81
	Zones d'ablation	1	0,646	125,385	0,024	125,361	3,72	99,98
		2	5,281	335,275	0,748	334,527	14,16	99,78
		3	4,197	29,487	0,078	29,409	1,86	99,74
		4	4,157	443,315	1,291	442,024	31,06	99,71
		tous	14,281	933,462	2,141	931,321	14,99	99,77
	Zones d'accumulation	1	1,629	156,767	0,787	155,980	48,31	99,50
		2	6,020	498,662	1,596	497,066	26,51	99,68
		3	11,311	40,169	0,514	39,655	4,54	98,72
		4	16,062	636,564	9,656	626,908	60,12	98,48
		tous	35,022	1332,162	12,553	1319,609	35,84	99,06

Annexe 25 : Tableau de validation des tests pour l'orthophotographie IR de 1974 (2 : par nombres (a) et pourcentages (b) de glissements sous ou sur-estimés).

(a)

	Objet	Type 'pi'	Nombre d'objets sous-estimés	Nombre d'objets surestimés	Nombre total d'objets identifiés
Test1	Glissements	1	2	1	3
		2	4	4	8
		3	1	0	1
		4	6	1	7
		tous	13	6	19
	Zones d'ablation	1	0	1	1
		2	4	5	9
		3	0	0	0
		4	2	3	5
		tous	6	9	15
	Zones d'accumulation	1	2	1	3
		2	2	4	6
		3	4	0	4
		4	6	7	13
		tous	14	12	26
Test4	Glissements	1	1	3	4
		2	4	8	12
		3	3	1	4
		4	0	11	11
		tous	8	23	31
	Zones d'ablation	1	1	1	2
		2	2	4	6
		3	1	2	3
		4	0	5	5
		tous	4	11	15
	Zones d'accumulation	1	1	1	2
		2	3	4	7
		3	2	0	2
		4	0	16	16
		tous	6	21	27

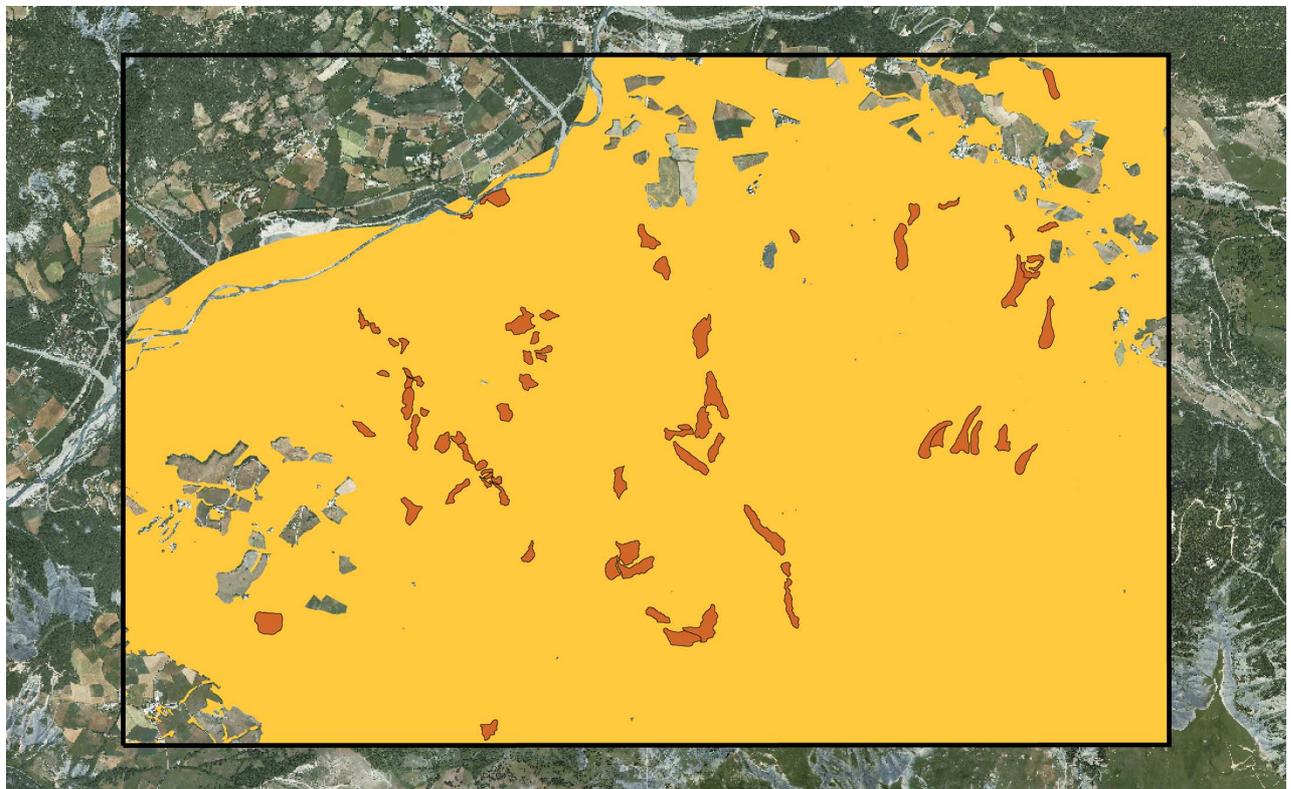
(b)

		% d'objets sous-estimés	% d'objets surestimés	% total d'objets identifiés
Test 1	Glissements	17,8	8,2	26,0
	Zones d'ablation	8,2	12,3	20,5
	Zones d'accumulation	19,2	16,4	35,6
Test 4	Glissements	11,0	31,5	42,5
	Zones d'ablation	5,5	15,1	20,5
	Zones d'accumulation	8,2	28,8	37,0

Annexe 26 : Image SPOT 5 segmentée sous 'eCognition'.



Annexe 27 : Masque de l'occupation du sol appliqué lors des classifications.



Légende :  Masque de l'occupation du sol appliqué  Zone testée  Glissement de terrain signalé par le *shapefile* 'expert'  0 500m 