



HAL
open science

Susceptibilité du bassin de Barcelonnette (Alpes du Sud, France) aux 'mouvements de versant': cartographie morphodynamique, analyse spatiale et modélisation probabiliste

Yannick Thiery

► To cite this version:

Yannick Thiery. Susceptibilité du bassin de Barcelonnette (Alpes du Sud, France) aux 'mouvements de versant': cartographie morphodynamique, analyse spatiale et modélisation probabiliste. Géomorphologie. Université de Caen, 2007. Français. NNT : . tel-00259135v1

HAL Id: tel-00259135

<https://theses.hal.science/tel-00259135v1>

Submitted on 26 Feb 2008 (v1), last revised 20 May 2008 (v3)

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

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



UNIVERSITE de CAEN/BASSE-NORMANDIE

U.F.R. de GEOGRAPHIE

ECOLE DOCTORALE 'Littératures, Cultures et Sciences Sociales'

*Laboratoire GEOPHEN (LETG UMR 6554)
GEOgraphie PHysique et ENvironnement*

T H E S E

présentée par

M. Yannick Thiery

et soutenue

le 17 décembre 2007

en vue de l'obtention du

DOCTORAT de l'UNIVERSITE de CAEN

Spécialité : Géographie physique, humaine, économique et régionale

Arrêté du 07 août 2006

**Susceptibilité du Bassin de Barcelonnette
(Alpes du sud, France) aux 'mouvements de versant' :
cartographie morphodynamique, analyse spatiale et
modélisation probabiliste.**



MEMBRES du JURY

Mme	Christiane Weber	DR2 CNRS	Université Louis Pasteur, Strasbourg (<i>rapporteur</i>)
Mr	Mario Panizza	Professeur	Università degli studi di Modena y Reggio Emilia, Italie (<i>rapporteur</i>)
Mr	Didier Hantz	MCF Habilité	Université Joseph Fourier, Grenoble
Mr	Jean-Philippe Malet	CR1 CNRS	Université de Caen Basse-Normandie
Mr	Olivier Maquaire	Professeur	Université de Caen Basse-Normandie (<i>Directeur de thèse</i>)

SOMMAIRE

SOMMAIRE	- 3 -
REMERCIEMENTS	- 5 -
INTRODUCTION	- 9 -
PARTIE I : EVALUATION DE LA SUSCEPTIBILITE ET DE L'ALEA STRATEGIE POUR UNE ECHELLE DU 1/10 000^{EME}	- 21 -
<i>Chapitre 1 : Evaluation de l'aléa 'mouvements de versant' au 1/10 000^{eme} : constat, besoins, enjeux</i>	<i>- 23 -</i>
<i>Chapitre 2 : cadre morphologique des sites d'étude et cartographie morphodynamique</i>	<i>- 69 -</i>
PARTIE II : TYPOLOGIE DES PHENOMENES ET VARIABLES RETENUES	- 113 -
<i>Chapitre 3 : les 'mouvements de versant' : description, typologie et analyse</i>	<i>- 115 -</i>
<i>Chapitre 4 : Les variables prédictives : acquisition et description</i>	<i>- 171 -</i>
<i>Chapitre 5 : Analyse et identification d'un jeu de variables de base</i>	<i>- 205 -</i>
PARTIE III : ANALYSE DE LA SUSCEPTIBILITE ET DE L'ALEA PAR APPROCHES PROBABILISTES	- 225 -
<i>Chapitre 6 : Cartographie 'expert' et semi-quantitative</i>	<i>- 227 -</i>
<i>Chapitre 7 : Cartographie probabiliste de la susceptibilité et règles de transposition</i>	<i>- 263 -</i>
<i>Chapitre 8 : Tentative d'évaluation de l'aléa : apport des modeles à base physique</i>	<i>- 309 -</i>
CONCLUSION GENERALE	- 335 -
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	- 343 -
TABLE DES FIGURES	- 365 -
TABLE DES TABLEAUX	- 371 -
ANNEXES	- 375 -
TABLE DES MATIERES	- 435 -

REMERCIEMENTS

Ce mémoire est l'aboutissement de cinq années de recherches passées d'abord à l'*Institut de Physique du Globe de Strasbourg (IPGS)* puis au laboratoire de *Géographie Physique et Environnement (GEOPHEN)* de Caen. Que par ces pages soient exprimées toute ma gratitude et ma reconnaissance envers toutes les personnes qui ont apporté soutien et conseil tout au long de ce travail.

Je tiens à remercier tout d'abord *Olivier Maquaire*, Professeur à l'Université de Caen Basse-Normandie. C'est après une rencontre à *Draix*, pour mon sujet de DEA, que se sont nouées des relations amicales et qu'il m'a alors proposé de venir à Strasbourg puis à Caen pour effectuer cette thèse de doctorat. C'est ensuite avec beaucoup d'autonomie qu'il m'a permis de la réaliser. Son soutien constant, sa disponibilité dans les moments difficiles, son souci de favoriser les contacts scientifiques, d'optimiser les conditions de recherche et de m'impliquer dans les programmes de recherche nationaux et internationaux ont sans aucun doute permis d'éveiller une vocation scientifique. Je le remercie aussi de la confiance accordée, notamment pour m'avoir confié la responsabilité de représenter notre équipe de recherche lors de diverses réunions du programme de recherche *ALARM*. Je salue aussi son soutien dans ces derniers moments de rédaction, malgré l'éloignement, ses diverses responsabilités et sa charge d'enseignement.

Je remercie *Christiane Weber*, Directrice de Recherche CNRS au Laboratoire Image et Ville de Strasbourg, *Mario Panizza*, Professeur au Dipartimento di Scienze della Terra de l'Università degli studi di Modena y Reggio Emilia en Italie, *Didier Hantz*, Maître de Conférences au Laboratoire de Géophysique Interne et Tectonophysique de l'Université Joseph Fourier de Grenoble, et *Jean-Philippe Malet*, Chargé de Recherche CNRS au laboratoire de Géographie Physique de l'Environnement de l'Université de Caen Basse-Normandie, d'avoir accepté d'être membres du jury de ce doctorat. Tous ont souscrit sans hésiter à cette tâche supplémentaire, malgré de nombreuses charges et un calendrier serré : je mesure les contraintes et l'effort accompli, et je leur suis gré d'avoir, malgré tout, accepté.

Ce travail a été soutenu financièrement par le programme européen *ALARM*, puis par un poste d'*ATER* au sein de la Faculté de Géographie de l'Université Louis Pasteur de Strasbourg. Il a bénéficié, en outre, de nombreuses collaborations de différents laboratoires de recherche français et étrangers qui ont donné lieu à des publications scientifiques conjointes. Je tiens à exprimer ma reconnaissance et mon amitié à :

Simone Sterlacchini, chercheur à l'Istituto per la Dinamica dei Processi Ambientali du Consiglio Nazionale delle Ricerche et de l'Università di Milano Bicocca, pour m'avoir accueilli au début de cette thèse, m'avoir fait profiter de ses connaissances approfondies des approches probabilistes par SIG et d'être venu sur le terrain pour y observer les différents phénomènes du site d'étude ;

Jose Luis Zêzere, Professeur à la Faculdade de Letras da Universida de Lisboa et au Centro de Estudos Geográficos da Universidade de Lisboa pour les nombreuses discussions sur les approches probabilistes, pour sa disponibilité et son aide pour interpréter certaines simulations numériques ;

Bruno Ambroise, Directeur de Recherche à l'Institut de Mécanique des Fluides et des Solides de Strasbourg pour ses conseils précieux et bénéfiques, et la rigueur de son analyse ;

Anne Véronique Auzet, Professeur à la Faculté de Géographie de l'Université Louis Pasteur, et chercheur à l'Institut de Mécanique des Fluides et des Solides de Strasbourg pour m'avoir accueilli dans le bureau de ses doctorants pendant ces deux dernières années d'*ATER* ;

Théo van Asch, Professeur à la Faculty of Geosciences of Utrecht University, pour les différentes discussions sur la modélisation de l'aléa et sur différentes stratégies à adopter pour obtenir des résultats cohérents ;

Je tiens à remercier particulièrement, *Jean-Philippe Malet* pour ses nombreux conseils avisés notamment pour la mise en œuvre de certains protocoles d'études de modèles probabilistes et des modèles à base physique. La rigueur acquise à ses côtés et son aide de tous les instants ont été autant d'atouts qui ont permis à ce travail d'aboutir. Je souhaite à quiconque de pouvoir bénéficier de l'expérience de quelqu'un comme Jean-Philippe.

Je suis très honoré d'avoir eu l'occasion de discuter de certains résultats et analyses de manière formelle ou informelle au cours de réunions de travail, séminaires, colloques avec *Sandro Silvano* et *Alessandro Pasuto* de l'Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica del Consiglio Nazionale delle Ricerche de Padova, *Angelo Cavallin* et *Andrea Zancchi*, Professeurs à l'Università di Milano Bicocca, *Alessandro Corsini* du Dipartimento di Scienze della Terra de l'Università degli studi di Modena y Reggio Emilia, *Tom Bogaard* de la Technical Univeristy of Delft, *Juan Remondo* du Departamento de Ciencias de la Tierra y Física de la Materia Condensada de l'Universidad de Cantabria.

Un grand merci aux différents jeunes et moins jeunes chercheurs rencontrés pendant les différents séjours des réunions du programme ALARM : *Mattia de Amicis*, *Simone Friggerio* et *Simone Poli* de l'Università di Milano Bicocca, *Fabrizio Tagliavini* de l'Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica del Consiglio Nazionale delle Ricerche de Padova, *Alessandro Ghinoi* du Dipartimento di Scienze della Terra de l'Università degli studi di Modena y Reggio Emilia, *Eusebio Reis* et *Ricardo Garcia* de la Faculdade de Letras da Universida de Lisboa, *Alfred Wagtendonk* du Spatial Information Laboratory à la Vrije Universiteit Amsterdam, *Jaime Bonachea* du Departamento de Ciencias de la Tierra y Física de la Materia Condensada de l'Universidad de Cantabria.

Ce travail de thèse, à forte composante '*terrain*', a été l'occasion d'un travail d'équipe. Que tous les étudiants de Licence, de Master I et II ayant participé de près ou de loin à ce travail trouvent ici ma gratitude. Merci à mes compagnons et amis des premières heures : *Emmanuel Truchet* et *Arnaud Ritzenthaler*, sans qui je ne serais pas là. Merci à *Elise Beck*, *Virginie Sautrey*, *Angélique Paniel*, *Albin Bernard* et *Diego Moreno* pour l'élaboration de certaines bases de données pour le projet ALARM ou sur les bassins versants de Draix. Un merci particulier pour '*l'équipe strasbourgeoise*' de ces deux dernières années : *Carine Heitz* et *Romain Armand* d'avoir supporté la '*plebe*', surtout dans les dernières semaines pendant lesquelles la tension montait d'un cran (voire deux). Je remercie *Martine Trautmann*, du Laboratoire d'Analyse des Sols de l'Ecole et Observatoire des Sciences de la Terre de Strasbourg, pour son accueil, sa bonne humeur communicative tous les matins à l'heure du café.

Je remercie également les amis de toujours : *Jean-Jacques*, *Mylène*, *Galathée*, *Marie-Laure*, *Anne*, *Marine*, *Claire*, *François Jacques*, *Valérie*, *Sébastien*, *Sophie*, *Pierre François*, *Julien*, *François*, pour m'avoir soutenu pendant ces cinq années. Des remerciements aussi aux différents partenaires de rugby, joueurs et entraîneurs, pour avoir supporté les absences répétées dans l'équipe.

'*Special thanks*' pour ceux sans qui ce travail n'aurait pu aboutir : *Jean-Philippe*, *Alexandre* et *Anne*. Leur bonne humeur, leurs questionnements incessants, leur disponibilité ont permis de créer un cadre de travail serein et productif. Même si les thématiques de travail étaient éloignées au départ, le rapprochement s'est effectué au fur et à mesure de nos réflexions pour arriver à une ligne de conduite commune dans le cadre de l'évaluation de l'aléa des mouvements de terrain. Vraiment merci à tous les trois, à vos encouragements et à votre aide précieuse dans le dernier col.

Enfin, ces remerciements s'adressent à mes parents, ma famille, Pascale partiellement délaissés cette dernière année. Ils m'ont tous encouragé dans le rush final. Et puis merci à toi, là haut, ou ailleurs, pour avoir été là, à mes côtés depuis pas mal d'années, ce travail t'est dédié.

That's all folks !!!!

1. PROBLEMATIQUE

Les instabilités de versant, appelées aussi ‘mouvements de versant’ recouvrent une grande variété de phénomènes naturels : allant des laves torrentielles aux écroulements rocheux. Tous ont en commun un déplacement de matériaux déstabilisés par des facteurs naturels et/ou anthropiques (séismes, fortes précipitations, déforestation...). Ces phénomènes complexes peuvent être ponctuels, superficiels, limités dans l’espace et dans le temps mais aussi rapides et de grandes ampleurs affectant alors des versants entiers (Flageollet, 1989 ; Ledoux, 1995). Ils peuvent être actifs, latents, inactifs, ou potentiels. Certains présentent parfois un danger pour les vies humaines et sont responsables de dommages et préjudices importants et coûteux (Maquaire, 2002). A l’origine d’enjeux socio-économiques et humains qui dépassent les possibilités de prévention des collectivités concernées (par leurs effets directs mais surtout indirects -effet ‘domino’-), ils constituent **de véritables risques naturels majeurs. Les effets de ces phénomènes (aléa) sont d’autant plus importants lorsqu’ils affectent des zones habitées plus ou moins vulnérables** (selon le nombre de personnes, d’habitations, d’infrastructures et des activités économiques).

Phénomènes azonaux, de rares régions sur le globe échappent à leurs manifestations (Flageollet, 1989). Quelques grandes régions fréquemment touchées par l’aléa ‘mouvements de versant’ peuvent toutefois être signalées comme les versants montagneux soumis à une anthropisation qui s’intensifie, les régions à forte sismicité ou encore les régions aux précipitations intenses (Ledoux, 1995 ; Alexander, 2000 et 2002 ; Hervàs, 2003). Au cours du 20^{ème} siècle, l’Asie, les Amériques et les pays européens de l’arc alpin ont été les régions les plus fréquemment affectées (Veyret, 2003).

Parmi les pays les plus affectés, le Japon est celui qui paie le plus lourd tribut avec 1.5 milliard de dollars de dégâts par an et une dépense de 4.4 milliards de dollars pour la mitigation (période 1973-1992 ; Moriyama et Horiuchi, 1993 ; Nishimoto, 1993 ; Glade 1998). Suivent l’Italie, les Etats-Unis et l’Inde avec respectivement 1.8, 1.4 et 1 milliard de dollars de dégâts par an (Catenacci, 1992 ; Schuster, 1996). Outre les dommages matériels, les ‘mouvements de versant’ ont provoqué 800 à 1 000 victimes en moyenne par an depuis 20 ans (Aleotti et Chowdhury, 1999) et depuis 1993, 940 personnes ont été tuées chaque année, la majorité résidant au Pérou, en Chine, au Japon, en Italie et aux Etats-Unis (Eisbacher et Clague, 1984 ; Berz, 1992 ; Alexander, 1993 ; Evans, 1997 ; Guzzetti, 2000).

Ces quelques exemples montrent que les conséquences induites se révèlent toutes aussi alarmantes pour les vies humaines que pour l’économie. Par exemple, en Italie, au *Vajont*, en 1964 une chute de plusieurs millions de m³ de matériaux dans un lac de retenue a provoqué une vague débordant du barrage et engendrant l’inondation de six villages, 2 000 morts et plusieurs millions d’euros de dégâts. Au Costa-Rica ou en Equateur, durant la dernière décennie, les ‘mouvements de versant’ ont eu un impact non négligeable sur leurs développements économiques avec une perte de 1 à 2 % de leur PNB respectif (Mora, 1995 ; Léone et Velázquez, 1996). Enfin, les conséquences

indirectes peuvent se traduire par de lourds investissements pour la protection des infrastructures et des populations (surveillance, travaux de stabilisation) et, la prévision spatiale et temporelle de ces phénomènes. En France, la surveillance des glissements de *Séchilienne* et de *la Clapière* s'est élevée respectivement à 100 000 euros et 275 000 euros (Rapport OPEST, 1995).

Il existe donc une forte demande sociale pour la définition du risque '*mouvements de versant*', notamment pour sa prévision spatiale et temporelle et sa prévention. Cette demande s'est accrue constamment au fil du temps sous l'effet de plusieurs facteurs (Besson, 1996 ; Malet, 2003) : (i) croissance économique et démographique (Finlay et Fell, 1997 ; Alexander 2002 ; Crozier et Glade, 2005), (ii) accroissement de la mobilité des populations, (iii) perte de la mémoire du '*risque*' et excès de confiance dans les systèmes de protection (Charlier et Decrop, 1997).

Cette demande sociale s'est traduite au niveau international par l'adoption de la *Décennie Internationale pour la Prévention des Catastrophes Naturelles* (DICPN, 1990–2000 ; Morgenstern, 1997), puis par le *Natural Hazard Program* soutenu par l'UNESCO. Depuis 2000, un nouveau programme international de prévention des catastrophes, intitulé *Stratégie Internationale pour la Prévention des Catastrophes* (IDCR), a été adopté lors de l'Assemblée Générale de l'ONU. La stratégie reste la même que pour la DICPN, c'est à dire : (i) réduire l'impact des catastrophes dans le monde, (ii) faire prendre conscience aux décideurs des dangers liés aux phénomènes par une politique d'information plus cohérente, (iii) améliorer la connaissance scientifique des phénomènes tout en favorisant la coopération entre scientifiques et décideurs. Ces initiatives soutenues par la *Banque Mondiale*, l'*Union Européenne*, les *Programmes des Nations-Unies pour l'Environnement et le Développement* ont permis de soutenir diverses conférences, programmes de recherche et consortiums dont l'*International Consortium on Landslides*¹ (ICL).

En France, comme en Suisse ou en Italie, des politiques de prévention des risques naturels, reposant sur des méthodes de cartographies spécifiques, ont été engagées à l'échelle du 1/25 000^{ème} ou du 1/10 000^{ème}. Précurseur dans ce domaine, la France mène une politique de cartographie préventive depuis les années 70 qui s'est traduite par la mise en place successive : (i) des cartes ZERMOS (*Zones Exposées aux risques de Mouvements du Sol et du sous-sol*) en 1975, (ii) des PER (*Plan d'Exposition aux Risques*) en 1982 et des PPR (*Plan de Prévention des Risques*) en 1995 (MATE/MATL, 1999).

En Suisse, en 1979, la *Loi Fédérale sur l'Aménagement du Territoire* (LAT) préconise que les zones soumises à de fortes probabilités de risques naturels soient spécifiquement intégrées dans les plans d'aménagement cantonaux. En 1997, une recommandation fédérale sur les mouvements de terrain leur confère une place spécifique dans les plans d'aménagement (OFAT², OFEE³, OFEFP⁴, 1997). Enfin, en Italie, l'action est moins centralisée : les régions sont '*seulement*' guidées par une *Agence Nationale pour la Protection Civile*. Elles doivent définir leur politique de prévention contre les risques naturels en termes d'outils et les mesures à prendre en cas d'urgence.

Pour ces trois pays, la cartographie du risque est fondée sur une démarche scientifique de zonage du risque. Cette démarche générale reprise de Crozier et Glade (2005), est détaillée dans la figure I.1⁵. **L'évaluation du risque (*Risk assessment*)**, exprimée par l'équation I.3 de la figure I.1, correspond au produit d'un **aléa (*Hazard*, Eq. I.2)** et des conséquences de l'action de cet aléa sur des **enjeux**. Les conséquences dépendent des **éléments exposés** et de leurs **vulnérabilités**

¹ <http://icl.dpri.kyoto-u.ac.jp/>

² OFAT : Office Fédéral de l'Aménagement du Territoire.

³ OFEE : Office Fédéral de l'Economie des Eaux.

⁴ OFEFP : Office Fédéral de l'Environnement des Forêts et du paysage.

⁵ Les différents concepts et termes ont été définis dans le cadre général de l'analyse du risque (Varnes, 1978 et 1984 ; UNDR0, 1979 ; UNDP/BCPR, 2004) puis adaptés aux spécificités du risque '*mouvement de versant*' par plusieurs auteurs depuis le début des années 1990 (Einstein, 1988 ; Antoine et Giraud, 1992 ; Dikau et al., 1996 ; Leroi, 1996 ; Cruden et Fell, 1997 ; Hungr et al., 2001 ; Bonnard et al., 2004 ; Fell et al., 2005 ; Crozier et Glade, 2005).

(Eq. I.1), exprimées le plus fréquemment en termes de valeurs ou de degrés de dégâts (Glade, 2003 ; Bell et Glade, 2004).

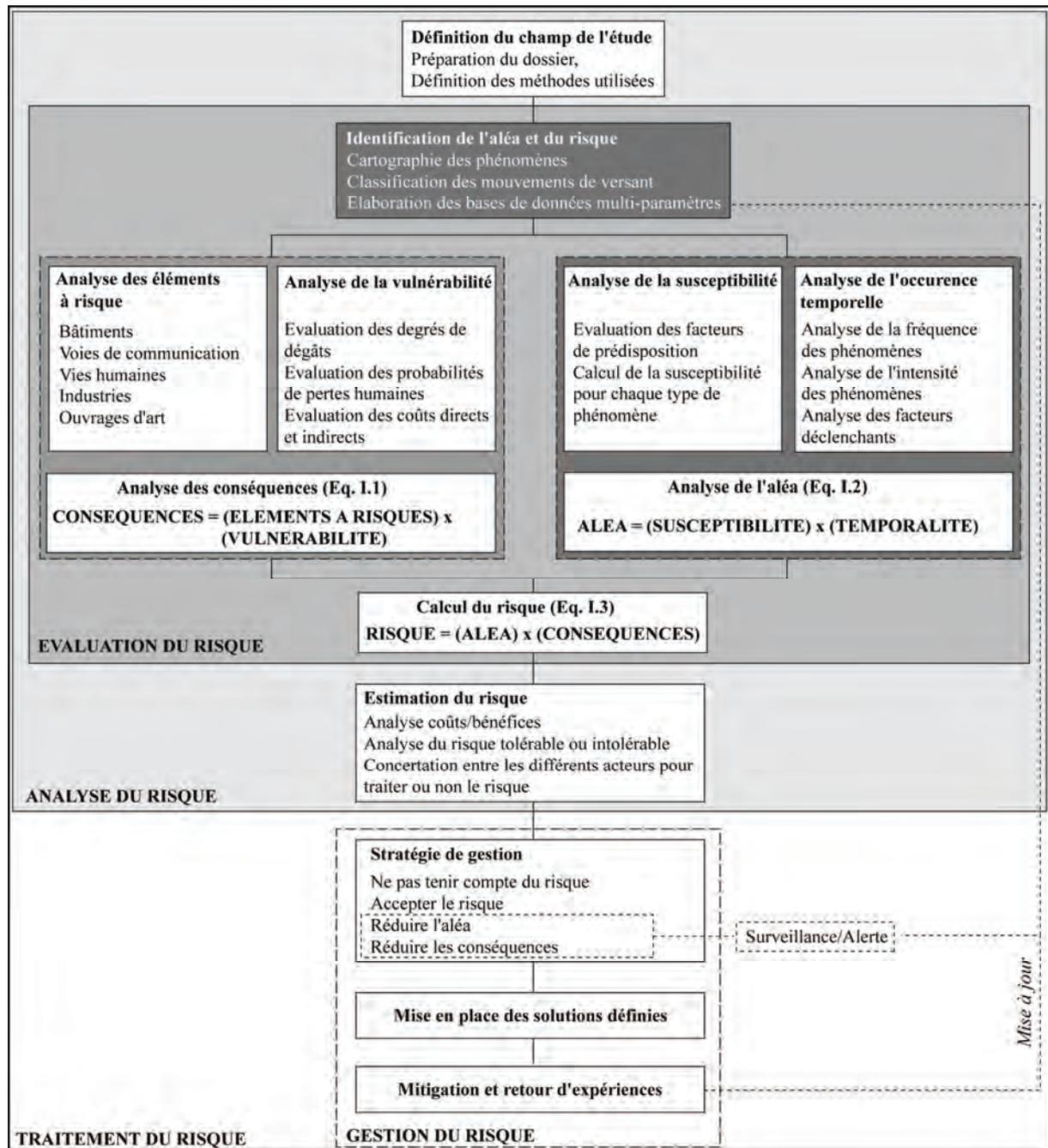
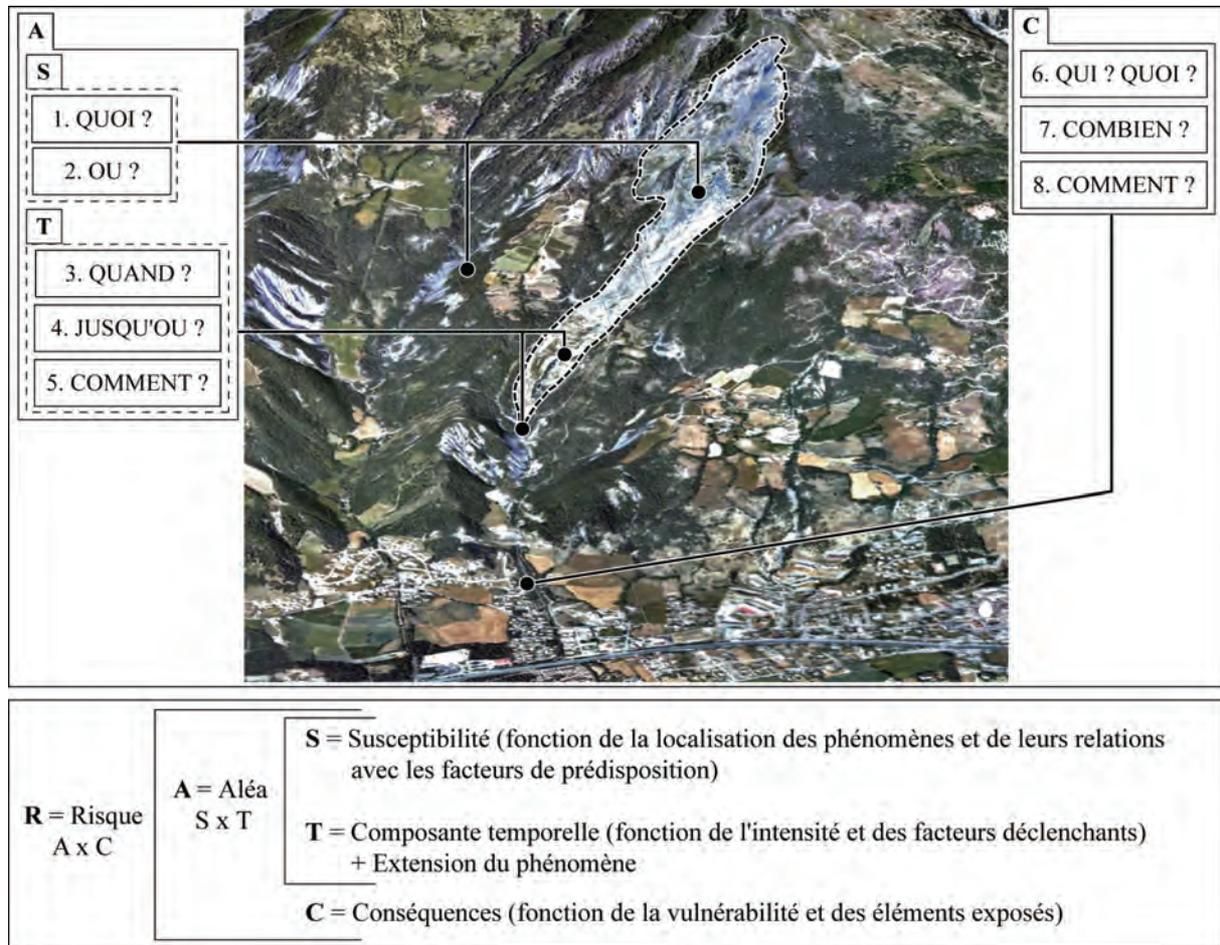


Fig. I.1. Cadre théorique de l'évaluation, de la gestion et du traitement du risque pour les mouvements de versant (Crozier et Glade, 2005).

Ainsi, la démarche scientifique pour le zonage du risque 'mouvements de versant' est synthétisée dans la figure I.2. Elle permet de répondre aux questions 1 et 2 soit, l'évaluation de la **susceptibilité** des terrains, c'est-à-dire la **probabilité d'occurrence spatiale d'un phénomène pour plusieurs facteurs de prédisposition** environnementaux. En complément, les questions 3 à 5 permettent d'évaluer l'**aléa stricto sensu**, c'est-à-dire la **probabilité d'occurrence spatiale, temporelle et de propagation d'un phénomène d'intensité donnée** (Cruden et Fell, 1997 ; Fell et al., 2005). Enfin, les questions 6 à 8 permettent de caractériser les **conséquences de l'aléa**

sur les enjeux potentiellement affectés. Procéder à l'évaluation du risque comporte ainsi trois étapes :

- (i) L'évaluation de l'aléa ;
- (ii) L'évaluation des conséquences ;
- (iii) L'évaluation du risque par le croisement des informations obtenues aux étapes (i) et (ii).



Document élaboré à partir de la BDAlti® (IGN, 1998) et de l'Orthophoto 2004 de l'IGN®.

Fig. I.2. Les différentes composantes de l'évaluation du risque à travers l'exemple du glissement-coulée de la Valette dans le bassin de Barcelonnette (Alpes-de Haute-Provence, France).

En France, dans le cadre de la procédure PPR, l'analyse et le zonage de l'aléa s'effectuent à l'échelle du 1/10 000^{ème} selon une démarche de type 'expert' qualifiée généralement de **subjective** et fondée sur la théorie de l'actualisme (Leroi, 1996 ; MATE/MATL, 1999 ; Malet *et al.*, 2006). L'expert définit le type de phénomène, les rôles respectifs des facteurs de prédisposition (gradient de pente, lithologie, occupation du sol, etc.) et des facteurs déclenchants (séismes, précipitations, actions anthropiques, etc.). Cette démarche est le résultat d'un **raisonnement par analogie** entre les observations des phénomènes et le rôle de chaque facteur. A partir d'observations et parfois de quelques investigations (de terrain, recherches documentaires, etc.), le professionnel estime le poids réel et relatif des différents facteurs intervenant dans l'occurrence des phénomènes pour les 100 prochaines années. Ce cheminement complexe le conduit à placer une limite qu'il estime être la plus judicieuse et la plus pertinente, au regard des connaissances du moment.

La cartographie de l'aléa suppose de fournir des informations sur la distribution spatiale et temporelle, le type, le volume, la vitesse, et les limites d'extension latérales, amont et aval des phénomènes prédits dans un secteur précis pour une période de retour donnée. Cependant, les processus de rupture de versants, ainsi que les comportements post-rupture sont encore mal connus (Flageollet, 1989 ; Aleotti et Chowdhury, 1999 ; Malet, 2003 ; van Westen *et al.*, 2006) et La prévention des aléas " glissements de terrain " implique que ces phénomènes soient caractérisés par une intensité, une occurrence spatiale et une occurrence temporelle. Ce qui revient à répondre à ces quatre questions : où, quand, comment et pourquoi le phénomène se produira ? Même en simplifiant l'analyse aux deux premières questions la **démarche reste difficile et est sujette à de nombreuses limites**. En Janvier 1994, par exemple, à la *Salle en Beaumont (Savoie)*, un glissement de terrain de 1.3 millions de m³ de matériaux a détruit neuf bâtiments et a provoqué la mort de quatre personnes. Quelques mois auparavant un *PPR* avait pourtant été approuvé et le secteur considéré '*constructible sans étude préalable*' (zone blanche). Si la démarche offre de nombreux avantages pour la cartographie de l'aléa '*mouvements de versant*' (cartographie sur une large zone, rapidité de mise en place, etc.), il reste des incertitudes liées :

- (i) A la nature discontinue dans le temps et l'espace des phénomènes (manque de données historiques fiables et complètes, difficultés d'identifier les causes des phénomènes) ;
- (ii) Aux erreurs d'appréciation de l'expert.

Les **Systèmes d'Information Géographique (SIG)** ont permis de développer de nouvelles techniques de cartographie de la susceptibilité à l'échelle du bassin versant ou du bassin de risque. Fondées sur des algorithmes statistiques (méthodes bivariée, multivariée, méthodes combinant différentes approches), ces méthodes permettent de s'affranchir de la subjectivité liée à l'expert. Généralement utilisées à méso-échelle (1/25 000^{ème} ou 1/50 000^{ème}), elles mettent en relation les '*mouvements de versant*' et des variables prédictives (*i.e.* les facteurs de prédisposition) pour obtenir des cartes de susceptibilité (van Westen, 1993 ; Carrara *et al.*, 1995 ; Chung *et al.*, 1995 ; Soeters et van Westen, 1996 ; van Westen *et al.*, 2003 ; van Westen, 2004 ; van Westen *et al.*, 2006).

Si ces techniques sont maintenant éprouvées à méso-échelle (van Westen, 2004 ; van Westen *et al.*, 2003 et 2005), peu de travaux à partir de méthodes statistiques par *SIG* ont été engagées aux échelles '*larges*', soit au 1/10 000^{ème} (Maquaire, 2002). **Se voulant une alternative aux méthodes expertes subjectives, les méthodes statistiques se doivent d'être testées et comparées à la même échelle de travail que ces dernières**. Ainsi, l'objectif scientifique de cette recherche est de pouvoir répondre à cette question :

Comment évaluer et cartographier par *SIG*, à partir d'un minimum d'informations, la susceptibilité et l'aléa '*mouvements de versant*' à l'échelle du 1/10 000^{ème}, échelle de la cartographie des risques officielle en France (*PPR*) ?

2. OBJECTIFS DE LA RECHERCHE

Cette recherche s'organise autour de quatre grandes questions principales :

- (i) **Quelles sont les données nécessaires et indispensables** pour une cartographie de la susceptibilité, puis de l'aléa pour des secteurs de montagnes à la morphologie complexe ?
- (ii) **Quelles sont les méthodes de cartographie les plus pertinentes** permettant de réduire les incertitudes liées aux données, aux différentes approches, aux phénomènes et à l'échelle du 1/10 000^{ème} ?

- (iii) **Comment obtenir des résultats fiables et transposables** à des sites aux conditions géomorphologiques similaires ?
- (iv) **Comment passer d'une cartographie de la susceptibilité à la cartographie de l'aléa**, à l'échelle du 1/10 000^{ème}, en utilisant des modèles numériques ?

La démarche adoptée dans ce travail est fondée sur la sélection de plusieurs approches cartographiques afin de les tester, de les caler, de les valider et de les comparer entre elles mais aussi avec des observations de terrain. L'objectif principal est de vérifier leur applicabilité au 1/10 000^{ème}, échelle rarement utilisée pour la modélisation jusqu'à ce jour. Pour ce faire, **trois axes de réflexion particuliers sont privilégiés** : le premier axe **porte sur les données**, leur échelle d'acquisition, leur nomenclature et leur influence sur les résultats. Le deuxième axe porte **sur la transposition des résultats** sur d'autres sites. Le troisième axe porte **sur le passage de la cartographie de la susceptibilité à la cartographie de l'aléa *stricto sensu***. Les objectifs et les étapes sont de :

- (i) **Elaborer des bases de données spatialisées** adaptées et représentatives des caractéristiques du site d'étude ;
- (ii) **Sélectionner les méthodes de cartographie les plus adaptées à notre recherche** parmi les méthodes qualitatives, semi-quantitatives, quantitatives existantes pour une application à l'échelle du 1/10 000^{ème} ;
- (iii) **Identifier les principaux facteurs de prédisposition** (topographie, lithologique, occupation du sol, etc.) qui influencent la localisation des différents '*mouvements de versant*' ;
- (iv) Evaluer les méthodes selon une procédure spécifique de calage/validation applicable pour chaque type de '*mouvements de versant*' ;
- (v) **Tester la transposition des meilleurs résultats calés et validés pour un site vers un autre site** aux caractéristiques géomorphologiques similaires. Ce type de transposition n'ayant jamais été réalisé à cette échelle d'analyse ;
- (vi) **Tenter une cartographie de l'aléa par SIG** tenant compte des conditions hydro-climatologiques normales et/ou exceptionnelles sur un bassin de risque.

3. CONTEXTE DE LA RECHERCHE

Cette recherche a pour cadre géographique le **bassin de Barcelonnette** situé dans les *Alpes-de-Haute-Provence* (France). Ce bassin est connu pour ses affleurements de marnes noires *callovo-oxfordiennes*, ses paysages de '*badlands*' (roubines) et ses formations glaciaires et périglaciaires. Il est l'objet de nombreux '*mouvements de versant*' dont les plus connus sont :

- (i) Le glissement-coulée de *la Valette* déclenché en 1982, sur le versant *Adret* ;
- (ii) Les glissement-coulées de *Poche* et de *Super-Sauze* déclenchés respectivement au 19^{ème} siècle et entre 1956 et 1971, sur le versant *Ubac* ;
- (iii) Les laves torrentielles des bassins versants *Adret* dont les dernières se sont déclenchées en 2003 dans les bassins versants de *Faucon* et du *Bourget*.

Depuis une dizaine d'années plusieurs programmes de recherches universitaires et interdisciplinaires (*EPOCH*⁶, 1991-1993 ; *TESLEC*⁷, 1994-1996, *NEWTECH*⁸, 1996-1998) ont été

⁶ *EPOCH* : *The Temporal Occurrence and Forecasting of Landslides in the European Community*, EC-DG XII, Contrat N° 90-0025, Coordinateur : J.-C. Flageollet, Université Louis Pasteur, Strasbourg, France.

⁷ *TESLEC* : *The Temporal Stability and Activity of Landslides in Europe with respect of Climatic Change*, EC-DG XII, Contrat N° EV5V-CT94-0454, Coordinateur : R. Dikau, Universität Bonn, Bonn, Germany.

engagés pour inventorier, caractériser, développer des techniques d'auscultation et des modèles numériques de prévision adaptés plus particulièrement aux glissement-coulées et aux laves torrentielles. Ces programmes de recherches ont permis de soutenir scientifiquement, et financièrement plusieurs thèses de doctorat dont les plus récentes ont été centrées sur l'analyse et la modélisation des glissement-coulées (thèse de Jean-Philippe Malet, 2003), ou sur l'identification des zones sources de laves torrentielles par plusieurs méthodes complémentaires (thèse d'Alexandre Remaître, 2006).

Ces travaux ont permis d'élargir le champ des connaissances de ces phénomènes notamment leurs caractéristiques morphologiques, leurs facteurs de contrôle et leurs évolutions temporelles pour des conditions données.

Le bassin de *Barcelonnette* est aussi sujet à d'autres '*mouvements de versant*' à la cinématique plus lente. Ces mouvements ont été inventoriés par Légier dès 1977, les différents programmes de recherches cités précédemment ayant contribué à compléter ces premières observations, notamment sur le versant *Ubac* de la vallée. Si la localisation de ces '*mouvements de versant*' est donc connue, leur typologie, leur activité, leur âge et les facteurs de contrôle sont encore à définir. C'est dans ce cadre scientifique que s'est mise en place cette thèse soutenue scientifiquement et financièrement par le programme *ALARM*⁹ (2002-2005). **L'objectif principal de ce projet était de produire des cartes de risque par SIG en :**

- (i) Elaborant des cartes d'inventaire de phénomènes associées à des bases de données spatialisées ;
- (ii) Identifiant les mécanismes contrôlant la dynamique des phénomènes ;
- (iii) Créant des cartes de susceptibilité et d'aléa à l'échelle du bassin de risque ;
- (iv) Proposant des méthodes de cartographie innovante de la vulnérabilité prenant en compte les effets directs et indirects sur la base de scénarios catastrophiques ;
- (v) Croisant les informations obtenues pour l'aléa et la vulnérabilité dans le but d'obtenir des cartes de risque.

Ce travail de recherche complète donc les différents travaux engagés sur la cartographie des '*mouvements de versant*' du bassin de *Barcelonnette* pendant les programmes *EPOCH*, *TESLEC* et *NEWTECH*. Les différentes informations collectées durant ces programmes ont servi de base à notre réflexion et à l'élaboration des bases de données spatialisées utilisées pour ce travail. En outre, ce travail a bénéficié de la coopération scientifique et technique de *l'Università di Milano-Bicocca* concernant les approches quantitatives et les modèles d'analyse spatiale associés.

4. STRUCTURE DE LA THESE

La thèse s'articule en trois grandes parties, regroupant au total huit chapitres (Fig. I.3). Les résultats sont présentés en tenant compte des problèmes liés à la complexité du terrain, à l'acquisition et à la précision des données et à l'incertitude des résultats permettant ainsi d'appréhender la stratégie sous différents angles scientifiques.

La première partie dresse un état de l'art des approches existantes pour la cartographie de la susceptibilité et de l'aléa '*mouvements de versant*', permettant d'en choisir quelques unes parmi les meilleures. Les caractéristiques géomorphologiques des sites de recherche (sites de calage, de

⁸ *NEWTECH : New Technologies for Landslides Hazard Assessment and Management in Europe, EC-DG XII, Contrat N° ENV-CT96-0248, Coordinateur : J. Corominas, Universitat Polytechnica de Catalunya, Barcelona, Spain.*

⁹ *ALARM : Assessment of Landslide Risk and Mitigation in Mountain Areas, EC-DG XII, Contrat N° EVG1-CT-2001-00038, Coordinateur : S. Silvano, Consiglio Nazionale delle Ricerche, Padova, Italia.*

validation et de transposition) sont ensuite présentées en s'appuyant sur une carte morphodynamique. Cette carte servira de base pour décrire les différents types de '*mouvements de versant*' observés.

- (i) **Le premier chapitre** dresse un état de l'art des méthodes d'évaluation de la susceptibilité et de l'aléa. L'apport des SIG comme outil d'aide à la compréhension des phénomènes et à leur analyse spatiale est discuté. Les avantages et les inconvénients des différentes approches (qualitatives, semi-quantitatives, quantitatives et déterministes) ainsi que leur domaine d'applicabilité sont ensuite résumés permettant de choisir parmi ces approches les plus adaptées à notre recherche et d'élaborer par la suite une stratégie d'analyse et de cartographie spécifique à l'échelle du 1/10 000^{ème}.
- (ii) **Le deuxième chapitre** expose les grands traits physio-géographiques des sites d'étude (site principal, le bassin de *Barcelonnette*, et site secondaire, le bassin versant du *Moulin*) en axant la description sur les caractéristiques générales favorables aux '*mouvements de versant*'. Cette description permet de justifier la présence d'un site de calage, d'un site de validation et d'un site de transposition. La méthodologie utilisée pour la cartographie morphodynamique, au 1/10 000^{ème} et servant de base pour la reconnaissance des types de '*mouvements de versant*' est ensuite abordée. Les différentes bases de données spatiales et attributaires, des différents types de phénomènes, collectées et digitalisées sous SIG sont ensuite présentées.

La **deuxième partie** est consacrée au choix des variables à retenir pour les différentes approches de cartographie. Sont successivement décrites les variables à modéliser (*i.e.* les '*mouvements de versant*') puis les variables prédictives (*i.e.* les facteurs de prédisposition). Avant d'utiliser une stratégie spécifique fondée sur le croisement des variables à modéliser et des variables prédictives, les problèmes relatifs à leur qualité et à leur choix sont discutés.

- (iii) **Le troisième chapitre** décrit plus précisément les caractéristiques géographiques et morphologiques du site principal (versant *Ubac* et versant *Adret* du bassin de *Barcelonnette*) en se fondant sur la cartographie morphodynamique. Une typologie et une description synthétique des '*mouvements de versant*' du bassin de *Barcelonnette* sont ensuite présentées. La description permet d'analyser des caractéristiques morphologiques et morphométriques de chaque type de phénomènes du site de calage (versant *Ubac*). Ces analyses sont discutées afin de démontrer dans quelles mesures certains attributs peuvent aider à qualifier les '*mouvements de versant*' du secteur étudié afin d'établir un premier jeu de variable(s) à modéliser.
- (iv) Les variables prédictives sont présentées dans **le quatrième chapitre**. Les différentes caractéristiques (acquisition, résolution et nomenclature) de chaque variable sont définies. Les données disponibles sont comparées à celles produites spécifiquement pour cette recherche, en confirmant une certaine différence entre les versants *Adret* et *Ubac* du bassin de *Barcelonnette*. Ce chapitre ouvre sur une discussion à propos du choix des variables à retenir.
- (v) **Le cinquième chapitre** est consacré aux choix des différentes variables à retenir (variables à modéliser et variables prédictives). Une stratégie originale, fondée sur des analyses statistiques descriptives et aidée par notre connaissance du site, est décrite pour ensuite effectuer une première sélection des variables propres à chaque type de phénomène observé.

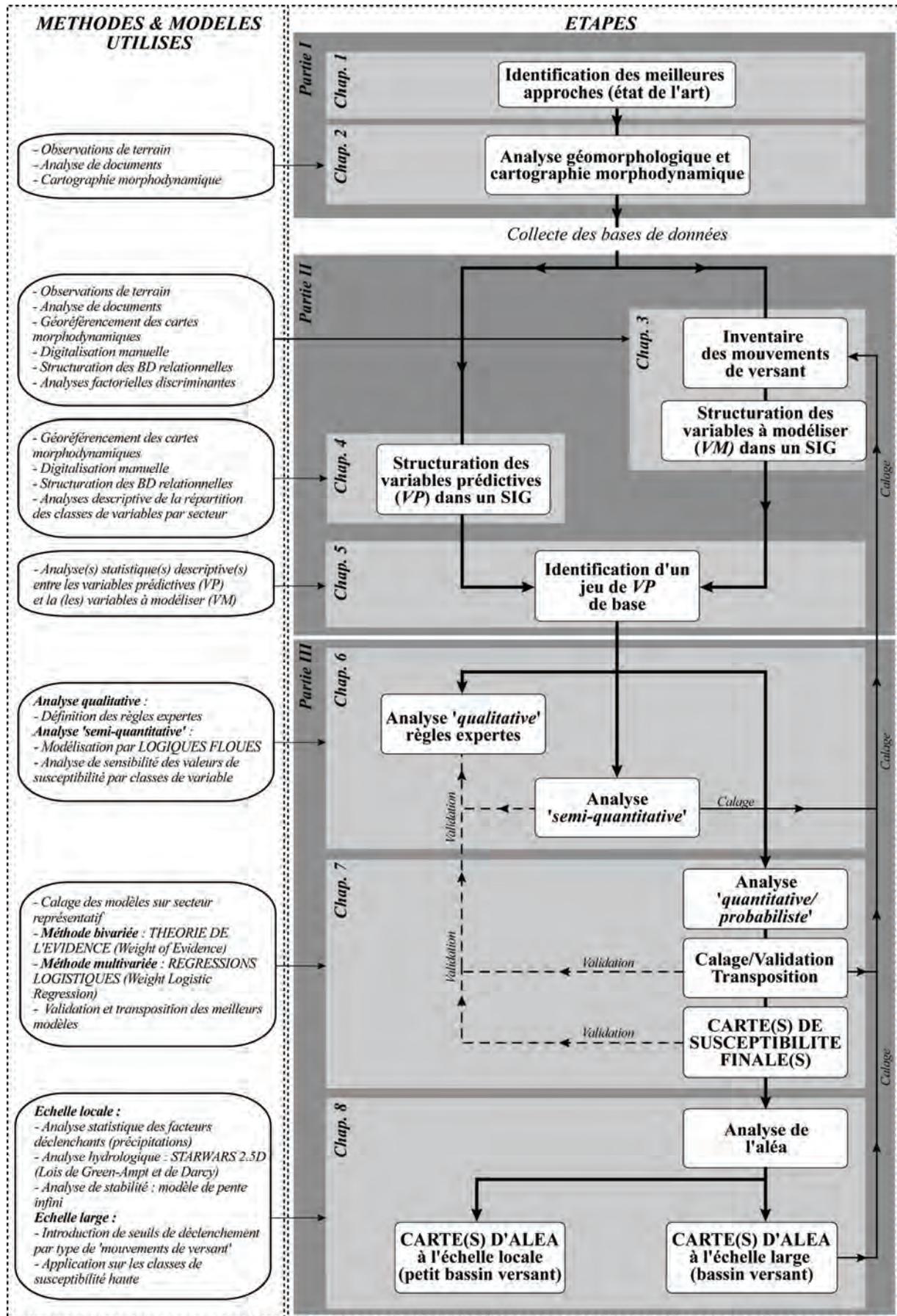


Fig. I.3. Représentation schématique des étapes et des méthodes suivies dans cette recherche.

La **troisième partie** présente les différentes approches et analyses de la susceptibilité et de l'aléa.

- (vi) **Le sixième chapitre** se concentre sur les approches qualitative et semi-quantitative de la susceptibilité. Pour ces deux approches sont retenues une **méthode d'analyse dite 'experte'** fondée sur les règles préconisées par le *PPR* et une **méthode d'analyse spatiale semi-quantitative fondée sur des règles par Logiques floues** assez peu utilisées actuellement. Les caractéristiques de chaque méthode et la stratégie de calage (sur un site représentatif) et de validation (sur le versant *Ubac*) pour l'approche par *Logiques floues* sont successivement présentées. Les résultats des analyses de sensibilité et des meilleures simulations sont ensuite discutés, évalués et validés par rapport à la carte de susceptibilité '*experte*' considérée comme document de référence.
- (vii) **Le septième chapitre** est consacré à l'approche quantitative de la susceptibilité. Deux modèles d'analyse spatiale fondée sur des méthodes probabilistes sont **testés : un modèle bivarié fondé sur le théorème de Bayes (*Théorie de l'Evidence ou Weight of Evidence*)** et un **modèle multivarié fondé sur les régressions logistiques (*Weighted Logistic Regression*)**. Une stratégie de calage et de validation spécifique est présentée. Fondée sur une succession d'analyses statistiques multidimensionnelles, cette analyse exploratoire permet d'identifier les variables les plus influentes pour chaque type de phénomène. Les résultats de chaque méthode sont ensuite comparés entre eux puis à ceux obtenus par l'approche semi-quantitative et évalués et validés par rapport à la carte '*experte*'. Au final, le meilleur modèle d'analyse spatiale est utilisé pour être validé localement sur le versant '*Adret*' puis transposé sur le bassin versant du *Moulin*. Les avantages et les limites de cette stratégie sont ensuite discutés.
- (viii) **Dans le huitième chapitre**, une cartographie de l'aléa au 1/10 000^{ème} reposant sur un rapprochement entre modèle probabiliste et modèle physique est proposée. Un modèle à base physique (*STARWARS*, modèle hydrologique couplé à un modèle de stabilité de pente) a été sélectionné pour déterminer les seuils de déclenchement de certains types de '*mouvements de versant*' caractéristiques du bassin de *Barcelonnette*. Une stratégie spécifique utilisant un site de calage dont les phénomènes recensés sont bien connus (dates de déclenchement, occurrence temporelle...) est décrite. Les paramètres les plus influents sont discutés. Cette approche étant limitée spatialement, une tentative de transposition est effectuée en intégrant les zones de forte susceptibilité aux '*mouvements de versant*' simulées par le modèle probabiliste bivarié. Les avantages et les limites des deux approches de cartographie de l'aléa expérimentées dans ce travail sont ensuite discutés.

PARTIE I : EVALUATION DE LA SUSCEPTIBILITE ET DE L'ALEA STRATEGIE POUR UNE ECHELLE DU 1/10 000^{EME}

La première partie dresse un état de l'art des approches existantes pour la cartographie de la susceptibilité et de l'aléa '*mouvements de versant*', permettant d'en choisir quelques unes parmi les meilleures. Les caractéristiques géomorphologiques des sites de recherche (sites de calage, de validation et de transposition) sont ensuite présentées en s'appuyant sur une carte morphodynamique. Cette carte servira de base pour décrire les différents types de '*mouvements de versant*' observés.

Le premier chapitre dresse un état de l'art des méthodes d'évaluation de la susceptibilité et de l'aléa. L'apport des SIG comme outil d'aide à la compréhension des phénomènes et à leur analyse spatiale est discuté. Les avantages et les inconvénients des différentes approches (qualitatives, semi-quantitatives, quantitatives et déterministes) ainsi que leur domaine d'applicabilité sont ensuite résumés permettant de choisir parmi ces approches les plus adaptées à notre recherche et d'élaborer par la suite une stratégie d'analyse et de cartographie spécifique à l'échelle du 1/10 000^{ème}.

Le deuxième chapitre expose les grands traits physio-géographiques des sites d'étude (site principal, le bassin de *Barcelonnette*, et site secondaire, le bassin versant du *Moulin*) en axant la description sur les caractéristiques générales favorables aux '*mouvements de versant*'. Cette description permet de justifier la présence d'un site de calage, d'un site de validation et d'un site de transposition. La méthodologie utilisée pour la cartographie morphodynamique, au 1/10 000^{ème} et servant de base pour la reconnaissance des types de '*mouvements de versant*' est ensuite abordée. Les différentes bases de données spatiales et attributaires, des différents types de phénomènes, collectées et digitalisées sous SIG sont ensuite présentées.

CHAPITRE 1 : EVALUATION DE L'ALEA 'MOUVEMENTS DE VERSANT' AU 1/10 000^{EME} : CONSTAT, BESOINS, ENJEUX

Le choix d'une méthode d'évaluation de la susceptibilité et de l'aléa '*mouvement de versant*' est fonction des objectifs de recherche (Aleotti et Chowdhury, 1999 ; Glade et Crozier, 2005). Ces objectifs sont liés à l'échelle de travail choisie : (i) soit l'échelle du versant ou d'un site instable utilisée pour définir le fonctionnement d'un phénomène et simuler des scénarii d'évolution, (ii) soit l'échelle du bassin versant pour évaluer et cartographier l'aléa selon des critères morphologiques avec la production d'une cartographie prévisionnelle et préventive (Maquaire, 2002). Chacune de ces échelles présente des avantages et des inconvénients, toutefois, que ce soit pour l'une ou pour l'autre, **la qualité des résultats dépend avant tout de la qualité des données d'entrée**. Par exemple, pour une évaluation à l'échelle du 1/5 000^{eme}, les données seront plus nombreuses et plus détaillées que pour une évaluation à l'échelle du 1/25 000^{eme}. Ainsi, selon l'échelle de travail, la résolution spatiale, la nomenclature et le nombre de ces données d'entrée sont différents.

L'objectif de ce chapitre est de dresser un état de l'art des différentes approches de cartographie de l'aléa '*mouvement de versants*' à l'échelle du bassin versant soit à l'échelle du 1/10 000^{eme}. Dans un premier temps, plusieurs approches d'évaluation de la susceptibilité et de l'aléa sont détaillées avec leurs avantages et leurs inconvénients. Nous insisterons sur l'apport des SIG (*Système d'Information Géographique*) pour chacune d'elle. Dans un deuxième temps, **un inventaire des données nécessaires et indispensables** pour chaque méthode ainsi que l'échelle de travail la plus appropriée pour obtenir des résultats fiables est donné. Enfin, dans un troisième temps, une synthèse permet : (i) d'identifier les lacunes de chaque méthode et (ii) de faire émerger un questionnement scientifique afin de choisir les approches les plus adaptées pour notre recherche.

1. EVALUATION ET CARTOGRAPHIE DE L'ALEA 'MOUVEMENTS DE VERSANT'

La multiplication des ouvrages et articles scientifiques indiquent qu'il existe plusieurs niveaux d'échelle de travail pour évaluer l'aléa et le risque. Schématiquement, cinq niveaux sont distingués : (i) l'échelle nationale, (ii) l'échelle régionale, (iii) l'échelle moyenne, (iv) l'échelle large et (v) l'échelle locale (Tableau 1.1, van Westen, 1993 ; Soeters et van Westen, 1996 ; Maquaire, 2002).

Pour obtenir des résultats exploitables pour le '*traitement du risque*' (Crozier et Glade, 2005), l'idéal est une évaluation de l'aléa selon deux échelles de travail imbriquées (Brand, 1988 ; Charlier et Decrop, 1997 ; Aleotti et Chowdhury, 1999). Il s'agit alors :

- (i) Dans un premier temps de travailler à l'**échelle large ou locale** (Tab. 1.1 ; Maquaire, 2002) et par conséquent de s'intéresser au fonctionnement d'un **versant ou d'un site instable**. Chaque facteur d'instabilité est étudié et un poids respectif lui est

attribué. Il est possible ensuite de modéliser les relations entre les paramètres (précipitations, pressions interstitielles, déplacements) afin de définir un coefficient de stabilité et définir des seuils de déclenchement (Maquaire, 2002 ; Malet, 2003) ;

- (ii) Dans un deuxième temps, de transposer les informations obtenues à l'**échelle moyenne ou large**, sur un site plus étendu comme un **bassin versant**, afin de spatialiser l'aléa.

Cependant, les exemples de **transposition de résultats entre les échelles** (l'échelle locale à l'échelle large ou de l'échelle large à l'échelle moyenne) **sont rares**. Cet exercice rencontre de trop nombreuses difficultés, notamment en termes de transfert de données. Par exemple, la trop grande complexité géomorphologique d'un bassin versant ne permet pas de transposer les paramètres géotechniques acquis sur un versant ou sur un phénomène déclenché. Ce transfert ne peut s'effectuer que sous certaines conditions avec une extrême simplification (i) de l'épaisseur des formations favorables au déclenchement des mouvements ou (ii) de la variation de la nappe aquifère (Corominas *et al.*, 2003 ; van Westen *et al.*, 2006).

Ainsi, le plus souvent, on se contente (i) de travailler à une échelle sans connecter les résultats acquis pour une autre échelle, (ii) ou de transposer les résultats de manière analogique en se référant essentiellement à l'opinion experte. Ainsi, certains développements méthodologiques sont nécessaires, les conditions de transposition nécessitant des vérifications à chaque étape de l'étude.

Tab. 1.1. Les différentes échelles d'analyse retenues pour l'évaluation de l'aléa 'mouvements de versant' (van Westen, 1993 ; Soeters et van Westen, 1996 ; Maquaire, 2002).

Nom	Echelle indicative	Zone d'étude	Type d'application
Nationale	1/1 000 000 ^{ème}	Pays et/ou région (> 10 000km ²)	Inventaire national
Régionale	1/100 000 ^{ème} à 1/500 000 ^{ème}	Région (10 000 à 1 000 km ²)	Inventaire régional
Moyenne	1/25 000 ^{ème} à 1/50 000 ^{ème}	Bassin versant (1 000 à 100 km ²)	Etude de faisabilité + Etude de la susceptibilité (approche experte, approches statistiques)
Large	1/10 000 ^{ème}	Bassin versant et/ou versant (100 à 10 km ²)	Etude de la susceptibilité et/ou de l'aléa (approches) statistiques et /ou déterministes)
Locale	1/1 000 ^{ème} à 1/5 000 ^{ème}	Versant et/ou phénomène (< 10 km ²)	Etude détaillée d'un site instrumenté et/ou de l'aléa (approches déterministes)

Actuellement, deux types d'approches sont distingués pour des échelles de travail différentes (Soeters et van Westen, 1996, van Westen, 2004) :

- (i) Les **approches déterministes** à base de modèle physique, reposant sur des mesures directes de différents paramètres (géotechniques, hydrologiques, etc.) des phénomènes et/ou du versant. Ces modèles sont essentiellement réservés aux **échelles larges et locales** (Bromehead, 1992 ; Malet, 2003) ;
- (ii) Les **approches statistiques**, fondées sur des corrélations spatiales entre les phénomènes inventoriés et les facteurs de prédisposition. Ces modèles sont réservés aux **échelles moyenne et large** (Carrara *et al.*, 1995 ; van Westen *et al.*, 2006).

L'objectif de cette section est de dresser un état de l'art des différentes approches d'évaluation de l'aléa 'mouvement de versant' pour un bassin versant. Après avoir énuméré les concepts de base, une revue des différentes approches, s'appuyant sur de nombreux exemples calés et validés sur divers sites à travers le monde, est réalisée. Les approches et les modèles utilisés à l'échelle locale sont peu discutés, une revue détaillée pouvant être trouvée dans la thèse de Malet (2003) et dans les articles de van Westen (2000), Dai *et al.* (2002), van Westen *et al.* (2006).

1.1. Concept de base de l'évaluation et du zonage de l'aléa à l'échelle du bassin versant

Pour un bassin versant (échelle moyenne ou large), l'évaluation de l'aléa se divise en deux phases successives (Varnes, 1984) avec **l'évaluation de la susceptibilité puis celle de l'aléa**.

La susceptibilité exprime la probabilité spatiale qu'un type de phénomène se produise sur un territoire pour différentes conditions environnementales locales (facteurs de prédisposition). Cela suppose que tous les phénomènes sont identifiés et classés et qu'ils se reproduiront selon les mêmes conditions géologiques, géomorphologiques, hydrologiques et climatiques que les phénomènes connus. **L'évaluation de la susceptibilité s'effectue en trois étapes** (Varnes, 1984 ; Carrara *et al.*, 1995 ; Soeters et van Westen, 1996 ; Leroi, 1996 ; van Westen, 2001 ; van Westen *et al.*, 2003 ; van Westen *et al.*, 2006) avec :

- (i) **L'inventaire des phénomènes** où chaque phénomène est distingué selon son type, son activité, son âge. L'information relative aux phénomènes est plus ou moins détaillée selon les moyens et les documents mis à disposition ;
- (ii) La **cartographie des paramètres de terrain** les plus significatifs (**facteurs de prédisposition**) pour l'occurrence spatiale des phénomènes et leur analyse ;
- (iii) La **définition des pondérations relatives à chaque facteur** mis en cause pour la localisation des phénomènes. La définition de ces pondérations reflète la relation spatiale entre les phénomènes et les facteurs de prédisposition et se définit par diverses méthodes détaillées ci-après.

L'aléa correspond à la probabilité spatiale (susceptibilité) et temporelle (période de retour) qu'un type de phénomène d'une certaine intensité se produise sur un territoire pour une période temporelle donné. Cela nécessite **la détermination de la probabilité de rupture**, qui exprime la possibilité qu'un évènement naturel ou non (forçage externe ou interne) devienne un facteur déclenchant en fonction des conditions initiales et de valeurs seuils. Selon les résultats, plusieurs niveaux sont définis (fort, moyen, faible, nul).

Pendant, il reste difficile de quantifier réellement un niveau d'aléa. En effet, les données nécessaires à une analyse complète et rigoureuse de l'aléa, comme celles relatives aux facteurs déclenchant, ne sont pas toujours disponibles et/ou insuffisamment détaillées (van Westen *et al.*, 2006). De plus, les phénomènes peuvent se déclencher sur des périodes courtes et/ou sur des petites surfaces augmentant les difficultés d'observation (Ibsen et Brunsten, 1996). Face à ces incertitudes et pour les raisons évoquées précédemment, les résultats sont difficilement transposables d'un site à un autre. Une certaine méconnaissance des phénomènes peut alors subsister (Aleotti et Chowdhury, 1999 ; Malet *et al.*, 2006 ; van Westen *et al.*, 2006). Expliquant pourquoi fréquemment à **l'échelle du bassin versant, seule la susceptibilité des terrains à un type de phénomène est analysée et une évaluation relative de l'aléa (relative hazard assessment) est effectuée** (Wu *et al.*, 1996).

Suivant le degré de subjectivité introduit dans l'analyse, six approches peuvent être distinguées. On trouvera dans la littérature (Soeters et van Westen, 1996 ; Leroi, 1996 ; Aleotti et Chowdhury, 1999 ; van Westen, 2001 ; Dai *et al.*, 2001 ; van Westen *et al.*, 2003 ; van Westen *et al.*, 2006) :

- (i) **L'approche qualitative** fondée sur l'opinion de l'expert en charge de l'évaluation ;
- (ii) **L'approche semi-quantitative** qui tend à diminuer la part de subjectivité liée à l'expert ;
- (iii) **L'approche quantitative** qui repose sur des méthodes statistiques diverses mettant en relation les phénomènes observés et les facteurs de prédisposition cartographiés ;
- (iv) **L'approche hybride** mêlant approches qualitative, semi quantitative, quantitative ou intelligence artificielle ;

- (v) **L'approche dite "temporelle"** introduisant le facteur temps de manière statistique pour améliorer l'évaluation de la susceptibilité ;
- (vi) **L'approche déterministe ou physique**, reposant sur des modèles à base physique, qui donne une information sur la stabilité réelle des versants en calculant la probabilité de la rupture (coefficient de sécurité F_s).

Les paragraphes suivant (§ 1.2 à § 1.7) donnent un aperçu de ces différentes approches, à travers une revue bibliographique détaillée. Les avantages et les inconvénients ainsi que l'échelle de travail la plus adaptée pour chaque approche sont analysés. Enfin, à travers un tableau synoptique une synthèse finale est réalisée (§ 1.8).

1.2. L'approche qualitative : les méthodes 'expertes'

L'approche qualitative (ou **approche 'expert'**, Leroi, 1996) repose sur l'opinion de l'expert en charge de l'évaluation de l'aléa. En principe, les informations sont collectées sur le terrain avec l'aide de photographies aériennes et à travers des documents existants (cartes topographiques, cartes géomorphologiques, cartes géologiques...). En outre, les technologies spatiales sont de plus en plus utilisées (Petley *et al.*, 2002 ; Barlow *et al.*, 2003 ; Canuti *et al.*, 2003 ; van Westen, 2004 ; van Westen *et al.*, 2006). Trois méthodes sont détaillées ci-après : (i) la **cartographie d'inventaire** et ses dérivées, (ii) la **méthode géomorphologique** et (iii) la méthode **par combinaison de cartes d'index**.

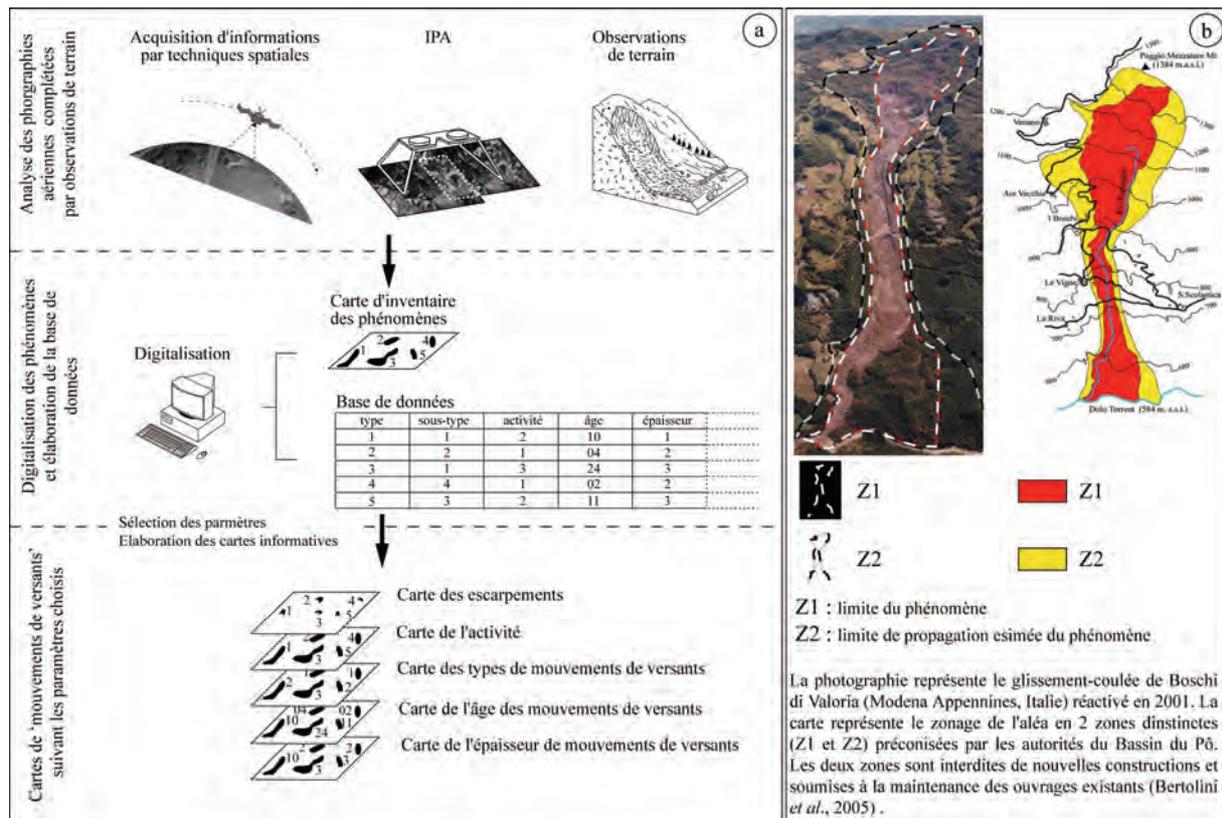
1.2.1. La cartographie d'inventaire et ses dérivées

La cartographie d'inventaire (Fig. 1.1), rapide à mettre en œuvre, est considérée comme la base indispensable pour toute autre évaluation à l'échelle du bassin versant sans pour autant privilégier une échelle de travail en particulier (van Westen, 2000). Elle nécessite un relevé de terrain, une photo-interprétation (diachronique ou non), le recueil et l'analyse de documents historiques ainsi que des témoignages fournissant des informations sur le type, l'occurrence et/ou l'activité des phénomènes. Au final, une carte de la distribution spatiale des phénomènes est obtenue.

A l'échelle nationale ou régionale, les '*mouvements de versant*' sont représentés par des points ; à l'échelle moyenne, large, ou locale, ils sont représentés par la surface qu'ils occupent sur le terrain (Wieczorek, 1984). Les **Systèmes d'Information Géographique (SIG)** sont utilisés comme simple outil de cartographie (Duman *et al.*, 2005 ; Giordano, 2005).

Le résultat cartographique peut aussi être considéré comme **une forme élémentaire de carte d'aléa** (Soeters et van Westen, 1996 ; Valadao *et al.*, 2002 ; Colombo *et al.*, 2005). En effet, les caractéristiques associées comme le type de phénomène, l'activité, l'âge, les périodes de retour, permettent d'obtenir des informations sur l'occurrence des phénomènes et sur l'évolution de certains facteurs, tel que l'occupation du sol (Soeters et van Westen, 1996).

A titre d'exemple, les **cartes d'activité dérivées** de cet inventaire sont une première source d'information sur les secteurs soumis à rupture (Canuti *et al.*, 1979, Soeters et van Westen, 1996 ; Borja-Baeza *et al.*, 2006 ; Colombo *et al.*, 2005). Ainsi, Bertolini *et al.* (2005) en *Emilie-Romagne* (Italie), après avoir dressé des cartes d'inventaire, ont réalisé une étude historique des phénomènes sur plusieurs dizaines d'années. L'activité recensée a permis de dresser une cartographie des phénomènes les plus dangereux. La figure 1.1.b présente un exemple de cette cartographie. On distingue deux zones avec : la zone de glissement actif (Z1), considérée comme la plus dangereuse, et une zone autour du phénomène (Z2), considérée comme une extension possible du phénomène. La zone Z2 est accompagnée d'une interdiction de construction.



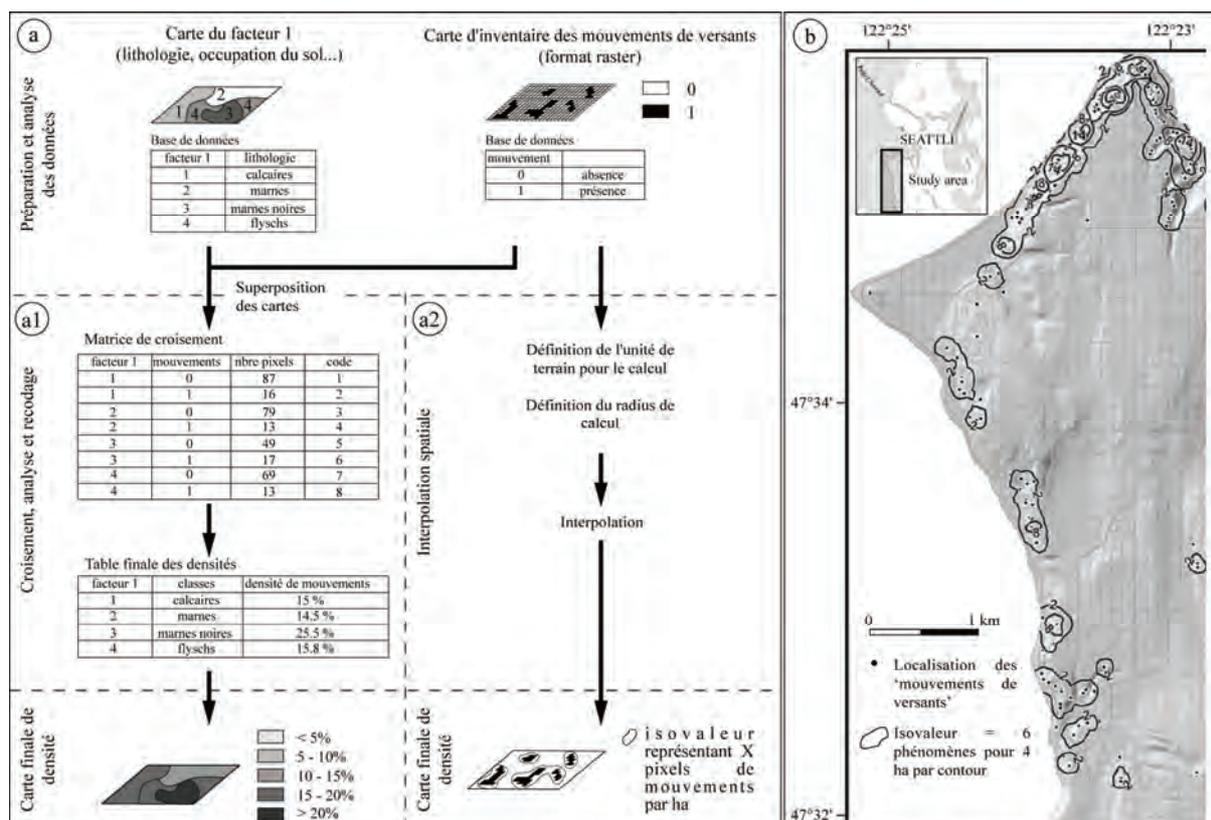
a. Etapes pour une cartographie d'inventaire sous SIG (adapté de van Westen, 1993 et Soeters et van Westen, 1996). b. Exemple de carte de susceptibilité fondée sur la carte d'inventaire, l'information historique et l'activité des mouvements de versant (adapté de Bertolini et al., 2005).

Fig. 1.1. Cartographie d'inventaire des mouvements de versant.

Enfin, la distribution des 'mouvements de versant' peut servir à l'élaboration de cartes de densité. Les premières cartes de ce type furent élaborées par Wright et al. (1974). Grâce à l'émergence des SIG, leur réalisation a été simplifiée. Les cartes de densité sont obtenues par :

- Le calcul de la densité de phénomènes par classes de facteurs (lithologie, occupation du sol, etc.). Les résultats sont reportés dans chaque classe (Fig. 1.2a1) ;
- L'interpolation du nombre de phénomènes sur le secteur par unité de terrain (*unit mapping*, ares, hectares etc., Fig. 1.2a2).

Les cartes finales montrent la densité de phénomène par des isovaleurs représentant la densité de phénomènes en cercles concentriques (*landslide isopleths*). On pourra noter que ce type de carte a été utilisé par De Graaf et Canuti (1988), Bülut et al. (2000), Coe et al. (2004) et Baum et al. (2005, Fig. 1.2b) pour délimiter les aires potentielles les plus favorables aux 'mouvements de versant' sur une dizaine et une centaine d'années. Il s'avère que, sur de courte période, ce type de carte peut-être une alternative pour obtenir une certaine information sur la future localisation des phénomènes. Cependant, pour une période plus longue, en comparaison avec d'autres méthodes plus élaborées, l'information obtenue sur l'occurrence et la susceptibilité est pauvre et surtout surestime des zones qui ne devraient pas être considérées comme susceptibles (Baum et al., 2005). C'est pour ces raisons que cette méthode est souvent utilisée à échelle moyenne (1/25 000^{ème}, 1/50 000^{ème}) sans relation avec les facteurs de prédisposition.



a. Méthode de cartographie par densité. a1. Méthode par facteur. a2. Méthode par calcul d'isovaleurs (adapté de van Westen, 1993 et Soeters et van Westen, 1996). b. Exemple de carte d'isovaleurs pour six phénomènes par ha (adapté de Coe et al., 2004 et Baum et al., 2005).

Fig. 1.2. Cartographie de densités des mouvements de versant par SIG.

1.2.2. L'analyse géomorphologique

Les premières analyses géomorphologiques concernant l'aléa ont été proposées en Europe où plusieurs expériences en cartographies géomorphologiques et géologiques existaient (Soeters et van Westen, 1996). De nombreux exemples datant des années 70 et 80 sont disponibles dans : Kienholz (1977 ; 1978), Amadesi et Vianello (1978), Malgot et Mahr (1979), Ives et Messerli (1981), Rupke *et al.* (1988) ou à travers les premières cartes ZERMOS au 1/25 000^{ème} (Antoine, 1977). Plus récemment, à des échelles plus petites (1/100 000^{ème} ; 1/50 000^{ème}), les exemples se sont multipliés (Moreiras, 2005).

Cette méthode est aussi connue comme étant une méthode de **cartographie directe** ou dite '*experte*' ('*direct mapping method*' ; Soeters et van Westen, 1996 ; Cardinali *et al.*, 2002 ; Hervàs *et al.*, 2002 ; van Westen *et al.*, 2000, 2003). **L'aléa est directement défini par le géomorphologue sur le terrain** par une analyse simple fondée sur son expérience et qui par analogie, avec des environnements similaires (ayant connu ou non des mouvements de versant), caractérise les secteurs en zone d'aléa fort, moyen, faible ou nul. Les bornes entre classes sont définies par l'expert. La reproductibilité entre site est difficile car les critères '*subjectifs*' et implicites pris en compte doivent être revus, adaptés, corrigés pour chaque secteur où la morphologie est différente. De ce fait, la démarche est renouvelée pour chaque secteur d'étude.

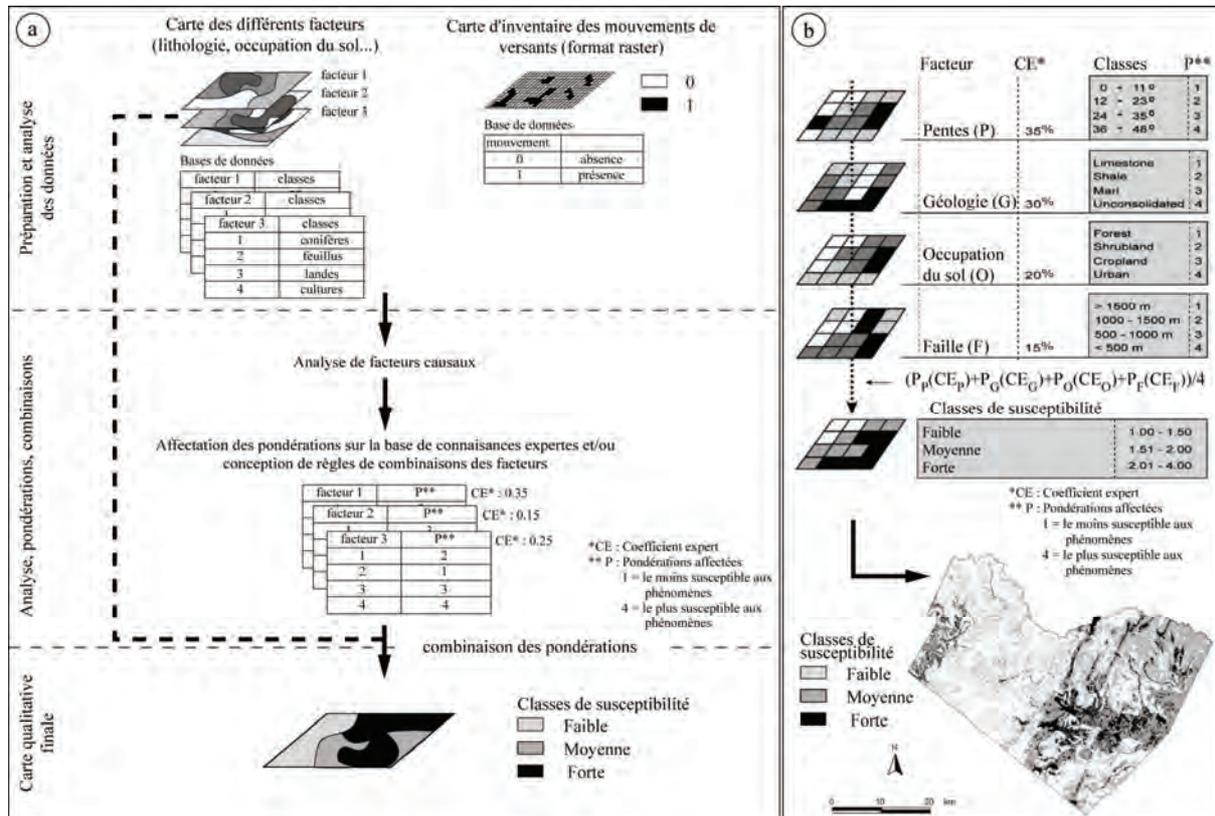
L'analyse géomorphologique fournit donc une évaluation rapide de l'aléa pour un secteur donné en tenant compte d'un très grand nombre de facteurs. Les cartes fournissent toutes les informations nécessaires pour définir les conditions de stabilité ou d'instabilité d'une aire donnée. Ce type d'évaluation peut-être appliqué à toutes les échelles de travail (régionale,

moyenne, large). Cette approche est celle recommandée, actuellement, pour l'élaboration des *Plans de Prévention des Risques (PPR)* en France à l'échelle du 1/10 000^{ème}.

Récemment, quelques essais de **cartographie 'experte'** réalisées sous **SIG** se basant sur des règles de combinaisons de polygones recodés ont été proposés notamment par Bunza *et al.* (1996) et van Westen *et al.* (2000 ; 2003). La méthodologie donne de bons résultats mais elle reste soumise à un contrôle de l'information obtenue pour tous les polygones uniques recodés. Les **SIG** sont alors utilisés comme simple outil de cartographie.

1.2.3. Méthode par combinaison de carte d'index

Cette méthode est une alternative à la méthode géomorphologique permettant de remédier aux problèmes inhérents à la retranscription des règles subjectives utilisées (Stevenson, 1977 ; Liener *et al.*, 1996 ; Soeters et van Westen, 1996 ; Parise, 2001). **Dans cette approche, l'expert cartographie les facteurs qu'il considère comme étant les plus influents pour la stabilité des versants.** Chacun des facteurs sélectionnés est évalué puis pondéré proportionnellement à l'importance estimée par l'expert pour un processus de rupture. Chaque carte est additionnée afin d'obtenir un document avec des valeurs '*brutes*' qui sont ensuite regroupées pour obtenir des classes homogènes d'aléa (Fig. 1.3a).



a. Stratégie par SIG (adapté de van Westen, 1993 ; Soeters et van Westen, 1996). b. Exemple de carte qualitative indexée (adapté de Wachal et Hudak, 2000).

Fig. 1.3. Cartographie qualitative indexée.

Cette **méthode empirique**, utilisée généralement à l'échelle régionale et moyenne, permet d'obtenir rapidement des résultats satisfaisants (Anbalagan et Singh, 1996 ; Turrini et Visintainer, 1998 ; Wachal et Hudak, 2000, Fig. 1.3b). Cependant, plusieurs inconvénients sont à souligner :

- (i) La méthode est empirique et les pondérations restent subjectives ;

- (ii) Il existe, souvent, une méconnaissance des réelles relations entre les facteurs et le déclenchement des phénomènes, empêchant une évaluation et une pondération 'adéquates' ;
- (iii) Des essais à répétition sont nécessaires pour déterminer des pondérations correctes pour chaque facteur choisi, ralentissant la procédure de calage/validation ;
- (iv) La transposition des résultats sur d'autres sites est difficile.

Pour réduire l'incertitude liée aux pondérations, les statistiques descriptives sont parfois utilisées (Baldelli *et al.*, 1996 ; Donati et Turrini, 2002 ; Guinau *et al.*, 2005). Selon la proportion de phénomènes inventoriés pour chaque facteur, un coefficient lui est assigné. Ce coefficient correspond soit au chiffre obtenu après le calcul statistique (Parise et Jibson, 2000) soit à une recodification après vérification experte (Liener *et al.*, 1996 ; Moreiras, 2005). La procédure pour obtenir une carte finale reste identique à celle exposée précédemment. Cette alternative, à une pondération essentiellement subjective, permet d'obtenir des résultats plus précis notamment à échelle moyenne (Moreiras, 2005). La transposition sur d'autres sites est alors possible à condition que les caractéristiques des sites soient très proches (Perotto-Baldiviezo *et al.*, 2004).

L'approche qualitative indexée a été remplacée peu à peu par les approches statistiques, plus objectives ou par des techniques tenant compte de l'incertitude des pondérations en utilisant, par exemple, des règles de combinaisons fondées sur la théorie des *Logiques floues* (Zadeh, 1965 ; Ercanoglu et Gokceoglu, 2002).

1.3. L'approche semi-quantitative

Nous avons délibérément choisi de n'aborder ici que les *Logiques floues*. Les *Logiques floues* (Zadeh, 1965) suscitent actuellement un intérêt de la part de toutes les sciences qui éprouvent le besoin de formaliser les méthodes empiriques ou expertes et de généraliser des modes de raisonnement sur des phénomènes complexes (Bonham-Carter, 1994). Les bases théoriques reposent sur des principes élaborés par Zadeh en 1965 et améliorés ensuite par Zimmermann et Zysno (1980). La théorie des *Logiques floues* est née de la constatation que la plupart des phénomènes souffrent d'une connaissance imparfaite, ou ont des limites imprécises difficiles à représenter à l'aide de variables booléennes (valeurs binaires de 0 ou 1 ; Bonham-Carter, 1994 ; Burrough et Mc Donnel, 1996). Le principe repose sur trois étapes :

- (i) **Quantification floue des facteurs** (*Fuzzyfication*) : il s'agit de l'attribution d'une valeur d'appartenance comprise entre 0 et 1 pour les classes de chaque facteur (aucune règle n'est définie pour attribuer une valeur d'appartenance selon la classe de facteur). Les valeurs d'appartenance sont souvent définies par des procédures empiriques reposant sur la connaissance experte du site d'étude et des phénomènes (An *et al.*, 1991, Carranza and Hale, 2001). Parfois des fonctions statistiques fondées sur la relation entre les 'mouvements de versant' et les facteurs de prédisposition sont utilisées (Chung et Fabbri, 2001 ; Chi *et al.*, 2002) ;
- (ii) **Intégration des valeurs d'appartenance** : la combinaison des différentes valeurs d'appartenance s'effectue à l'aide de cinq opérations qui sont : l'opérateur *OU* (*OR*), l'opérateur *ET* (*AND*), l'opérateur *SOMME* (*SUM*), l'opérateur *PRODUIT* (*PRODUCT*) et l'opérateur *GAMMA* (γ) ;
- (iii) **Defuzzification** : le calcul donne une fonction d'appartenance finale qui pour être analysée doit être transformée en valeur. Cette transformation (*defuzzification*) s'effectue : par centre de gravité ; par la méthode du maximum ; par le minimum du plateau 'à gauche' ; par le maximum du plateau 'à droite'. En pratique, les deux premières sont utilisées majoritairement (El Shayeb, 1999).

Les Logiques floues sont plus qu'une méthode de pondération fondée sur des règles subjectives de l'expert : elles permettent de 'formaliser' ces règles. En effet, le moteur d'inférence

(combinaison) permet d'obtenir des variations sur les combinaisons, notamment par l'opérateur γ , afin d'obtenir des résultats proches de ce qu'attend le scientifique (Bonham-Carter, 1994). Très utilisée pour la cartographie géologique (Burrough et al., 1992 ; Bonham-Carter, 1994, D'Ercole et al., 2000 ; Knox-Robinson, 2000, Carranza et Hale, 2001), la cartographie de la susceptibilité et de l'aléa 'mouvements de versant' par *Logiques floues* connaît un certain engouement depuis quelques temps (Kawakami et Saito, 1984 ; Nguyen, 1985a, b ; Binaghi et al., 1998 ; El-Shayeb, 1999 ; Uromeihy et Mahdavifar, 2000 ; Chung et Fabbri, 2001 ; Ercanoglu et Gokceoglu, 2002, 2004 ; Hoon Chi et al., 2002 ; Pistocchi et al., 2002 ; Ercanoglu et al., 2004 ; Tangestani, 2004 ; Thiery et al., 2006).

Les résultats obtenus sont généralement bons, proches de ceux obtenus par méthodes statistiques. Toutefois, par rapport à ces dernières, les *Logiques floues* peuvent être utilisées à toutes les échelles et se révèlent plus flexibles, notamment lorsque la zone d'étude est vaste et que les incertitudes, liées aux manques d'information sur les phénomènes ou les facteurs de prédisposition, sont grandes (Ercanoglu et al., 2004). Néanmoins, à l'heure actuelle la transposition des 'règles' floues utilisées par l'expert est encore à tester et à valider sur d'autres sites de recherche (Thiery et al., 2006).

1.4. L'approche quantitative ou probabiliste

L'approche probabiliste est fondée sur les **relations statistiques entre les phénomènes (passés et présents) observés et chaque facteur contributif** (Carrara, 1977 ; Carrara, 1988 ; van Westen, 1993 ; Carrara et al., 1995 ; Soeters et van Westen, 1996 ; Leroi, 1996 ; Aleotti et Chowdhury, 1999 ; van Westen, 2001 ; van Westen et al., 2006).

Cette approche a connu quelques adeptes à partir des années 80 grâce au développement des outils informatiques (ordinateurs personnels et *SIG*) qui ont autorisé un stockage de grandes quantités de données et ont augmenté les possibilités de calculs complexes. Mais, c'est à partir du début des années 90 que ce type d'approche a été plus utilisé dans des domaines aussi variés que la géographie, la géomorphologie, la géologie ou encore les mathématiques appliquées.

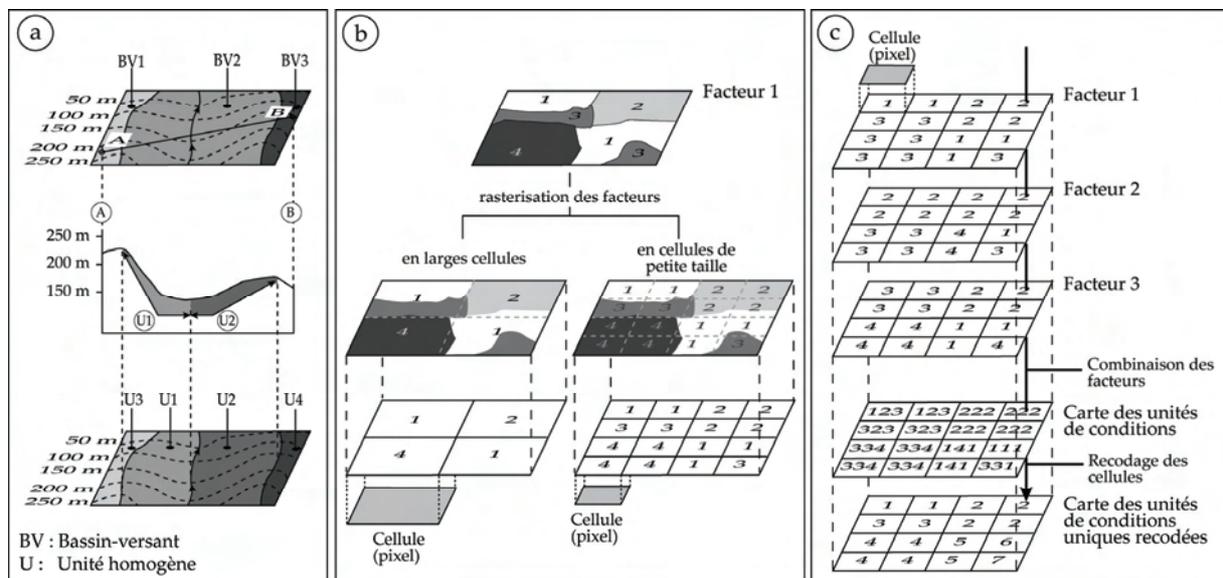
Deux grandes méthodes sont généralement définies dans le domaine de la cartographie depuis une quinzaine d'années : (i) **l'approche bivariée** et (ii) **l'approche multivariée**. Pour chacune d'elle, le principe est le même : la distribution spatiale des phénomènes est comparée aux différents facteurs. Par différents algorithmes, une pondération pour chaque facteur est obtenue. Les pondérations sont définies de manière objective, sans intervention de l'expert. Les résultats sont alors appliqués aux zones encore stables mais susceptibles de connaître une rupture future. La difficulté majeure réside dans le choix des facteurs apparentés à l'instabilité ; il faut parfois plusieurs analyses et plusieurs combinaisons de facteurs pour obtenir des résultats cohérents avec la réalité 'terrain'.

Les calculs se font selon des **unités de terrain homogènes** (*terrain-unit, mapping unit, homogeneous domain* ; Carrara et al., 1995) qui représentent des portions du terrain d'étude aux caractéristiques des unités contiguës différentes (Hansen, 1984). Plusieurs techniques ont été proposées pour obtenir ces unités de terrain homogènes (Fig. 1.4) :

- (i) **La première technique** est fondée sur la partition du site d'étude en **polygones** à partir de la topographie. Ce découpage représente des **unités de pentes homogènes** (*Slope-units* ; Carrara et al., 1995) soit : des bassins-versants, des sous bassins-versants ou les facettes droite et gauche des sous-bassins versants (Fig. 1.4a) Dans ce cas, seule la topographie est prise en compte pour le découpage. L'identification peut se faire manuellement ou automatiquement à partir d'un modèle numérique de terrain (*MNT* ; Carrara, 1988).
- (ii) **La seconde technique** se fonde sur la représentation du site d'étude **par maillage en cellules carrées** (*pixels, grid-cells, rasterisation*, Mark et Ellen, 1995). La surface du site et les facteurs sont découpés selon une grille de base aux cellules de même taille

déterminée avant les calculs (100 m X 100 m ; 50 m X 50 m etc., Fig. 1.4b). Cette technique a fait l'objet de nombreuses critiques au milieu des années 90 : les outils informatiques ne pouvaient traiter qu'un nombre limité de cellules. Ainsi, pour de grandes surfaces les cellules pouvaient représenter des portions de terrain de 1 km X 1 km ce qui ne favorisait pas la précision des cartes et surtout généralisait trop les facteurs. De plus, aucune signification géomorphologique 'fine' ne pouvait être assignée à un découpage déterminé à l'avance. Actuellement, la taille des cellules n'est plus un facteur limitatif. Souvent une analyse de sensibilité sur la taille des cellules est effectuée sur un site test afin de déterminer la taille optimale pour obtenir des calculs précis.

- (iii) **La troisième technique** repose sur la combinaison des facteurs représentés sous la forme d'un maillage en cellules carrées (pixels) pour obtenir une carte unique (Fig. 1.4c). Chaque combinaison, communément appelée **unité de condition unique** (*Unique condition unit* ; Chung *et al.*, 1995), est codée. Elle représente l'ensemble des facteurs pour une même localisation. Plus il y a de facteurs, plus il y a d'unités.



a. Unités homogènes fondées sur les unités de pente (Slope-units) proposé par Carrara (1988) et Carrara *et al.* (1995). b. Unités homogènes sur la base d'une rasterisation en cellules (grid-cells, pixels) de plus ou moins grande taille. c. Unités homogènes obtenues par combinaisons de facteurs sous forme de cellules : unités de conditions uniques (Unique condition units ; Chung *et al.*, 1995).

Fig. 1.4. Exemples d'unités homogènes pour le calcul de l'aléa sous SIG.

- (iv) **La quatrième technique** est fondée sur des **unités géomorphologiques définies par l'expert** (*Main geomorphological unit*). L'expert représente sous la forme de polygones les unités qu'il considère comme ayant une signification géomorphologique (Meijerink, 1988). Cette technique demande du temps et surtout n'est pas généralisable car les unités sont liées à la perception du cartographe (Carrara *et al.*, 1995). Cette technique de 'découpage' du site d'étude peut se faire par SIG en combinant les classes de facteurs sous formes de polygones (Clerici *et al.*, 2002 ; van Westen *et al.*, 2000, 2003). Un recodage unique est ensuite nécessaire pour obtenir un nombre restreint de polygones 'uniques' aux mêmes caractéristiques.

Généralement, ce sont les techniques de découpage (i) (ii) et (iii) qui sont le plus employées actuellement. Le tableau 1.2, ci-dessous, compare les avantages et les inconvénients de chaque type d'unité proposé.

Tab. 1.2. Avantages, inconvénients et précision spatiale du découpage par unité homogène pour la cartographie statistique de l'aléa 'mouvements de versant' (adapté de Carrara et al., 1995).

- : mauvais ; + : moyen ; ++ : bon ; +++ : excellent ; * dépend de la qualité du MNT ; ** dépend de la taille des cellules ; M : manuelle ; A : automatique

Type d'unité de terrain	Qualité spatiale	Signification géomorphologique	Technique d'acquisition	Vitesse d'acquisition
Unités de terrain homogène*	- à ++	+ à +++	M ou A	-
Cellule**	- à +++	- à ++	A	+++
Unités de condition unique (cellule)**	- à +++	++	A	+++
Unités géomorphologiques	+++	+++	M ou A	-

1.4.1. Méthodes bivariées

Les méthodes bivariées reposent sur le calcul de la densité de phénomènes par facteur. Chaque facteur ou chaque combinaison spécifique de facteurs peut être analysé individuellement. En utilisant les valeurs normalisées (densité de phénomènes par classes reportées sur la surface totale du site) une carte finale d'aléa peut être obtenue par addition des facteurs pondérés (Fig. 1.5). Ces derniers peuvent aussi être combinés selon des règles spécifiques fondées sur l'expérience du scientifique.

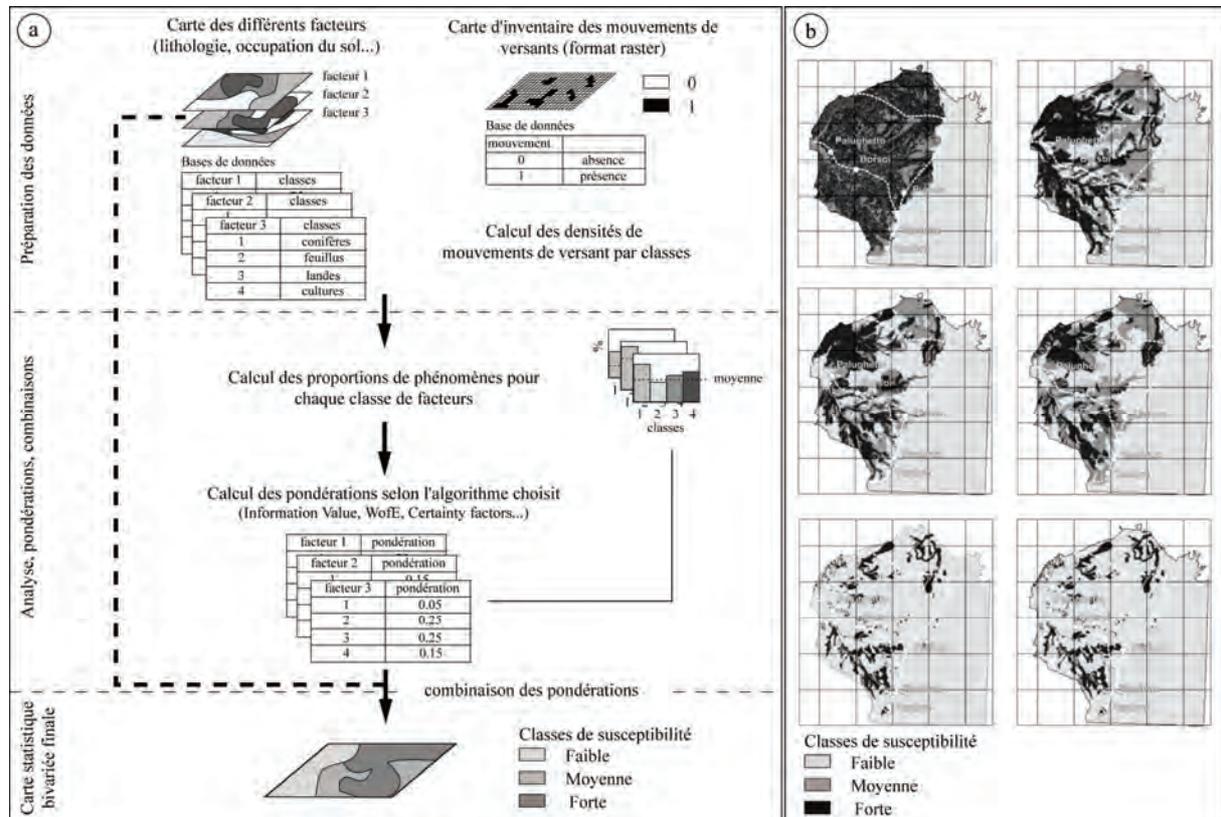
Les **SIG sont particulièrement appropriés pour ce type d'approche** qui peut requérir un grand nombre de données d'entrées. Les pondérations peuvent être calculées par différentes techniques qui vont du **simple calcul de densité à l'introduction de techniques bayésiennes**. Si les techniques de pondération diffèrent **quatre étapes communes** peuvent être distinguées avec (Fig. 1.5a ; van Westen, 1993) :

- (i) La classification de chaque facteur (carte d'entrée) en nombre pertinent de classes (que le facteur soit continu ou classé) ;
- (ii) Le croisement des cartes reclassées avec la carte d'inventaire des phénomènes (recodée 0 pour *absence de phénomène* et 1 pour *présence de phénomène*) pour obtenir la densité des phénomènes (étape proche de la cartographie de densité § 1.2.1) ;
- (iii) Le calcul des pondérations sur la base des résultats de (ii) ;
- (iv) L'affectation des pondérations à chaque facteur et combinaison des cartes suivant des règles de décisions (addition, multiplication..., choix des variables), classification des résultats selon un nombre de classes définies, validation des cartes par comparaison avec la carte d'inventaire.

Les méthodes bivariées présentent un sérieux inconvénient : elles doivent être utilisées en tenant compte de la **dépendance conditionnelle des facteurs utilisés** (Bonham-Carter, 1994 ; van Westen, 2001). En théorie, si les facteurs ne sont pas indépendants statistiquement, l'expert doit alors évaluer la dépendance et combiner les facteurs entre eux pour éviter la redondance statistique (Bonham-Carter, 1994). En pratique, de nombreux scientifiques supposent cette indépendance et ne l'évaluent pas.

Cependant, cette approche offre de **nombreux avantages** : (i) **l'introduction de l'opinion du scientifique dans l'analyse** en choisissant les facteurs qu'il considère comme les plus importants (van Westen *et al.*, 2003) ; (ii) contrairement aux approches multivariées, **les facteurs n'ont aucune influence l'un sur l'autre dans le calcul des pondérations**, ce qui permet une analyse de

sensibilité sur l'influence des facteurs sur les cartes finales (Fig. 1.5b) ; (iii) ces méthodes, souvent considérées comme réservées à l'échelle moyenne, commencent à présenter des stratégies adaptées pour l'échelle large (1/10 000^{ème}).



a. Stratégie de cartographie par SIG (adapté de van Westen, 1993 ; Soeters et van Westen, 1996). b. Exemples de cartes de susceptibilité obtenues par la Théorie de l'évidence suivant des combinaisons différentes de facteurs.

Fig. 1.5. Cartographie de la susceptibilité par approche bivariée (adapté de van Westen, 2003).

1.4.1.1. 'Méthode de susceptibilité' (Landslide susceptibility method)

C'est la technique bivariée la plus simple à mettre en place. Les pondérations sont obtenues en deux étapes : la première consiste à calculer la densité de phénomènes pour chaque facteur et la seconde compare cette densité à celle de la totalité de la surface du secteur d'étude (Brabb, 1984 ; Pachauri et Pant, 1992). Une fois les pondérations calculées, on procède à l'addition des facteurs selon des règles expertes établies : soit on additionne un à un les facteurs pour connaître l'influence de chacun sur la future localisation des phénomènes, soit on additionne tous les facteurs en une seule fois estimant que chacun est indispensable. Par exemple, van Westen (1993) procède par étape en comparant les résultats de chaque combinaison avec la carte des phénomènes. Si la proportion avec un nouveau facteur est inférieure à la précédente, le facteur est rejeté (van Westen, 1993). Une alternative est la combinaison, avant le calcul des pondérations, des facteurs considérés par l'expert comme plus 'influents' (combinaison deux à deux -van Westen, 1993- ou plus -Pachauri et Pant, 1992). Les résultats peuvent varier avec une reconnaissance des phénomènes supérieure de 20 à 25% (van Westen, 1993).

1.4.1.2. L'approche par pondération de l'information (Information value method)

Cette technique statistique est introduite en 1988 par Yin et Yan. Comme la technique précédente, **l'approche par pondération de l'information repose sur la densité de phénomène par facteur**. Les pondérations sont obtenues par le logarithme de la densité par facteur divisée par la densité sur la surface totale (Jarde et Sarkar, 1993 ; Equation 1.1). L'addition des facteurs s'effectue de la même manière que précédemment. Mathématiquement, cette technique se formule pour un facteur X :

$$I_i = \log \frac{S_i/N_i}{S/N} \quad [\text{Eq. 1.1}]$$

où S_i est le nombre d'unités homogènes (cellules ou surface des unités de pente) comportant un ou des phénomène(s) en présence du facteur X, N_i est le nombre de cellules ou la surface des unités de pentes pour le facteur X_i , S le nombre total de cellules ou la surface totale des unités de pentes pour les phénomènes, N est le nombre total de cellules ou la surface totale des unités de pentes pour le site d'étude.

La différence entre la méthode par densité de phénomène et celle reposant sur la pondération de l'information réside essentiellement dans l'introduction dans la formule de la valeur logarithme du quotient de la densité de facteur sur la densité de la surface totale. Dans le premier cas, ce quotient est utilisé de manière brute, dans le second, le quotient sert à calculer les pondérations intermédiaires (van Westen, 1993). Comme pour la méthode précédente, les résultats diffèrent selon la combinaison des cartes avant ou après calcul des poids : les résultats étant meilleurs avec une combinaison de facteurs ayant un certain sens pour l'expert avant la modélisation (van Westen, 1993 ; Zêzere, 2002).

1.4.1.3. Les méthodes bayésiennes (Bayesian combination rules)

Les méthodes bayésiennes, issues des théories sur les probabilités de Bayes (1763)¹⁰, **sont couramment utilisées pour la modélisation statistique des 'mouvements de versant'**. On cherche à déterminer la probabilité *a posteriori* ($ppost$) de la probabilité *a priori* ($pprior$) d'une loi binomiale. Par conséquent, le théorème de Bayes est utilisé dans l'inférence statistique pour actualiser les estimations d'une probabilité ou d'un paramètre quelconque ($ppost$), à partir des observations et des lois de probabilité de ces observations ($pprior$). Succinctement résumé on part du principe que A et B sont deux événements. Le théorème de Bayes permet de déterminer la probabilité de A sachant B, si l'on connaît les probabilités (i) de A, (ii) de B et (iii) de B sachant A [Eq. 1.2]. Soit retranscrit de manière mathématique :

$$P(A|B) = \frac{P(B|A)P(A)}{P(B)} \quad [\text{Eq. 1.2}]$$

où le terme $P(A)$ est la probabilité *a priori* de A. Elle est '*antérieure*' au sens qu'elle *précède* toute information sur B. Le terme $P(A|B)$ est appelée la probabilité *a posteriori* de A sachant B (ou encore de A sous condition B). Elle est '*postérieure*', au sens qu'elle dépend directement de B. Le terme $P(B|A)$, pour un B connu, est appelé la fonction de vraisemblance de A.

Appliquée aux mouvements de versant, A est la probabilité qu'il y ait un événement sur toute l'aire d'étude, B est la probabilité qu'il y ait un événement pour la surface d'un facteur. La probabilité *a posteriori* est la probabilité qu'il y ait un événement pour A sachant B.

Plusieurs techniques bayésiennes ont été utilisées depuis une vingtaine d'années, comme la **théorie de l'évidence** (*Weight of Evidence*, Spiegelhater, 1986 ; van Westen, 1993 ; Bonham-

¹⁰ Les travaux de Thomas Bayes ont été édités et présentés à titre posthume (1763) par Richard Price dans 'Un essai pour résoudre un problème dans la théorie des risques' (*An Essay towards solving a Problem in the Doctrine of Chances*).

Carter, 1994 ; Luzi *et al.*, 2000 ; Sterlacchini, 2000 ; Lee *et al.*, 2002 ; Saha *et al.*, 2002, 2005 ; Gorsevski *et al.*, 2003 ; Süzen et Doyuran, 2004a ; Thiery *et al.*, 2004a et 2004b, 2005, 2007 ; van Westen *et al.*, 2003), les **probabilités conditionnelles** (*Conditional probability*, Chung et Fabbri, 1998 ; 1999 ; 2002 ; Clerici *et al.*, 2002 ; Negnevitsky, 2002 ; Remondo *et al.*, 2003b ; Gokceoglu *et al.*, 2005 ; Clerici *et al.*, 2006), et les **facteurs de certitudes** (*Certainty factors*, Chung et Fabbri, 1993 ; 1998 ; Binaghi *et al.*, 1998 ; Chung et Fabbri, 1998 ; Pistocchi *et al.*, 2002 ; Remondo *et al.*, 2003a ; Lan *et al.*, 2004).

1.4.1.4. Concept de fonctions favorables (*Favourability functions*)

Le concept des **fonctions favorables** (*Favourability functions*) est parfois employé dans la littérature. Ce terme a été introduit par Chung et Fabbri en 1993 pour évaluer et comparer les différentes approches statistiques bivariées et hybrides. Le but est de pouvoir comparer par une même procédure les différentes techniques, afin de choisir la plus adaptée pour le site d'étude. Ce n'est pas une technique de calcul à proprement parler, mais un ensemble de procédures de comparaison (Chung et Fabbri, 1993, 1998, 1999, 2001, 2003 ; Fabbri *et al.*, 2002 ; Remondo *et al.*, 2004a, 2004b ; Zêzere *et al.*, 2004).

1.4.2. L'approche multivariée

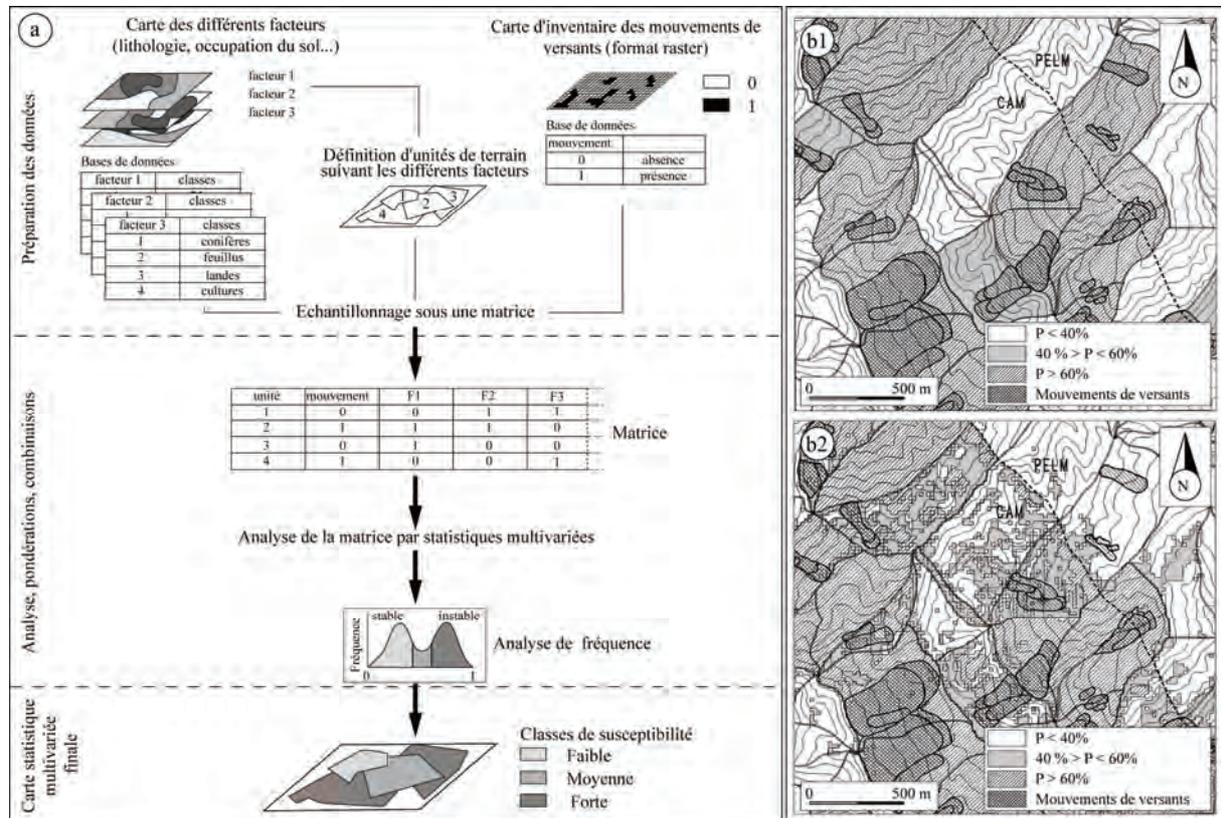
L'**approche statistique multivariée** a été développée par Carrara *et al.* (1977) puis reprise par Carrara *et al.* (1982, 1988, 1990, 1991, 1992, 1995, 1998, 1999), Guzzetti *et al.* (1999, 2006), Reger (1979), Reichenbach *et al.* (2005). Le concept de calcul est différent des techniques bivariées : les **statistiques multivariées** analysent la contribution relative de chaque facteur à l'occurrence des mouvements de versant à l'intérieur d'**unités de terrain homogènes** définies précédemment (*Unique condition units* ou *slope units*, Carrara *et al.*, 1995 ; Chung *et al.*, 1995). **Les calculs sont fondés sur la présence ou l'absence de phénomènes pour chaque unité de terrain.** Ces unités de terrain homogènes peuvent être des sous bassin versants, des unités de pentes aux caractéristiques communes, des unités morphologiques. Généralement, ce sont des unités définies par des polygones ou de larges cellules de 100 X 100 m minimum (van Westen, 2001).

Plusieurs techniques ont été utilisées, les plus communes étant les **techniques discriminantes** et les **techniques de régressions multiples** (van Westen, 1993). Actuellement, les **régressions logistiques** leur sont préférées (van Westen *et al.*, 2006). Dans la majorité des cas, le scientifique a recourt à des logiciels statistiques externes au SIG pour pouvoir calculer les contributions de chaque facteur et obtenir des valeurs d'aléa. Ces techniques requièrent un large nombre de facteurs pour obtenir des résultats cohérents (van Westen *et al.*, 1997).

Cinq étapes communes sont définies pour les méthodes multivariées (Fig. 1.6) :

- (i) **Détermination des facteurs** pour l'analyse et recodification des données alphanumériques en données numériques (comme la lithologie les formations superficielles, etc.). Ces valeurs numériques peuvent prendre comme valeur la présence/absence de phénomènes pour chaque unité homogène de terrain, ou peuvent traduire la surface couverte par chaque unité de terrain, ou les facteurs peuvent être re-classifiés de manière croissante ou décroissante selon la densité de phénomène calculée ;
- (ii) **Combinaison via le SIG des unités homogènes** avec l'inventaire des phénomènes et la division des unités obtenues en surface stable ou instable. En croisant les unités de terrain homogènes, les facteurs et les phénomènes, une large matrice est alors créée ;
- (iii) **Exportation de la matrice vers un logiciel de traitement statistique** et obtention des coefficients ;

- (iv) **Importation des résultats** pour chaque unité de terrain homogène dans le SIG et recodification. La distribution des fréquences des unités stables et instables est vérifiée pour s'assurer de la bonne séparation des groupes ;
- (v) **Analyse des fréquences des coefficients** et classification de la carte finale représentant les unités homogènes en classes d'aléa.



a. Stratégie de cartographie par SIG, calcul effectué avec des unités homogènes de terrains catégorisées comme 'unités de pentes' (adapté de van Westen, 1993 ; Soeters et van Westen, 1996). b1. Carte d'aléa obtenue par analyse discriminante et par 'unités de pentes' (Slope units, adapté de Carrara et al., 1995). b2. Carte de susceptibilité obtenue par analyse discriminante et par unités de condition unique (Unique condition units ; adapté de Carrara et al., 1995).

Fig. 1.6. Cartographie de l'aléa par approche multivariée.

Les **méthodes multivariées** sont considérées comme les techniques statistiques les plus **objectives** (van Westen, 2001) : l'expert n'intervient en aucun cas sur des combinaisons de facteurs. En cas d'intervention de l'expert les contributions des facteurs non combinés sont différentes, chaque facteur étant dépendant de l'autre. De ce fait, ces modèles sont aussi appelés '**boîte noire**' (*black box model*). Les **méthodes multivariées** peuvent être appliquées, en théorie, à **toutes les échelles de travail** (régionale à large), même lorsqu'une carte d'inventaire précise n'est pas disponible ou que certains facteurs manquent d'information. Dans certains cas, à l'échelle large, des facteurs tels que l'épaisseur des formations superficielles ou la hauteur de la nappe peuvent être utilisés (van Westen, 1993).

Néanmoins, ces méthodes multivariées présentent **trois difficultés majeures** :

- (i) **Elles nécessitent un large jeu de facteur** (jusqu'à soixante, Carrara et al., 1995) et surtout génèrent des matrices volumineuses lorsque les unités homogènes sont petites (van Westen, 1993) ;

- (ii) En augmentant la surface des unités homogènes, les matrices sont réduites **mais il est plus difficile de trouver les facteurs les plus influents sur l'occurrence des phénomènes** (Mulder et van Asch, 1987 ; Rezig, 1998) ;
- (iii) Comme il a été mentionné précédemment, cette approche peut en théorie être appliquée à toutes les échelles. Cependant, certains facteurs (l'épaisseur des formations superficielles ou la hauteur de la nappe) sont difficiles à obtenir et par conséquent **l'échelle moyenne**, soit le 1/50 000^{ème} et le 1/25 000^{ème} est encore l'échelle de travail la plus appropriée pour cette méthode.

1.4.2.1. L'analyse discriminante

L'**analyse discriminante** étudie les données provenant de groupes connus *a priori*. Elle a **deux buts principaux** : la **description** des différents groupes et le **classement**, ce qui revient à répondre à ces deux questions : (i) Quelles sont les principales différences que l'on peut déterminer à l'aide des variables observées ? (ii) Est-il possible de déterminer le groupe d'appartenance d'une nouvelle observation à partir des variables observées ?

L'**aspect classement** est celui qui nous intéresse le plus ici. Il est possible de résumer l'approche comme ceci : les phénomènes sont observés, ils sont issus d'une conjonction de facteurs favorables. Avec l'approche discriminante et quelques unités homogènes choisies (au hasard pour la majorité des exemples), on forme deux groupes selon l'existence ou non des 'mouvements de versant'. Le calcul de la matrice et l'analyse des fréquences déterminent quelques classes d'aléa. Pour les autres unités homogènes '*inconnues*', on mesure les facteurs et on classe les coefficients. Si les coefficients obtenus appartiennent à la classe '*haute*' on considère que cette zone est favorable aux instabilités. La formule linéaire obtenue est alors :

$$D_s = C_0 + C_1X_1 + C_2X_2 + C_3X_3 + \dots C_nX_n \quad [\text{Eq. 1.3}]$$

où X_i sont les valeurs des facteurs et C_i sont les coefficients calculés. Les coefficients peuvent être analysés et validés par divers coefficients annexes : le coefficient lambda de *Wilks* (λ) qui permet d'analyser la variabilité entre deux groupes et de définir si la fonction est bien discriminante ou le χ^2 (*chi-carré*) qui détermine si deux groupes sont significativement différents (Davis, 2002).

Les différents résultats acquis, depuis une quinzaine d'années, sur divers sites montrent que l'analyse discriminante fonctionne bien, essentiellement avec des unités homogènes déterminées à partir d'un MNT, c'est à dire avec des '**unités de pentes**' (*Slope-units* ; Carrara, 1983, 1988 ; Carrara *et al.*, 1991, 1995, 1999 ; Finlay *et al.*, 1997 ; Gorsevski *et al.*, 2000 ; Guzzetti *et al.*, 1999 ; 2006 ; Reichenbach *et al.*, 2005 ; van Westen, 1993). **Les calculs à partir de cellules (pixels) rencontrent beaucoup plus de difficultés** (Mulder et van Asch, 1987 ; van Westen, 1993 ; 2000) car :

- (i) **Les facteurs ne peuvent pas toujours être normalisés** ;
- (ii) **Certains pixels sont mal classés** et biaisent, par conséquent, les résultats de la matrice (du fait d'erreurs de cartographie, de limites mal interprétées, d'un manque d'information) ;
- (iii) **Pour éviter des matrices trop volumineuses**, une ou deux cellule(s) par mouvements sont choisis, mais ils ne sont pas toujours représentatifs des phénomènes et de leurs facteurs de prédisposition, biaisant ainsi les résultats finaux. Pour éviter ces erreurs, Baeza et Corominas (2001) ou Santacana *et al.* (2003) procèdent à une analyse en composante principale avant de déterminer la fonction discriminante. Ainsi, la structure statistique (les principaux facteurs) des '*mouvements de versant*' est définie, les facteurs pris en compte sont indépendants et les coefficients sont mieux ajustés.

1.4.2.2. Les régressions multiples

La **régression multiple** permet de décrire la liaison entre une variable à expliquer (occurrence des 'mouvements de versant') et des variables explicatives (*facteurs*) par le calcul de la variance. Mathématiquement, cette relation se traduit comme ceci :

$$Y_i = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + \dots + b_nX_n + \varepsilon_i \quad [\text{Eq. 1.4}]$$

où Y_i représente la présence ou l'absence de 'mouvements de versant' pour une localisation i . Cette valeur exprime la proportion d'unités de terrain couverte par les phénomènes. X_n représente les facteurs, b_n sont les coefficients partiels de régression et ε_i l'erreur aléatoire non observable.

Les coefficients de régressions partiels standardisés (coefficients partiels de régressions exprimés sous forme d'écart-type) indiquent la contribution relative des facteurs indépendants pour l'occurrence des 'mouvements de versant' (Davis, 2002). Quelques coefficients supplémentaires sont utilisés pour évaluer les résultats comme :

- (i) Le **coefficient de détermination multiple** (R^2) : il mesure la qualité de l'ajustement des estimations de l'équation de régression. Il permet d'avoir une idée globale de l'ajustement du modèle et s'interprète comme la part de la variance de la variable Y expliquée par la régression. Il varie entre 0 et 1 et s'exprime souvent en pourcentage. Ce test doit être couplé à un test de Fisher (F) pour connaître la significativité de la relation entre Y et les X_i (Davis, 2002) ;
- (ii) **L'erreur standard estimée** ou **racine de l'erreur quadratique moyenne** ($RMSE$: *root mean square error*) qui mesure la part de la variance non expliquée pour les facteurs ;
- (iii) **La moyenne des erreurs** (ME) : exprime l'erreur moyenne attendue pour la prédiction (Davis, 2002).

Les avis divergent sur la qualité des résultats acquis par cette technique de calcul pour la modélisation de l'aléa 'mouvement de versants'. Dans certains cas, les cartes finales obtenues apparaissent correctes (Anbalagan 1992 ; Jade et Sarkar, 1993 ; Chung *et al.*, 1995 ; Rezig, 1998 ; Chau *et al.*, 2004, Duman *et al.*, 2006). Dans d'autres cas, les résultats sont loin d'être satisfaisants. Par exemple, Van Westen (1993) obtient un R^2 de 0.25 ce qui signifie qu'un quart de la variance peut-être expliquée avec une prédiction fiable entre 40 et 50%. Il résume les inconvénients de cette technique en quelques points :

- (i) **Les problèmes relatifs à la partition des unités homogènes par polygones** (unités de pentes, unités géomorphologiques). Ce type d'unité généralise les facteurs qui sont compris à l'intérieur. Par exemple, il est indispensable de définir un seuil de 'présence' de la variable à l'intérieur de l'unité homogène. Ce seuil peut être défini selon la proportion de surface du facteur dans l'unité. Une autre solution est d'introduire la valeur (%) comme une variable. Dans ce cas, la variable à expliquer (les phénomènes) est aussi exprimée en pourcentage. Cependant, cette technique de calcul tient compte d'un effet multiplicateur : la régression multiple est effectuée selon l'hypothèse que le pourcentage de 'mouvements de versant' dans une unité homogène croît avec l'augmentation des pourcentages des facteurs (van Westen, 1993) ;
- (ii) Effectuer le calcul suivant des unités homogènes par polygones **ne tient pas compte de la relation spatiale réelle entre les phénomènes et les facteurs de prédisposition**, la généralisation réalisée tendant à la masquer. La figure 1.7, reprise de van Westen (1993), présente la complexité de la relation selon une situation théorique simple de 'présence/absence' de phénomènes. Pour la figure 1.7.a, lorsque le facteur 1 est présent il n'y a pas de 'mouvements de versant'. Pourtant, les résultats de la matrice de relation entre les unités de versants (*Slope-units*) et les phénomènes témoignent du contraire. La situation est donc peu claire. A l'inverse, la figure 1.7.b

indique que lorsque le facteur 2 est présent il y a localisation de 'mouvements de versant'. Cette relation évidente est bien présentée dans la matrice de relation. La situation est plus claire.

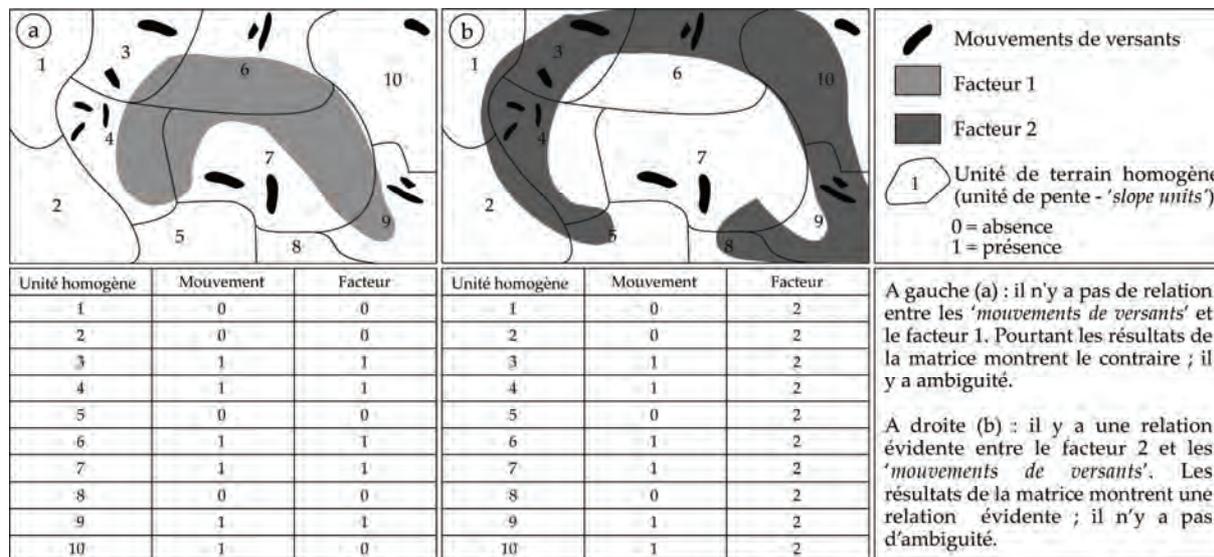


Fig. 1.7. Problèmes relatifs à l'échantillonnage des facteurs avec des unités homogènes par polygones pour une analyse statistique (adapté de van Westen, 1993).

- (iii) Les résultats finaux sont analysés selon la proportion de phénomènes dans une unité de terrain. Généralement, lorsque les valeurs observées sont reconnues par les valeurs modélisées, on considère le modèle comme bon¹¹. Le problème avec les unités homogènes par polygones est la **généralisation des valeurs** et la '*non variation*' des degrés d'aléa à l'intérieur de l'unité. Par exemple, il est possible d'avoir des pentes fortes, des pentes moyennes et des pentes faibles dans une unité selon la taille et les caractéristiques de découpage choisies. Si la proportion de 'mouvements de versant' est forte dans l'unité alors la régression multiple peut donner une valeur forte dans l'unité homogène cela même pour des pentes faibles qui, d'un point de vue mécanique, ne peuvent connaître l'instabilité. La réponse à ce biais est donc de bien définir les caractéristiques de découpage et de bien adapter la taille des unités homogènes selon les phénomènes (Carrara *et al.*, 1995 ; Rezig *et al.*, 1996) afin d'obtenir des résultats acceptables ;

- (iv) **La complexité du site d'étude** : si la situation géologique et géomorphologique est très complexe et hétérogène, il est difficile d'obtenir des résultats acceptables.

Van Westen (1993) conseille donc d'utiliser cette technique en amont de la modélisation afin d'obtenir une indication de la complexité et de l'influence des facteurs entre eux.

Toutefois, les régressions multiples peuvent s'appliquer avec succès à condition de définir, en amont et de manière statistique ou de manière experte, les facteurs les plus importants (Chung *et al.*, 1995 ; Rezig, 1998 ; Nagarajan *et al.*, 2000). Cette sélection permet de réduire les facteurs et d'augmenter la justesse des résultats finaux. A l'heure actuelle, cette méthode est supplantée par les régressions logistiques, plus souples à mettre en œuvre.

¹¹ Cette supposition est d'ordre général, la validation des modèles statistiques a fait l'objet de nombreuses publications ces dernières années (Chung et Fabbri, 1998 ; Chung et Fabbri, 2003 ; Brenning, 2005 ; Begueria, 2006 ; Chung, 2006 ; van Westen *et al.*, 2006). Cet aspect de la modélisation est d'ailleurs discuté plus loin dans la thèse.

1.4.2.3. L'approche par régression logistique

Plusieurs raisons justifient l'utilisation des *régressions logistiques* à la place des autres méthodes statistiques multivariées :

- (i) **La régression logistique peut fonctionner avec des variables quantitatives et/ou catégorielles** : un recodage n'est donc pas nécessaire contrairement aux régressions multiples (Berknopf *et al.*, 1998 ; Gorsevski *et al.* 2000) ;
- (ii) **Aucune analyse sur l'indépendance des facteurs n'est nécessaire** pour obtenir des résultats cohérents (Süzen, 2002 ; Süzen et Doyuran, 2004b) ;
- (iii) La méthode de calcul ne nécessite pas obligatoirement une partition de la zone d'étude par unités homogènes. Le calcul par cellules, même de petite taille est possible (technique généralement utilisée), ce qui permet une implémentation dans un environnement SIG plus rapide (Ohlmacher et Davis, 2003) ;
- (iv) **Certains modules statistiques sous SIG ont été développés** pour faciliter l'implémentation du modèle (Kemp *et al.*, 2001), l'utilisation de modules externes n'est donc pas nécessaire.

Dans sa forme mathématique la plus simple le modèle s'écrit :

$$Pr(event) = \frac{e^z}{1+e^z} \quad [Eq. 1.5]$$

où $Pr(event)$ est la probabilité qu'un événement survienne. Comme Z varie de $-\infty$ à $+\infty$, la probabilité varie de 1 à 0 sur une courbe sigmoïde. Z est la combinaison linéaire tel que :

$$Z = C_0 + C_1X_1 + C_2X_2 + \dots + C_nX_n \quad [Eq. 1.6]$$

où C_0 est la constante du modèle, n est le nombre de facteurs (lithologie, pentes...), C_i ($i = 1, 2, \dots, n$) est le coefficient du modèle et X_i ($i = 1, 2, \dots, n$) les 'mouvements de versant'. Un coefficient positif signifie une relation au dessus de 'la moyenne' entre le facteur et les phénomènes. Un coefficient négatif signifie une corrélation en dessous de 'la moyenne' (Atkinson *et al.*, 1998).

Les résultats acquis par cette technique sont généralement bons à excellents (Atkinson et Massari, 1998 ; Ohlmacher et Davis, 2003 ; Dai *et al.*, 2001, 2002, 2003 ; Ayalew et Yamagishi, 2005 ; Chau et Chan, 2005 ; Yesilnacar et Topal, 2005) et sont proches de ceux acquis par les techniques bivariées (Süzen et Doyuran., 2004b ; Thiery *et al.*, 2005 ; Wang et Sassa, 2005). Toutefois, lorsque le terrain devient complexe et/ou que l'échelle de travail devient trop large (1/10 000^{ème} ou 1/5 000^{ème}) la technique par régression logistique doit être adaptée (van den Eeckhaut *et al.*, 2006).

Si, les méthodes multivariées se révèlent complexes à mettre en place, elles n'en demeurent pas moins les techniques les plus objectives pour l'évaluation de l'aléa. Cependant, devant cette complexité, leur aspect 'boite noire', le nombre de facteurs nécessaires pour obtenir des résultats fiables, et l'incertitude de l'information de certaines données, l'expert lui préférera les techniques bivariées plus souples et parfois moins contraignantes à mettre en place (van Westen *et al.*, 2003 ; Thiery *et al.*, 2005 ; Thiery *et al.* 2007).

1.5. Le zonage par approche hybride

Malgré les différentes techniques énumérées précédemment et utilisées depuis une quinzaine d'années sur divers sites, il subsiste beaucoup d'incertitudes pour la cartographie de l'aléa. Actuellement la 'tendance' est la combinaison de plusieurs méthodes afin d'obtenir des cartes plus 'réalistes'. Pour cela l'opinion de l'expert, délaissée dans les années 90, est plus employée actuellement. Plusieurs techniques combinatoires ou 'hybrides' sont proposées comme :

L'approche par *système de décision multicritères*, l'approche par *Logiques floues* et/ou *combinées avec des techniques bivariées*, l'approche par *réseaux de neurones*, l'approche par *Logiques floues combinées à des réseaux de neurones*. Ces méthodes nouvelles combinatoires sont décrites, ci-après, suivant la part d'expertise requise.

1.5.1. L'approche par système de décision multicritères

1.5.1.1. Définition

Les **approches multicritères** sont issues des difficultés rencontrées lors de l'utilisation des outils d'analyse '*classiques*' d'aide à la décision¹² (analyses coûts/bénéfices –*cost/effectiveness*, Teitz, 1968 ; *shadow-project*, Klaassen, 1973 ; *planning balance*, Lichfield *et al.*, 1975) en économie au milieu des années 70 (Nijkamp *et al.*, 1990, Laaribi, 2000). Le constat était que « *les algorithmes restreignent, parfois, le champ de solutions admissibles et satisfaisantes au regard des multiples critères susceptibles d'être considérés. Solutions, qui, en général, ne sont pas données à l'avance, mais doivent précisément être inventées ou construites par le concepteur.* » (Le Moigne, 1986). Ce type d'approche ne donne pas la solution optimale, mais œuvre plutôt à réaliser des arbitrages pour parvenir à une solution de compromis tenant compte de tous les critères considérés pour un problème complexe (Laaribi, 2000). Ce type d'analyse a pour but de répondre à un problème posé en tenant compte de :

- (i) Plusieurs critères quantitatifs et qualitatifs ;
- (ii) L'hétérogénéité des critères pris en compte ;
- (iii) La '*conflictualité*' des critères ;
- (iv) Leur inégale importance considérée par l'expert.

Plusieurs techniques peuvent être regroupées en deux catégories (Laaribi, 2000) : les **méthodes discrètes** et les **méthodes continues**. Pour chaque approche, l'importance relative des critères (facteurs) est traduite en poids ou pondérations. La différence entre les deux méthodes réside (i) dans l'évaluation des poids et (ii) dans le nombre d'actions déterminées pour arriver au résultat final. Les méthodes discrètes opèrent avec un nombre fini et limité d'actions alors que pour les méthodes continues les actions peuvent être en nombre illimité.

Parmi les méthodes discrètes on distingue : le principe de **l'utilité multi-attributs** (*MAUT, Multi Attribute Utility Theory* ; Schärli, 1985), les **méthodes de surclassement** (Vincke, 1989), la **méthode ELECTRE 1** (Roy, 1968), les **processus analytique hiérarchique** (*AHP, Analytical Hierarchy Process*, Saaty 1977 ; Saaty et Vargas, 2001).

Pour les méthodes continues, on différencie principalement les **méthodes interactives** (Vincke, 1989) avec par exemple la *programmation linéaire à objectifs multiples* (*PLOM*), les **méthodes 'point de mire'** (*Ideal point*), la **méthode STEM** (*STEP Method*, Benayoun *et al.*, 1971) ; et les **méthodes particulières** (Laaribi, 2000) comme le *Goal programming* (Romero, 1991).

Les méthodes continues n'étant pas utilisées pour la cartographie de la susceptibilité, nous avons choisi de nous intéresser à **l'AHP** (processus analytique hiérarchique) qui est flexible, rapide à mettre en œuvre et à interpréter.

1.5.1.2. Le processus analytique hiérarchique (AHP) et la cartographie de l'aléa

La technique par **processus analytique hiérarchique** (*AHP*) est la méthode multicritère la plus employée pour la cartographie de l'aléa '*mouvement de versants*'. Depuis 2000, quelques scientifiques l'ont utilisée avec des résultats encourageants (Barredo *et al.*, 2000 ; Aganogawa, 2002 ; Esmali et Ahmadi, 2003 ; Ayalew *et al.*, 2004 ; Ownegh, 2003 ; Komac, 2006 ; Yoshimatsu et

¹² Pour une revue exhaustive des ces différents concepts le lecteur peut se référer à Laaribi (2000).

Abe, 2006). Trois grandes étapes sont requises pour obtenir de bons résultats (Saaty, 1977 ; Saaty et Vargas, 2001) :

- (i) **La structuration de la hiérarchie** en plusieurs niveaux représentant un/des thème(s) (par exemple pour les 'mouvements de versant', le thème 'géologie' peut représenter la lithologie + les formations superficielles). Plusieurs niveaux sont possibles : par exemple, une fois le 'problème' décomposé et structuré en hiérarchie, les poids relatifs des éléments de chaque niveau sont déterminés ;
- (ii) **La pondération relative** : la méthode par AHP prend en compte les facteurs qualitatifs et quantitatifs : il est possible de pondérer simplement de manière 'experte' comme pour les cartes d'index ou par *comparaison par paire* (*pairwise combination*). Sans détailler le processus de fonctionnement de la *comparaison par paire*, cette technique se divise en deux étapes avec (i) l'attribution d'un coefficient représentant une expression linguistique en valeur numérique (généralement de 1 à 9) et (ii) le calcul d'un poids final exprimant l'importance d'un facteur par rapport à un autre. Saaty (1977) propose une échelle, pour les poids finaux, allant de 1 à 9 ; avec 1 = égal, 5 = fort, 7 = plus fort, 9 = extrême ;
- (iii) **La pondération globale** : pour chaque niveau, chaque facteur est classé suivant son poids relatif. Le poids global, qui représente le degré d'importance du niveau, est ensuite introduit soit de manière experte soit par calcul suivant les poids relatifs (Saaty et Vargas, 2001).

Cette technique connaît un fort développement informatique dans différents environnements SIG ces dernières années, notamment avec des modules spécifiques développés sous ILWIS¹³, ou encore ceux créés pour IDRISI¹⁴ par Clark Labs (1999) ou ArcGIS¹⁵ par Marinoni (2004). L'avantage de cette technique est sa relative **facilité de compréhension et sa rapidité de mise en œuvre**. En outre, elle permet d'analyser ensemble des facteurs qualitatifs et quantitatifs (par *comparaison par paire*) et une grande flexibilité dans les processus de calculs. En effet, les pondérations sont créées automatiquement par la méthode, la combinaison de facteurs pouvant être exécutée par un autre processus (hors de la méthode ; Laaribi, 2000).

1.5.2. Méthode par Logiques floues combinées à une autre méthode

Ce type de méthode diffère des *Logiques floues* classiques pour l'étape de *fuzzification* et de ce fait dans l'attribution des valeurs d'appartenance (pondérations). Ces valeurs peuvent être calculées à partir des théorèmes de Bayes, par réseaux de neurones ou par d'autres méthodes. Les valeurs obtenues sont alors intégrées classiquement par différents opérateurs (Binaghi *et al.*, 1998 ; Pistocchi *et al.*, 2002). L'objectif est de diminuer la part de subjectivité liée à l'expert qui attribue les valeurs d'appartenance. Ce type de méthode reste assez exploratoire et peu d'exemples sont disponibles.

1.5.3. Méthode par intelligence artificielle (réseaux de neurones artificiels)

L'approche cartographique par intelligence artificielle prend plusieurs formes, une revue détaillée peut être trouvée dans Openshaw et Openshaw (1997). Nous la résumerons en ne considérant que la méthode par **réseau de neurones artificiels** (RNA ; *Artificial Neural Network* : ANN). Ce modèle de calcul s'inspire du fonctionnement des neurones humains. Un réseau de neurones artificiels (RNA) peut être défini comme suit : « *c'est un mécanisme informatique capable*

¹³ ILWIS : *Integrated Land and Water Information System*. Ce logiciel SIG intègre le module SMCE (*Spatial Multi-Criteria Evaluation*) regroupant plusieurs outils de pondération et d'analyse comme les combinaisons par deux utilisées pour l'AHP et des techniques de décision par arbre décisionnel (Sharifi et Retsios, 2003).

¹⁴ Clark Labs : <http://www.clarklabs.org/>

¹⁵ Module AHP externe développé en langage VBA pour ArcGIS 9x.

d'acquérir, de représenter, et de calculer une projection depuis un espace d'informations multivariées vers un autre suivant un ensemble de données représentant cette projection » (Garrett, 1994). Zaknich (2003) considère qu'un RNA permet de saisir tous les paramètres d'un problème que les méthodes statistiques 'exactes' ne peuvent résoudre en raison de leurs limitations théoriques.

Un RNA est formé par l'utilisation d'un ensemble de valeurs d'entrée (*input*) et de sorties associées (*output*). Le but est d'établir un processus de production d'information suffisamment intelligent pour que le(s) réseau(x) puisse(nt) généraliser et prévoir des informations de sorties par rapport à certaines données d'entrées sans avoir été préparé pour cela au départ. Trois types de structure pour un réseau de neurones artificiels existent :

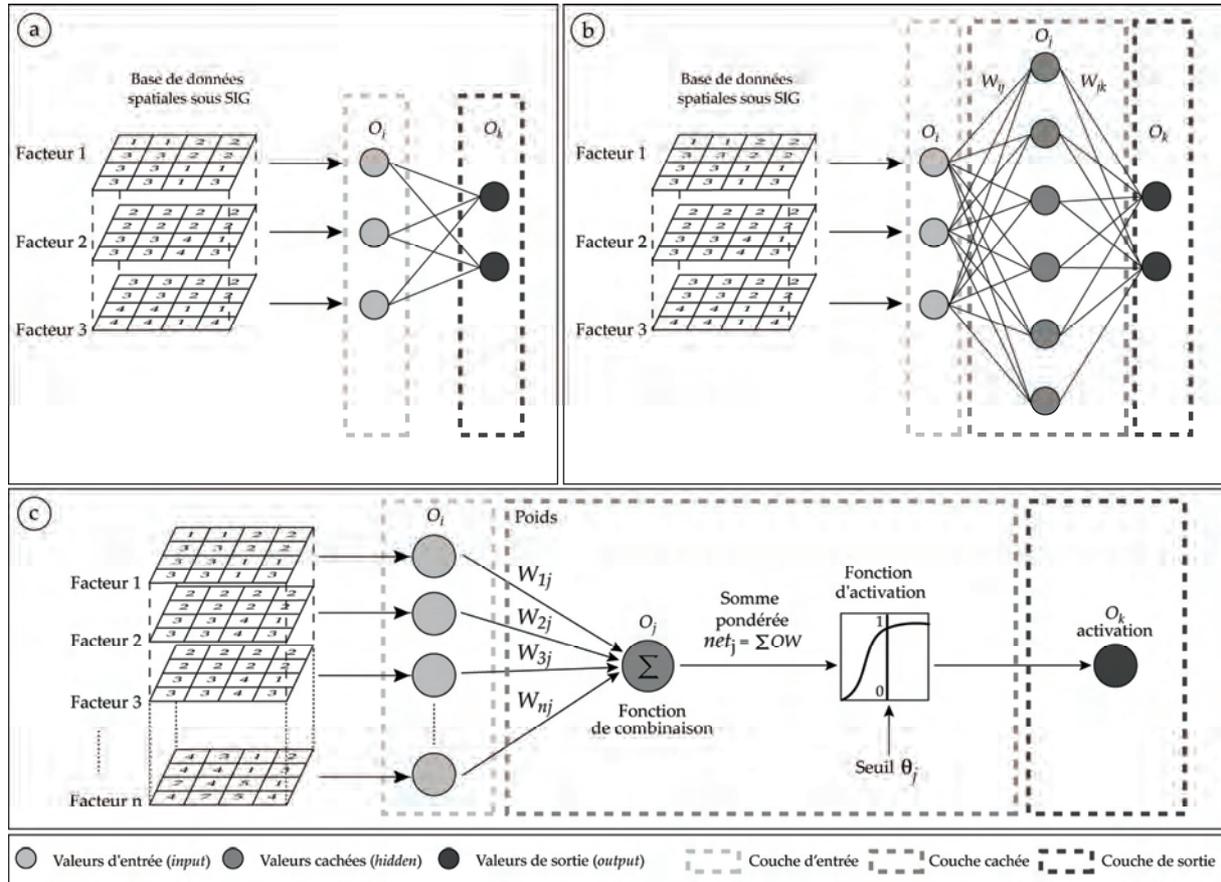
- (i) Les **réseaux monocouches** (e.g. *Perceptron de Rosenblatt*, Fig. 1.8a) avec une couche d'entrée et une couche de sortie ;
- (ii) Les **réseaux multicouches** (*MLP, Multi-Layer Perceptron*) avec une couche d'entrée, une ou plusieurs couches cachées (*hidden layers*) et une couche de sortie. Chaque neurone est connecté à tous les neurones de la couche précédente, sauf pour les couches d'entrée et de sortie, les cellules d'une même couche ne sont pas connectées entre elles (Fig. 1.8b) ;
- (iii) Les **réseaux à fonction radiale** (*RBF, Radial Basis Function*) dont la structure est la même que pour les réseaux multicouches, mais dont les algorithmes de calcul différent (méthodes gaussiennes).

En général, le fonctionnement d'un neurone artificiel (Fig. 1.8c) peut se résumer ainsi : un neurone fonctionne avec une **fonction de combinaison** (*d'agrégation*), une **fonction d'activation** (*de seuillage*) et un **algorithme d'apprentissage** (Brimicombe, 2003). La **fonction de combinaison** représente l'ensemble des valeurs (poids) de chaque facteur pris en compte formalisée sous la forme d'une fonction renvoyant : (i) au produit scalaire entre le vecteur des entrées et le vecteur des poids synaptiques (réseau de type *MLP*) ou (ii) à la norme euclidienne du vecteur issu de la différence vectorielle entre les vecteurs d'entrées (réseau de type *RBF*). La **fonction d'activation** sert à introduire une non-linéarité dans le fonctionnement du neurone. Généralement, il existe trois intervalles : en dessous du seuil, le neurone est non-actif ; aux alentours du seuil, le neurone est en phase de transition ; au dessus du seuil, le neurone est actif. Les fonctions d'activation les plus utilisées sont la **fonction sigmoïde**, la **fonction à tangente hyperbolique** et la **fonction discriminante de Kronecker**. L'**algorithme d'apprentissage** consiste à tirer des généralisations plausibles sur la base d'observations limitées. La méthode la plus utilisée est la **rétropropagation** (*back-propagation learning*). Le but de cette méthode est l'apprentissage progressif du réseau de neurones par un ajustement des poids entre les neurones, en réponse aux erreurs générées entre les valeurs actuelles et les valeurs que l'on veut obtenir. A la fin de cette étape, le réseau de neurones présente un modèle qui doit, en théorie, être capable d'accorder des valeurs de prédictions pour des valeurs d'entrée données. Il existe d'autres méthodes d'apprentissage telles que le *quickprop*, *méthode de Kohonen*, etc., (Bishop, 1995 ; Personnaz et Rivals, 2003).

Quelques exemples prometteurs de zonage d'aléa de 'mouvements de versant' sous SIG par réseau de neurones ont été proposés ces dernières années (Lee *et al.*, 2003 ; Ercanoglu, 2005 ; Ermini *et al.*, 2005 ; Yesilnacar et Topal., 2005). En général, une **structure multicouche** est utilisée avec un **algorithme d'apprentissage par rétropropagation** et une **fonction sigmoïde**. La stratégie usuelle est de tester le RNA sur une zone représentative de l'aire d'étude et de valider les valeurs finales sur le site entier, avec des phénomènes connus. Les résultats acquis sont encourageants, avec des proportions de phénomènes reconnus au dessus de 75%. Ces résultats sont assez proches de ceux obtenus par des méthodes statistiques (Yesilnacar et Topal, 2005). Cependant, il convient de bien vérifier l'influence des facteurs pris en compte. Yesilnacar et Topal (2005) montrent que si les résultats par *régression logistique* et par RNA sont proches, les facteurs les plus influents ne sont pas les mêmes. Pour connaître l'influence de chaque facteur, il est possible d'éliminer les moins influents au fur et à mesure de l'apprentissage du modèle. Cette technique employée par Lee *et al.* (2003) se révèle être à l'heure actuelle une des plus abouties pour retenir

un jeu de facteurs significatifs pour la localisation des futurs 'mouvements de versant'. Elle permet de s'affranchir partiellement de l'aspect 'boite noire' des RNA.

Une autre stratégie permettant d'obtenir des résultats probants serait de combiner RNA, connaissances expertes et pondérations statistiques. Une telle tentative est proposée par Ercanoglu (2005) qui distingue au préalable les facteurs les plus influents par méthode bivariée puis introduit ces pondérations dans le RNA. Différents processus de validation montrent qu'une telle procédure donne des résultats satisfaisants (Ercanoglu, 2005).



a. Structure d'un réseau de neurones artificiels monocouche. b. Structure d'un réseau de neurones artificiels multicouches ou à fonction radiale. c. Fonctionnement d'un neurone artificiel.

Fig. 1.8. Principes d'un réseau de neurones artificiels.

1.6. Approche 'temporelle' pour le zonage de l'aléa

Le facteur temporel et les facteurs déclenchant ne sont pas intégrés dans les méthodes d'analyse de la susceptibilité excepté dans l'approche géomorphologique sur la base de la connaissance experte (§12.1). Pour tenter d'introduire ces paramètres, notamment les précipitations, quelques scientifiques (Zêzere *et al.*, 2004 ; Remondo *et al.*, 2005) ont développé plusieurs approches fondées sur (i) l'analyse historique des précipitations et des lois de probabilités de retour, telle la loi de *Gumbel*, ou (ii) sur des probabilités temporelles comme la *loi de Poisson* (Crovelli, 2000). Trois approches principales ont été proposées, chacune essayant d'apporter une réponse pour une cartographie proche d'une carte d'aléa aux 'mouvements de versant' *stricto sensu*.

1.6.1. Approche par analyse de fréquence des précipitations

Cette analyse se base sur cette citation de van Westen (1993) : « La probabilité d'occurrence d'un mouvement de versants pour un endroit donné pendant une certaine période de retour peut être déterminée uniquement lorsque une relation est définie entre cette occurrence et la fréquence des facteurs déclenchants tels les précipitations et les séismes ». La technique la plus utilisée est le calcul des pluies antécédentes selon des **lois de retour**, des **moyennes mobiles**, des **pluies accumulées sur des périodes spécifiques** avant l'occurrence du phénomène (Crozier, 1986) ou encore le **calcul du couple intensité/durée** (Keefer *et al.*, 1987).

Cette méthode d'analyse des fréquences des précipitations est appropriée pour l'échelle régionale, et peut-être adaptée à une échelle large uniquement dans le cas où une information détaillée sur l'occurrence des phénomènes ainsi qu'un réseau dense de stations de mesures sont disponibles.

Cette méthode empirique connaît quelques limitations : l'information recueillie est difficilement transposable d'un site à une autre. La corrélation entre le déclenchement d'un événement sur un site particulier avec des précipitations enregistrées sur des sites éloignés ou aux situations morphologiques très différentes comporterait trop d'incertitudes et engendrerait des résultats peu précis. De ce fait, cette méthode est peu applicable à l'échelle locale. Par exemple, Wilson (1997, 2000) propose une procédure pour transférer en Californie du Sud les précipitations critiques de la Californie du Nord, en prenant en compte les moyennes annuelles de précipitation et le nombre de jour de pluie dans le but d'expliquer les différentes caractéristiques de déclenchement de certains glissements superficiels. Sur la base de ces suppositions, une carte générale des risques de glissements superficiels de la Californie est proposée (Wilson et Jayco, 1997). Si une première information ressort il demeure trop d'incertitudes concernant les pluies critiques et les seuils calculés. D'ailleurs pour cette approche la composante spatiale n'est pas indispensable. Comme le souligne van Westen (1993) elle est peu utilisée sauf pour l'analyse de la distribution des précipitations qui peut s'effectuer par SIG.

1.6.2. Approche par analyse de fréquence des précipitations couplées aux approches statistiques

Cette approche a été proposée par Zêzere *et al.* (2004) dans la cadre du programme de recherche européen ALARM. Elle est fondée sur :

- (i) **Une analyse historique détaillée des phénomènes** avec la date exacte de leur déclenchement ;
- (ii) Le **calcul d'une carte de susceptibilité** par méthode statistique sur la base de l'inventaire (i). Les calculs s'effectuent cellule par cellule par la méthode des probabilités conditionnelles développées par Chung et Fabbri (1993). La validation est effectuée avec des 'mouvements de versant' récents et quatre classes de susceptibilité sont définies ;
- (iii) **Une analyse des précipitations** par reconstruction des pluies cumulatives de 1 à 40 jours pour les périodes d'activité déclarées. Une *loi de Gumbel* est appliquée pour calculer la combinaison intensité/durée des précipitations et des pluies critiques sont définies.

Le principe repose sur la relation directe entre l'occurrence des 'mouvements de versant' superficiels et des précipitations intenses, longues et exceptionnelles (Zêzere *et al.*, 1999). Différents scénarii sont élaborés sur la base des périodes de retour spécifiques pour les différentes classes de susceptibilité. Les différents résultats sont appliqués pour chaque cellule de la carte initiale. Pour chaque scénario, la distribution des classes ne change pas. La différence se situe dans des probabilités pour une même cellule susceptible d'être affectée par un 'mouvement de versants' suivant le scénario choisi. Ce type d'étude requiert une connaissance très fine du site

et des facteurs de déclenchement des phénomènes (le site mesure 20 km²). De ce fait, **la méthode est applicable seulement si l'on dispose :**

- (i) **De l'inventaire des dates de déclenchement des 'mouvements de versant' ;**
- (ii) **Des données sur les précipitations à un pas de temps journalier.**

Enfin, les processus physiques réels ne sont pas pris en compte mais supposés, tout comme la relation entre la durée et l'intensité des précipitations avec l'occurrence des phénomènes.

1.6.3. Méthode par analyse en retour des phénomènes

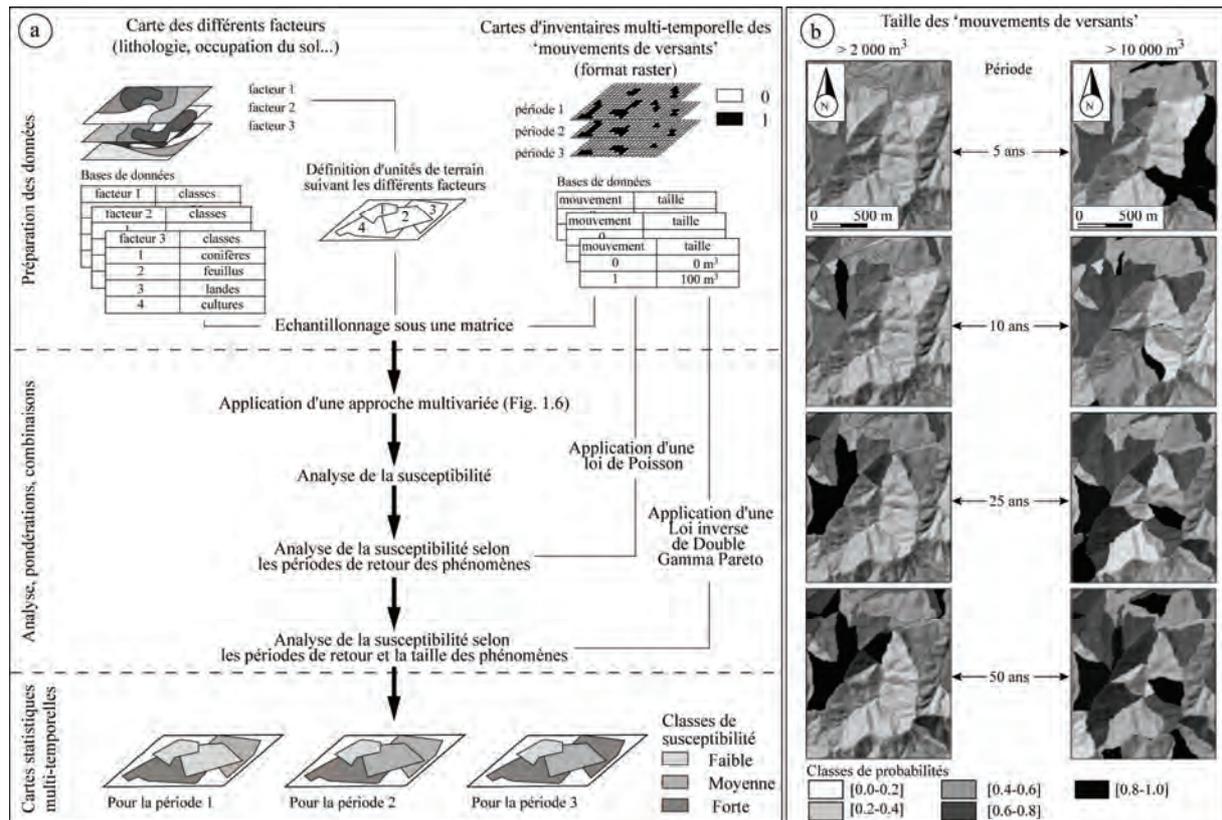
Cette approche est proposée par Crovelli en 2000. A l'origine, l'approche n'est pas spatiale, elle repose essentiellement sur un inventaire historique de l'occurrence des phénomènes et sur l'application d'une loi de probabilité de *Poisson* couplée à un modèle économique. L'objectif est de créer un modèle probabiliste d'estimation du nombre et du coût des dégâts dus aux 'mouvements de versant' pour une période définie (Crovelli, 2000). Depuis, elle a été largement employée dans des environnements SIG par Baum *et al.* (2005), Coe *et al.*, (2000, 2004), Guzzetti *et al.* (2006), Hantz *et al.* (2003).

Seule la partie concernant les probabilités de retour par loi de *Poisson* concerne l'analyse de l'aléa. La technique se divise en trois phases (Fig. 1.9a) soit :

- (i) **L'analyse de la susceptibilité par une analyse multivariée ;** les calculs s'effectuent avec des unités homogènes de pentes (*slope-units*) ;
- (ii) **L'analyse de retour des 'mouvements de versant'** selon une loi de *Poisson* et des périodes de retour définies selon l'inventaire des 'mouvements de versant' réalisé préalablement ;
- (iii) **L'analyse de la surface probable des futurs 'mouvements de versant'** selon une loi inverse de *Gamma Double Pareto*.

Les résultats acquis à chaque étape sont satisfaisants et plusieurs cartes sont réalisées par exemple pour les 5 ans, les 10 ans, 25 ans et 50 ans à venir. Toutefois, deux points sont à souligner :

- (i) Comme pour la méthode proposée par Zêzere *et al.* (2004) cette technique demande un **inventaire historique très détaillé** des phénomènes. Si le site d'étude comporte peu d'archives disponibles et accessibles, la méthode n'est pas applicable ;
- (ii) Les périodes de retour des phénomènes sont calculées sur des intervalles de temps réguliers (5, 10, 25, 50 ans). Or, **l'inventaire peut-être effectué pour des intervalles de temps irréguliers** (20 ans, 5 ans, 14 ans, 5 ans ; Guzzetti *et al.*, 2005). La méthode consiste alors à calculer la récurrence des phénomènes pour X années (en prenant en compte le nombre total de 'mouvements de versant') et calculer une loi de retour pour 5 ans. De ce fait, il subsiste beaucoup d'incertitude concernant les périodes d'occurrence des phénomènes, certaines années ont probablement connus plus d'instabilité que d'autres. La figure 1.9.b montre plusieurs extraits de carte de probabilité des 'mouvements de versant' pour les 50 ans à venir pour différentes périodes (5, 10, 25, 50 ans). Les différences entre les cartes pour les 25 ans et les 50 ans à venir sont peu perceptibles. En occultant les facteurs de déclenchement et en se basant essentiellement sur l'aspect historique des phénomènes, l'approche simplifie trop l'aspect temporel et surestime probablement la probabilité de rupture.



a. Stratégie de cartographie de la susceptibilité par analyse en retour des phénomènes. b. Exemples de cartes obtenues pour des périodes de 5, 10, 25 et 50 ans pour deux tailles de mouvements de versant différentes dans le bassin de la Staffora (Alpes du Nord, Italie).

Fig. 1.9. Cartographie de la susceptibilité par l'analyse des périodes de retour des phénomènes (adapté de Guzzetti et al., 2005, 2006).

1.7. Le zonage déterministe ou physique

Les méthodes décrites auparavant ne donnent pas d'information sur la stabilité réelle des versants : seuls les facteurs de prédisposition sont évalués, l'aspect temporel y est introduit mais de manière statistique la probabilité réelle de rupture n'est pas calculée. « Ce sont des méthodes d'évaluation de la susceptibilité des terrains aux 'mouvements de versant', elles ne peuvent avoir la prétention de donner de manière absolue la probabilité de rupture » (Terlien et al., 1995). Pour obtenir une information sur la stabilité réelle des versants, il est nécessaire de calculer la probabilité à la rupture par un coefficient de sécurité F_s se définissant ainsi : « Le coefficient de sécurité est un indicateur de la stabilité mécanique d'un versant, défini comme le facteur par lequel les paramètres de résistance au cisaillement peuvent être réduits afin d'amener la pente dans d'un état d'équilibre limite » (Morgenstern, 1992). Ce facteur définit la stabilité d'une pente selon des conditions requises : il est fonction des forces résistantes et des forces motrices (Fig. 1.10).

Plusieurs approches ont été proposées ces dernières années. Certaines sont très simples comme le zonage géotechnique simplifié, d'autres sont plus complexes comme le zonage dynamique aux modèles à base physique qui couple des modèles hydrologiques ou hydrogéologiques et un modèle de stabilité des pentes (Malet, 2003). **Par conséquent, le zonage déterministe nécessite des données supplémentaires comme :**

- (i) Les caractéristiques géométriques et structurales des phénomènes ;

- (ii) **Les caractéristiques géotechniques des formations** (poids spécifique, cohésion, angle de frottement interne) ;
- (iii) **Les précipitations** ;
- (iv) **La teneur en eau des formations** ;
- (v) **Le niveau de nappe phréatique et les pressions interstitielles.**

Ces données sont acquises généralement à l'échelle du phénomène ou du versant par instrumentation (sondages, piézomètres, essais en laboratoire etc.). Jusqu'à présent, il était difficile de transposer les résultats du site à un bassin versant entier. Depuis quelques années, grâce notamment au développement des SIG, il est possible, en prenant quelques précautions, de générer de véritables cartes d'aléas sur de petits bassins-versants.

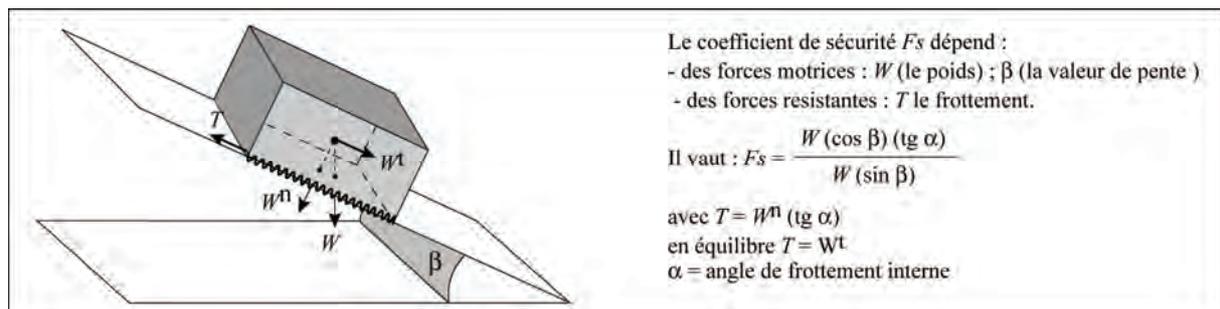


Fig. 1.10. Schématisation du calcul du coefficient de sécurité pour un bloc rocheux (adapté de Flageollet, 1989).

1.7.1. L'approche géotechnique

Le zonage géotechnique se résume à un calcul d'un coefficient de sécurité F_s . Deux méthodes peuvent être distinguées avec une **méthode semi-quantitative** et une **méthode quantitative simplifiée**. Pour les deux méthodes, plusieurs données précises sont indispensables comme (Mulder et van Asch, 1987 ; Terlien *et al.*, 1996 ; van Westen *et al.*, 2006) :

- (i) Une carte des formations superficielles indiquant leur type, leur épaisseur et leurs caractéristiques géotechniques ;
- (ii) Une carte du niveau de la nappe d'eau, fondée sur un modèle hydrologique ou sur des mesures *in situ* ;
- (iii) Une carte des gradients de pente détaillée et dérivée d'un MNT précis.

Pour la **méthode semi-quantitative**, un calcul bidimensionnel du facteur de sécurité F_s est effectué (Gokceoglu et Aksoy, 1996). L'expert assigne ensuite un coefficient pour les facteurs comme l'angle de pente critique et applique une sommation simple des différents facteurs choisis (comme pour une carte d'index). Cette méthode, rarement appliquée, simplifie énormément l'information. Toutefois, dans le cadre d'une généralisation sur un bassin versant large, elle peut s'avérer rapide à mettre en place et permet d'obtenir une première information sur la probabilité de rupture, à prendre toutefois avec précaution.

La **seconde méthode quantitative** est fondée sur un **modèle de pente infini** et un calcul d'un F_s sous SIG cellule par cellule ou par unités de pentes homogènes (Mulder et van Asch, 1987). Il est possible de **mettre en relation les précipitations et le battement de la nappe** et/ou d'exécuter une analyse historique sismique afin d'obtenir la **probabilité de rupture en fonction de la période de retour des facteurs déclenchants**. Aux échelles moyenne à large (du 1/50 000^{ème} au 1/10 000^{ème}), les variations spatiales du battement de la nappe phréatique et les caractéristiques géotechniques des formations superficielles sont des facteurs limitatifs à son application : c'est pourquoi les exemples de ce type d'approche sont souvent limités à des petits bassins-versants.

Pour cette méthode, les relations précipitations/nappe sont simplifiées au maximum et les cellules ne sont pas connectées. Pour obtenir des modèles plus précis sur la probabilité de rupture, des modèles à base physique plus complexes sont généralement utilisés (§ 1.7.3).

1.7.2. Méthode par précipitations critiques

Cette méthode s'appuie sur l'hypothèse que pour un nombre considérable de versants les instabilités sont superficielles et sont le résultat de précipitations orageuses intenses. Les deux postulats de départ sont :

- (i) La topographie joue un rôle par sa forme (convexité/concavité) qui conditionne la concentration des eaux de surface d'amont en aval ;
- (ii) Les 'mouvements de versant' superficiels se déclenchent lorsque les formations superficielles, considérées comme peu épaisses (maximum 2 m d'épaisseur) sont complètement saturées (Montgomery et Dietrich, 1994 ; Wu et Sidle, 1995 ; Montgomery, *et al.*, 1998 ; Borga *et al.*, 2002 ; Casadei *et al.*, 2003 ; Claessens *et al.*, 2005).

Ces modèles se fondent sur un modèle hydrologique simplifié et un MNT. Inspiré des concepts du modèle hydrologique *TOPMODEL*, le modèle hydrologique calcule la pression interstitielle en partant du principe que la hauteur de la nappe d'eau dans le sol saturé est suffisante pour maintenir une décharge latérale proportionnelle à un bassin versant spécifique (Duan et Grant, 2000 ; Pack *et al.*, 1998, 2001). La pression interstitielle est alors utilisée dans la formule de stabilité de versant pour calculer les changements des contraintes internes qui, à travers l'angle de friction, sont liés aux résistances de cisaillement (paramètres de *Mohr-Coulomb*). Les pluies critiques sont obtenues en dérivant les résultats, comme la transmissivité (Montgomery et Dietrich, 1994 ; Dietrich et Montgomery, 1998).

La simplification peut-être extrême. En effet, pour des modèles comme *SHALSTAB*¹⁶ et *SINMAP*¹⁷ le rôle de la végétation n'est pas pris en compte (notamment le rôle des racines sur la stabilité), car considéré comme trop variable spatialement, demandant un temps d'analyse trop long et jouant un rôle négligeable sur l'instabilité. Ce paramètre est éliminé (Dietrich et Montgomery, 1998). L'épaisseur du sol, la conductivité hydraulique et la cohésion du sol peuvent être aussi supprimées des modèles. Ainsi, avec une simplification extrême peu de paramètres sont nécessaires : seuls l'angle de pente, les surfaces contributives à la concentration des eaux, l'angle de friction interne des matériaux et la densité des matériaux et de l'eau sont nécessaires pour obtenir des valeurs d'instabilité.

La stratégie de cartographie repose donc sur trois étapes :

- (i) **Calcul des surfaces contributives** pour la concentration des eaux sur la base du MNT ;
- (ii) Calcul de la stabilité des pentes en conditions saturées ;
- (iii) **Classification des valeurs de stabilité**, comparaison des résultats avec des précipitations extrêmes et comparaison avec des événements connus.

Plusieurs codes ont été créés comme *SHALSTAB.C*, *SHALSTB.V* (Dietrich *et al.*, 1995 ; Dietrich et Montgomery, 1998), *SINMAP* (Pack *et al.*, 1998, 2001) qui peuvent être insérés directement

¹⁶ *SHALSTAB.C* : code développé par Dietrich et Montgomery en 1994 en langage AVENUE pour ArcVIEW 3.x. (Dietrich et Montgomery, 1998). Ce code est le premier de la série des *SHALSTAB* qui comprend *SHALSTAB.C*, *SHALSTAB.V* et *SHALSTAB.D*. *SHALSTAB.V* est une évolution de *SHALSTAB.C* qui tient compte en plus de l'épaisseur des formations superficielles et de la conductivité hydraulique des matériaux en jeu (Dietrich *et al.*, 1995). *SHALSTAB.D* est conçu pour la modélisation des laves torrentielles (Montgomery et Dietrich, 1994). <http://socrates.berkeley.edu/~geomorph/shalstab/>

¹⁷ *SINMAP* : Stability INdex MAPping, code développé par Pack *et al.* (1998). Ce code est optimisé pour fonctionner sous ArcVIEW 3.x. Le principe de calcul est le même que *SHALSTAB.V*. <http://hydrology.neng.usu.edu/sinmap/>

dans un environnement SIG comme ArcVIEW 3.x. ou LAPSUS-LS (Claessens, 2005 ; Claessens *et al.*, 2007). Ces modules développés spécialement pour les mouvements de terrain superficiels négligent le rôle de la végétation, contrairement au modèle dSLAM (Wu et Sidle, 1995). Ces modèles ont été calés et validés pour plusieurs sites (Rosso *et al.*, 2006). Les résultats sont probants, mais ces modèles restent limités aux mouvements de terrains superficiels (< 2 m d'épaisseur).

1.7.3. L'approche par zonage dynamique

Pour répondre à une trop grande simplification des modèles utilisés pour les mouvements très superficiels, de nouveaux modèles plus complexes et applicables pour des 'mouvements de versant' plus profonds ont été développés. Ces modèles sont capables de simuler des conditions hydrogéologiques pour :

- (i) Des situations météorologiques variables (Brooks *et al.*, 1993) ;
- (ii) Des changements de végétation qui conditionnent les écoulements et la distribution de l'eau ;
- (iii) Des variations dans le temps de propriétés du sol et des formations superficielles (van Beek, 2002).

Cette d'approche nécessite des données précises et de ce fait elle est réservée aux échelles locales (à l'échelle du phénomène¹⁸). Cependant, quelques exemples appliqués à des petits bassins-versants ont été proposés récemment comme par exemple le modèle développé par van Beek (2002) sous un environnement SIG (PC Raster)¹⁹. Ce modèle dynamique, distribué et à base physique, couple deux étapes distinctes :

- (i) Une première étape pendant laquelle **la distribution de l'eau est modélisée** pour obtenir une représentation spatiale des grandes lignes d'écoulement, de la surface piézométrique et/ou des pressions interstitielles (Bromehead, 1986 ; module STARWARS : *Storage And redistribution of Water on Agricultural and Revegetated Slopes*), l'influence de certains paramètres comme la végétation est prise en compte ;
- (ii) Une deuxième étape qui **calcule la stabilité du versant** (Module PROBSTAB fondé sur les critères de ruptures de Mohr-Coulomb).

L'avantage de ce modèle est de prendre en compte, par une stratégie adaptée des précipitations dans le temps. Ainsi, en tenant compte de l'évolution des précipitations, de l'influence de la végétation dans le temps (par des fonctions de densités de probabilités), le calcul de la rupture se fait en dynamique suivant des conditions qui se veulent plus proches de la réalité. Des prédictions de comportements des versants à long terme sont alors possibles sur la base de modèles climatiques et/ou d'évolution de la végétation. Des scénarii prédictifs peuvent alors être réalisés dans le cadre de l'évaluation du risque (Malet, 2003 ; Malet *et al.*, 2005).

1.8. Synthèse et discussion

Toutes les approches et techniques décrites précédemment ne sont pas applicables à toutes les échelles de travail. Certaines ont besoin de peu de données et seulement d'observations de

¹⁸ Une revue synthétique des modèles à l'échelle du phénomène peut être trouvée dans Malet, 2003. Ces approches sont en pleine évolution et ont fait l'objet de développements récents (van Westen *et al.*, 2006). Elles bénéficient de la multiplicité des sites de recherches à l'échelle du phénomène, des résultats acquis et du développement de codes spécifiques pour la modélisation à l'échelle du versant. Le transfert d'échelle de ces modèles à l'échelle du versant vers l'échelle du bassin versant est un challenge délicat qui s'avère nécessaire pour d'élaboration de scénarii réaliste dans la cadre de l'évaluation du risque à l'échelle du bassin versant.

¹⁹ D'autres modèles couplant hydrologie et calcul de stabilité des versants existent comme le code CHASM® (Combined Hydrology And Stability Model ; Anderson et Lloyd, 1991 ; Wilkinson *et al.*, 2000).

terrain. D'autres, au contraire, requièrent des données précises qui ne peuvent être collectées que sur de petites zones grâce à des sites instrumentés pour être calées et validées. D'un point de vue strictement économique, ces méthodes demandent plus de temps et sont plus coûteuses. Le choix d'une méthode dépend donc des objectifs fixés au départ, mais il doit aussi être fonction du coût selon un ratio coût/bénéfice acceptable (Soeters et van Westen, 1996 ; Maquaire, 2002 ; Glade et Crozier, 2005).

On peut aussi noter, qu'aucune méthode ne peut-être recommandée *a priori* (Aleotti et Chowdhury, 1999) et peu d'études comparatives existent (Jennings *et al.*, 1991). Il est toutefois possible d'utiliser en cascade plusieurs méthodes distinctes à différentes échelles pour : (i) définir à l'échelle du bassin versant des zones fortement susceptibles (par exemple par approche experte ou quantitative) et (ii) choisir à l'échelle locale, une zone caractéristique du bassin versant et définie comme fortement susceptibles pour analyser l'aléa par des méthodes déterministes (Thiery *et al.*, 2006). **A travers cette discussion trois points essentiels seront mis en avant : le premier point évoque les avantages et les inconvénients de chaque méthode. Le deuxième point indique quelles sont les échelles de travail adaptées à chaque approche. Enfin, le troisième point décrit l'apport des SIG pour l'évaluation de l'aléa.**

1.8.1. Avantages et inconvénients des différentes approches d'évaluation de la susceptibilité puis de l'aléa.

Les avantages et les inconvénients des approches évoquées précédemment sont détaillés dans le tableau 1.3, adapté de travaux antérieurs (van Westen, 1993, Soeters et van Westen, 1996 ; Aleotti et Chowdhury, 1999 ; Maquaire, 2002, van Westen *et al.*, 2006). Il est possible de synthétiser succinctement ces avantages et ces inconvénients pour chaque approche comme suit :

- (i) Pour les **approches qualitatives** : les avantages résident surtout dans la rapidité de mise en place des méthodes et ce même avec un grand nombre de facteurs. Le principal inconvénient réside dans l'évaluation subjective des facteurs, ne permettant pas de transposition de résultats sur d'autres sites ;
- (ii) Pour les **approches semi-quantitatives** : les avantages sont dans la réduction de la subjectivité et la transposition des résultats à des environnements similaires. Le problème est double avec : un doute possible pour le choix de certaines valeurs d'appartenance (pondérations) lorsqu'un facteur est mal connu ou mal apprécié, et un nombre d'itérations conséquent lorsque plusieurs facteurs sont choisis afin de trouver la bonne combinaison selon l'opérateur ;
- (iii) Pour les **approches quantitatives (probabilistes)** : l'avantage le plus souvent cité est l'objectivité des pondérations affectées pour chaque facteur. Parmi les différentes méthodes, **les méthodes bivariées** (notamment celles fondées sur les théorèmes de Bayes) sont considérées comme les plus souple et les plus fiable en terme de calcul ; chaque facteur n'ayant aucune influence sur l'autre lors du calcul des pondérations. Leur souplesse de mise en œuvre est également appréciée car, même avec peu de données, il est possible d'introduire l'opinion experte dans le processus de calcul. Toutefois, les méthodes bivariées présentent l'inconvénient majeur d'avoir l'indépendance conditionnelle entre les facteurs avant le calcul des pondérations et la détermination de la susceptibilité. Pour **les méthodes multivariées**, si leur grand avantage est une objectivité totale du calcul des pondérations, leur aspect 'boite noire' et le grand nombre de facteurs requis pour obtenir de bons résultats restent leurs grands inconvénients ;
- (iv) Pour les **approches hybrides** : l'avantage principal est la formalisation des règles subjectives de cartographie en règle(s) mathématique(s) de manière automatique ou semi-automatique. L'inconvénient majeur est l'aspect encore exploratoire de chaque approche ;

- (v) Pour les **approches 'temporelles'** : l'avantage réside dans l'introduction de l'aspect temporel des phénomènes pour les cartes de susceptibilité. L'inconvénient est que cet aspect est fondé sur des résultats de lois statistiques qui ne prennent pas en compte les processus physiques du déclenchement des phénomènes ;
- (vi) Pour les **approches déterministes** : l'avantage est que tous les processus physiques qui influencent le déclenchement des phénomènes sont pris en compte. Les inconvénients sont le large jeu de données à collecter (dont certaines ne peuvent pas toujours être obtenues) et la grande expérience nécessaire pour les utiliser.

1.8.2. *Echelle de travail et approches pour l'évaluation de l'aléa : quelle échelle pour quelle approche ?*

En suivant le tableau 1.3 des approches '*optimales*' pour certaines échelles se distinguent nettement :

- (i) **A l'échelle nationale (1/1 000 000^{ème})** : peu d'approches sont adaptées, sauf la carte d'inventaire qui est d'une utilisation restreinte. D'ailleurs les exemples de cartes nationales d'inventaire des mouvements de versant sont rares et lorsqu'elles existent les phénomènes ne sont pas représentés, seules les grandes régions sont indiqués sur le document sans gradation de la susceptibilité. La simplification est donc extrême (Godt, 1999) ;
- (ii) **A l'échelle régionale (1/100 000^{ème} à 1/500 000^{ème})** : les méthodes les plus adaptées sont les méthodes statistiques ainsi que la méthode par recherche de fréquence de précipitations. Pour les méthodes statistiques, les méthodes multivariées sont les plus appropriées. A cette échelle, la généralisation des facteurs topographiques comme par exemple le gradient de pentes dans de grandes unités homogènes de terrain influence peu sur les résultats finaux (van Westen, 1997). Pour l'approche par fréquence de précipitations, dans la majorité des cas, l'échelle régionale n'est pas idéale. En effet, les stations météorologiques sont généralement fortement éloignées les unes des autres et transposer des enregistrements de précipitations d'un site particulier vers un site aux caractéristiques différentes (géomorphologiques, physio-géographiques etc.) reste un exercice difficile ;
- (iii) **A l'échelle moyenne (1/25 000^{ème} à 1/50 000^{ème})** : les méthodes statistiques sont les plus adaptées. En effet, au cours des années 90, ces méthodologies se sont développées à partir des données disponibles produites aux échelles régionales (cartes géologiques, données spatiales numérisées, etc.). On notera que les méthodes hybrides nécessitant les mêmes jeux de données initiales peuvent aussi être optimisées pour cette échelle de travail ;
- (iv) **A l'échelle large (1/15 000^{ème} à 1/5 000^{ème})** : l'approche géomorphologique ainsi que les combinaisons de cartes d'index sont très bien adaptées. Les méthodes déterministes comme l'analyse géotechnique ou par précipitations critiques sont aussi adaptées pour cette échelle de travail uniquement dans les cas bien instrumentés et/ou bien connus par l'expert. Cette échelle permet la synthèse d'un territoire sans déformer la qualité de visualisation du bâti et la réalité topographique. Les **phénomènes de petites tailles peuvent encore y être repérés** assez aisément par photo-interprétation, permettant de réduire le temps passé sur le terrain. La précision spatiale est donc optimale sans être superflue. En environnement urbain ou complexe, des agrandissements ponctuels peuvent être nécessaires avec l'utilisation de l'échelle locale (1/1 000^{ème} à 1/5 000^{ème}). Enfin, il apparaît depuis quelques années que les données disponibles numérisées soient produites de plus en plus souvent à cette échelle. Tel est le cas en France avec la *BD Topo*® (2006b) optimisée pour les échelles comprises entre le 1/25 000^{ème} et le 1/5 000^{ème} ou en Belgique dans le cadre de l'harmonisation des données par leur *Institut Géographique National (IGN, programme*

Top10V-GIS)²⁰. Cet aspect relatif aux données disponibles adaptées ou non aux différentes approches et méthodes et aux différentes échelles sera détaillé dans la section 2.

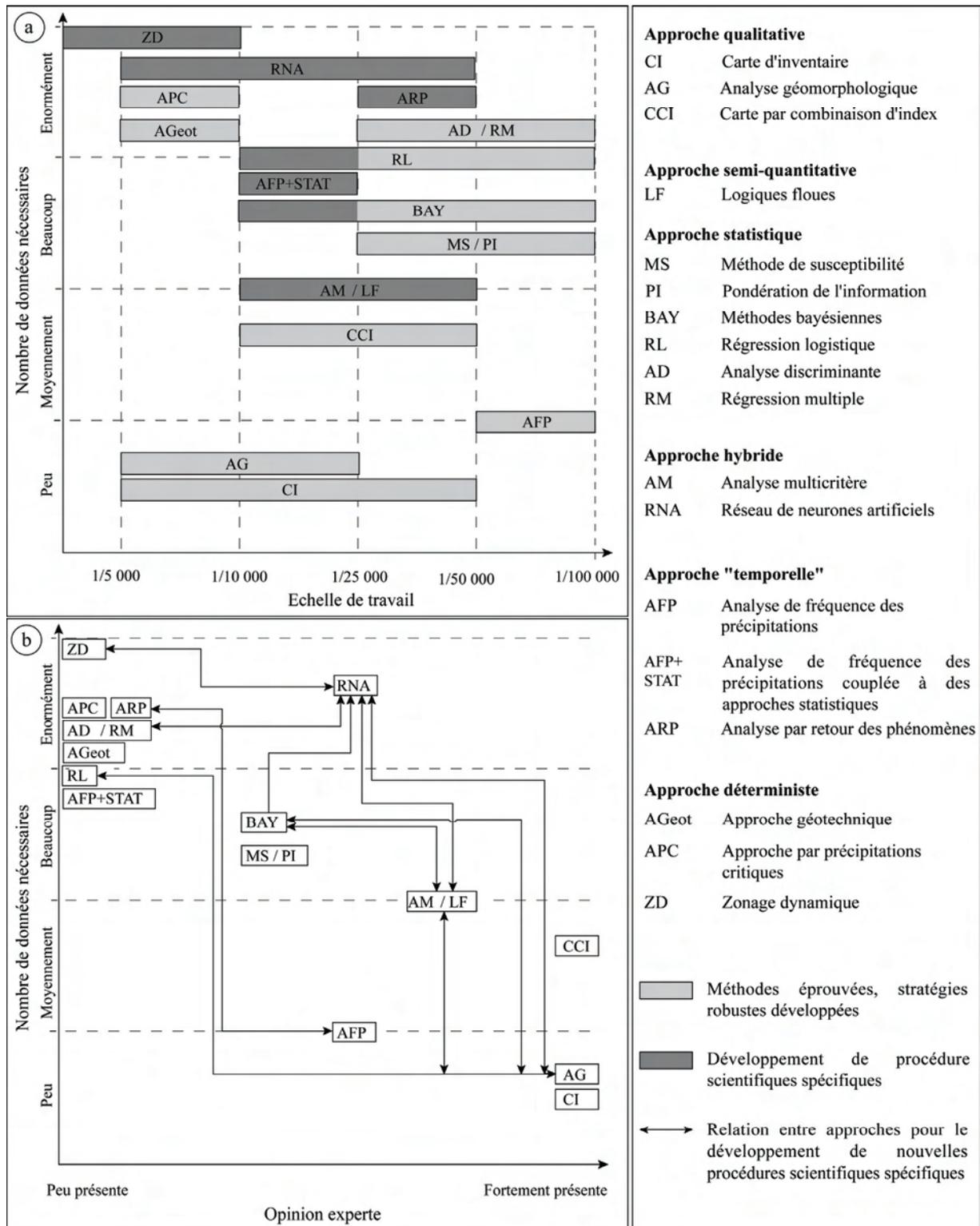
- (v) A l'échelle large, le 1/10 000^{ème} est généralement utilisée pour la **gestion réglementaire du risque**. Par exemple les cartes réglementaires des risques opposables au tiers comme les '*Plans de Prévention des Risques*' en France (*PPR*), les '*Cartes de Danger*' en Suisse (OFEE/OFEFP, 1995 ; OFAT/OFE/OFEFP, 1997 ; BUWAL, 1999 ; Raetzo *et al.* 2002) ou encore les **cartes de risques italiennes** (Bertolini et Pellegrini, 2001 ; Bertolini *et al.*, 2001 ; 2005 ; Maquaire *et al.*, 2003 ; Panizza *et al.*, 1996) **s'effectuent au 1/10 000^{ème}**.
- (vi) **A l'échelle locale (1/1 000^{ème} à 1/5 000^{ème})** : cette échelle est essentiellement réservée aux approches déterministes, parfois appliquée pour la méthode géomorphologique. Pour les méthodes déterministes nécessitant un large jeu de données très précises, cette échelle permet d'instrumenter les sites et d'obtenir les informations voulues. Pour l'approche géomorphologique, une telle échelle de travail permet de localiser précisément les phénomènes et un ensemble de facteurs associés sans obligatoirement généraliser l'information.

Pour conclure, l'échelle du 1/10 000^{ème} tend à devenir l'échelle de travail de référence. Elle est considérée actuellement comme l'échelle optimale pour l'évaluation de l'aléa et du risque pour un bassin versant (Crozier et Glade, 2005 ; van Westen *et al.*, 2006). Cette échelle de travail a également été retenue et **utilisée dans le cadre du programme de recherche européen ALARM** (Pasuto *et al.*, 2004). **Auparavant, l'échelle du 1/10 000^{ème} était peu utilisé pour l'évaluation de la susceptibilité et de l'aléa par différentes approches d'évaluation de la susceptibilité aux mouvements de versant en particulier par les approches quantitatives.** Plusieurs raisons étaient alors évoquées : (i) les données disponibles étaient peu nombreuses ou pas disponibles ; (ii) lorsqu'elles étaient disponibles, l'incertitude spatiale et la généralisation des nomenclatures ne permettaient pas d'obtenir des résultats réalistes²¹. Aujourd'hui, ces verrous liés à ces problèmes de précision des données, d'incertitudes spatiales et aux temps de calculs longs sont progressivement résolus.

Ainsi, de nouvelles procédures de cartographie d'évaluation de la susceptibilité et de l'aléa couplant parfois plusieurs méthodes différentes sont actuellement développées pour l'échelle du 1/10 000^{ème} (Fig. 1.11). Ces nouvelles procédures spécifiques sont fondées soit sur des algorithmes utilisés dans d'autres disciplines (van Den Eckhaut *et al.*, 2006) soit sur des stratégies adaptées aux sites (Thiery *et al.*, 2004a et 2004b, 2005 , 2007 ; van Westen *et al.*, 2003). En travaillant à cette échelle, il est désormais possible de comparer des cartes obtenues par méthodes réglementaires avec des tentatives de modélisation par SIG (Malet *et al.*, 2006 ; Thiery *et al.*, 2006, Thiery *et al.*, 2007).

²⁰ Cet aspect sur les données disponibles adaptées ou non aux différents modèles à différentes échelles sera détaillé dans le point n°3.

²¹ Par exemple, en réduisant la taille des unités de calculs (maillage ou polygones homogènes) les temps de calcul étaient longs pour des résultats loin d'être satisfaisants.



a. En fonction du nombre de données nécessaires et de l'échelle de travail considérée pour obtenir des résultats fiables. b. En fonction de la présence de l'opinion experte dans le processus d'évaluation et des relations entre les approches pour le développement de nouvelles procédures spécifiques.

Fig. 1.11. Evaluation qualitative des différentes techniques de zonage de la susceptibilité et de l'aléa pour un bassin versant.

Tab. 1.3.a. Avantages, inconvénients et utilité des SIG pour les méthodes d'évaluation de la susceptibilité et de l'aléa à différentes échelles (adapté Soeters et van Westen, 1996 et Aleotti et Chowdhury, 1999).

En blanc : évaluation de la susceptibilité ; en grisé : évaluation de l'aléa. SIG : Utilité du SIG : H : haute ; I : intermédiaire ; R : restreinte. Echelle de travail : R : régionale ; M: moyenne ; L : large ; Lo : locale. Op : optimale ; Na : non adaptée ; Rec : développement de procédures spécifiques pour la recherche. Nota : les n° reprennent ceux des différents paragraphes.

Approches		Avantages	Inconvénients	SIG	Echelle				
					R	M	L	Lo	
1.2. QUALITATIVE	1.2.1. Carte d'inventaire	Information sur la localisation des phénomènes. Basé pour toutes les autres approches.	Aucune évaluation de la susceptibilité et de l'aléa.	R	R	Op	Op	Op	
	1.2.2. Analyse géomorphologique	Evaluation rapide tenant compte d'un grand nombre de facteurs.	Méthodologie subjective utilisant des règles implicites qui empêchent une analyse critique des résultats. Méthode peu transposable sur d'autres sites.	I	Na	R	Op	Op	
	1.2.3. Combinaison de cartes d'index	Diminue le problème des règles subjectives Totale automatisation des étapes. Standardisation de la gestion des données.	Subjectivité dans l'attribution des poids des valeurs des classes de chaque facteur. Méthode peu transposable sur d'autres sites.	I	R	R	Op	Op	
1.3. SEMI-QUANTITATIVE	1.2.4 Logiques floues	Diminue le problème des règles subjectives. Permet une transposition dans des environnements similaires	Subjectivité dans l'attribution des pondérations des classes de chaque facteur. Recherche des règles combinatoires longues à mettre en œuvre	H	Op	Op	Rec	R	
1.4. QUANTITATIVE/PROBABILISTE	1.4.1. BIVARIEE	1.4.1.1. 'Méthode de susceptibilité'	Simplicité de mise en place, rapidité des calculs. Permet l'introduction de l'opinion 'expert' pour améliorer les résultats. Possibilité d'automatiser la procédure.	Collecte systématique de certaines données. Evaluation de la dépendance conditionnelle des données d'entrée.	H	Op	Op	R	R
		1.4.1.2. Méthode par pondération de l'information	Simplicité de mise en place, rapidité des calculs. Permet l'introduction de l'opinion 'expert' pour améliorer les résultats. Possibilité d'automatiser la procédure.	Collecte systématique de certaines données. Evaluation de la dépendance conditionnelle des données d'entrée.	H	Op	Op	R	R
		1.4.1.3. Méthodes Bayésiennes	Technique la plus souple et modulable pour la modélisation. Permet l'introduction de l'opinion 'expert' pour améliorer les résultats. Possibilité d'automatiser la procédure.	Collecte systématique de certaines données. Evaluation de la dépendance conditionnelle des données d'entrée. Procédure à adapter pour l'échelle large.	H	Op	Op	Rec	R
	1.4.2. MULTIVARIEE	1.4.2.1. Analyse discriminante	Résultats très fiables si les facteurs les plus influents sont caractérisés avant le calcul. Généralisation aisée à un site large si les unités homogènes sont bien définies avant le calcul.	Collecte systématique de certaines données. Nécessite un large jeu de données Nécessite de caractériser les facteurs les plus influents avant le calcul Calcul par cellules déconseillé. Nécessite un traitement par logiciel externe au SIG.	H	Op	Op	R	R
		1.4.2.2. Régressions multiples	Résultats très fiables si les facteurs les plus influents sont caractérisés avant le calcul. Généralisation aisée à un site large si les unités homogènes sont bien définies avant le calcul.	Collecte systématique de certaines données. Nécessite un large jeu de données Calcul par cellules déconseillé. Généralisation des facteurs trop grande si unités homogènes par polygones (slope-units) utilisées. Résultats peu acceptables si le site est complexe. Nécessite un traitement par logiciel externe au SIG.	H	Op	Op	R	R
		1.4.2.3 Régressions logistiques	Possibilité de calcul cellules par cellules. Pas d'analyse préalable sur les facteurs. Modules développés sous SIG existants.	Nécessite un large jeu de données Adaptation d'une stratégie spécifique si le terrain est complexe. Les distributions des probabilités sont difficiles à analyser pour de faible niveau d'aléa.	H	Op	Op	Rec	R

Tab. 1.3.b. Avantages, inconvénients et utilité des SIG pour les méthodes d'évaluation de la susceptibilité et de l'aléa à différentes échelles (adapté Soeters et van Westen, 1996 et Aleotti et Chowdhury, 1999).

En blanc : évaluation de la susceptibilité ; en grisé : évaluation de l'aléa. SIG : Utilité du SIG : H : haute ; I : intermédiaire ; R : restreinte. Echelle de travail : R : régionale ; M : moyenne ; L : large ; Lo : locale. Op : optimale ; Na : non adaptée ; Rec : développement de procédures spécifiques pour la recherche. Nota : les n° reprennent ceux des différents paragraphes.

Approches		Avantages	Inconvénients	SIG	Echelles			
					R	M	L	Lo
1.5. HYBRIDE	1.5.1. Système de décision multicritères	Diminue le problème des règles subjectives (<i>hidden rules</i>). Rapidité de mise en place. Standardisation de la gestion des données.	Subjectivité dans l'attribution des poids des valeurs des classes de chaque facteur. Méthode peu transposable sur d'autres sites actuellement.	H	R	Op	Rec	R
	1.5.2. Intelligence artificielle (Réseaux de neurones artificiels)	Méthode objective. Ne demande aucune connaissance théorique sur les processus physiques. Peut-être couplé avec d'autres approches.	Approche encore expérimentale. Peut nécessiter un calage long. Demande une vérification systématique de tous les facteurs les plus influents.	H	R	Rec	Rec	Rec
1.6. TEMPORELLE	1.6.1. Analyse de fréquence des précipitations	Information rapide à obtenir. Donne un aperçu de l'influence des précipitations.	Nécessite un inventaire précis des phénomènes.	R	Op	R	Na	Na
	1.6.2. Analyse de fréquence des précipitations couplées aux approches statistiques	Information rapide à obtenir après calcul de la susceptibilité. Donne un aperçu de l'influence des précipitations.	Nécessite un inventaire précis des phénomènes. Les processus physiques ne sont pas pris en compte.	H	Na	R	Rec	R
	1.6.3. Approche par analyse en retour des phénomènes	Permet d'élaborer des scénarii à court et moyen terme.	Nécessite un inventaire historique précis des phénomènes. Les processus physiques ne sont pas pris en compte. Beaucoup d'incertitude entre les périodes de retour et la réalité.	H	Na	Rec	Na	Na
1.7. DETERMINISTE	1.7.1. Approche géotechnique	Méthodologie objective et quantitative. Demande des investigations et des mesures détaillées des paramètres géotechniques.	Besoin de connaissances détaillées de la zone d'étude. Besoin d'une grande expérience pour utiliser les modèles géotechniques. Ne prend pas en compte l'incertitude des variables.	H	Na	Na	Op	Op
	1.7.2. Approche par précipitations critiques	Méthodologie objective et quantitative. Demande des investigations et des mesures détaillées des paramètres géotechniques.	Besoin de connaissances détaillées de la zone d'étude. Ne prend pas en compte l'incertitude des variables. Simplification des processus physique pour certains modèles. Ne prend en compte qu'un type de mouvements de versant.	I	Na	Na	Op	Op
	1.7.3. Approche par zonage dynamique	Méthodologie objective et quantitative. Demande des investigations et des mesures détaillées des paramètres géotechniques. Fournit des champs de pression et de déformations. Permet l'élaboration de scénarii prédictifs.	Besoin de connaissances détaillées de la zone d'étude. Besoin d'une grande expérience pour utiliser les modèles. Besoin de codes de calcul spécifiques, de longs paramétrages. Problèmes d'interface.	H	Na	Na	Rec	Op

1.8.3. Apports des SIG pour l'évaluation de l'aléa et de la susceptibilité

Depuis une vingtaine d'années, les SIG sont de plus en plus utilisés pour l'évaluation de la susceptibilité et de l'aléa 'mouvements de versant' pour les raisons suivantes (van Westen, 1993; Soeters et van Westen, 1996 ; Longley *et al.*, 2001 ; Süzen, 2002) :

- (i) La numérisation des données permet un stockage et une mise à jour régulière et aisée (Burrough et Mc Donnell, 1996) ;

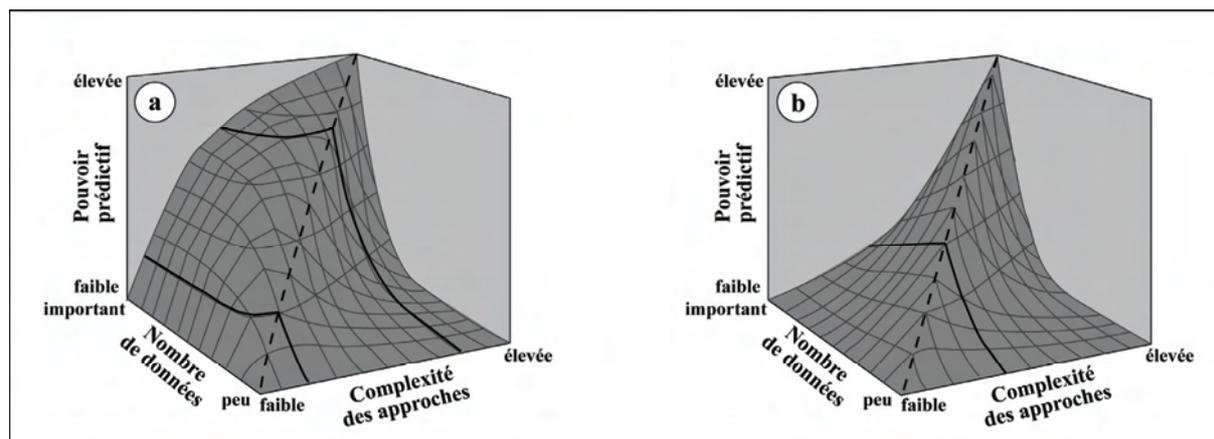
- (ii) Un large éventail d'extensions et de codes de calculs sont disponibles sous des interfaces différentes comme l'extension *ArcSDM* pour *ArcVIEW 3.x.* ou *ArcGIS* (Kemp *et al.*, 2001 ; Sawatzky *et al.*, 2004) ou encore des codes de calculs à retranscrire sous *ILWIS* (<http://itc.nl>) ;
- (iii) L'amélioration de modèles utilisés par diverses méthodes d'ajustement des données d'entrée. L'utilisateur peut procéder à plusieurs analyses de sensibilité des modèles et optimiser les résultats par des procédures d'essais et d'erreurs (*trial and error process*) permettant d'obtenir des résultats précis ;
- (iv) La comparaison des modèles entre eux par des procédures de superposition ou de croisement plus complexes (Fielding et Bell, 1997) qui permettent de choisir plus facilement un modèle adapté à son site de recherche.

Toutefois, les SIG comportent aussi des inconvénients qu'il ne faut pas négliger comme :

- (i) Le temps nécessaire à la numérisation et au stockage des données pour constituer les différentes bases de données. La procédure peut s'avérer longue et fastidieuse, avec des retours '*terrain*' si des erreurs subsistent, particulièrement dans le cas de travaux aux échelles larges et locales qui demandent une précision accrue ;
- (ii) Le danger de vouloir intégrer trop de données d'entrée augmentant le temps de manipulation et d'analyse et n'entraînant pas nécessairement un gain dans la qualité des résultats obtenus. Pour pallier à ce problème Glade et Crozier (2005) proposent une courbe idéale fondée sur la qualité et le nombre de données d'entrée, sur la complexité des approches et leur pouvoir prédictif (Fig. 1.12) ;
- (iii) La majorité des méthodes d'analyse peuvent être utilisées sous SIG. Cependant, certaines demandent des informations parfois difficiles à obtenir. Par conséquent, il est primordial de bien cibler les objectifs et d'élaborer un cahier des charges précis avant de commencer les manipulations.

Le tableau 1.4 présente les différentes étapes d'élaboration d'une analyse de l'aléa '*mouvements de versant*', utilisant ou non un SIG, ainsi que le temps relatif mis pour chaque étape. Ce n'est qu'une estimation fondée sur des exemples tirés de la littérature (van Westen, 1993 ; Soeters et van Westen, 1996).

Les pourcentages exprimés (Tab. 1.4) ne sont pas dépendants de la taille du site d'étude. Il est évident que plus le site est étendu plus la collecte de données est longue, notamment pour les étapes relatives aux données d'entrée (étapes 2, 3, 5, 6 et 7). Certaines d'entre elles demandent plus de temps de numérisation à **l'échelle large et à l'échelle locale**. En effet, les cartes existantes (cartes géologiques, cartes topographiques, cartes géomorphologiques, etc.) sont produites à l'échelle régionale et moyenne ; c'est-à-dire au 1/100 000^{ème}, au 1/50 000^{ème}. **Cependant, pour les échelles large et locale la résolution spatiale ainsi que la nomenclature doivent être plus précises.** Ainsi, une réflexion est nécessaire lors de la numérisation (étape 4) afin d'adapter les documents existants à ces deux échelles de travail.



La relation conceptuelle a, généralement admise (Grayson et Blöschl, 2000 ; Grayson et al., 2002), indique une ligne de performance optimum (en pointillée) entre les trois facteurs. Les deux courbes noires indiquent que plus l'approche est complexe, plus il faut de données et meilleurs sont les pouvoirs prédictifs. Cette relation n'est pas obligatoirement vérifiée car plus il y a de données introduites dans un modèle, plus les étapes de calages sont longues et plus l'incertitude s'accroît (Glade et Cozier, 2005).

La relation conceptuelle b est plus proche de la réalité que le schéma conceptuel précédent (Glade et Crozier, 2005). La ligne noire indique une diminution du pouvoir prédictif du modèle lorsque la ligne de performance optimum est dépassée. Ainsi, pour une approche moyennement complexe, même avec un nombre plus élevé de données, l'approche est à son optimum avec un nombre de données moyennement faible.

a. Relation généralement admise pour la modélisation. b. relation proposée par Glade et Crozier (2005).

Fig. 1.12. Relation conceptuelle entre la complexité des approches, le nombre de données et le pouvoir prédictif des approches (adapté de Grayson et Blöschl, 2000 ; Grayson et al., 2002 et Glade et Crozier, 2005).

Cependant, des bases de données sont produites désormais par des prestataires de services comme les organismes géographiques nationaux, des services publics locaux ou des entreprises privées, pour le compte d'établissements publics ou privés de gestion (par exemple les conseils généraux en France, communautés de communes, certaines agglomérations, etc.). Ces bases de données numériques sont souvent produites à l'échelle régionale ou moyenne comme par exemple la base de données **CORINE Land Cover** pour l'occupation du sol (adaptée à l'échelle régionale et moyenne grâce à deux nomenclatures différentes) ou la série des **BD** produites en France par l'IGN (*Institut Géographique National*, **BDA**lti®, **BDC**arto®, **Scan25**®).

Pour l'échelle large et locale, quelques bases de données numériques sont produites comme la **BD Topo**® (IGN, 2006b) ou les **orthophotos** de la totalité du territoire français à une **résolution spatiale de 50 cm**. A ces grandes échelles, ces données sont souvent réalisées pour des secteurs très urbanisés, où la demande d'acquisition est forte, contrairement aux secteurs moins urbanisés (milieu montagnard) où ces bases de données sont absentes, ou en cours d'acquisition (**BD Topo**® ; IGN, 2006b).

En général, ces bases de données sont coûteuses, même si des prix spéciaux sont consentis aux chercheurs et universitaires. Dans certains cas, ces données peuvent être mises à disposition aux services publics de l'Etat, collectivités locales, services locaux ou organismes de recherches par convention spécifique. Par exemple, le **CRIGE-PACA** (*Centre Régional de l'Information géographique de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur*, France) a acquis certaines données numériques produites par l'IGN. Cet organisme peut aussi, en fonction des besoins, acquérir spécifiquement certaines données, comme par exemple l'occupation du sol dérivée de la base de données **CORINE Land Cover** et adaptée à la région *Provence-Alpes-Côte d'Azur*. Toutes ces données (fonds de plans, couches thématiques, orthophotos, images satellites) sont mises à disposition, depuis 2001, avec leur plateforme internet (<http://www.crige-paca.org/>).

Tab. 1.4. Etapes et temps de travail pour l'évaluation de l'aléa 'mouvements de versant' de manière manuelle et sous un environnement SIG pour différentes échelles de travail (adapté de van Westen, 1993 ; Soeters et van Westen, 1996 ; Süzen, 2002).

Le temps de chaque étape est exprimé en pourcentage. IPA : Interprétation des Photographies Aériennes ; en grisé les étapes concernant les données détaillées au point 3.

Etapes	Echelle Régionale (≤1/100 000 ^{ème})		Echelle Moyenne (1/50 000 ^{ème} – 1/25 000 ^{ème})		Echelle large (1/10 000 ^{ème})		Echelle locale (1/5 000 ^{ème} – 1/1 000 ^{ème})	
	Sans SIG	Avec SIG	Sans SIG	Avec SIG	Sans SIG	Avec SIG	Sans SIG	Avec SIG
1. Choix de l'échelle de travail et de la méthode	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 1	< 5
2. Elaboration de l'architecture des bases de données	0	< 5	0	< 5	0	10	0	10
3. Collecte des données existantes	5	5	5	5	< 5	< 5	10	10
4. IPA	50	50	40	40	20	20	10	10
5. Observations de terrain	< 5	< 5	7	7	20	20	10	20
6. Mise en place des données d'entrée	0	20	0	25	0	30	0	15
7. Validation des données	0	< 5	0	5	0	5	0	5
8. Manipulation des données	0	< 5	0	5	0	5	0	5
9. Analyse des données	30	10	40	10	40	10	60	20
10. Analyse de l'erreur	0	< 5	0	< 5	0	< 5	0	< 5
11. Production des cartes finales	10	< 5	10	< 5	10	< 5	10	< 5
TOTAL	≈ 100 %	≈ 100 %	≈ 100 %	≈ 100 %	≈ 100 %	≈ 100 %	≈ 100 %	≈ 100 %

2. LES DONNEES D'ENTREE POUR L'EVALUATION DE LA SUSCEPTIBILITE ET DE L'ALEA

Le nombre et la qualité des données d'entrée dépendent du type d'approche choisie et du problème considéré, de l'extension du site de recherche, de l'échelle de travail adoptée, des enjeux, des moyens financiers à disposition (Longley *et al.*, 2001). Pour évaluer l'aléa 'mouvements de versant' il faut donc, dès le début du projet, cibler les objectifs et les moyens c'est-à-dire définir si :

- (i) L'évaluation sera qualitative ou quantitative ;
- (ii) Les données historiques seront disponibles ou non ;
- (iii) Des observations et des investigations spécifiques seront nécessaires et possibles.

Sous SIG, les données spatialisées sont introduites habituellement sous la forme de couches (*data layer*) vectorisées (points, arcs ou polygones, *vector*) ou par maillage (*raster* ; Wise, 2002 ;

Fig. 1.16). Ces données spatialisées sont reliées à des bases de données informatives appelées tables attributaires (*attribute tables*). Ces données peuvent être dérivées de documents disponibles comme des cartes géologiques, des cartes géomorphologiques, des rapports d'études, des rapports historiques, des archives, des bases de données spécifiques historiques, etc. Toutefois, quelque soit la méthode choisie, les données d'entrée devront être sélectionnées seulement après avoir prudemment évalué les causes des instabilités passées et les causes probables d'une instabilité potentielle.

2.1. Les données d'entrée nécessaires pour l'évaluation de la susceptibilité et l'aléa 'mouvements de versant'

Les données nécessaires pour une évaluation de l'aléa 'mouvements de versant' aux différentes échelles de travail (national, régional, moyen, large et local) sont appelées :

- (i) **Variable à modéliser (VM)** pour les 'mouvements de versant' ;
- (ii) **Variable prédictive (VP)** pour les facteurs de prédisposition ou déclenchant.

Elles sont réparties en cinq grands groupes qui sont (i) la géomorphologie, (ii) la topographie, (iii) la géologie, (iv) l'occupation du sol et (v) l'hydrologie. Le Tab. 1.7 donne un aperçu synthétique des groupes de données, de l'information contenue, de leur(s) technique(s) d'acquisition, et de l'échelle de travail adaptée. Chaque groupe comprend plusieurs données détaillées ci-après :

- (i) La **géomorphologie** : comprend les unités cartographiées, les phénomènes passés et récents. Ces données sont obtenues dans la majorité des cas par observations de terrain, par interprétation des photographies aériennes, par analyse d'images satellites, par analyse d'anciennes cartes géomorphologiques, géologiques, topographiques et par analyse de documents existants (rapport, mémoires etc.) ;
- (ii) La **topographie** : les données topographiques sont obtenues par un modèle numérique de terrain (MNT). Ce dernier est acquis soit par interpolation de points dérivés de digitalisation de cartes topographiques ou par GPS, soit par photogrammétrie, soit par technologies laser comme le LIDAR. Le MNT permet d'obtenir des (i) données dérivées de premier ordre (Burrough et Mc Donnel, 1996) comme le gradient de pente, l'exposition des pentes, la longueur des pentes puis (ii) des données dérivées de second ordre comme l'aspect des pentes (concavités/convexités), le réseau de drainage, les bassins-versants, le rayonnement solaire (Fu et Rich, 1999) ;
- (iii) La **géologie** : réunit la lithologie, la structure géologique, les séquences sédimentaires (formations superficielles), et les données sismiques. Ces données sont obtenues grâce aux cartes géologiques, à l'interprétation de photographies aériennes, aux observations de terrain, et aux investigations en laboratoire et/ou sur le terrain. Pour un travail à échelle large et locale, les cartes géologiques (généralement à l'échelle du 1/50 000^{ème}), sont réinterprétées et complétées par des observations de terrain. A ces échelles, certaines données comme les données géotechniques ou sismiques sont obtenues par instrumentation sur sites ;
- (iv) L'**occupation du sol** : comprend les infrastructures (actuelles et anciennes), l'occupation du sol (récente et ancienne). Comme il a été précisé auparavant, certaines bases de données concernant l'occupation du sol et les infrastructures peuvent être disponibles pour des échelles régionales et/ou moyennes sur tout un territoire ou sur certains secteurs. Ces données sont obtenues par interprétation d'images satellites complétés par une interprétation de photographies aériennes, une interprétation de cartes topographiques et parfois des observations de terrain. Pour l'échelle large et locale pour disposer d'une information récente et exhaustive les

observations de terrain sont indispensables, en complément des différentes interprétations énumérées précédemment ;

Tab. 1.5. Inventaire des données d'entrée nécessaires pour l'évaluation de la susceptibilité et de l'aléa 'mouvements de versant' à l'échelle du bassin versant (d'après Soeters et van Westen, 1996 et Maquaire, 2002).

Échelle : R : régionale ; M : moyenne ; L : large ; Loc : locale. Possibilité de collecte de données selon les échelles d'analyses : 3 : bon ; 2 : moyen ; 1 : très moyen. ISS : Interprétation par Images Satellite ; IPA : Interprétation par Photographies Aériennes ; MNT : Modèle Numérique de terrain ; SIG : Système d'Information Géographique ; K_{sat} : test de conductivité à saturation.

Couche de données pour le zonage de l'aléa	Table de données	Méthodes utilisées	Echelle d'analyse			
			R	M	L	Loc
i. Géomorphologie						
1. Zones cartographiées	Zones cartographiées	IIS + IPA + observations (de terrain)	3	3	3	3
2. Unités et sous unités	Description géomorphologique	IPA + observations	2	3	3	3
3. Mouvements de versant (récents)	Type, activité, épaisseur, dimensions, etc.	IPA + IPA diachronique + observations	1	3	3	3
4. Mouvements de versant (anciens)	Type, activité, épaisseur, dimensions, date, etc.	IPA + IPA diachronique + Archives et documents	1	3	3	3
ii. Topographie						
5. Modèle numérique de terrain	Classes d'altitude	Sous SIG grâce aux cartes topographiques, par technologie laser, par photogrammétrie	2	3	3	3
6. Carte des pentes	Classes des pentes	Sous SIG depuis le MNT	2	3	3	3
7. Carte de direction des pentes	Classes des directions des pentes	Sous SIG depuis le MNT	2	3	3	3
8. Longueur des pentes	Classes des longueurs de pente	Sous SIG depuis le MNT	2	3	3	3
9. Concavités/convexités	Concavités/convexités	Sous SIG depuis le MNT	1	1	3	3
iii. Géologie et techniques associées						
10. Lithologie	Lithologie, résistance de la roche, discontinuités, failles...	Cartes géologiques + IPA + observations, investigations terrain et laboratoire	2	3	3	3
11. Séquences sédimentaires	Type de matériaux, épaisseurs, classification USCS, granulométrie, densité, poids volumique, C, ϕ	Modélisation grâce aux cartes : lithologiques, géomorphologiques, des pentes, observations terrain et laboratoire	1	2	2	3
12. Structure géologique	Failles, longueur, pendage, direction du pendage, axe des plis, etc.	IIS + IPA + observations de terrain	3	2	2	3
13. Données sismiques	Accélération sismique maximale	Données sismiques + données géologiques + modélisation	3	3	3	3
iv. Occupation du sol						
14. Infrastructures (récentes)	Voies de communication (type de routes, chemin de fer...), extension urbaine	IPA+cartes topographiques + observations de terrain + classification par images satellites	3	3	3	3
15. Infrastructures (anciennes)	Voies de communication (type de routes, chemin de fer...), extension urbaine	IPA+cartes topographiques	3	3	3	3
16. Occupation du sol (récente)	Type d'occupation du sol, densité d'arbres, profondeur des racines	IPA+classification par images satellites-observations de terrain	2	3	3	3
17. Occupation du sol (ancienne)	Type d'occupation du sol	IPA	2	3	3	3
v. Hydrologie						
18. Drainage	Type, ordre, longueur	IPA+cartes topographiques	3	3	3	3
19. Bassin versant	Ordre, taille	IPA+cartes topographiques	2	3	3	3
20. Précipitations	Précipitations au cours du temps	Données issues de stations météorologiques	2	3	3	3
21. Températures	Températures au cours du temps	Données issues de stations météorologiques	2	3	3	3
22. Evapotranspiration	Evapotranspiration au cours du temps	Données issues de stations météorologiques et modélisation	2	3	3	3
23. Cartes piézométriques	Hauteurs des nappes au cours du temps,	Mesures de terrain K_{sat} + modèles hydrologiques	1	1	1	3

- (v) **L'hydrologie** : inclut les données relatives au réseau hydrographique (drainage), au bassin versant, aux précipitations, aux températures, à l'évapotranspiration et à la piézométrie. Les *MNT* sont d'une grande aide pour acquérir les données relatives au drainage et les contours des bassins-versants de manière automatique. Plus ils sont précis et plus les informations obtenues sont distinctes. Il est néanmoins possible d'obtenir ces données manuellement à partir de cartes topographiques. Pour les précipitations, les températures, l'évapotranspiration et la piézométrie les données sont issues des informations des stations météorologiques nationales ou locales ou des stations de mesures supplémentaires.

2.2. Les données d'entrée en fonction de l'échelle de travail

Pour l'évaluation de la susceptibilité puis de l'aléa '*mouvements de versant*', chaque échelle de travail peut être associée à un jeu de données minima. Les points suivants, complétés par le tableau 1.5, donnent un aperçu des données à utiliser.

Pour une **approche régionale**, la collecte systématique d'informations pour chaque facteur pris individuellement (géomorphologie, lithologie, sols, formations superficielles, etc.) n'est pas nécessaire. Les données n'ont pas besoin d'être trop '*précises*' (en termes spatial et de nomenclature). Pour obtenir des résultats satisfaisants, les données disponibles peuvent être utilisées (§ 2.1). La représentation spatiale des informations se limite, à cette échelle, à un découpage du site en surfaces homogènes sur la base, par exemple, d'interprétation d'images satellites, de photographies aériennes et des cartes géologiques (Pachauri et Pant, 1992). Ce découpage peut-être affiné si d'autres facteurs sont pris en considération (Fig. 1.13, van Westen *et al.*, 1997).

Pour une approche à l'**échelle moyenne**, la majorité des données pour chaque groupe peut-être collectée excepté les données sur les variations de la nappe d'eau et les informations géotechniques. Les données à collecter à cette échelle doivent se focaliser sur la distribution, l'aspect temporel et historique des '*mouvements de versant*'. Ainsi, plusieurs cartes d'activité, de distribution par type de phénomène, et les paramètres considérés comme influents sur leur localisation sont produites. Comme pour l'échelle régionale, les données disponibles (§ 2.1) peuvent être suffisantes pour une évaluation de l'aléa satisfaisante.

Pour une approche à l'**échelle large**, la surface à évaluer sera plus restreinte, limitée à une centaine de km² ou à un bassin versant. A cette échelle, toutes les données peuvent être collectées. Si la surface est trop grande il convient de se limiter aux mêmes données que pour l'échelle moyenne. Toutefois, leur précision spatiale ainsi que leur nomenclature doivent être accrues. Dans ce cas, les bases de données disponibles ne sont pas satisfaisantes : il faut soit les retravailler pour les adapter à l'échelle de travail, soit en produire de nouvelles, adaptées aux objectifs fixés. Dans le cadre du programme *ALARM*, des tests comparatifs, entre les bases de données existantes sur l'occupation du sol (comme *CORINE Land Cover* et des bases de données spécifiquement acquises par analyse d'images satellites et de photographies aériennes) ont été effectuées pour une évaluation de l'aléa en région montagneuse. Les résultats montrent que la précision des résultats est multipliée par huit en utilisant des bases de données spécifiquement acquises pour le 1/10 000^{ème} (Thiery *et al.*, 2003 ; Maquaire *et al.*, 2004).

Pour une approche à l'**échelle locale**, le site sera limité à un petit bassin versant de quelques km² ou à un versant. Toutes les données sont indispensables. Des informations précises sur la géométrie des versants (structure 3D), la structure lithologique et des formations superficielles, les paramètres géotechniques et de pressions interstitielles doivent être collectées et spatialisées.

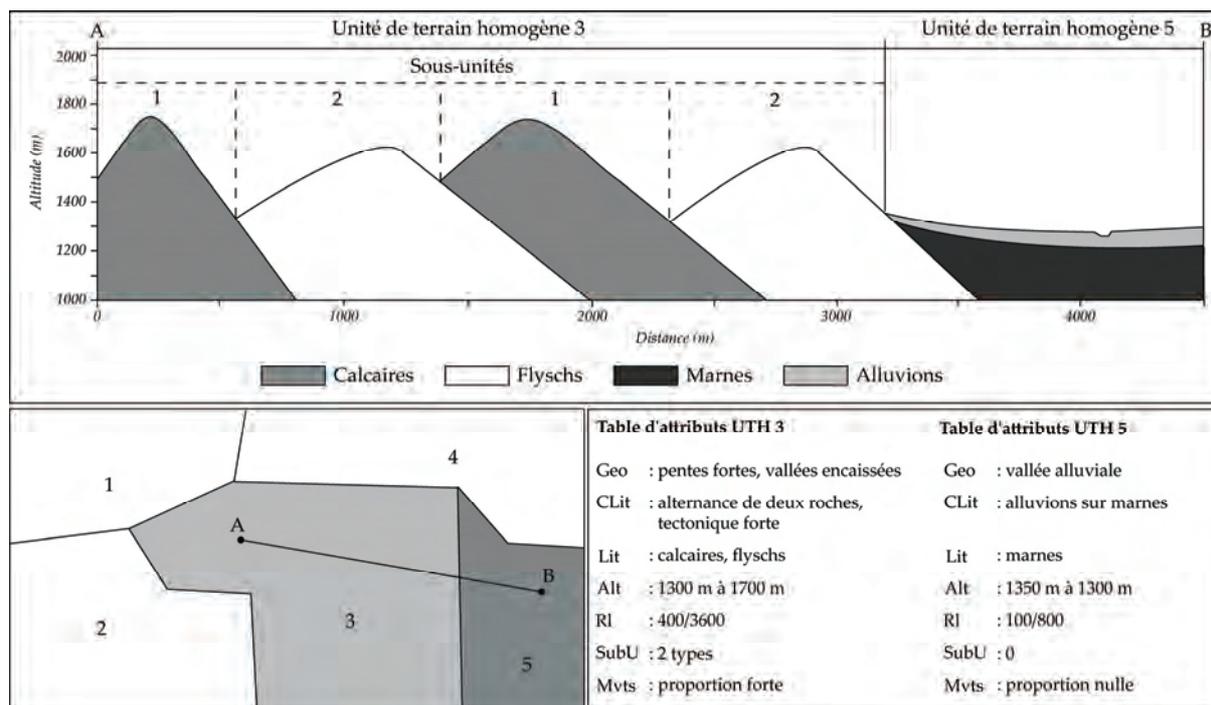


Fig. 1.13. Représentation des unités de terrain homogènes dans un environnement SIG et des tables attributaires associées pour une évaluation de l'aléa à l'échelle régionale (adapté de van Westen et al., 1997).

2.3. Gestion des données : collecte, stockage et sélection

La collecte de données et des informations pour un site d'étude est l'étape préalable à toute analyse. Plusieurs points fondamentaux, comme la précision spatiale des données, la recherche d'une nomenclature adaptée aux objectifs de l'étude et un stockage efficace ont été décrits dans plusieurs ouvrages et articles (Carrara, 1983 ; Chowdhury et Flentje, 1998 ; van Westen, 1993 ; Burrough et Mc Donnel, 1996 ; Longley *et al.*, 2001). Que ce soit pour l'évaluation de l'aléa 'mouvements de versant' ou d'autres problèmes environnementaux c'est l'opération la plus lourde à mettre en œuvre quelque soit l'échelle de travail et la méthode choisie.

Cette étape représente environ 80% du temps et du coût total (tableau 1.6 ; Leroi, 1996 ; Maquaire, 2002) comptabilisant la recherche de données, la numérisation, le stockage, les corrections, la validation et la mise à jour. Sous un environnement SIG, ces étapes sont facilitées par le logiciel de cartographie lui-même et par le *Système de Gestion de Base de Données (SGBD)* plus particulièrement pour la mise à jour des données attributaires. Concernant la cohérence des données attributaires deux règles doivent être respectées (Leroi, 1996) :

- (i) Les données acquises doivent l'être sous le même système de projection et à la même échelle de travail ;
- (ii) Une banque de données doit être organisée spatialement selon des couches monothématiques (représentées sous formes vecteur ou par maillage), chaque couche est accompagnée d'une ou plusieurs tables attributaires.

Une banque de données doit inclure, au minimum, les informations suivantes (Chowdhury et Flentje, 1998) :

- (i) Le recensement des mouvements existants sous forme spatiale. La base de données doit inclure un code référence (identificateur, *ID*), leur nature (type), leurs dimensions, leur historique (activité, date d'activation) ;

- (ii) Toute information disponible relative aux précédentes investigations (interprétation de photographies aériennes, essais de laboratoire, observations de terrain, etc.) ;
- (iii) Les nouvelles données acquises à partir d'observations, de suivi(s) de surface, de nouvelles investigations, instrumentation (piézomètres, inclinomètres, etc.).

Par conséquent, la sélection et la critique des données sont primordiales pour la suite du projet. Cependant, dans la majorité des cas, les données ne sont pas harmonisées en ce qui concerne leur échelle d'acquisition, leur résolution et leur nomenclature, risquant de biaiser l'analyse. Il convient alors de faire une sélection soit de manière experte, soit en élaborant une stratégie de calage conduisant à l'élimination des données peu fiables comme cela est effectué pour cette recherche (cf. : *Chap. 6 et Chap. 7 ; Thiery et al., 2003*).

2.4. Synthèse

Les descriptions des différentes données d'entrée indispensables et nécessaires pour une analyse de la susceptibilité puis de l'aléa sont fondées sur des descriptions classiques que l'on peut trouver dans la littérature (Soeters et van Westen, 1996 ; Aleotti et Chowdhury, 1999 ; Maquaire, 2002 ; Van Westen *et al.*, 2006).

Trois points sont à retenir :

- (i) Les **cinq groupes principaux de données d'entrée** (géomorphologie, topographie, lithologie, occupation du sol et hydrologie) doivent être acquis selon un échantillonnage spatial, une fréquence et une durée propre aux phénomènes étudiés et au site choisi. Ces données seront présentées successivement en deux ensembles : d'une part, celles relatives aux '*mouvements de versant*' et à leurs activités, soit les variables à modéliser (VM), et d'autre part, les facteurs de prédisposition soit les variables prédictives (VP) ;
- (ii) Leur **nombre et leur qualité** (spatiale et nomenclature) conditionnent la méthode d'évaluation. Pour les approches se basant sur l'opinion experte, toutes les données ne seront pas forcément nécessaires. En revanche, pour les approches déterministes, un large jeu de données s'avèrera indispensable pour obtenir des résultats cohérents.
- (iii) Enfin, **l'échelle de travail conditionne la qualité des données** : lorsque l'échelle de travail est petite (régionale et moyenne) les documents disponibles s'avèrent suffisants pour obtenir des résultats satisfaisants. Cependant, lorsque l'échelle est plus grande (large et locale) les documents ou les bases de données existantes s'avèrent peu adaptées, surtout dans des environnements particuliers comme en montagne. De plus, à ces échelles de travail, certaines bases de données spécifiques sont nécessaires. Il est alors indispensable d'adapter les bases de données existantes ou d'en acquérir de nouvelles. Pour l'échelle large et locale, de plus en plus de bases de données produites à ces échelles de travail sont disponibles. Elles s'avèrent être adaptées pour l'évaluation de l'aléa et aussi pour celle de la vulnérabilité et du risque.

3. CONCLUSION : STRATEGIE D'ÉVALUATION DE LA SUSCEPTIBILITE ET DE L'ALÉA A L'ÉCHELLE DU 1/10 000^{ÈME}

Depuis une quinzaine d'années, la cartographie de la susceptibilité et de l'aléa '*mouvements de versant*' a fait de grands progrès par l'application d'approches utilisant les SIG. Par exemple, les approches statistiques, ont été optimisées pour l'échelle régionale et moyenne. Toutefois, à l'échelle du 1/10 000^{ème} (échelle des PPR), même avec des données disponibles de plus grande qualité, en termes de résolution et de nomenclature, le **degré de confiance**, la **validité**, les

champs d'application et les différentes **étapes de calage** sont remis en cause, que ce soit à la fois pour les approches statistiques ou déterministes. Face à ces points de blocage, des stratégies combinant différentes approches comme (i) l'introduction de l'opinion experte dans les approches statistiques considérées comme objectives ou (ii) l'application de méthodes hybrides ont été proposées

La stratégie pour une évaluation fiable et reproductible de la susceptibilité puis de l'aléa par SIG à échelle large ne peut donc pas reposer sur une seule approche et sur un seul site. Elle doit être fondée sur **plusieurs approches complémentaires** qui doivent être **calées sur un ou plusieurs sites**. Les **meilleurs résultats** nécessitent alors d'être **validés et transposés** afin de **vérifier la cohérence des hypothèses de départ, limiter les incertitudes liées aux modèles, aux phénomènes et aux données et ainsi accroître le degré de confiance à accorder aux modèles, à leurs domaines de validité et à leurs champs d'application.**

Pour cette recherche, initiée dans le cadre du programme *ALARM*, l'objectif n'est pas de développer un modèle au sens strict, mais plutôt de se fonder sur le constat précédent. Il s'agit d'adapter différentes approches afin d'obtenir une stratégie de cartographie reproductible de la susceptibilité puis de l'aléa. De ce fait, sont appliquées :

- (i) Une **approche qualitative** se basant sur **l'opinion experte et une utilisation des SIG** comme simple outil de cartographie. Malgré la subjectivité et la faible reproductibilité de l'approche, nous considérerons ce premier document comme une référence qui aidera à la mise en œuvre d'autres approches ;
- (ii) Une **approche semi-quantitative par Logiques floues** qui doit permettre de réduire la subjectivité de l'expert et augmenter la possibilité de transposition des résultats ;
- (iii) Une **approche statistique/probabiliste** par la mise en œuvre d'une **méthode bivariée** fondée sur les **théorèmes de Bayes (Théorie de l'évidence, Weight of Evidence)** et d'une **méthode multivariée par régression logistique (Weighted Logistic Regression)**. Leurs résultats seront comparés de manière à conserver la méthode la plus performante avec le moins d'incertitudes de calcul ;
- (iv) Une approche déterministe par zonage dynamique fondée sur un modèle numérique à base physique (*STARWARS*).

L'application successive des ces approches nous a conduit à :

- (i) **Choisir un jeu de données le plus adapté** parmi les données existantes ou construites spécifiquement (en termes d'échelle d'acquisition, de nomenclature et de résolution) et à l'échelle du 1/10 000^{ème} ;
- (ii) Identifier les différents types de phénomènes, puis les facteurs de prédisposition les plus pertinents pour chaque type de phénomènes retenus ;
- (iii) Tester les différents modèles retenus avec le jeu de données optimum et minimum ;
- (iv) **Limiter au maximum la part de calage dans le paramétrage des modèles** quitte à ne pas obtenir un modèle '*optimum*', mais avoir des simulations reflétant les conditions réelles du terrain ;
- (v) Indiquer les conditions de transposition à d'autres sites.

Pour ce faire, **deux sites ont été choisis : le bassin de Barcelonnette (Alpes de Haute-Provence, France) et le bassin versant du Moulin (Draix, Alpes-de-Haute-Provence, France).**

Le bassin de Barcelonnette, qui a fait l'objet de recherches dans le cadre de programmes de recherche sur les '*mouvements de versant*' (programmes *NEWTECH*, *EPOCH*, *ALARM*), sert de site de calage et de validation local. Il a été choisi pour :

- (i) La diversité des mouvements de versants actifs ou non ;

- (ii) La série de documents (cartographiques, rapports, bases de données, etc.) disponibles à diverses échelles, documents numérisés ou non.

Le bassin versant du *Moulin*, distant de 80 km, sert de site de transposition pour certains résultats.

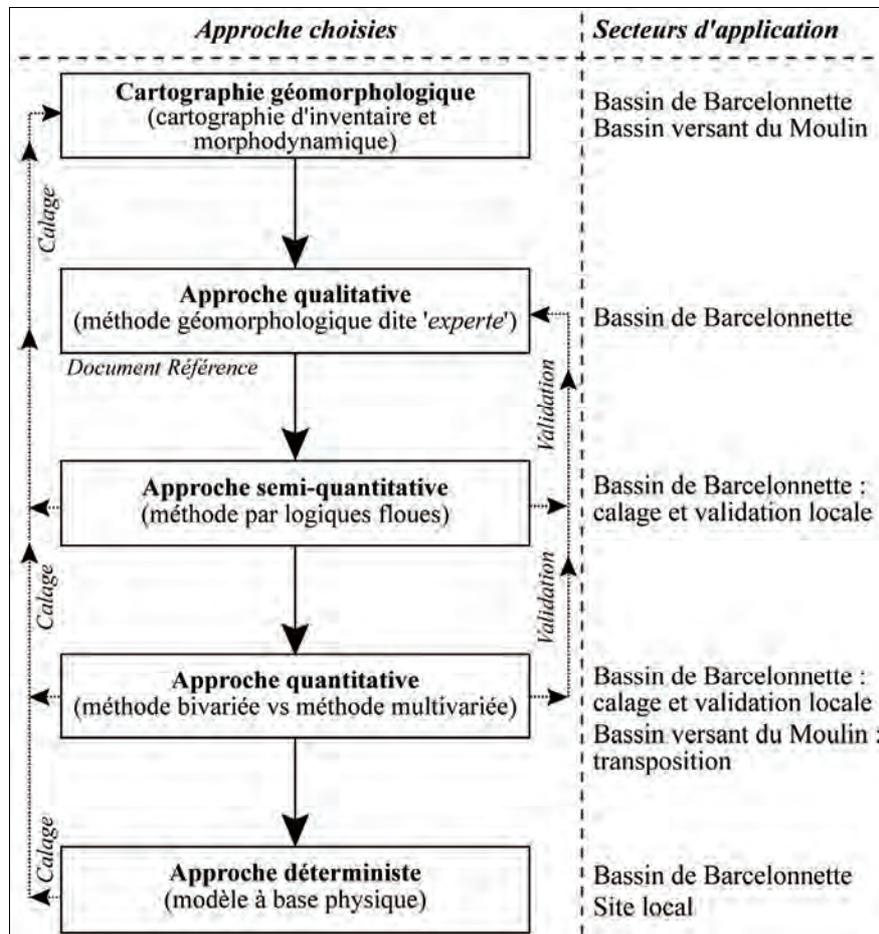


Fig.1.14. Stratégie de calage/validation/transposition des différentes approches utilisées pour cette recherche.

L'application de cette stratégie originale de calage/validation/transposition permettra de répondre aux différentes interrogations scientifiques (Fig.1.14) que suscite une cartographie de la susceptibilité et de l'aléa à l'échelle du 1/10 000^{ème} par différents modèles d'analyse spatiale sous SIG. Les différents sites d'étude sont présentés dans le chapitre 2.

CHAPITRE 2 : CADRE MORPHOLOGIQUE DES SITES D'ÉTUDE ET CARTOGRAPHIE MORPHODYNAMIQUE

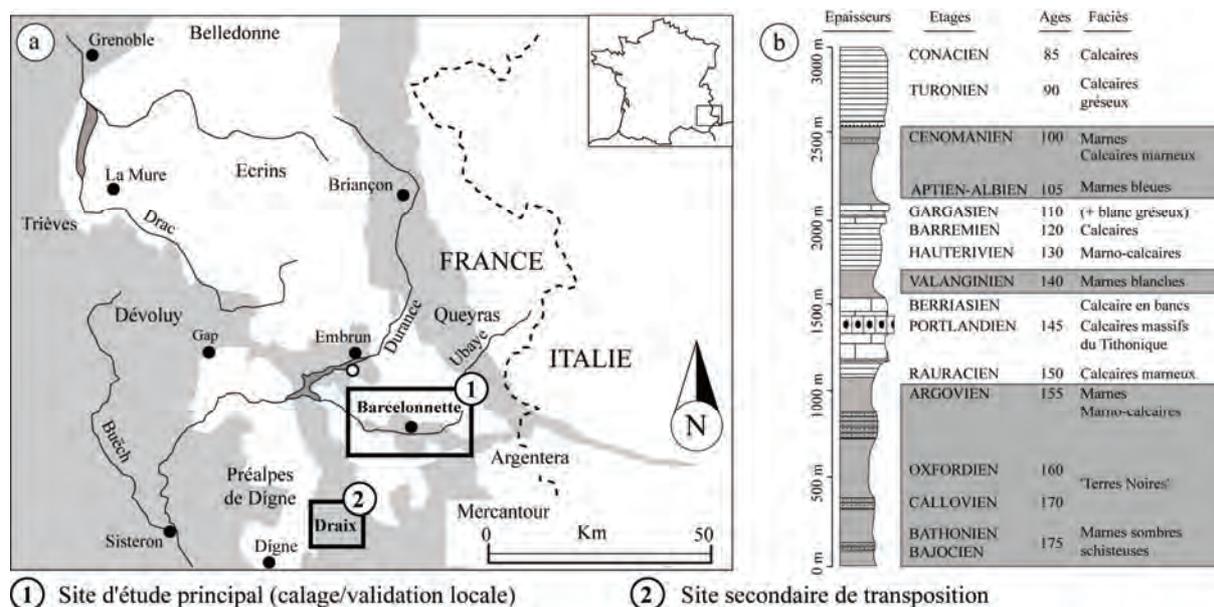
La zone externe des Alpes occidentales françaises se caractérise par des formations géologiques marneuses (marnes noires du *Callovo-Oxfordien* ; marnes blanches du *Valanginien* et marnes bleues de l'*Aptien-Albien*) affleurantes sur plus de 2200 km² dans le bassin de la *Durance* (Fig. 2.1). **Les marnes noires, appelées aussi 'Terres noires' sont très sensibles à l'érosion et sont le siège de nombreuses instabilités dans le département des Alpes-de-Haute-Provence.** Tel est le cas dans le bassin de *Barcelonnette*, avec de **grands glissements-coulées** (*la Valette, Poche* ou *Super-Sauze*) ou avec des coulées de boue ou des laves torrentielles (torrents du *Riou-Bourdoux* et de *Faucon*), ou dans les bassins du Cemagref du *Laval* et du *Moulin* (Bassins Versants de Recherche Expérimentaux de *Draix*) avec des écoulements hyper-concentrés et des mouvements banc sur banc.

Si, ces phénomènes spectaculaires, font l'objet de multiples recherches et sont parfois médiatisés comme le glissement de *la Valette* menaçant un lotissement (Colas et Locat, 1993 ; Squarzoni *et al.*, 2003), **les versants dégagés dans les marnes noires subissent d'autres modifications morphologiques par des instabilités de versants de plus faibles ampleurs : mouvements superficiels de type translationnel et/ou rotationnel** (Salomé et Beukenkamp, 1988 ; Caris et van Asch, 1991 ; Flageollet *et al.*, 1999 ; Maquaire *et al.*, 2003). Bien que moins impressionnants, ces phénomènes ont déjà fait l'objet de quelques investigations géomorphologiques à la fois dans le bassin de *Barcelonnette* (Légier, 1977 ; Weber, 2001) et dans les bassins versants de *Draix* (Thiery, 2000 ; Maquaire *et al.*, 2002).

Ces recherches sont axées autour d'une cartographie des phénomènes accompagnés d'interprétations géomorphologiques (Légier, 1977 ; Salomé et Beukenkamp, 1988 ; Quintlé, 1995 ; Bossu, 1995), et de l'étude des conditions de déclenchement d'un évènement (Caris et van Asch, 1991 ; van Asch et Buma, 1997, Dhen et Buma, 1999 ; Malet, 2003). Ainsi, **si l'inventaire des phénomènes est relativement bien établi, pour certains types de 'mouvements de versant', les facteurs de prédisposition et les conditions de déclenchements sont encore mal connus et la cartographie de l'aléa est inexistante.** Les informations et les données spatialisées et numérisées disponibles sur ces deux sites nous ont incité à les choisir comme sites de support et d'application de la recherche envisagée, avec le bassin de *Barcelonnette* comme site principal et *le bassin versant du Moulin (Draix)* comme site secondaire.

Ce choix est renforcé par le fait que ces sites, bien que distants de 80 km, présentent quelques caractéristiques communes : (i) la morphologie de certains versants sous la forme de '*badlands*' entaillant les marnes noires ; (ii) la présence de mouvements superficiels de type translationnel et rotationnel se déclenchant dans les formations superficielles et (iii) la présence de mouvements banc sur banc localisés sur les pentes ravinées et/ou complètement nues.

Cette connaissance physique des sites d'étude permettra d'envisager pour certaines approches les conditions de transposition des résultats acquis.



a. Affleurements de faciès marneux dans les Alpes du Sud-est de la France et localisation des sites d'étude. Le gris représente l'extension spatiale des ces affleurements. b. Stratigraphie de la fosse vocontienne (Sondage d'Aurel) où les étages marneux sont représentés en grisé.

Fig. 2.1. Extension et stratigraphie des marnes et des schistes argileux dans les Alpes françaises (adapté de Malet, 2003 ; Remaître, 2006).

La première section de ce chapitre est consacrée à la présentation des caractéristiques physio-géographiques générales des deux sites d'étude (caractéristiques morphologiques, climatiques et anthropiques). La seconde section présentera et justifiera la méthode de cartographie morphodynamique à l'échelle du 1/10 000^{ème} retenue pour retranscrire au mieux les différents processus, en particulier les 'mouvements de versant' et leurs activités dont les bases de données spatiales et attributaires seront présentées.

1. CARACTERISTIQUES PHYSIO-GEOGRAPHIQUES DES SITES D'ETUDE

1.1. Le bassin de Barcelonnette : site d'étude principal

1.1.1. Un contexte morphostructural particulier

Géologiquement, les Alpes du Sud se divisent selon un axe transversal ouest/est en deux domaines distincts avec (i) le domaine externe et (ii) le domaine interne (Fig. 2.2 ; Evin, 1997).

Le domaine externe est constitué des massifs cristallins externes (*Argentera-Mercantour* et *Ecrins*) et de la zone dauphinoise constituée de formations autochtones ;

Le domaine interne est formé de plusieurs nappes, dont les zones briançonnaise et sub-briançonnaise au centre et la zone piémontaise à l'extrême est.

Le bassin de Barcelonnette se situe sur une zone géologique complexe où se juxtaposent plusieurs ensembles structuraux (Fig. 2.2. ; Légier, 1977 ; Weber, 2001). Les différentes phases tectoniques alpines ont largement contribué à la genèse du bassin et à la dissymétrie des ses versants. En effet, lors du plissement alpin oligocène, l'effacement du socle cristallin externe entre l'*Oisans* et le *Mercantour* a permis l'avancée de nappes de charriage sur le domaine sédimentaire externe, sur une trentaine de km selon une direction nord-est/sud-ouest (Blanchard, 1950 ;

Evin, 1997). Ce déplacement, sous forme de nappes, s'est effectué par vagues sur plus de 20 millions d'années, de la fin de l'Eocène jusqu'au cours du Miocène. Cette phase tectonique a permis le déplacement de formations sous-jacentes sous la forme de fragments rocheux gigantesques.

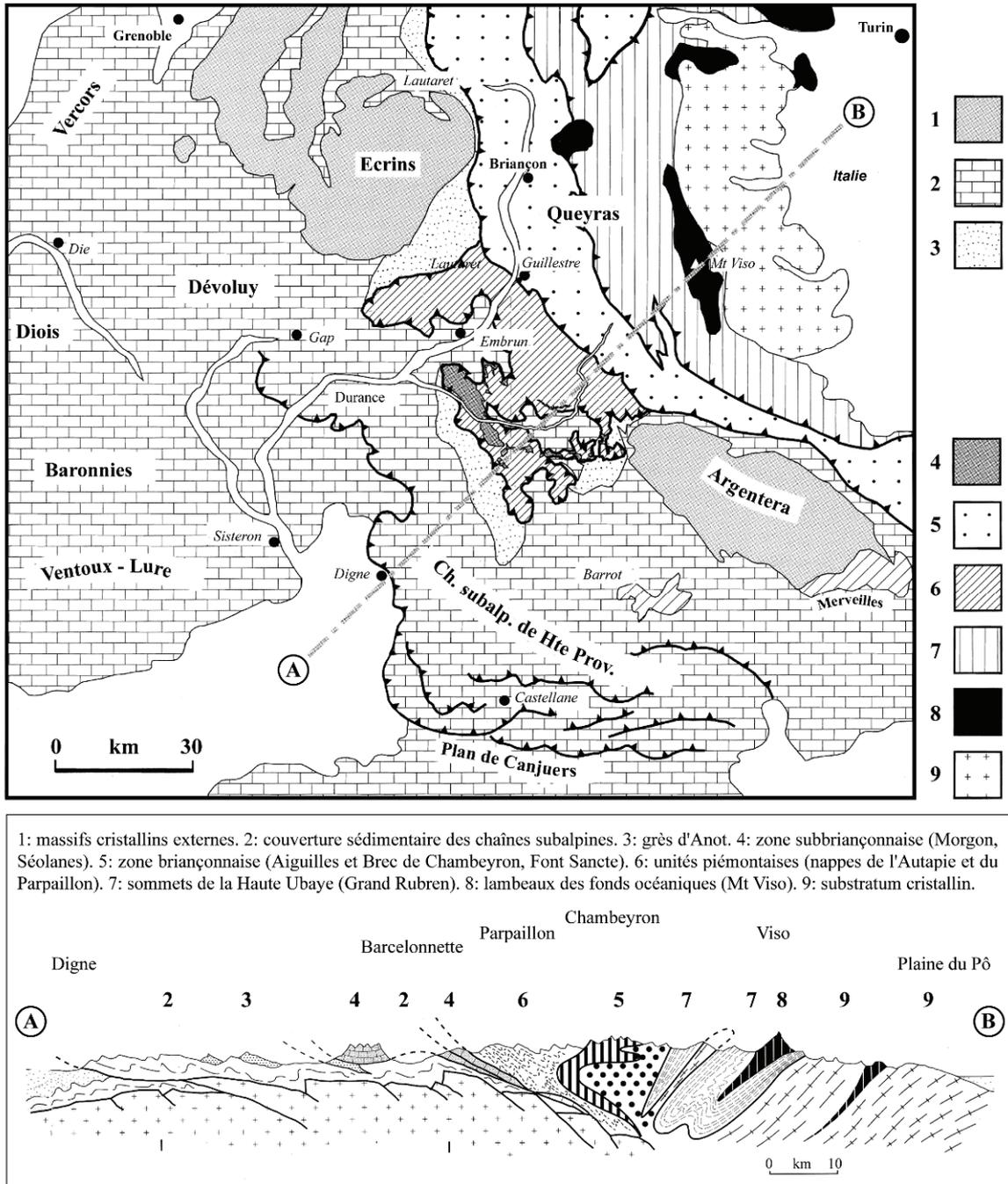
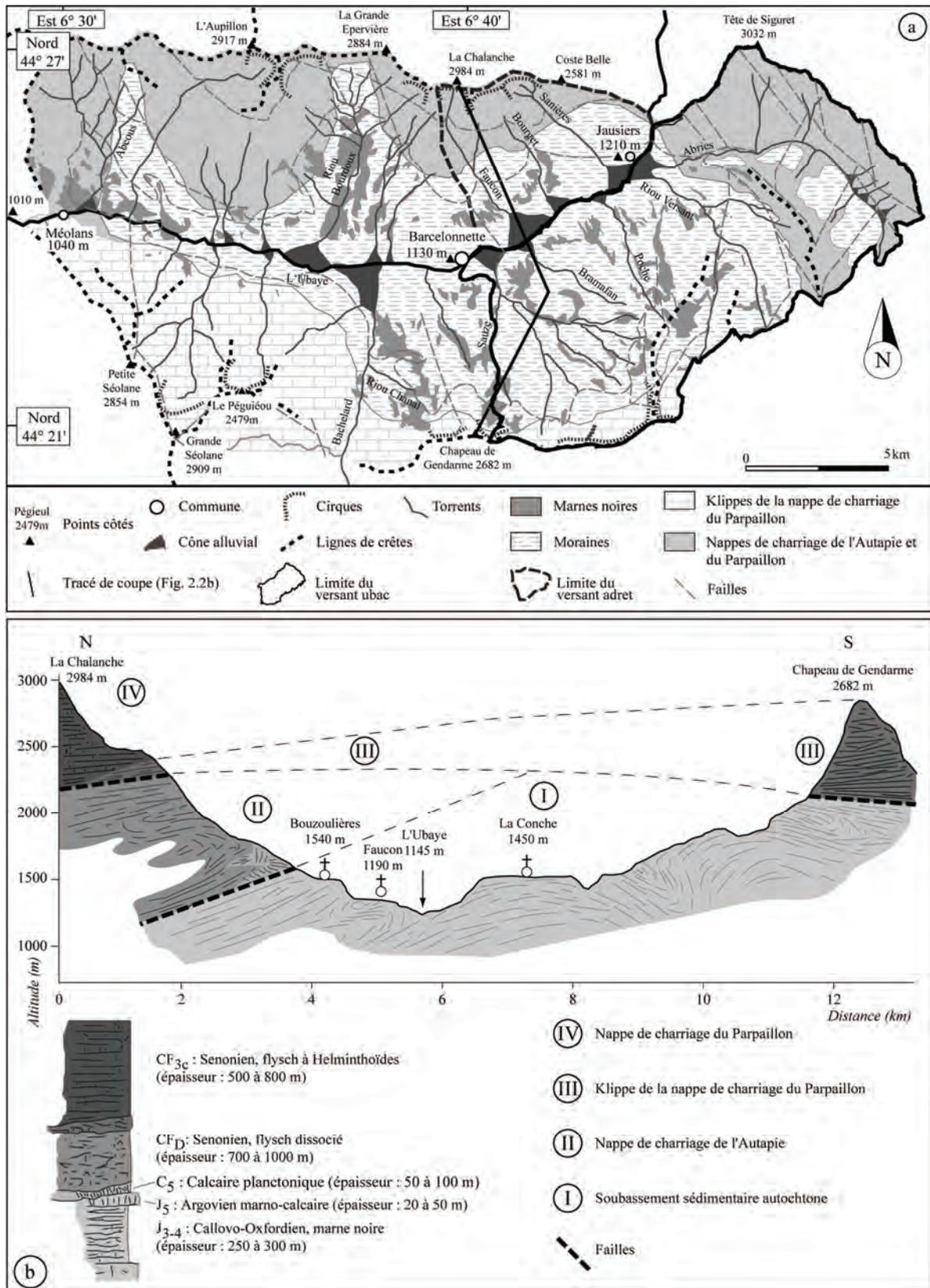


Fig. 2.2. Croquis morphostructural et coupe géologique des Alpes du Sud (d'après Evin, 1997).



a. Principaux traits morphologiques du bassin. b. Coupe géologique (modifié de Maquaire et al., 2003).

Fig.2.3. Morphostructure du bassin de Barcelonnette.

Ainsi, ces lambeaux de nappe et de fragments rocheux forment la majorité des crêtes visibles dans le bassin de *Barcelonnette* (Fig. 2.3a) :

- (i) Pour le **versant Ubac**, les crêtes sont essentiellement constituées d'écailles calcaires et de lambeaux de flyschs (klippes) des unités piémontaises (nappe du *Parpaillon* et nappe de *l'Autapie*) comme, par exemple le *Chapeau de Gendarme* (2682 m). Ces formations lithologiques s'observent sur les hauts des versants à partir de 1800 m et 2000 m d'altitude ;
- (ii) Pour le **versant Adret**, les crêtes sont armées par des formations de la nappe de *l'Embrunais-Ubaye (Parpaillon)* comme pour *l'Aupillon* (2916 m), *La Chalanche* (2984 m) ou encore *Coste Belle* (2581 m). Ces affleurements allochtones sont beaucoup plus développés que pour le versant *Ubac* et se retrouvent jusqu'à 1600 m d'altitude. A partir de 2000 m, les hauts versants sont formés par des écailles basales des nappes de *Parpaillon* et de *l'Autapie* aux faciès de flyschs divers. Les crêtes sommitales, peu déformées, sont quant à elles armées essentiellement dans la nappe du *Parpaillon* dont la formation majeure est le flysch à *Helminthoïdes*.

Quelques plissements postérieurs à ces phases de charriage ont généré des plis anticlinaux et synclinaux dans les nappes de charriage guidant plus ou moins les cours d'eau actuels (Weber, 2001). Ces déformations du *Miocène supérieur* se traduisent par des failles obliques normales d'orientation nord-ouest/sud-est (Fig. 2.3b).

Enfin, **l'érosion différentielle** a permis de dégager les formations autochtones du *Mésozoïque* de la zone dauphinoise ouvrant ainsi une véritable fenêtre géologique. Les terrains autochtones se présentent sous la forme d'un vaste anticlinal d'axe sud-ouest/nord-est et d'un pendage général de 20°. Au sein de ces couches lithologiques, les déformations du *Miocène supérieur* se traduisent généralement par des flexures (Weber, 2001), des diaclases et des failles locales qui marquent de brusques variations de pendage (Plan, 1968 ; Légier, 1977).

Les terrains autochtones sédimentaires s'étendent du *Trias* à *l'Eocène supérieur*. Ils se composent en majorité des marno-calcaires de *l'Argonien* et surtout des '*Terres noires*' du *Callovo-Oxfordien*. D'une épaisseur de 300 m, dans le bassin, les '*Terres noires*' se divisent en quatre sous ensembles (Artru, 1972, Awongo, 1984 ; Maquaire *et al.*, 2003) :

- (i) Les marnes schisteuses à plaquettes détritiques du *Callovien* (80-100 m) ;
- (ii) Les marnes noires de *l'Oxfordien inférieur et moyen* (150-200 m) à bancs centimétriques de calcaires argileux ;
- (iii) Les marnes noires de *l'Oxfordien supérieur* (80-150 m) ;
- (iv) Quelques rares affleurements de marnes noires de *l'Argovien* (20-30 m).

D'un aspect de schistes argileux, les **marnes noires callovo-oxfordiennes** sont tendres et finement feuilletées. La macrostructure du substratum, la microstructure du matériau ainsi que leur minéralogie expliquent en partie leur susceptibilité aux '*mouvements de versant*' (Malet, 2003 ; Maquaire *et al.*, 2003, Remaître, 2006). Ainsi, les sources et les concentrations d'eau dues à la faible perméabilité des marnes noires favorisent des surfaces de rupture au contact des formations superficielles ou des flyschs. **On peut ajouter que leur changement rapide d'état ou de consistance** (passage d'un état solide à un état plastique puis liquide pour des variations de teneurs en eau faibles à modérées) **favorisent cette susceptibilité aux '*mouvements de versant*'** (Antoine *et al.*, 1995 ; Malet, 2003). Ce comportement hydrologique, géomécanique et rhéologique des marnes noires callovo-oxfordiennes est détaillé dans Malet (2003).

L'autre particularité des '*Terres noires*' est leur susceptibilité au ruissellement concentré qui se manifeste dans la paysage par un modelé de '*badlands*' (Mathys *et al.*, 1996 ; Chodzco et Lecompte, 1992 ; Lecompte *et al.*, 1996 ; Descroix Olivry, 2002). **Deux facteurs essentiels favorisent ce modelé : le facteur lithologique et structural et le facteur climatique.** En effet, les marnes noires sont des **formations meubles, mal consolidées, friables**, relativement

imperméables et sensibles au ruissellement concentré et au ravinement. Cette sensibilité est accentuée par le **régime climatique méditerranéen à tendance montagnarde** (cf. Chap.2 §.1.1.5.). Ces formations autochtones sont en majorité recouvertes par les dépôts quaternaires d'épaisseur variable et discontinue (moraines, colluvions, éboulis).

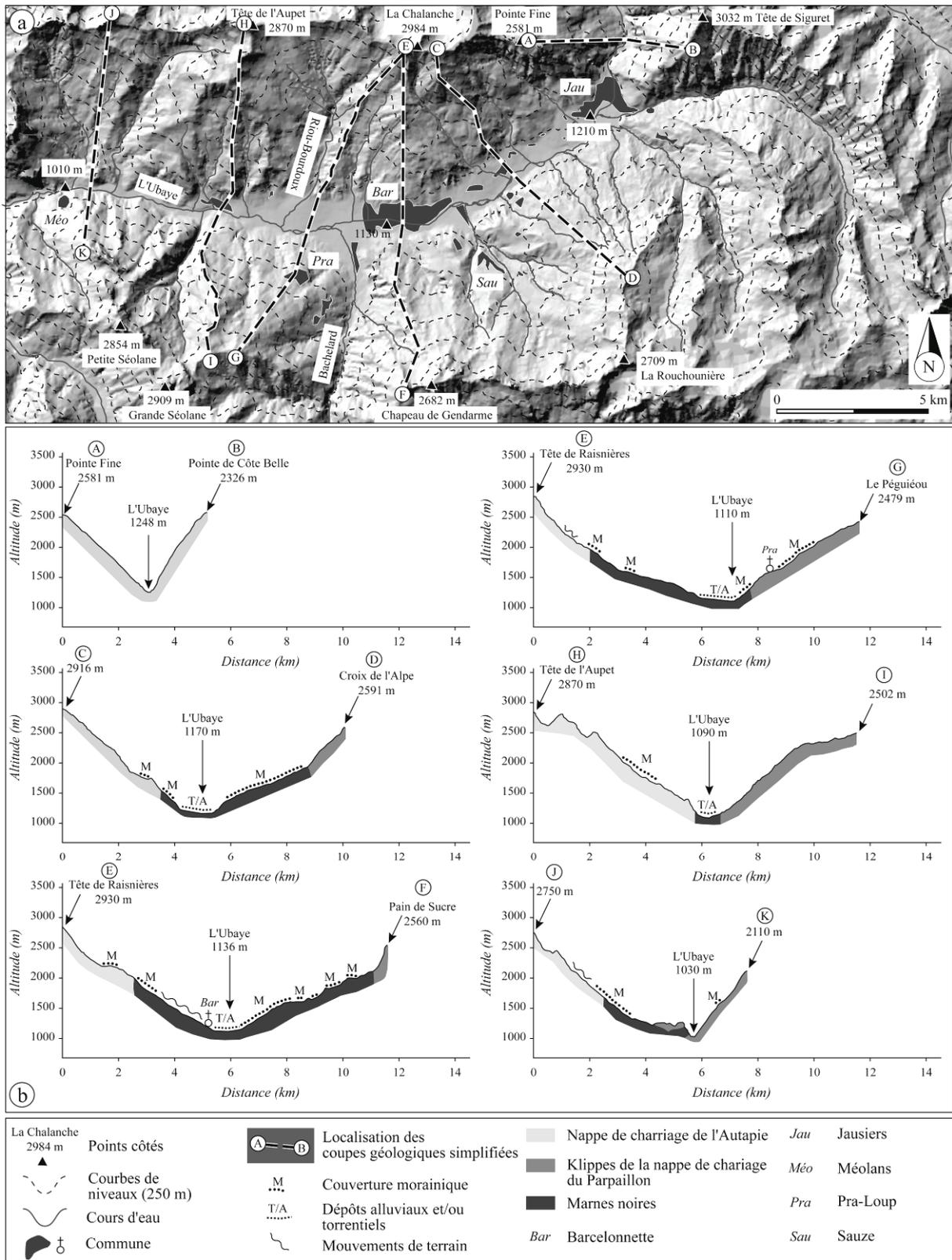
1.1.2. Une dissymétrie générale de la vallée

Le bassin de Barcelonnette forme véritablement une 'cellule' enclavée entre ses massifs environnants : au nord-ouest et au nord-est par les massifs des *Ecrins* et du *Queyras*, au sud par les massifs cristallins de l'*Argentera* et du *Mercantour* (Fig. 2.1). Dominée par des lignes de crêtes aux altitudes avoisinant 3000 m d'altitude, cette vallée, drainée par le cours moyen de l'*Ubaye*, s'étend sur 22 km de long entre *Jausiers* (1210 m), à l'Est, et *Méolans* (1040 m), à l'Ouest, pour une largeur entre 8 et 15 km (Fig. 2.3a, 2.4a, 2.5b).

L'*Ubaye*, qui prend naissance sous le col franco-italien du *Longet* (2646 m) dans le massif du *Chambeyron*, entre dans le bassin de *Barcelonnette* au *Pas de Grégoire* par une gorge étroite située en amont de *Jausiers*, entre le massif du *Parpaillon* et le massif du *Siguret* (Fig. 2.5a). Le cours d'eau, d'une pente générale de 0.8%, ressort par une autre gorge formée par un verrou glaciaire qui accentue l'impression d'isolement de la vallée. Les crêtes qui dominent la vallée sont armées dans des calcaires ou des flyschs résistants entre 1600 m et 3000 m d'altitude. Les sommets culminent généralement autour de 3000 m avec au sud la *Grande Séolane* (2909 m), le *Chapeau de Gendarme* (2682 m), et au nord l'*Aupillon* (2917 m), le *Grand Bérard* (3048 m) et la *Tête de Siguret* (3032 m). Sous ces sommets, les versants aux pentes souvent supérieures à 45°, forment localement de vastes bassins de réception circulaires issus de périodes de surcreusement glaciaires antérieures. **Ces bassins de réception donnent naissance à des torrents qui contribuent à entailler les versants de plusieurs mètres, formant un paysage déchiqueté** (Flageollet *et al.*, 1999). Des formations périglaciaires plus ou moins actives, comme des éboulis, tapissent certains pieds de versants (Fig. 2.5c). Ces éboulis parviennent jusqu'aux torrents et/ou alimentent des glaciers rocheux sur le versant *Ubac*, comme par exemple le glacier rocheux de *la Goutta* au nord de la station de ski de *Super-Sauze* (Fig. 2.5i, Weber, 2001 ; Malet, 2003).

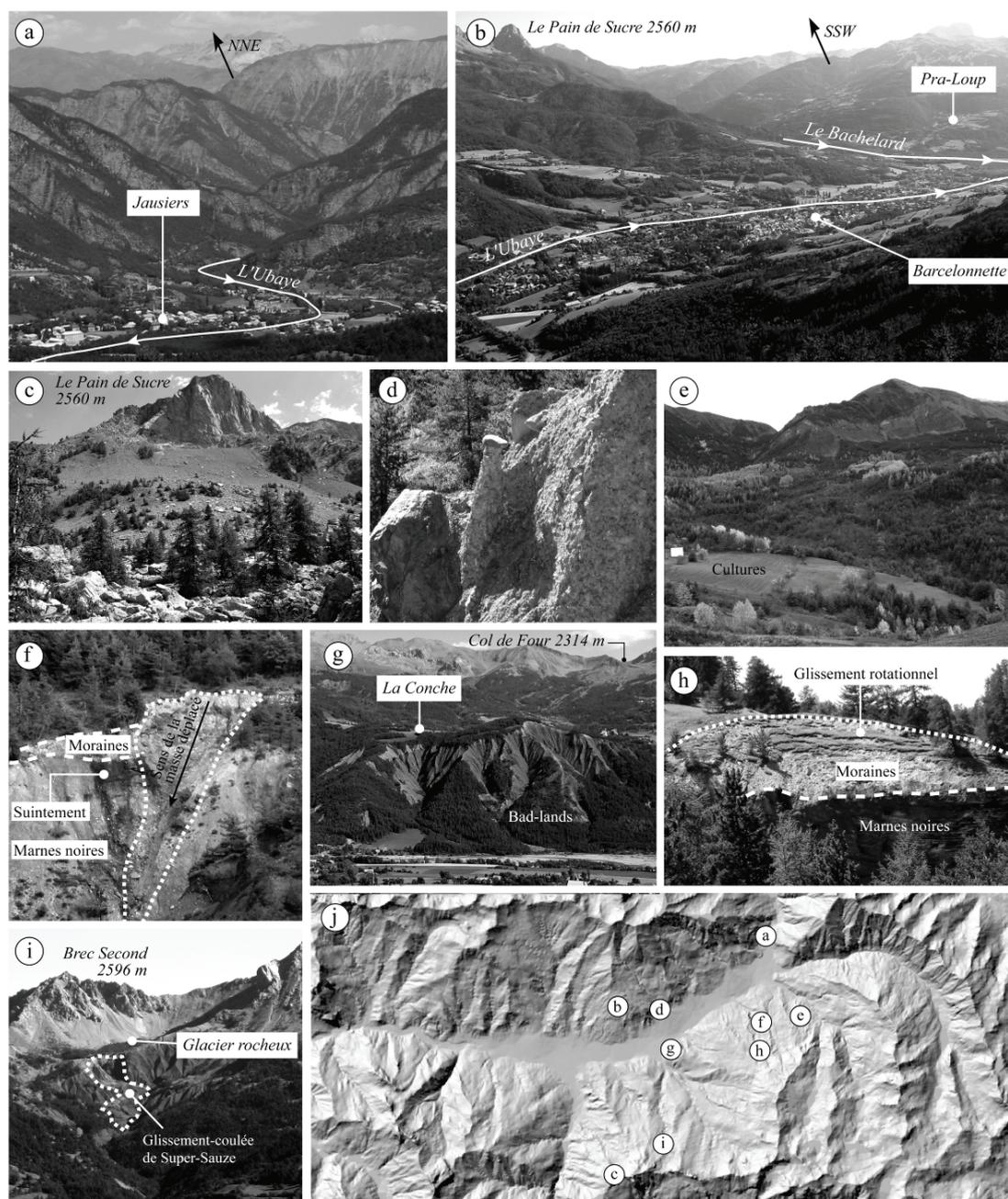
Sous les versants aux pentes fortes, les versants intermédiaires, aux **pentés plus douces** (entre 15° et 25° en moyenne), sont formés dans les marnes noires **recouvertes de dépôts morainiques** et/ou de colluvions (Fig. 2.5d et 2.5e). Ces versants ont été ou sont encore affectés par de nombreuses instabilités (Fig. 2.5f, 2.5h et 2.5i ; BRGM, 1974 ; Légier, 1977, Weber, 2001). Ils peuvent être **entrecoupés localement par un ravinement intense laissant apparaître les marnes nues sous forme de 'badlands'** (Fig. 2.5g). Ces phénomènes d'érosion intense se localisent, dans la majorité des cas, sur des pentes supérieures à 30° et/ou le long des torrents et contribuent à déstabiliser le matériau sus-jacent. Localement, sur les interfluvés des 'badlands', les marnes nues altérées se confondent par leur couleur beige claire avec les dépôts morainiques ou les colluvions.

Sur environ 8 Km, d'est en ouest, **une forte dissymétrie entre le versant Adret (en rive droite) et le versant Ubac (en rive gauche) s'observe dans le paysage** (Fig. 2.4b). Cette dissymétrie est véritablement marquée à partir de la confluence du *Riou versant* et de l'*Ubaye* jusqu'à la confluence entre le *Bachelard* et l'*Ubaye* (Fig. 2.4b et 2.5b) où l'éloignement de la crête méridionale par rapport à l'*Ubaye* est le plus marqué (environ 7 km). Ainsi, aux pentes moyennes à fortes pour le versant *Adret* (30° en moyenne) s'oppose les pentes plus douces du versant *Ubac* (25° en moyenne). Cette dissymétrie se manifeste aussi par un aspect topographique différent des vallées torrentielles latérales :



a. Relief général du bassin de Barcelonnette (vue du relief en 2.5D; source BD Alti ®, IGN 1998).
b. Coupes géologiques simplifiées du bassin de Barcelonnette.

Fig. 2.4. Extension du bassin de Barcelonnette et coupes géologiques simplifiées le long de la vallée de l'Ubaye.



a. Vue sur l'amont du bassin de Barcelonnette : après avoir traversée de véritables gorges, la vallée de l'Ubaye s'élargit à partir du village de Jausiers. b. Vue en direction du SSW sur Barcelonnette et la vallée du Bachelard. c. Le Pain de Sucre (2560 m), taillé dans les klippes de la nappe de charriage du Parpaillon, ses éboulis sont colonisés par les mélèzes. d. Demoiselles coiffées dans la vallée de Faucon, ces formes et formations glaciaires se localisent dans le secteur de transition entre le chenal d'écoulement et le cône torrentiel. e. Versant de Bois Noir caractéristique des versants intermédiaires de l'Ubaye, ce secteur est particulièrement instable. f. Glissement superficiel le long des berges du torrent de Poche. Le glissement est favorisé par la déstabilisation de la couverture morainique par sapement de berge et par la concentration d'eau au contact de la moraine et des marnes noires sous-jacentes. g. Paysage de 'badlands' au dessous du village de la Conche à 1250 m d'altitude. h. Glissement rotationnel dans les moraines au contact des marnes noires. i. Glissement-coulée de Super-Sauze à 1850 m d'altitude, ce glissement profond, déclenché entre 1956 et 1960, est issu d'une chute de blocs marneux qui avec le temps se sont transformés en coulée. j. Localisation des prises de vue.

Fig. 2.5. Morphologie générale du bassin de Barcelonnette.

- (i) **Sur le versant *Ubac***, les torrents présentent des vallées peu encaissées, sauf à certains endroits spécifiques (comme le torrent de *Poche* ou celui du *Sauze*), les pentes sont régulières et varient peu (Remaître, 2006) ;
- (ii) **Sur le versant *Adret***, les torrents ont entaillé des vallées profondes (jusqu'à 150 m de profondeur) et étroites. Les profils en long sont pentus en amont, avec une diminution de la pente vers l'apex. Les profils sont plus accidentés que pour ceux des torrents du versant *Ubac* avec des successions de pentes faibles et fortes (Remaître, 2006). Ces torrents, qui produisent des laves torrentielles fréquentes (Remaître, 2006), ont développé des cônes de déjection imposants, larges de 1500 m, dans le fond de la vallée (Ballandras et Nevière, 1991 ; Miramont, 1998 ; Remaître *et al.*, 2002, 2005a). Depuis la fin du 19^{ème} siècle, ces torrents sont corrigés de manière à diminuer les effets des laves torrentielles qu'ils produisent (Sivan, 2000 ; Remaître, 2006).

1.1.3. Une vallée marquée par l'héritage glaciaire et post-glaciaire

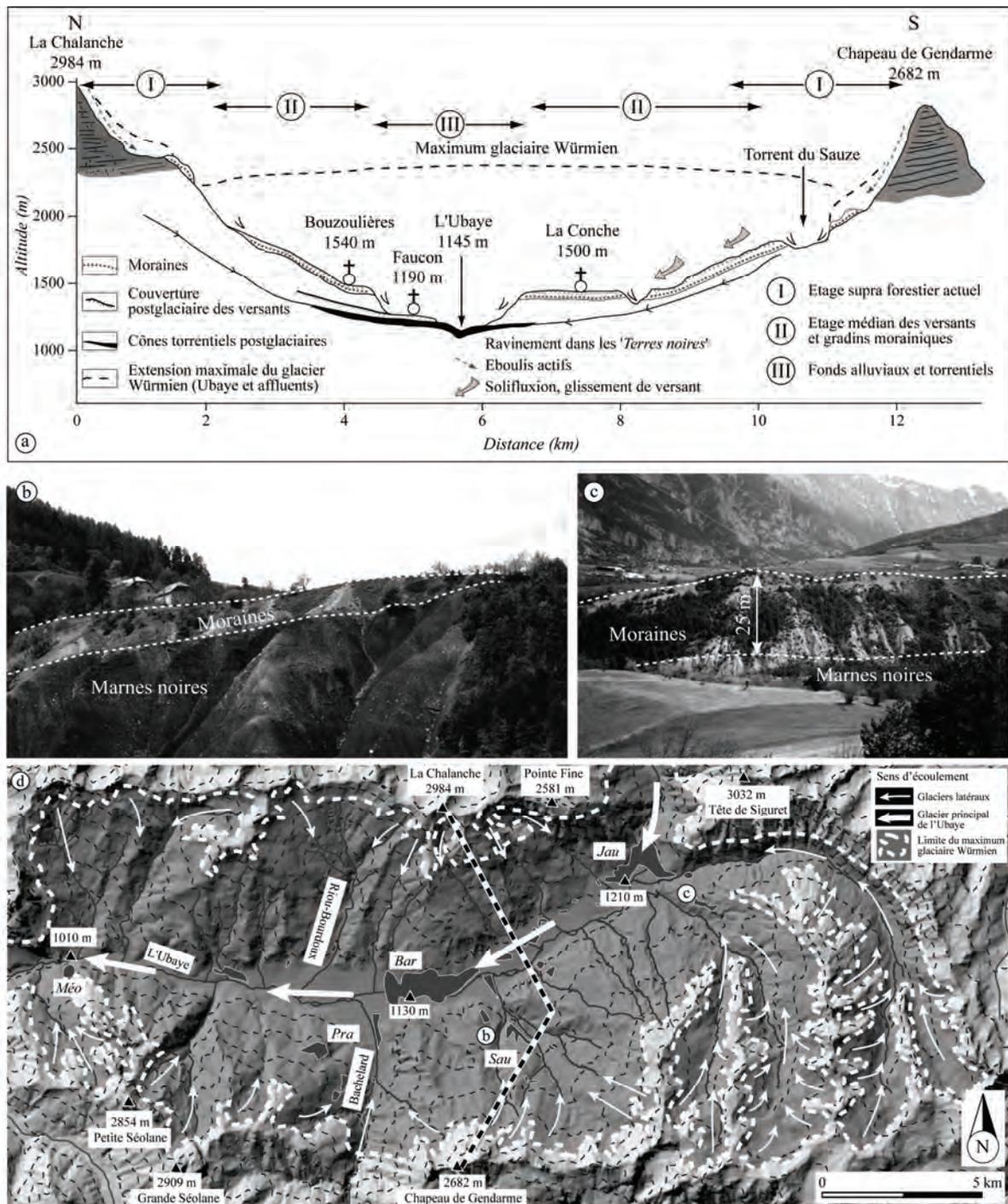
Recouvrant en majorité, le substratum marneux callovo-oxfordien, les formations glaciaires appartiennent au Würm et au Tardi- et Post-glaciaire (Jorda, 1980 ; Assier, 1993). Leur localisation au 1/50 000^{ème} (carte géologique ; BRGM, 1974) est imprécise et nécessite une cartographie plus détaillée afin d'analyser leurs relations avec les 'mouvements de versant'.

De manière générale, ces formations ont été déposées par le glacier de l'Ubaye et par de nombreux glaciers affluents (Fig. 2.6, *Abriès, Clapouse, Terres Plaines, Brecs, Bachelard*) dont le maximum de l'extension se situe au Pléniwürm (Fig. 2.6a et 2.6d). La vallée de l'Ubaye, déjà creusée, est alors occupée par un glacier de 65 km de long confluant, à *Serre-Ponçon* avec celui de la *Durance*. La glace atteint 600 m au minimum et l'action du glacier remodèle fortement la morphologie du bassin, notamment par le creusement de nombreux ombilics dont celui de *Barcelonnette* aujourd'hui remblayé par les alluvions (Jorda, 1980 ; Assier 1993).

Les formes et les dépôts glaciaires marquent l'ensemble de la vallée par des terrasses de kame, des glaciers rocheux (glacier rocheux de *La Goutta*) des bourrelets, des cordons et des arcs morainiques (Fig. 2.6c et 2.6d ; versant de *Lans*), des roches moutonnées (cimetière de *l'Aupillon*, collines de *la Conchette* et du *Vivier*) et des blocs erratiques (Vallon de *la Rente*).

Les formations glaciaires et périglaciaires se caractérisent par une couverture morainique discontinue et d'une épaisseur variable de 1 à 25 m au maximum (versant de *Lans*, Fig. 2.6.c). Elle présente une matrice fine riche, de teinte beige claire à gris foncé (Flageollet *et al.*, 1999). Sans entrer dans le débat sur l'origine et l'âge exact des formations morainiques, on peut noter la présence de dépôts assez hauts sur les versants (jusqu'à 2200-2400 m d'altitude ; Weber, 2001 ; Remaître, 2006) notamment sur le versant *Ubac* de la vallée, en amont d'*Enchastrayes-village*. La présence de blocs erratiques, leur disposition linéaire et longiligne, loin du massif d'origine (*Roche Chamoussière*, 2575 m), tendent à prouver le rôle non négligeable des appareils glaciaires locaux et tardifs, par rapport au grand glacier würmien de l'Ubaye, dans la genèse morphologique générale du bassin (BRGM, 1974 ; Weber, 2001).

Toutefois, probablement affectés par de grands 'mouvements de versant' à la fin du Tardiglaciaire et à l'Holocène supérieur qui ont déstructurés leurs étagements (Jorda, 1980), les dépôts morainiques restent difficiles à dater aussi bien d'un point de vue relatif qu'absolu. D'une capacité de rétention d'eau élevée, ces dépôts sont actuellement sujets à des mouvements superficiels (Légier, 1977 ; Mulder 1991).



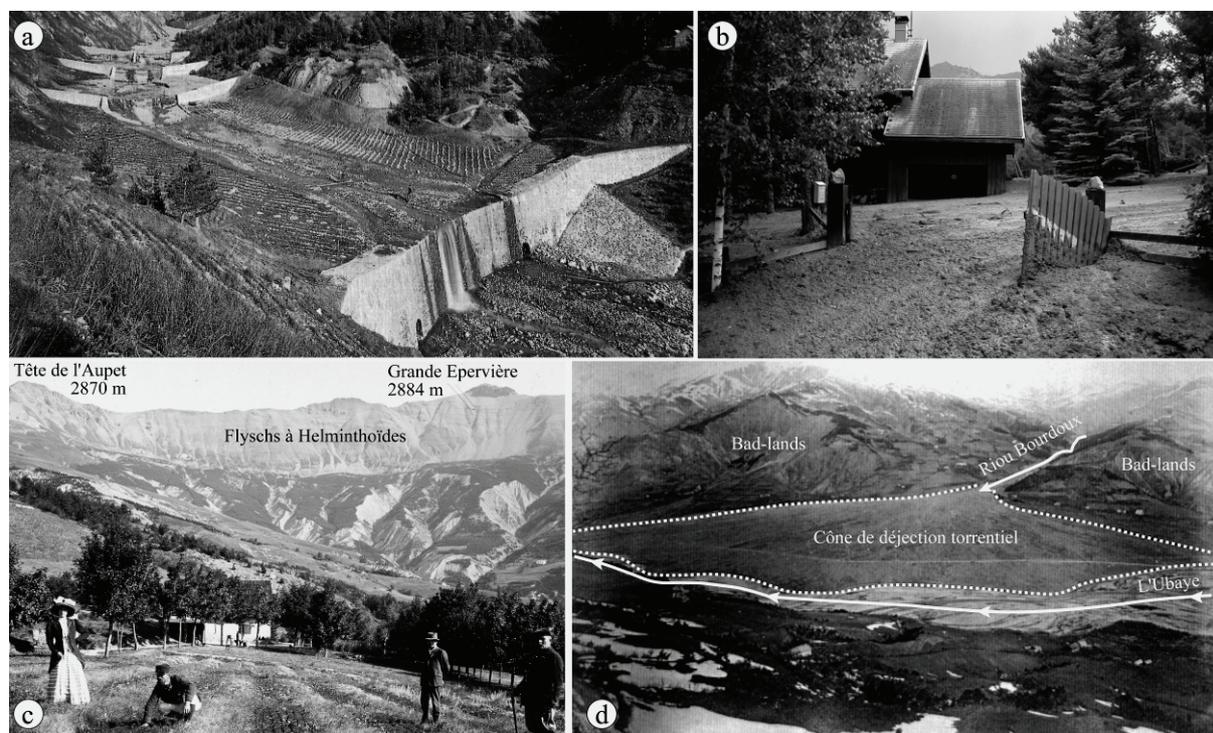
a. Ensembles morphodynamiques et chronostratigraphiques post-glaciaires (modifié de Jorda, 1993). b. Epaisseur de dépôts morainiques à la Conchette (1460 m). c. Epaisseur des dépôts morainiques à Lans. L'épaisseur considérable de moraines est probablement due à la rencontre des glaciers des Hautes Plaines et de Restefond. d. Extension maximum probable des glaciers latéraux et du glacier principal de l'Ubaye au Plénivürmien.

Fig. 2.6. Les glaciers du bassin de Barcelonnette et les dépôts morainiques associés.

1.1.4. La torrentialité : un phénomène majeur du bassin.

Les torrents du bassin de *Barcelonnette* ont déjà fait l'objet de nombreux travaux pour retracer leurs évolutions depuis 15 000 ans ou pour mieux connaître le fonctionnement de leurs laves torrentielles.

Deux grandes périodes de torrentialité sont reconnues et mises en avant dans les travaux de Ballandras et Nevière (1991), de Chondroyannis (1992) de Jorda (1980, 1983, 1985, 1992, 1993) et de Miramont (1998). La première période se situe de la fin du *Tardiglaciaire* (15 000 B.P.) à la fin de la période *Atlantique* (4700 B.P.), et la seconde au *Subboréal* (4700-2700 B.P.). Cette seconde période est marquée par une diminution des précipitations et l'instauration d'un climat perturbé (oppositions saisonnières plus tranchées, pluies moins fréquentes mais plus intenses, répartition interannuelle des pluies très inégale). Ces crises de la torrentialité, aux origines bioclimatiques (changement de régimes et fortes irrégularités de précipitations, changement de températures et de végétation) trouvent aussi des explications dans l'influence des sociétés agro-pastorales. Les périodes intermédiaires plus 'calmes' s'observent sous la forme de terrasses alluviales et torrentielles emboîtées dans lesquelles des troncs de pins ont été retrouvés et datés, notamment dans le bassin versant du *Riou Bourdoux* (Jorda, 1993 ; Miramont, 1998).



a. Barrages construits le long du Riou Bourdoux par les services de Restauration des Terrains de Montagnes (Cliché : RTM, 1891). b. Lave torrentielle du 5 août 2003 dans le bassin versant du Faucon (Remaître, 2006). c. Vue sur le bassin de réception du Riou Bourdoux. Les divers appareils torrentiels amont affouillent les flyschs de la nappe de charriage et leur tablier d'éboulis alimentant ainsi les laves torrentielles lors d'épisodes orageux intenses (Cliché : RTM, 1909). d. Photographie du cône de déjection du Riou Bourdoux en 1878, avant la politique de restauration de terrains en Montagne (Cliché : C. Rava, 1878). Le cône est d'une surface approximative de 180 ha pour un bassin de réception d'environ 2000 ha.

Fig. 2.7. Illustrations de l'évolution historique des appareils torrentiels du bassin de Barcelonnette.

Les travaux de Lecarpentier (1963) et ceux plus récents de Remaître *et al.* (2002, 2005a, 2005b) et Remaître (2006), sont orientés sur l'activité récente des appareils torrentiels et plus précisément sur les laves torrentielles. Les torrents de la vallée de l'*Ubaye*, malgré un aménagement du RTM

pour en réduire leur activité (Fig. 2.7a), restent actifs et dangereux pour les populations et pour les aménagements comme le prouvent les laves torrentielles du torrent de Faucon de 1996 et 2003 (Fig. 2.7b ; Remaître, 2006). Les torrents les plus actifs sont localisés en rive droite de l'Ubaye avec : le *Riou Bourdoux*, *Sanières*, *Faucon*, l'*Abéous*, et le *Bourget*. A eux seuls ils concentrent 72% des événements du bassin de *Barcelonnette* depuis 1850 (Remaître, 2006). Outre le climat agressif, l'origine des laves torrentielles dans les torrents du versant *Adret* est multiple (Remaître, 2006) :

- (i) **Leurs sources se situent dans les nappes de charriage** qui produisent une quantité de débris non négligeable (Fig. 2.7c) ;
- (ii) **Ils affouillent majoritairement les éboulis formés dans les flyschs et les calcaires** des nappes de charriage puis les '*Terres noires*' et les dépôts morainiques contrairement aux torrents du versant *Ubac* qui ne sont pas connectés au tablier d'éboulis ;
- (iii) **Leur profil en long est caractérisé par des pentes fortes dans le bassin de réception** ;
- (iv) **Par leur fort pouvoir érosif (sapement de base), les torrents sont susceptibles de déstabiliser les formations superficielles le long des berges** et ainsi déclencher des '*mouvements de versant*' (Lecarpentier, 1963 ; Remaître, 2006). Certains se localisent dans les bassins de réception, d'autres dans la partie médiane le long des berges (Remaître, 2006).

Ainsi, depuis 15 000 ans la torrencialité a largement participé au modelage des versants avec des juxtapositions et des emboîtements de formations superficielles et la construction des cônes de déjection imposants comme ceux du *Riou Bourdoux* (Fig. 2.7d) ou celui de *Faucon*. Les formations qui en découlent (alluvions, colluvions formations diverses de pentes) sont souvent difficiles à différencier : les faciès et les caractéristiques géotechniques étant très proches (Remaître *et al.*, 2002).

1.1.5. Un contexte climatique particulier

Le climat de la vallée de *Barcelonnette* est un climat méditerranéen combiné à un climat montagnard (Fig. 2.8). Globalement le régime pluviométrique est sec et les modules annuels s'échelonnent entre 680 et 1100 mm par an²². Les postes situés à l'intérieur du bassin de *Barcelonnette* traduisent des '*vallées sèches intra-alpines*' (Remaître, 2006).

Les caractéristiques du climat méditerranéen se résument par un fort ensoleillement annuel (+ 2700 h.an⁻¹), une sécheresse estivale, des amplitudes thermiques diurnes marquées, une forte variabilité des précipitations interannuelles (735 ± 400 mm pour 1928-2004). Les précipitations annuelles se concentrent sur quelques jours (103 jours en moyenne, Remaître, 2006). Ainsi, les saisons les plus arrosées sont d'abord l'automne puis le printemps (> 60% des précipitations annuelles), les épisodes pluvieux sont longs. L'hiver et l'été sont plus secs, les précipitations estivales sont liées à des orages intenses et très localisés marqués par une relative sécheresse préalable (Flageollet *et al.*, 1999 ; Remaître, 2000 ; Malet *et al.*, 2001, Remaître, 2006).

Les caractéristiques du climat montagnard sont liées aux faibles températures hivernales (130 jours de gel par an) et d'importantes précipitations sous forme de neige qui peut demeurer jusqu'au mois de juin. Au poste météorologique de *Barcelonnette*, la température moyenne annuelle est de 9.5°C pour la période 1928-2004.

²² Les chiffres moyens énoncés sont repris de la thèse de Remaître (2006). Les moyennes sont calculées selon six postes pluviométriques Météo France disponibles. Deux postes sont situés dans l'axe du bassin (*Barcelonnette* et *Jausiers*) et quatre postes sont localisés aux alentours immédiats du bassin de *Barcelonnette* (*La Condamine* et *S'-Paul en Haute-Ubaye*, *Allos* dans la vallée du *Verdon*, *Uvernet-Fours* dans la vallée du *Bachelard*).

Enfin, le bassin de *Barcelonnette* présente des **caractéristiques d'un climat continental**. Ces caractéristiques sont marquées par des réchauffements diurnes forts, des amplitudes thermiques journalières importantes et de nombreux cycles gel/dégel. Ces différents traits sont particulièrement renforcés par une opposition '*Adret/Ubac*' et par l'orientation générale du relief (est/ouest, Malet *et al.*, 2003). Ainsi, de cette opposition ressort une persistance du manteau neigeux sur le versant *Ubac* contrairement au versant *Adret*, qui est parfois sujet à une fonte très rapide et soudaine, entraînant des apports d'eau considérables vers l'aval (Sivan, 2000).

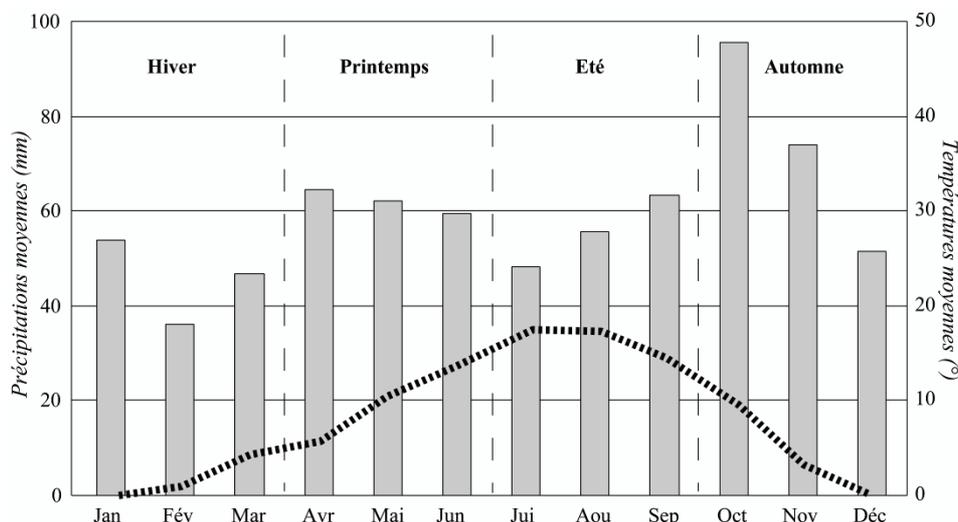


Fig. 2.8. Diagramme ombrothermique de la station climatique de Barcelonnette (1975-2004 ; d'après Remaître, 2006).

Ces différents traits climatiques sont favorables aux instabilités gravitaires avec :

- (i) Une **phase de préparation** du matériau pendant les hivers froids et les printemps humides ;
- (ii) Une **phase de déclenchement** lors des orages estivaux et des précipitations plus longues d'automne (Maquaire *et al.*, 2003).

Les phénomènes de laves torrentielles correspondent à des orages très localisés (Remaître, 2006). **Concernant les 'mouvements de versant' stricto sensu, il reste difficile de corrélérer leur déclenchement aux moyennes pluviométriques.** En effet, dans la majorité des cas il subsiste un manque de données historiques, notamment sur les dates de déclenchement des évènements (Malet *et al.*, 2006 ; Thiery *et al.*, 2006). Ainsi, pour déterminer les seuils de précipitations nécessaires au déclenchement de différents types de '*mouvements de versant*', il est nécessaire d'avoir recours à des modèles numériques à base physique prenant en compte les intensités de précipitations et les caractéristiques hydro-géotechniques des phénomènes (Malet *et al.*, 2007). Cette approche est utilisée pour l'étude du déclenchement d'un mouvement de type translationnel dans le bassin de *Barcelonnette*.

1.1.6. Une occupation du sol marquée par l'empreinte de l'homme

Si le climat particulier de la vallée favorise une végétation étagée, allant de l'étage collinéen à l'étage alpin, l'occupation du sol du **bassin de Barcelonnette est marquée par trois traits principaux** : (i) **une quasi exclusivité des résineux** (pins noirs d'Autriche, pins cembro, mélèzes, pins à crochets, Arnaud, 2007), (ii) **un contraste 'Adret/Ubac' fortement marqué** et (iii) **une origine anthropique d'une grande majorité des surfaces boisées** (Sivan, 2000).

Comme dans beaucoup d'autres bassins montagneux des *Alpes-de-Haute-Provence*, la végétation est ou a été largement influencée non seulement par le climat mais aussi par le facteur anthropique (Jorda, 1980, 1993). Par exemple, si le début du *Subboréal*, évoqué précédemment, équivaut à une reprise d'incision synonyme de changement climatique, il traduit aussi le changement de végétation dû à l'intervention anthropique sur le paysage. En effet, les travaux de Jorda (1980, 1992) et Miramont (1998) mettent en évidence des traces d'incendies qui, combinés à l'essartage sur les versants et aux pratiques pastorales, ont fortement contribué à l'augmentation de l'activité torrentielle dans le bassin de *Barcelonnette*.

Ainsi, depuis l'époque romaine, où l'homme s'installe véritablement, les terres du bassin de *Barcelonnette* ont été exploitées (notamment les cônes de déjection plus fertiles). Au Moyen Age, une nette croissance de la population produit une intensification de l'activité agro-pastorale et un défrichement généralisé qui sera maximum au début du 19^{ème} s. Cette absence de couverture forestière est en partie responsable d'une recrudescence de l'activité torrentielle (Sivan, 2000). Ainsi, une série de reboisements et de corrections²³ des torrents est engagée par les services de RTM (Chondroyannis, 1992 ; Delsigne *et al.*, 2001, Remaître, 2006).

Si l'influence du défrichement est connue sur l'activité torrentielle, qu'en est-il pour les instabilités de versants ? Beaucoup de '*mouvements de versant*' se situent sous forêts (Weber, 2001) ; et si les arbres ont des effets positifs sur la stabilisation des versants (interception des précipitations, renforcement de la résistance du sol au cisaillement), ils peuvent aussi avoir un effet négatif (augmentation de la capacité d'infiltration du sol, surcharge pour les sols, etc. ; Greenway, 1997). Par conséquent, la cessation de l'exploitation agricole des versants et celle de l'entretien du milieu naturel (recolonisation anarchique, abandon des canaux de drainage, etc.) peuvent constituer des facteurs non négligeables pour le développement des '*mouvements de versant*' (Augier et Rebmman, 1990).

1.1.7. *Les instabilités de versant*

Cette présentation générale montre que le bassin de *Barcelonnette* a largement été modelé par **les glaciers puis par l'activité des torrents et les instabilités gravitaires**. Il suffit d'observer la carte géologique (BRGM, 1974) ou de s'appuyer sur les travaux d'Antoine *et al.* (1995) pour constater que **21% de la surface de la carte géologique au 1/50 000^{ème} sont affectés par les instabilités de versant**. Si l'on se réfère à cette carte et en ne gardant que le bassin de *Barcelonnette stricto sensu*, cette proportion s'élève à 17% du bassin.

En reprenant les travaux de Légier (1977) et de Weber (2001), 66% des mouvements de terrain se sont déclarés au sein des '*Terres noires*' du *Callovo-Oxfordien* recouvertes ou non par des formations quaternaires. Les mouvements sont en majorité stabilisés et/ou dormants. Certains secteurs apparaissent comme très actifs comme *Bois noir* au sud-est de *Jausiers* ou encore la zone du *Riou des Ribes* à l'ouest du torrent de *Poche* (Koehle, 1994 ; Weber, 2001). Deux grandes catégories d'instabilités de versants peuvent y être distinguées : les mouvements '*profonds*' et les mouvements '*superficiels*' :

- (i) Les **mouvements '*profonds*'** correspondent soit aux glissements-coulées actifs, soit aux grands mouvements translationnels complexes ou rocheux fossiles. Les glissements-coulées sont représentés par *la Valette* sur le versant *Adret*, *Poche* et *Super-Sauze*, sur le versant *Ubac* (Malet, 2003). Ils prennent naissance dans les nappes de charriage ou les marnes noires ainsi que dans la couverture morainique ;

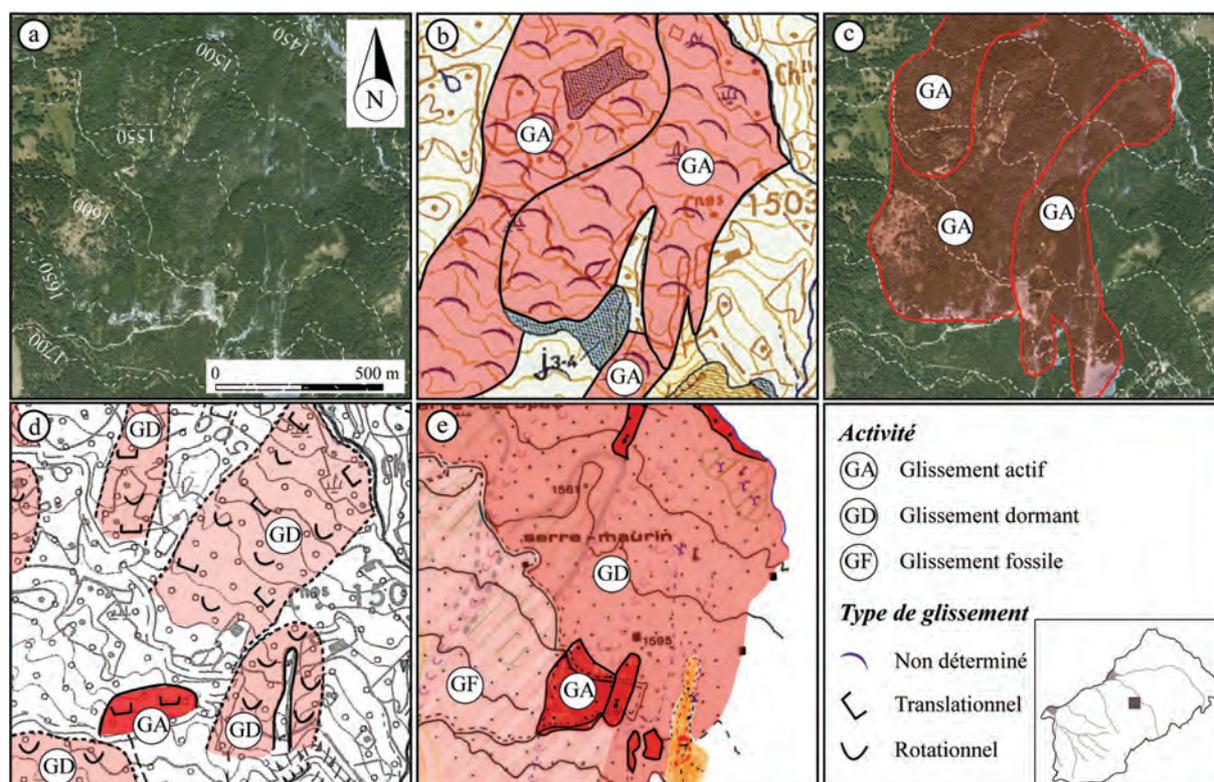
²³ Ces travaux ont constitué à reboiser les zones défrichées aux cours des derniers siècles (environ 11 000 ha de terrain ont été reboisés de 1864 à 1950), et à mettre en place puis entretenir un réseau d'ouvrages torrentiels (digues, seuils, canalisations, etc.). Ils sont actuellement à la charge des services du RTM. Pour plus de détail se référer à Remaître (2006).

- (ii) Les **mouvements 'superficiels'**, plus nombreux, se localisent sur les interfluves et le long des berges. Ils affectent principalement les marnes noires et les dépôts morainiques et/ou détritiques.

Si la carte géologique à l'échelle du 1/50 000^{ème} retranscrit fidèlement les secteurs affectés par ces instabilités de versants passées, **il reste difficile de discerner pour chaque phénomène :**

- (i) **Leurs différentes caractéristiques géomorphologiques** (état de surface, caractéristiques morphométriques, intensité, etc.) ;
- (ii) **Leur typologie** (mouvements profonds, superficiels, translationnels, rotationnels, etc.) ;
- (iii) **Leur activité** (actifs, latents, fossiles).

Les cartes géomorphologiques de Salomé et Beukenkamp (1988), réalisées à l'échelle du 1/25 000^{ème} pour l'ensemble du bassin, ou celles plus locales et levées au 1/10 000^{ème} par Augier et Rebmann (1990), Koehle (1994), Bossu (1995) ou Quintlé (1995), sont plus détaillées notamment concernant la typologie des 'mouvements de versant' et leurs limites spatiales. Ainsi, **deux grands types** sont généralement **discernés** sur ces cartes : les **glissements rotationnels** et les **glissements translationnels**. Toutefois, les levés étant effectués de manière subjective par des méthodes différentes et à des échelles diverses, des décalages de limites et d'interprétation des phénomènes demeurent (Carrara *et al.*, 1995 ; Wills et M^c Krinck, 2002). Ainsi, sur la figure 2.9, dans le secteur de Bois Noir, quatre cartes levées par quatre personnes distinctes présentent des différences notables de limites et d'interprétations morphologiques.



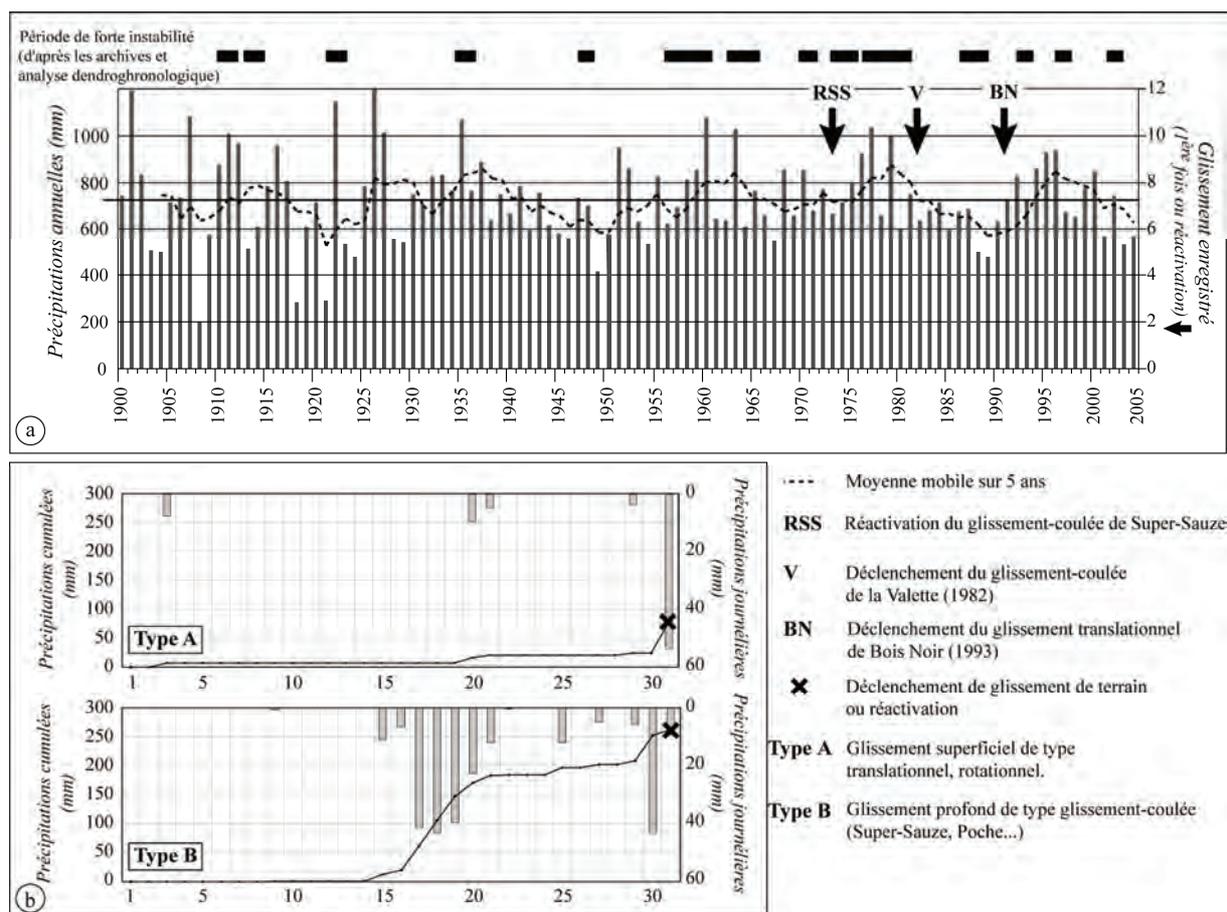
a. Orthophoto du secteur de Bois Noir (IGN, 2004). b. Carte géologique de Barcelonnette au 1/50 000^{ème} (BRGM, 1974). c. Carte des 'mouvements de versant' levée au 1/25 000^{ème} par analyse de photographies aériennes (Quintlé, 1995). d. Carte géomorphologique levée au 1/25 000^{ème} par analyse de photographies aériennes et observations de terrain (Salomé et Beukenkamp, 1988). e. Carte géomorphologique levée au 1/10 000^{ème} par analyse de photographies aériennes et observations de terrain (Koehle, 1994).

Fig. 2.9. Extraits de cartes géologiques et géomorphologiques du secteur de Bois Noir.

Malgré ces divergences, l'interprétation des **facteurs de prédisposition** (statiques) et **déclenchants** (dynamiques) sont généralement les mêmes suivant les différents travaux. Ainsi, lorsqu'on met en relation les **facteurs de prédisposition** et les '*mouvements de versant*', on retrouve :

- (i) Le **facteur géologique** avec la **nature lithologique des terrains et des formations superficielles et la structure**. Ainsi, se distinguent les mouvements se déclenchant essentiellement dans les marnes noires (la structure interne et minéralogique des marnes étant largement favorables), les mouvements se déclenchant dans la couverture quaternaire ; les mouvements se déclenchant dans les flyschs de l'*Autapie* recouvertes ou non par une couverture morainique ; et enfin, les mouvements touchant les autres formations charriées (Légier, 1977 ; Weber, 2001). Pour le **facteur structural**, beaucoup d'instabilités de versant sont proches des contacts anormaux entre le soubassement autochtone et les nappes charriées et/ou des failles. Ainsi, **les contacts anormaux constituent des plans de discontinuité hydrologiques majeurs** entre des formations perméables (calcaires et flyschs) et des formations imperméables (marnes noires). Enfin, la '*discontinuité*' entre **les formations quaternaires et le substratum ou les plans de schistosité conformes à la pente constituent des plans d'écoulement préférentiels favorisant les surfaces de rupture** ;
- (ii) Le **facteur de 'préparation'** qui correspond à la phase de préparation des matériaux par les processus de gel/dégel, de dessiccation/humectation ;
- (iii) Le **facteur topographique** avec une majorité de '*mouvements de versant*' sur des **pentés moyennes à fortes** ($>15^\circ$) sur l'ensemble du bassin et une **opposition 'Adret/Ubac'**. Ainsi, 80% des phénomènes sont localisés sur le versant *Ubac*. Ce dernier ayant des versants exposés majoritairement vers le nord et l'ouest connaît un ensoleillement plus faible, une humidité plus élevée et un enneigement supérieur au versant *Adret*. **L'infiltration et l'humectation plus longues des formations quaternaires à forte capacité de rétention favorisent alors les instabilités** ;
- (iv) Le **facteur 'fluvial et torrentiel'** se manifeste essentiellement par **sapement basal** qui favorise l'entretien de l'instabilité des berges. Ainsi, **une grande partie des petits 'mouvements de versant' se localisent le long des berges des torrents** ;
- (v) Le **facteur 'occupation du sol'** se distingue par une diversité de la couverture végétale des versants affectés par les '*mouvements de versant*'. **Ils se déclenchent aussi bien sous forêts (Bois Noir) que sur les prairies, sur des landes alpines ou sur une couverture mixte**. Pour certains secteurs, surfaces cultivées ou forêts non entretenues avec canaux de drainage et/ou des systèmes d'irrigation abandonnés, l'écoulement de l'eau dans les formations superficielles est directement à mettre en relation avec certains phénomènes.

Quant aux **facteurs déclenchants**, ils sont encore mal connus. Ils se résument aux **intensités de précipitations** et à leur **cumul pré-événement** (Flageollet *et al.*, 1999 ; Malet *et al.*, 2007). Il n'y a pas de rythmicité définie. Toutefois, l'inventaire historique effectué pour la période 1850-1995 (Amiot et Nexon, 1995) montre que peu de '*mouvements de versant*' se déclenchent en avril, octobre, novembre et décembre alors qu'un grand nombre est enregistré en mai, août et septembre (Amiot et Nexon, 1995 ; Weber, 2001). **Un cumul des précipitations** élevé peut suffire au déclenchement de certains types de mouvements (Fig. 2.10a) alors que pour d'autres ce sont **des événements climatiques exceptionnels** qui participent activement à leur déclenchement (Fig. 2.10b ; Malet *et al.* 2007).



a. Précipitations annuelles, moyenne mobile sur 5 ans et enregistrement des glissements de versant. b. Situation type de déclenchement de 'mouvements de versant' pour le bassin de Barcelonnnette.

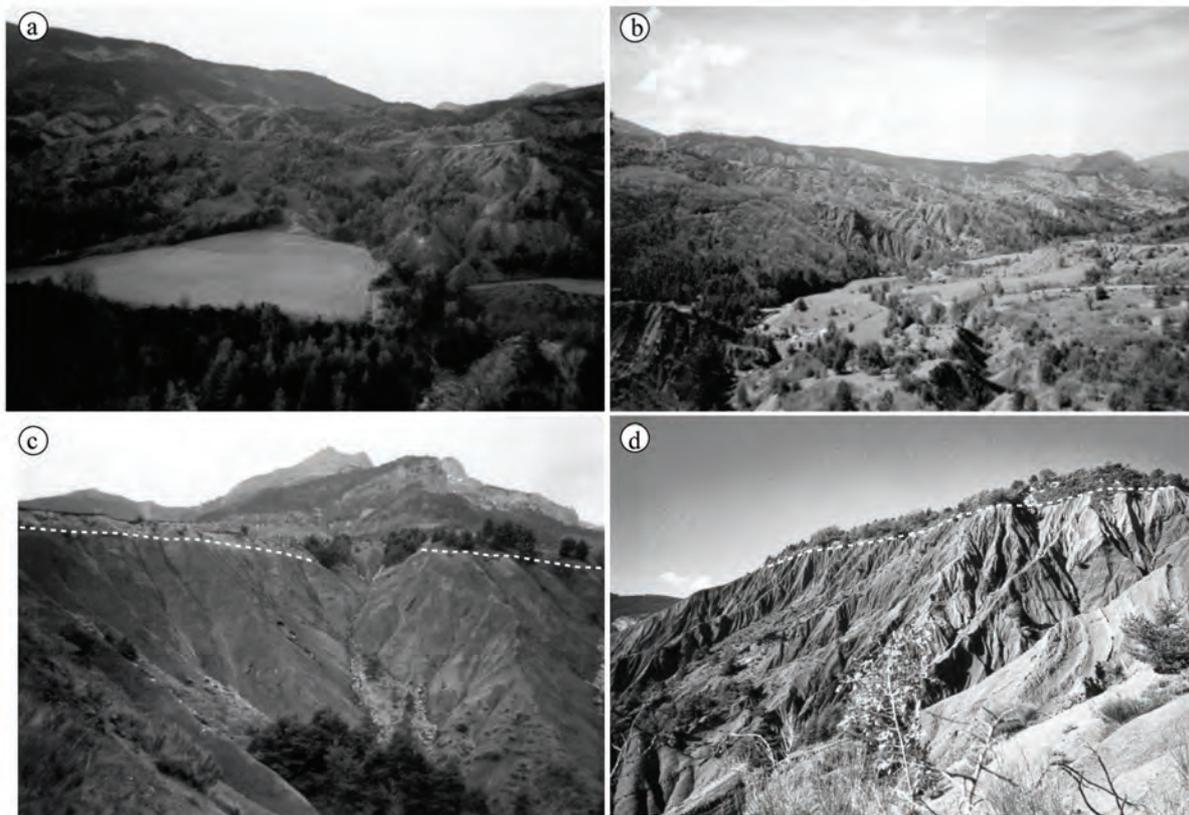
Fig. 2.10. Relation entre les 'mouvements de versant' et les précipitations (adapté de Malet et al., 2007).

1.2. Le bassin versant du Moulin (Draix) : site d'étude secondaire

Les Bassins Versants Représentatifs Expérimentaux (BVRE) du Cemagref, inscrits dans des 'Terres noires' et marqués par des paysages de 'badlands', constituent un site de choix pour valider les différents travaux menés dans le bassin de Barcelonnnette. En effet, les 'mouvements de versant' s'y développant présentent des caractéristiques proches de ceux du bassin de Barcelonnnette (notamment les mouvements banc sur banc aux mêmes facteurs de prédisposition). Ainsi, les résultats des différents modèles d'analyse spatiale acquis pour le bassin de Barcelonnnette seront transposés sur le bassin versant du Moulin (cf. § 1.2.2) pour les valider.

1.2.1. Contexte général

Situé à 15 Km au nord-est de Digne-les-Bains, les BVRE du Cemagref (le Brusquet, le Francon, le Laval et le Moulin) sont localisés dans la moyenne vallée du Bouinenc. Affluent majeur de la rive gauche de la moyenne Bléone, il prend naissance sur le versant ouest de la Montagne du Cheval Blanc (2323 m) vers 1450 m d'altitude, à la jonction entre la source des Foutounes (1689 m) et les sources du Cheval Blanc (1528 m). Après avoir traversé des couches lithologiques marneuses, marno-calcaires et calcaires, il se jette dans la Bléone à 678 m d'altitude.



a. Vue sur les vestiges de terrasses des torrents de Draix. b. Vue sur le secteur de Draix depuis l'amont du BVRE du Moulin. Les glacis d'accumulation sont attaqués de toute part par l'intense activité érosive au sein des 'Terres noires'. c. Vestiges de glacis d'accumulation. d. Ravines dans les 'Terres noires' du BVRE du Laval, surmontées par des restes de formations superficielles allochtones supposées du Pléistocène supérieur.

Fig. 2.11. Morphologie générale des bassins versants de Draix.

De manière générale, les BVRE sont dominés par plusieurs lignes de crêtes. Au nord, une ligne de crête de direction ouest/est qui s'abaisse régulièrement vers l'Ouest. Elle rejoint le sommet du *Cheval Blanc* au col de la *Cèpe* (903 m), passe par le sommet de *Pompe* (1748 m) et la *Tête du Laval* (1140 m). A l'ouest, domine la crête de la *Blache* (1263 m), d'orientation nord-est/sud-ouest, entaillée sous la forme d'une gorge par le *Bouinenc*. Enfin, au Sud, les sommets du *Couard* (1988 m) et du *Cucuyon* (1886 m) dominent des vestiges de glacis d'accumulation (Fig. 2.11b et 2.11c), où sont localisés les villages d'*Archail* ou de *Draix*.

La structure géologique environnante est complexe et est issue de la mise en place de la nappe de *Digne* (Haccard *et al.*, 1989). Tout comme dans les autres parties des Préalpes méridionales (*Baronnies*, *Diois*, ...), les séries lithologiques du *Jurassique* et du *Crétacé* (Fig. 2.12) se caractérisent par des couches marneuses et marno-calcaires issues de la période de sédimentation vocontienne. Les calcaires sont peu représentés, sauf par les calcaires du *Lias inférieur*, du *Tithonique* et du *Coniacien* qui arment la majorité des escarpements et crêtes. Les différentes couches ont subi les nombreuses phases tectoniques '*Pyrénéo-provençales*' qui se manifestent par des séries de plis et de failles d'axes nord-ouest/sud-est ou nord-est/sud-ouest et la mise en place de la nappe de *Digne* (Bravard *et al.*, 1987 ; Haccard *et al.*, 1989). Si la structure joue donc un grand rôle sur la formation du paysage, les vestiges de périodes d'accumulation et d'incision du quaternaire, notamment des périodes *Pléistocène* et *Holocène* sont tout aussi visibles (Ballais, 1996 ; Thiery, 2000). Ainsi, se juxtaposent d'amont en aval :

- (i) **Des crêtes et des croupes, d'origine structurale et d'axes divers**, dégagés dans les calcaires du *Tithonique* (*Barre de Pompe, sommet de Pompe, sommet du Couard*) et du *Coniacien* (*Montagne du Cheval Blanc*) très résistants à l'érosion (Fig. 2.11c) ;
- (ii) **Des versants ravinés et de vastes dépressions taillées sous forme de 'badlands'** dans les couches lithologiques tendres et tectonisées, parfois séparés par des lambeaux de glacis d'accumulation plus ou moins étagés (Figs. 2.11a, 2.11b, 2.11.c ; Thiery, 2000) ;
- (iii) **Un réseau hydrographique souvent inadapté à la structure** laissant supposer son antécédence (Haccard *et al.*, 1989) ainsi que des terrasses étagées et/ou emboîtées qui dominent de quelques mètres les drains principaux.

Le détail de la genèse des paysages dans le *Moyen Bouinenc* peut être trouvé dans Haccard *et al.*, (1989), Ballais (1996) et Thiery (2000).

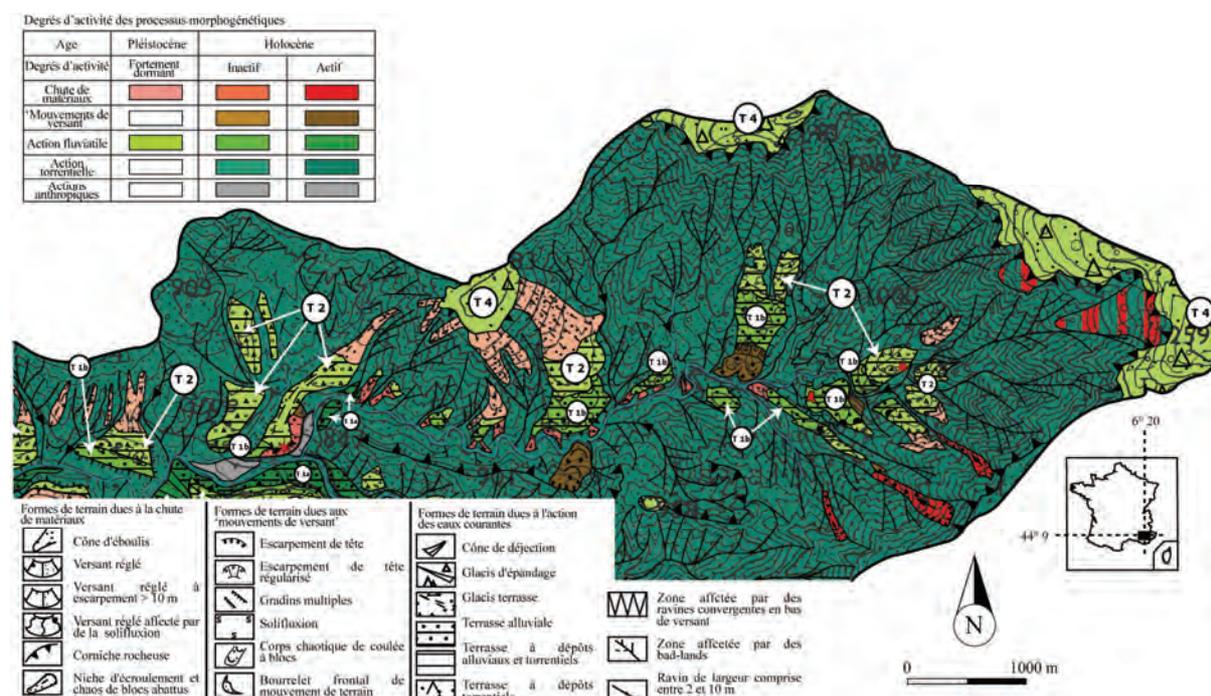


Fig. 2.12. Extrait de la carte géomorphologique au 1/10 000^{ème} de la vallée du Bouinenc. L'extrait est centré sur les bassins versants du Laval et du Moulin (Thiery, 2000).

1.2.2. Le bassin versant du Moulin

En dehors de son intérêt scientifique, le choix de ce site de validation a été guidé (i) par les travaux que j'ai pu y mener en DEA (Thiery, 2000) et par la suite, dans le cadre de plusieurs projets de recherches (PNRH, 2001-203 ; ACI-FNS ECCO, 2003-2005) et (ii) par les travaux précédents menés sur les instabilités gravitaires centrés sur le **bassin versant du Moulin** (Ritzenthaler, 2001 ; Moreno, 2004). **Ce bassin versant bénéficie d'une cartographie des formations superficielles levée au 1/2 000^{ème}** (Thiery, 2000) et **d'une observation régulière des 'mouvements de versant' pour la période 2002-2005** avec une base de données mise à jour régulièrement.

D'une surface de 8 ha et d'une pente moyenne de 27°, ce bassin est recouvert à 46% de formations superficielles allochtones, le reste étant couvert par les '*Terres noires*' (Figs. 2.12 et 2.13). Son réseau hydrographique, fortement incisé, a donné lieu à une organisation morphologique du relief en échines. Les facettes ainsi formées présentent des élévations de 15 mètres avec des inclinaisons de pente de 50°. La dégradation de la marne en place permet la

constitution d'un manteau de dégradation d'environ 30 cm en moyenne (Ritzenthaler 2001). Ainsi, certains secteurs morphologiques de ravinement se distinguent selon la direction de l'incision des drains principaux par rapport au pendage de la roche (Ritzenthaler, 2001 ; Moreno, 2004) avec :

- (i) Des **ravins en position orthoclinale** amenant à une morphologie de ravines entrecroisées ;
- (ii) Des **ravins en position cataclinale** présentant des morphologies dendritiques ;
- (iii) Des **ravins en position anaclinale** qui mettent en évidence une incision linéaire de la roche.

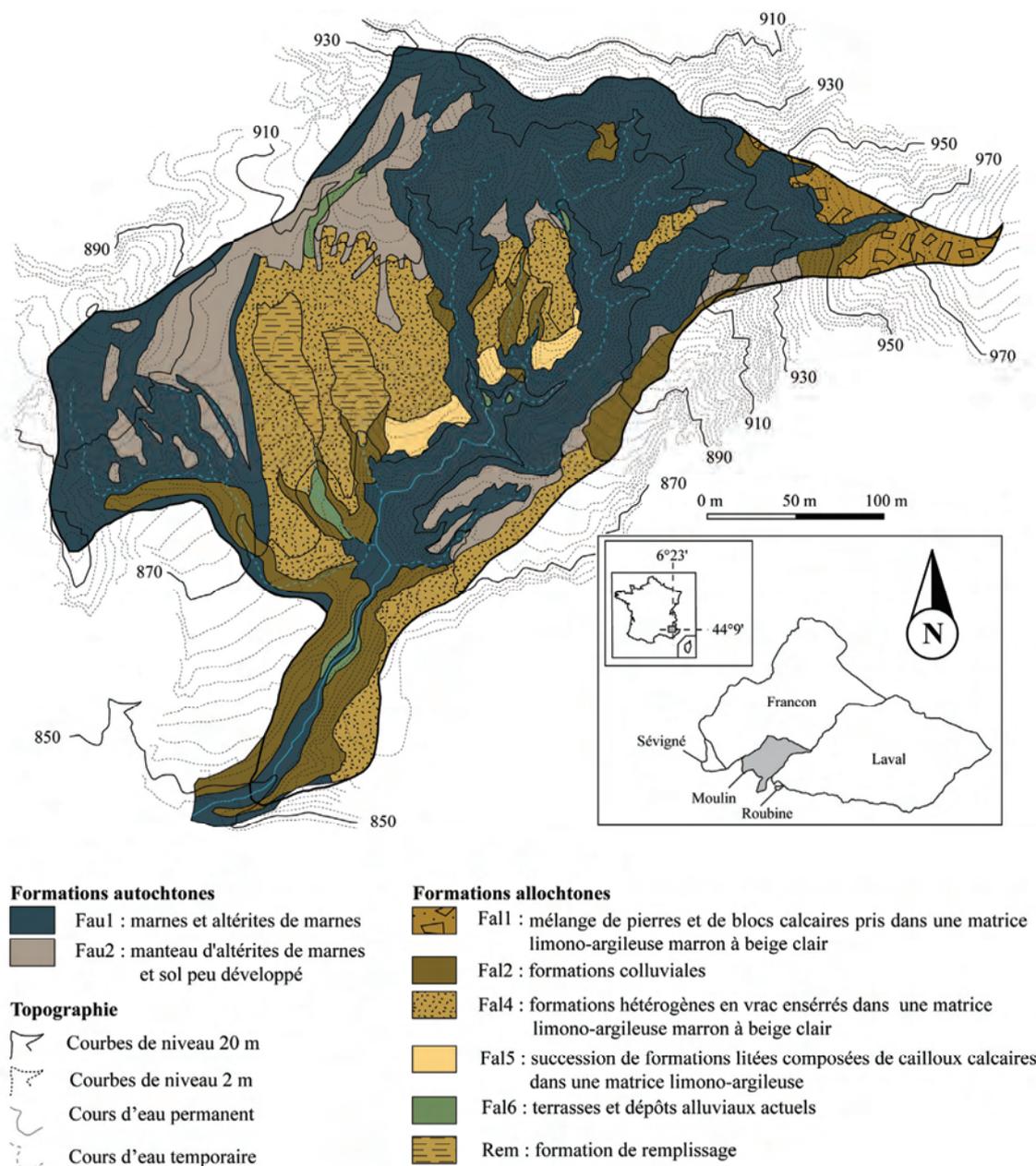


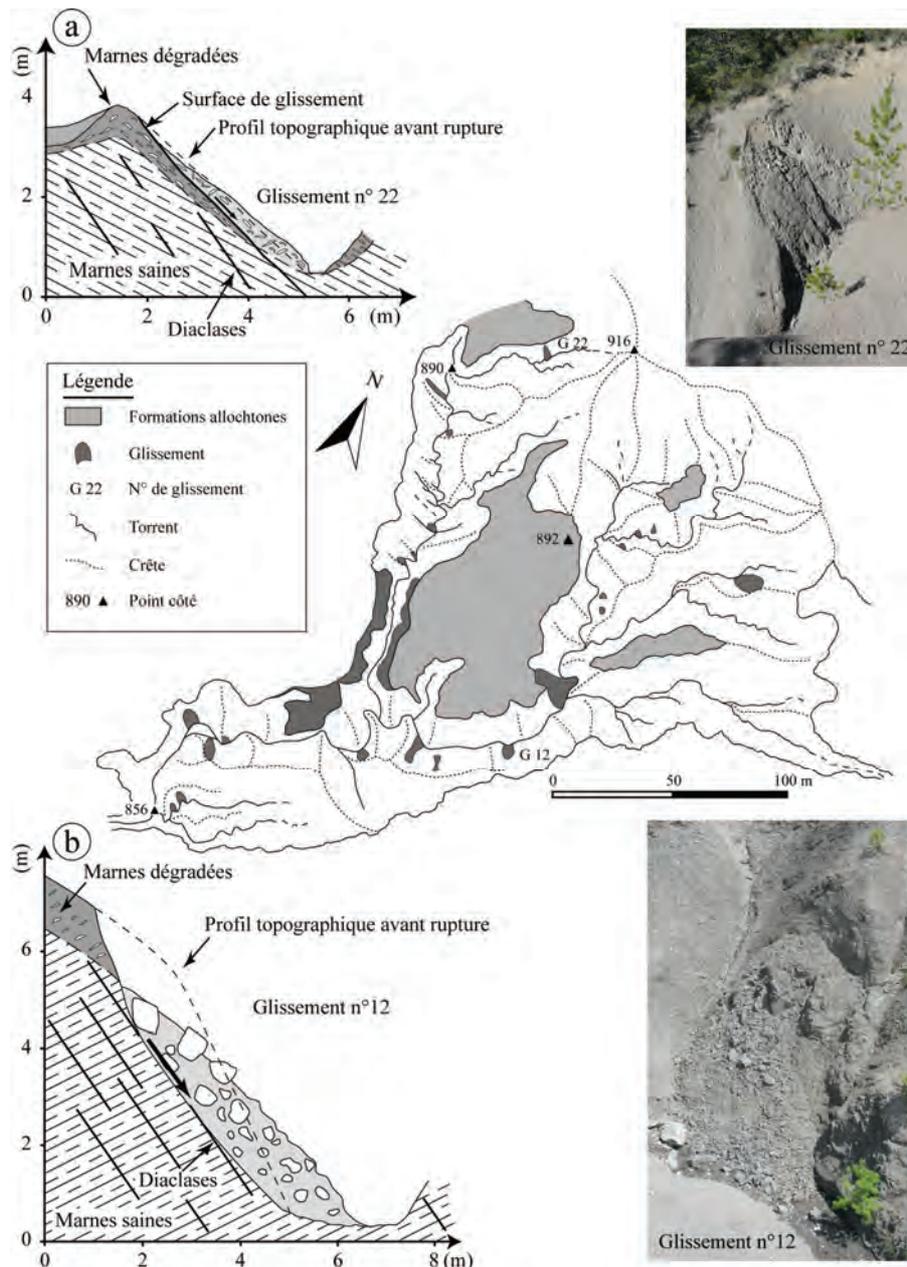
Fig. 2.13. Formations superficielles du BVRE du Moulin.

Enfin, ces ravins sont dominés par des lambeaux de terrasses estimées du *Pléistocène* et de l'*Holocène* dont la capacité de rétention d'eau est forte (Fig. 2.13 ; Truchet, 2000 ;

Maquaire *et al.*, 2000) et se manifeste par un décalage entre les volumes d'eau précipités et les volumes d'eau en transit (Richard et Mathys, 1999).

1.2.3. Les instabilités de versants du Moulin

Deux types de mouvements de terrains sont généralement reconnus dans les BVRE : les mouvements structuraux favorisés par les plans de schistosité, les diaclases (comme les **mouvements banc sur banc**) et les **coulées superficielles**. Les coulées étant peu fréquentes dans le BVRE du Moulin (Ritzenthaler, 2001), seuls les mouvements structuraux sont retenus pour ce site de validation (Moreno, 2004).



a. Mouvement structural banc sur banc favorisé par le pendage conforme des marnes et les diaclases.
 b. Mouvement structural favorisé par les diaclases.

Fig. 2.14. Carte des 'mouvements de versant' du Moulin et typologie des mouvements (modifié de Maquaire et Malet, 2006).

De manière détaillée, Ritzenthaler (2001) subdivise ces '*mouvements de versant*' selon la nature des matériaux mobilisés (Fig. 2.14). On trouve ainsi :

- (i) **Les mouvements dans les marnes saines ;**
- (ii) **Les mouvements dans le régolithe ;**
- (iii) **Les mouvements dans la couverture détritique.**

La figure 2.14 présente différents types de mouvements observés dans le *Moulin*. Selon la configuration géologique relative à l'orientation des plans de schistosité, on trouvera également des mouvements **conformes au pendage** (surface de rupture parallèle aux plans de schistosité et aux diaclases) et des mouvements **contraires au pendage** (surface de rupture plus ou moins perpendiculaire aux plans de schistosité et parallèle aux diaclases). Enfin, la soudaineté est une des caractéristiques majeures de ce type de '*mouvements de versant*', et l'absence de signes précurseurs (fractures de distension, fissures etc.) ne permet pas de prévoir de manière précise leur déclenchement (Ritzenthaler, 2001 ; Moreno, 2004).

1.3. Conclusion

Ces présentations, en particulier celle du bassin de *Barcelonnette*, montrent que plusieurs facteurs influencent la localisation des '*mouvements de versant*' et que des tendances fortes se dégagent. Mais, **des précisions manquent sur (i) les différents types de phénomènes, (ii) leurs limites exactes, (iii) et les facteurs de prédisposition propres à chaque type de phénomène.** Ainsi, avec ces seules données déjà disponibles, il n'est pas encore possible d'établir des règles systématiques pour une cartographie de la susceptibilité et de l'aléa à l'échelle du 1/10 000^{ème} par les approches retenues (cf. *Chap. 1, § 3*). **Il apparaît donc indispensable d'engager une cartographie morphodynamique précise et adaptée pour disposer de ces informations manquantes.**

Les principes de cette cartographie morphodynamique (documents utilisés, choix de la légende et des taxons) sont exposés dans la section 2 ci-après.

2. CARTOGRAPHIE MORPHODYNAMIQUE : ELABORATION ET MISE SOUS SIG

La cartographie géomorphologique est un exercice assez subjectif qui se démarque d'une simple description et d'un repérage des phénomènes (processus). Elle présente les différentes unités morphologiques en tenant compte de plusieurs facteurs tel que la topographie et la structure. Son objectif est d'expliquer la formation du relief, de distinguer et hiérarchiser les différentes étapes de sa mise en place. Ainsi, une carte géomorphologique doit pouvoir indiquer clairement de nombreuses informations sur le relief, les processus, les formations superficielles, la structure, etc. Aucune règle stricte n'est établie *a priori*, et dans beaucoup de cas, la légende doit être adaptée à l'échelle de travail retenue et aux objectifs fixés.

Pour être pertinente, dans cette recherche sur la cartographie de la susceptibilité/aléa, la carte géomorphologique doit comporter des informations sur l'activité des '*mouvements de versant*' (Annexe 1). C'est pour cette raison que cette carte sera appelée *carte morphodynamique*. Le nombre important de variables nécessaires pour cette recherche (*Chap.1, § 2.2*) oblige à porter une attention particulière à la retranscription des informations acquises sur le terrain ou obtenues par analyse de documents : **trop d'information risque de multiplier les variables et de complexifier l'analyse ; pas assez d'information risque d'aboutir à des documents peu précis ou peu fiables.** En d'autres termes, le choix du système de cartographie morphodynamique revêt un caractère primordial. Ainsi, l'accent est mis sur les différentes méthodes existantes de cartographie géomorphologique. Leurs descriptions et leurs analyses permettent de justifier nos choix de

représentation pour une échelle du 1/10 000^{ème} (documents utilisés, choix de la légende et des taxons).

Cette section décrit, d'abord, différentes méthodes de cartographie géomorphologique et/ou morphodynamique. Les règles établies et suivies pour ce travail sont ensuite exposées pour représenter les processus morphogénétiques, les degrés d'activité (et les différents indicateurs retenus), et les formes et formations affectées. Puis, cette cartographie morphodynamique est appliquée aux sites d'études. Enfin, les bases de données spatiales et attributaires '*mouvement de versant*' sont présentées.

2.1. De nombreuses méthodes de cartographie

De très nombreuses méthodes de cartographie géomorphologique ont été proposées (Tricart, 1965 ; Kienholz, 1977 ; Barsh *et al.*, 1978 ; Demek et Embleton, 1978 ; Barsh et Liedtke, 1980 ; van Zuidam, 1986 ; De Graaff *et al.*, 1987 ; Salomé et Beukenkamp, 1988 ; Augier et Flageollet, 1992 ; Schoeneich, 1993 ; Tripet *et al.*, 1993 ; van Westen, 1993 ; Kienholz et Krummenacher, 1995 ; Gueremy et Marre, 1996 ; Joly, 1997 ; Schoeneich, 1998 ; Noverraz, 1999 ; Otto et Dikau, 2004 ; Reynard *et al.*, 2005 ; Gustavsson *et al.*, 2006). **Même si certaines légendes se ressemblent, aucune codification internationale n'existe dans ce domaine** (Jobard, 2005 ; Gustavsson *et al.*, 2006). Ainsi, chaque méthode, chaque légende, chaque système proposé répond à un certain objectif pour une échelle de travail donnée. Sans aller jusqu'à faire un inventaire complet de toutes méthodologies passées et actuelles (une revue détaillée peut être trouvée dans Gustavsson *et al.*, 2006), nous détaillons, ci-après quelques méthodologies parmi des méthodes ou systèmes dit '*officiels*', '*universitaires*' et '*innovants*' de cartographie géomorphologique qui ont servis de base pour établir nos propres règles de cartographie morphodynamique.

2.1.1. Les systèmes '*officiels nationaux*'

Ces méthodes adoptées par certains pays, sont le plus souvent le fruit d'une coopération entre plusieurs unités de recherches qui ont tenté de présenter une certaine cohérence de légendes pour un même état. Trois systèmes ont retenus notre attention (Fig. 2.16).

2.1.1.1. Le système suisse

Le système suisse (Fig. 2.15a) utilise deux couleurs : le rouge pour l'érosion et le vert pour l'accumulation (Schoeneich, 1993). Les formes de terrain sont représentées par des signes et des trames dans la couleur de la dynamique à une échelle du 1/50 000^{ème}. Cette représentation permet une vision immédiate de la morphodynamique régionale pouvant être utilisée pour une cartographie orientée aléas. Le système, très descriptif, ne distingue pas la genèse des formes de terrain. En outre, des vides, lorsque d'autres processus que l'érosion et l'accumulation sont présents, peuvent subsister.

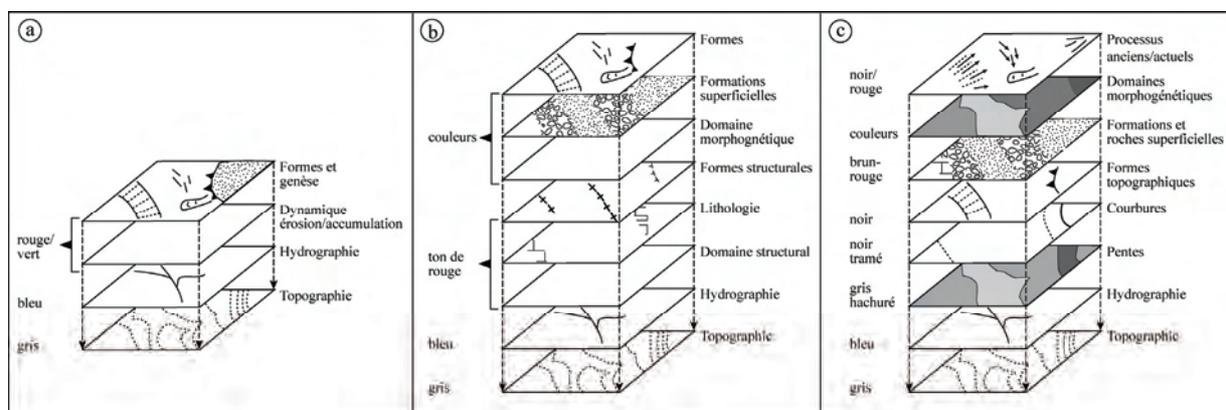
2.1.1.2. Le système français (RCP 77)

Le système français (RCP 77) a été développé dès les années 50 pour une échelle du 1/50 000^{ème} (Tricart, 1965). La légende repose sur un ensemble de signes et de trames en couleur (Fig. 2.15b). La couleur représente à la fois la structure (lithologie, tectonique), la dynamique externe et le domaine morphoclimatique. Le système est très complet avec cinq couleurs (Annexe 2.1) et chaque espace est cartographié. Toutefois, ce document très complet apparaît trop souvent comme extrêmement surchargé, et le nombre de cartes produites reste très limité. En outre, l'utilisation des couleurs peut être ambiguë : une forme peut être représentée par une couleur correspondant à l'origine structurale, au processus qui l'affecte ou à l'ambiance climatique dans laquelle le processus s'exerce. La question est donc de savoir quelle couleur choisir afin de

représenter au mieux la forme et sa genèse (Gueremy et Marre, 1996). Ce système a été revu, corrigé et simplifié par Joly (1997).

2.1.1.3. Le système allemand (GMK 25)

Développé à la fin des années 70, le **système allemand GMK 25** (Barsh *et al.*, 1978 ; Barsh et Liedtke, 1985) résulte d'un programme de cartographie aux échelles du 1/25 000^{ème} et du 1/100 000^{ème} en ex-RFA. Le système combine des signes, des plages de couleur et des trames (Fig. 2.15c). Les trames sont en gris et représentent des classes de pentes en degré (hachures plus ou moins éloignées), les signes de différentes couleurs représentent des formes de pente, des processus anciens ou actuels et la lithologie. Les plages de couleur recouvrent les unités où s'exerce un processus morphologique défini (glaciaire, action des eaux, vent, etc.). Si la carte est complète et 'plus simple' à lire que la RCP 77, elle n'en demeure pas moins confuse (superposition d'information, couleurs (noir et rouge) ayant deux significations, etc.).



Système suisse. b. Système français RCP 77. c. Système Allemand GMK.

Fig. 2.15. Structures et légendes des systèmes de cartographie géomorphologique 'officielles nationales' (adapté de Schoeneich, 1993).

Malgré une assez bonne représentation des formes, de leur genèse, des processus et de la dynamique des versants, ces cartes restent difficiles à lire et à exploiter. Ainsi, dans le cadre de recherches sur les 'mouvements de versant', des systèmes plus adaptés ont été proposés par des équipes de recherches universitaires.

2.1.2. Les systèmes 'universitaires'

Quatre systèmes 'universitaires' ont retenu notre attention, notamment parce qu'ils ont été développés pour une échelle du 1/10 000^{ème}.

2.1.2.1. Le système 'IGUL'

Le **système 'IGUL'**²⁴ a été développé à la fin des années 1980 (Reynard *et al.*, 2005). Ce système repose sur un ensemble de signes et de surfaces en couleur pour chaque domaine morphogénétique (Fig. 2.16). Les formes sont représentées par des signes identiques à la couleur du domaine morphogénétique correspondant. La lecture de la carte donne une vision d'ensemble des processus dominants et de leur importance relative, en ne gardant que l'information strictement géomorphologique : pentes ou ruptures de pente sont déduites de la carte topographique et la lithologie n'est pas représentée (Reynard et Schoeneich, 1995). Sauf cas

²⁴ IGUL : Institut de Géographie de l'Université de Lausanne. <http://www.unil.ch/igul/>

particuliers, seule la dynamique des 'mouvements de versant' et des glaciers rocheux est indiquée (Schoeneich, 1998 ; Jobard, 2005).

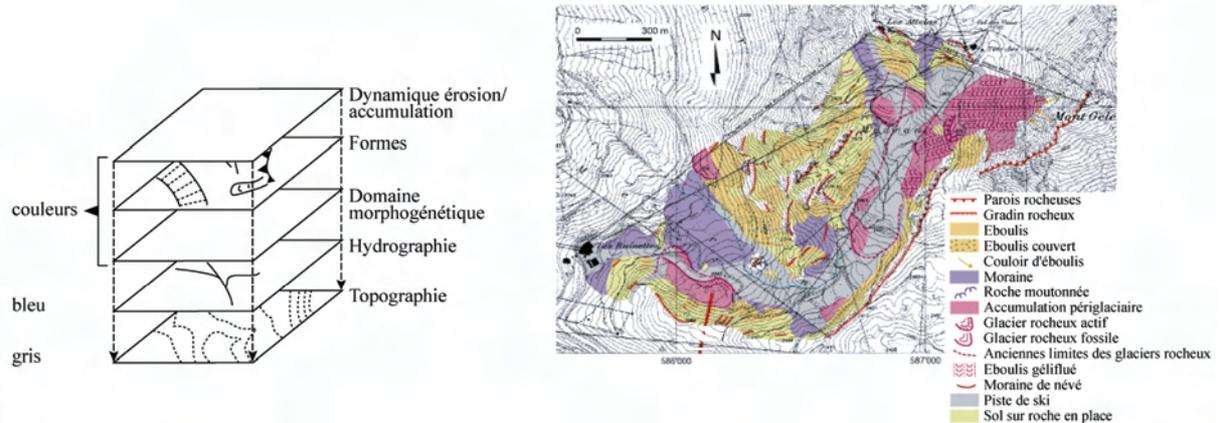


Fig.2.16. Système de cartographie géomorphologique 'IGUL' (adapté de Schoeneich, 1993 ; Lambiel et Reynard, 2002).

2.1.2.2. Le système 'champenois'

Le système 'champenois' est une alternative au système IGUL avec une légende particulièrement bien adaptée à l'échelle du 1/10 000^{ème} et à une cartographie morphodynamique des versants (Gueremy et Marre, 1996). Des couleurs représentent les différents processus avec les degrés d'activité associés (dégradé de couleur) et des signes en noir indiquent les formes de terrain et leurs dépôts corrélatifs (Fig. 2.17). Les pentes, les ruptures de pente sont déduites du fond topographique. La lithologie peut être indiquée en retrait uniquement lorsque la roche affleure. Ainsi, la couleur exprime la dynamique des formes, qui pour les auteurs, est source d'aléa. Plusieurs essais de cartographie effectués avec ce système ont été concluants dans les *Baronnies du Sud* : morphologie et aléa peuvent y être distingués aisément (Dumas *et al.*, 1987 ; Cliquot *et al.*, 1993 ; Thiery, 1999).

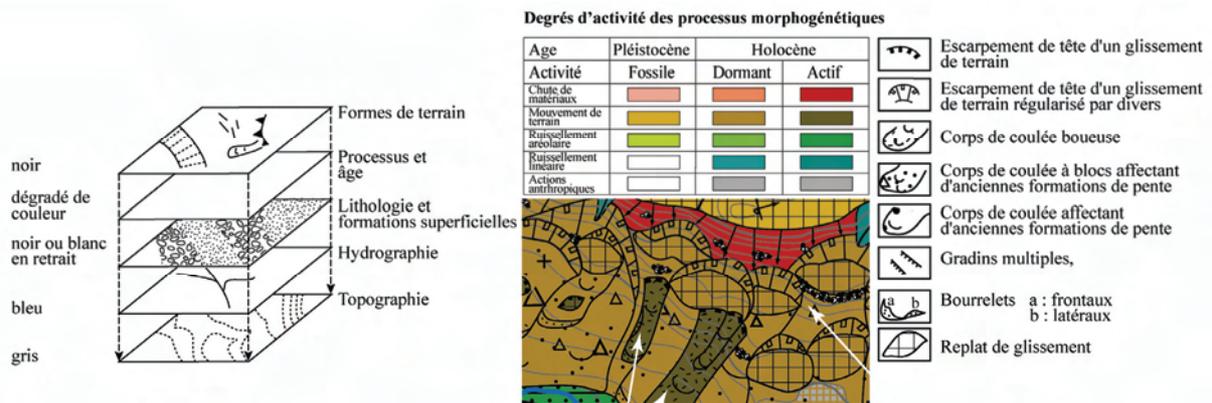


Fig. 2.17. Système de cartographie géomorphologique 'champenois' (adapté de Thiery, 1999).

2.1.2.3. Le système 'TESLEC'

Le système 'TESLEC' est orienté dynamique de versants avec un accent particulier sur les 'mouvements de versant' (Pasuto et Soldati, 1999). Le secteur à cartographier est divisé en 'unités de mouvement de versant' (*landslide unit*). Les formes de terrain sont représentées par des signes en noir. L'activité est signalée soit par un système de signes discontinus inspirés des travaux de

Salomé et Beukenkamp (1989), soit par une concentration de signes distinctifs plus fort (Fig. 2.18). D'autres formes et formations peuvent être indiquées mais à titre informatif et lorsque l'expert l'estime nécessaire. La lecture de cette carte est aisée, mais un seul type de processus y est représenté, en outre la carte comporte des 'vides' et le relief n'est pas expliqué.

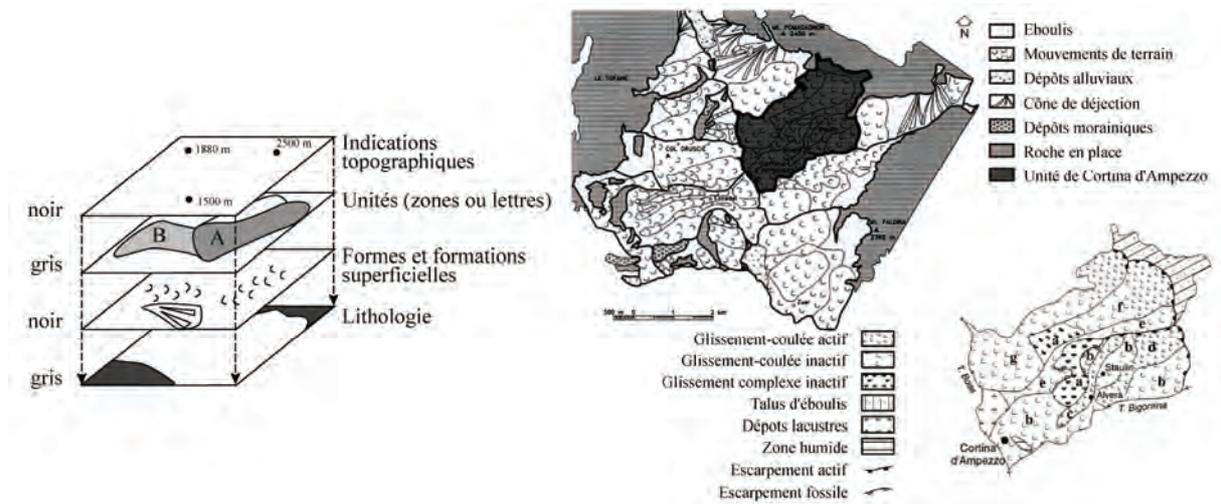


Fig. 2.18. Système de cartographie géomorphologique 'TESLEC' (adapté de Pasuto et Soldati, 1999)

2.1.2.4. Le système 'strasbourgeois'

Le système 'strasbourgeois' est issu des travaux menés depuis 1992 sur la cartographie morphodynamique au 1/10 000^{ème} pour le bassin de *Barcelonnette*. Le système met l'accent sur la dynamique des 'mouvements de versant' et sur les formes associées. Les processus actifs et leurs formations associées sont représentés. L'activité des 'mouvements de versant' est représentée par un dégradé de couleur rouge. Les cônes torrentiels et les 'badlands' sont cartographiés en bleu. Les indices d'activités (fissures, bourrelets, escarpements secondaires) sont représentés par des signes de même couleur. Les formes associées, peu ou pas actives, sont représentées en tirets. La topographique est suggérée par quelques courbes de niveaux maîtresses. La carte morphodynamique est claire et met l'accent sur les phénomènes d'instabilité et d'érosion (Fig. 19).

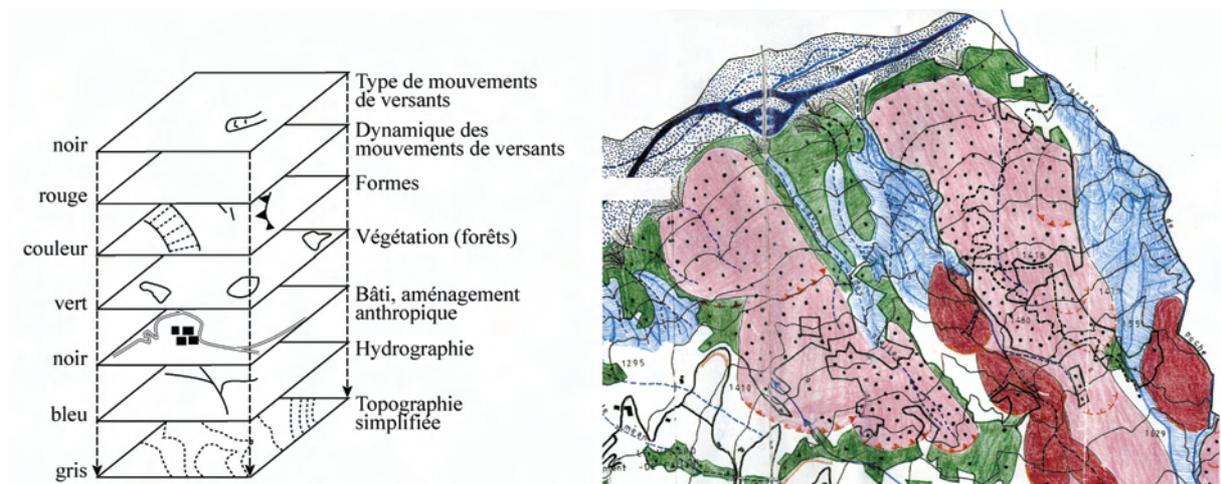


Fig.2.19. Système de cartographie géomorphologique 'strasbourgeois' (adapté d'Augier et Flageollet, 1992).

2.1.3. Les méthodes 'semi- automatiques' ou ' automatiques'

La plupart des cartes sont maintenant réalisées sous DAO (*Dessin Assisté par Ordinateur*) avec des légendes informatisées (Schoeneich et Imfeld, 1996 ; Reynard, 1997 ; Schoeneich, 1998 ; Schoeneich *et al.*, 1998). Certains auteurs ont tenté de les appliquer sous SIG (Pierrehumbert, 1998 ; Gentizon *et al.*, 2000), mais en raison de la difficulté de représentation des signes conventionnels les essais sont restés infructueux (van Westen, 1993). Cependant, en mode vecteur, en utilisant un système de codification approprié, il est possible d'obtenir une information géomorphologique de base fiable, pouvant être mise à jour aisément (van Westen, 1993 ; Gustavsson *et al.*, 2006). Des méthodes 'semi-automatiques' ou 'automatiques' performantes sous environnement SIG (van Westen, 1993 ; van Westen *et al.*, 2003) se fondent soit sur une segmentation du site en sous-unités grâce à des données exogènes (MNT par exemple), soit sur une extraction automatique à partir d'un MNT, d'images satellites et d'analyses de photographies aériennes. Le but est d'obtenir rapidement une information crédible sur un large territoire (van Asselen et Seijmonsbergen, 2006).

2.1.3.1. Le système d'unités homogènes

Le système d'unités homogènes est développé par van Westen (1993) sur la base des travaux de Verstappen et van Zuidam (1968). Il s'agit de segmenter le terrain en unités géomorphologiques homogènes (TMU, *Terrain Mapping Unit*). L'unité est fondée sur la lithologie, la morphogenèse, les processus et les formations superficielles. Chaque polygone est attaché à une base de données relationnelle et un code est affecté pour chaque combinaison d'unité homogène. Pour ne pas multiplier les codes et pouvoir travailler à plusieurs échelles, plusieurs niveaux d'unités homogènes peuvent être créés. Par exemple, van Westen (1993) en crée trois fondés sur :

- (i) Le(s) processus morphogénétique(s) (niveau 1) ;
- (ii) Le(s) processus morphogénétique(s) + les formes principales (niveaux 2) ;
- (iii) Le(s) processus morphogénétique(s) + les formes principales + la géomorphologie de détail (niveaux 3 ; Fig. 2.20).

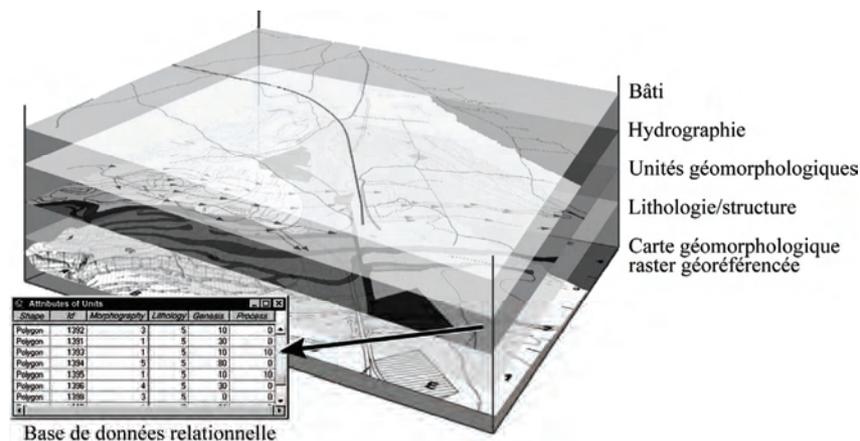


Fig. 2.20. Système de cartographie géomorphologique par unité homogène sous environnement SIG (adapté de Gustavsson *et al.*, 2006).

Gustavsson *et al.* (2006) ont ajouté des informations sur la lithologie et la structure. Ce système, axé processus/morphogenèse, propose une codification par couleur et par lettre des unités cartographiées. Les deux systèmes sont clairement orientés SIG, permettant de multiplier l'information disponible dans les bases de données relationnelles avec une rapide intégration dans le cadre d'analyses spatiales descriptives ou statistiques (van Westen *et al.*, 2003 ; Miska et

Jan, 2005). Toutefois, graphiquement, des améliorations sont nécessaires : peu de symboles géomorphologiques sont encore disponible sous SIG (Gustavsson *et al.*, 2006) et la carte imprimée est bien moins lisible qu'une carte classique dessinée manuellement.

2.1.3.2. Les systèmes d'extraction

Les systèmes d'extraction d'informations géomorphologiques **semi-automatiques** (supervisés, orientés objets) et/ou **automatiques** se développent. La disponibilité et le moindre coût des techniques Laser embarqué (*LiDAR*) ainsi que le développement de logiciels informatiques '*orientés objet*' (*e-Cognition*®) permettent de s'affranchir de techniques traditionnelles de collecte d'information (observations de terrain, acquisition de photographies aériennes, etc.) et de cartographier des territoires encore jusque là inaccessibles (Jones *et al.*, 2007). **La combinaison de cette technique avec les SIG a le triple avantage :**

- (i) **De permettre d'extraire des formes de terrain** de manière **semi-automatique** (van Asselen et Seijmonsbergen, 2006) ou automatique (Jones *et al.*, 2007) ;
- (ii) **D'indiquer les secteurs aux formations superficielles similaires ;**
- (iii) **D'extraire les secteurs aux processus et aux formes similaires.**

La connaissance experte requise pour pouvoir interpréter les résultats est relativement faible (van Asselen et Seijmonsbergen, 2006). Enfin, la précision spatiale des polygones extraits est largement plus fiable qu'une cartographie manuelle, qu'elle soit obtenue manuellement sous *DAO* ou sous *SIG*. En outre, des informations complémentaires peuvent être apportées si d'autres variables sont disponibles ou ajoutées pour le secteur d'étude, améliorant le processus de classification. Ces nouvelles techniques restent encore à tester sur des sites à la morphologie complexe, notamment en montagne.

2.2. Une cartographie morphodynamique adaptée pour la recherche

Le choix du système (ou mode) de représentation est guidé par la nécessité : (i) de représenter le plus simplement mais fidèlement possible les différents processus et leur activité ; (ii) d'aider à la compréhension des formes du relief et de leur fonctionnement/évolution ; (iii) d'aider à la formalisation de scénarios d'évolution (en particulier pour la cartographie '*expert*') ; (iv) de pouvoir disposer des informations (données d'entrée) nécessaires et suffisantes, et non superflues pour les différentes modélisations spatiales envisagées (cf. *Chap. 1, §.3*) ; (v) d'utiliser un environnement *SIG* avec une numérisation des informations par couches successives sans analyse de sensibilité.

La méthodologie mise en œuvre est centrée sur les processus morphodynamiques et les formations associées en privilégiant les '*mouvements de versant*' passés et actuels. Les systèmes aux légendes trop complexes ont été éliminés ainsi que les classifications automatiques en raison de leur caractère encore trop expérimental. **Le choix d'une combinaison entre le système '*champenois*' et le système '*strasbourgeois*' s'est imposé en raison :**

- (i) **De l'aspect pratique du système '*champenois*'** notamment par son système d'une couleur par processus et du système de dégradé dans la couleur suivant l'âge et l'activité estimés des différents processus ;
- (ii) **De l'aspect orienté '*instabilités de versant*' du système '*strasbourgeois*'** qui facilite le passage vers la cartographie de la susceptibilité et l'aléa.

Sont décrits, ci-après, les modes de représentations graphiques des différents niveaux d'information des processus morphogénétiques, des degrés ou classes d'activité et âges relatifs, et des formes et formations associées.

2.2.1. Processus morphogénétiques

Les processus morphogénétiques qui traduisent la dynamique des formes de terrain sont représentés par des couleurs. Sept processus morphogénétiques sont retenus (Fig. 2.21) : (i) les 'mouvements de versant', (ii) l'action glaciaire, (iii) l'action périglaciaire, l'action des eaux courantes en distinguant (iv) l'action torrentielle de (v) l'action alluviale, (vi) l'action chimique (dissolution et altération des roches) et (vii) l'action anthropique. Une couleur est attribuée pour chacun des processus, ces couleurs sont inspirées de celles utilisées pour la RCP 77 et pour la méthode 'champenoise'. Toutefois, l'accent étant mis sur les instabilités gravitaires, la couleur rouge plus voyante est réservée aux 'mouvements de versant'. Le bleu est utilisé pour l'action glaciaire et le violet pour les processus du domaine périglaciaire. Des couleurs vertes sont retenues pour l'action torrentielle et pour l'action alluviale, le jaune pour l'action chimique et le gris pour l'action anthropique.

Age estimé	Pléistocène		Holocène		Historique		Actuel
	20 000 B.P.		10 000 B.P.		150 B.P.		Présent
Degré d'activité	Fossile		Dormant (Latent)		Actif		
Mouvement de versant	[Rouge pâle]		[Rouge vif]		[Rouge vif]		[Rouge vif] Intermittent [Rouge vif] Continu
Action glaciaire	[Bleu pâle]		[Bleu vif]		[Bleu vif]		[Bleu vif]
Action périglaciaire	[Violet pâle]		[Violet vif]		[Violet vif]		[Violet vif]
Action fluviatile	[Vert pâle]		[Vert vif]		[Vert vif]		[Vert vif]
Action torrentielle	[Vert pâle]		[Vert vif]		[Vert vif]		[Vert vif]
Action chimique	[Jaune pâle]		[Jaune vif]		[Jaune vif]		[Jaune vif]
Action anthropique	[Gris pâle]		[Gris vif]		[Gris vif]		[Gris vif]

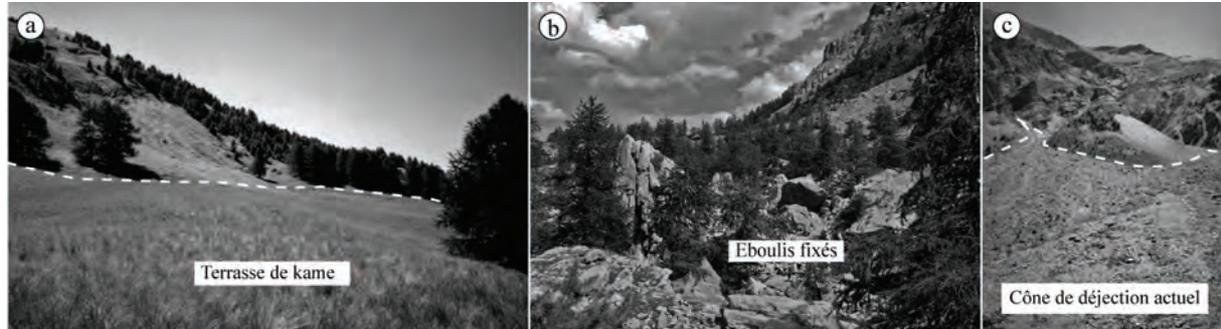
Fig. 2.21. Couleurs adoptées pour illustrer les processus morphogénétiques, leur activité et leur âge estimé.

Le degré d'activité des processus est distingué en fonction de l'âge et de la périodicité des phénomènes (Flageolet, 1996 ; Gueremy et Marre, 1996 ; Fig. 2.21). L'âge est estimé grâce au degré d'estompement des formes, selon les travaux paléogéographiques de Jorda (1993). Le distinguo entre les degrés d'activité s'effectue selon une gradation de la couleur du processus considéré : couleur pâle pour un processus éteint (fossile), couleur vive pour un processus encore actif. Trois degrés d'activité ont été retenus pour tous les processus cartographiés à l'exception des 'mouvements de versant' pour lesquels des nuances sont apportées selon les indicateurs retenus (cf. § 2.2.1.1) :

- (i) Les **processus éteints** ou **fossiles** correspondent à des événements anciens qui ne sont plus susceptibles de se produire dans des conditions climatiques et topographiques actuelles. Leur degré de fréquence et d'activité est nul. Les formes résultantes sont des formes éteintes ou fossiles (Fig. 2.22a). Néanmoins, elles peuvent être affectées par d'autres processus actuels. Par exemple un ancien tablier d'éboulis peut être soumis à un fort ravinement : dans ce cas à la couleur violet pâle, s'ajoutera, à l'endroit du processus érosif, la couleur vert foncé ;
- (ii) Les **processus latents (dormants)** sont susceptibles de se déclencher dans les conditions naturelles actuelles (climat, pente, etc., Fig. 2.22b). La périodicité n'est pas connue mais les formes laissent penser que leur fonctionnement est plus récent que celui des processus fossiles. Leur âge est généralement estimé de la fin du *Pléistocène*, de l'*Holocène* ou d'un passé proche, les couleurs sont plus vives que pour les processus fossiles ;

- (iii) Les **processus actifs** sont représentés par une couleur vive. Les formes associées sont bien visibles dans le paysage (Fig. 2.22c).

Afin, d'estimer l'activité des '*mouvements de versant*' observés, des indicateurs supplémentaires et plus précis ont été utilisés.



a. Terrasse de kame, forme fluvio-glaciaire issue de la vidange d'un lac de retenue lors d'une déglaciation post- Holocène. b. éboulis fixés ; ils devaient fonctionner lors des phases plus froides et humides du milieu de l'Holocène. Actuellement, ces dépôts sont fixés par les pins. c. Cône de déjection actuel ou actif.

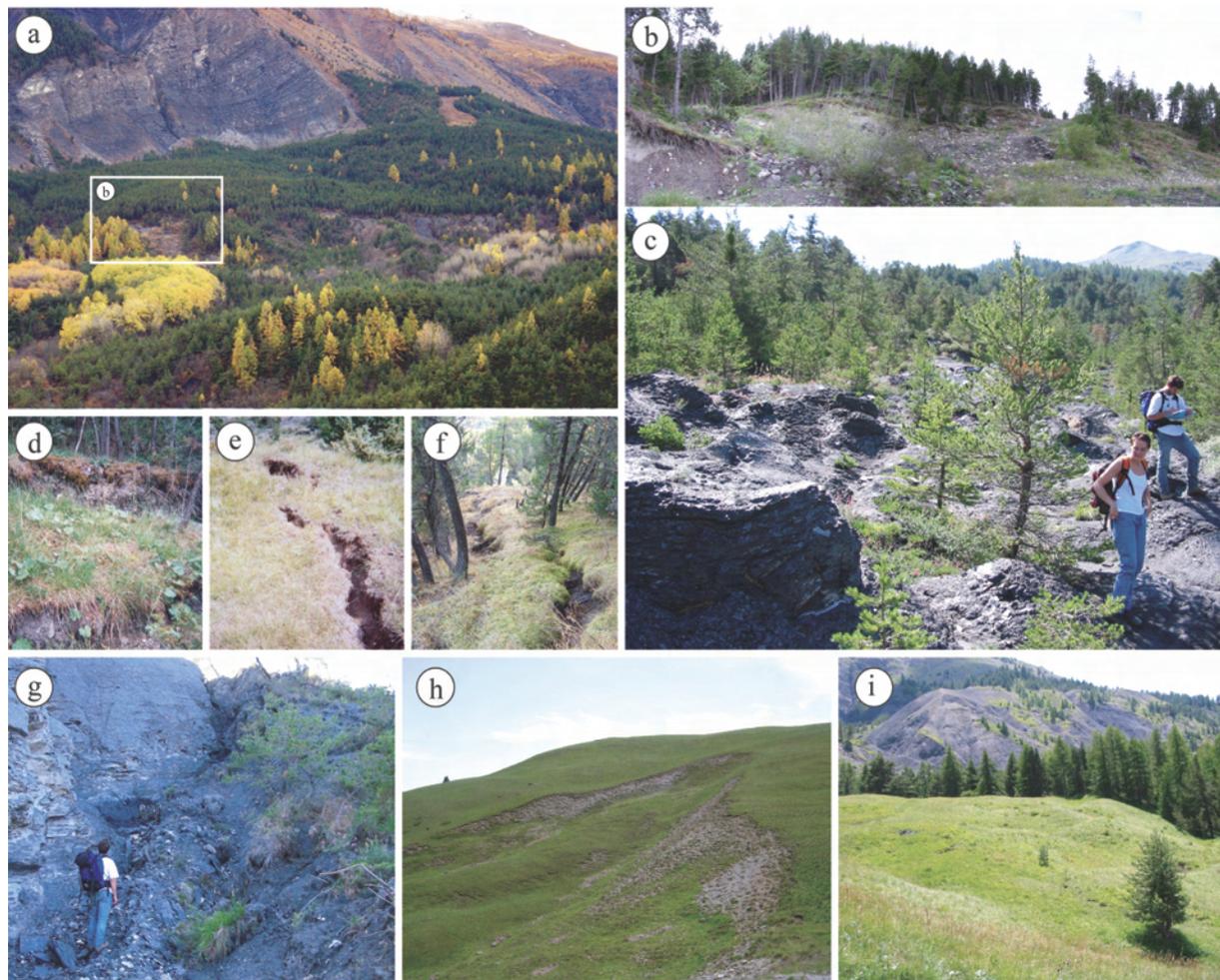
Fig. 2.22. Exemples de formes issus de processus à différents degrés d'activité.

2.2.1.1. Les indicateurs d'activité des '*mouvements de versant*'

Les concepts et terminologie généralement adoptés pour décrire l'activité des '*mouvements de versant*' seront trouvés en annexe (Annexe 1). La démarche proposée pour qualifier l'activité repose sur la description et l'analyse de trois indicateurs : **la morphologie, l'état de la végétation, la perturbation du réseau hydrographique**. D'autres indices ont été observés, comme les zones humides ou l'état des aménagements. L'âge des phénomènes n'est pas ou peu utilisé car la date de déclenchement est rarement connue de manière précise. Dans le cas contraire, cette information supplémentaire est donnée ponctuellement.

a. La morphologie

La relation indicateurs morphologiques/activité/âge a été mise en avant par les géomorphologues dans les années 80 (Palmquist et Bible, 1980 ; Crozier, 1984 ; Wieczorek, 1984 ; Gueremy, 1987 ; M^c Calpin et Rice, 1987 ; Einstein, 1988 ; Keaton et Degraaf, 1996). Plus la morphologie (les formes) est fraîche, plus le phénomène est considéré comme actif. Les formes comme les escarpements de tête, les fissures de régression en amont, les rides marquées, les blocs disloqués, une topographie fortement chaotique sont alors considérés comme des marqueurs de l'activité récente et forte d'un mouvement. **En effectuant un '*état de surface*' minutieux, il ainsi est possible d'établir un état de fraîcheur des formes** (Fig. 2.23). Les différents états de dégradation sont ensuite comparés les uns aux autres, afin d'obtenir une échelle d'activité relative.



a. Secteur de Bois Noir, les mouvements translationnels complexes de ce secteur sont visibles. Les escarpements ainsi que les corps des mouvements affectent le versant et laissent une topographie chaotique dénudée. b. Escarpement du mouvement translationnel de Bois Noir déclenché en avril 1993. c. Corps chaotique d'un glissement complexe dans le secteur du torrent de Poche. La végétation reprend ses droits, le mouvement est encore actif par intermittence, les arbres portent les stigmates des accélérations du phénomène. d. Escarpements mineurs de glissements rotationnels successifs. e. Fissure de traction en amont du glissement-coulée de Poche. f. Fissures de régression en amont des mouvements translationnels de Bois Noir. g. Bourrelet latéral de friction du glissement-coulée de Poche. h. Escarpement atténué d'un glissement rotationnel en amont de Soleil-Bœuf (torrent de Faucon). i. Glissement rotationnel dormant aux formes atténuées.

Fig. 2.23. Les indicateurs d'activité : la morphologie.

b. La végétation

La végétation est un marqueur apprécié sur le terrain (Fig. 2.24). Elle apporte des témoignages d'instabilités actuelles ou passées. Une forêt ivre, des arbres morts, déracinés ou inclinés vers l'amont, une végétation différente sont autant de témoins d'une activité récente et de localisation d'un phénomène. A l'inverse, une végétation non perturbée, un recouvrement d'escarpement par une végétation herbacée, des arbres redressés laisseront penser à une activité passée du mouvement. Une végétation hygrophile sur un phénomène stabilisé suggèrera une forte humidité et peut-être un risque de réactivation du mouvement. Enfin, une analyse dendrochronologique permet de connaître les périodes d'activité intense (Weiss, 1988 ; Corominas et Moya, 1999).



j. Le port caractéristique de jeunes pins témoigne de l'activité intermittente d'un mouvement translationnel. k. Forêt ivre dans le secteur actif de Bois Noir. l. Forêt ivre en amont du secteur de la Frache. m et n. Les pistes témoignent de l'activité passé ou récente des mouvements de terrain (secteur de Bois Noir).

Fig. 2.24. Indicateurs d'activité : la végétation et les pistes.

c. Le réseau hydrographique

La perturbation des versants par les torrents est considérée comme un critère d'instabilité. En effet, les cours d'eau par leur mobilité et leur pouvoir érosif engendrent des modifications des berges. La suppression de butée engendrée par l'érosion des berges peut provoquer le déclenchement d'un '*mouvement de versant*' ou sa réactivation. Ainsi, le réseau hydrographique est inclus dans les facteurs d'activité des '*mouvements de versant*'. Par exemple, si le cours d'eau est éloigné du phénomène (*i.e.* le pied du glissement étant séparé du torrent par une terrasse) il est admis que le glissement se stabilisera (Palmquist et Bible, 1980 ; M^c Calpin, 1984).

La figure 2.25 illustre les conséquences de l'érosion d'un torrent sur un versant selon un rythme érosif régulier ou irrégulier. Schématiquement, un mouvement fraîchement déclaré ou réactivé peut imposer son activité au cours d'eau en provoquant un changement de direction. Peu à peu, le cours d'eau reprendra son travail érosif, sapera à nouveau la base du mouvement provoquant une réactivation ou construira une terrasse protégeant le pied du mouvement.

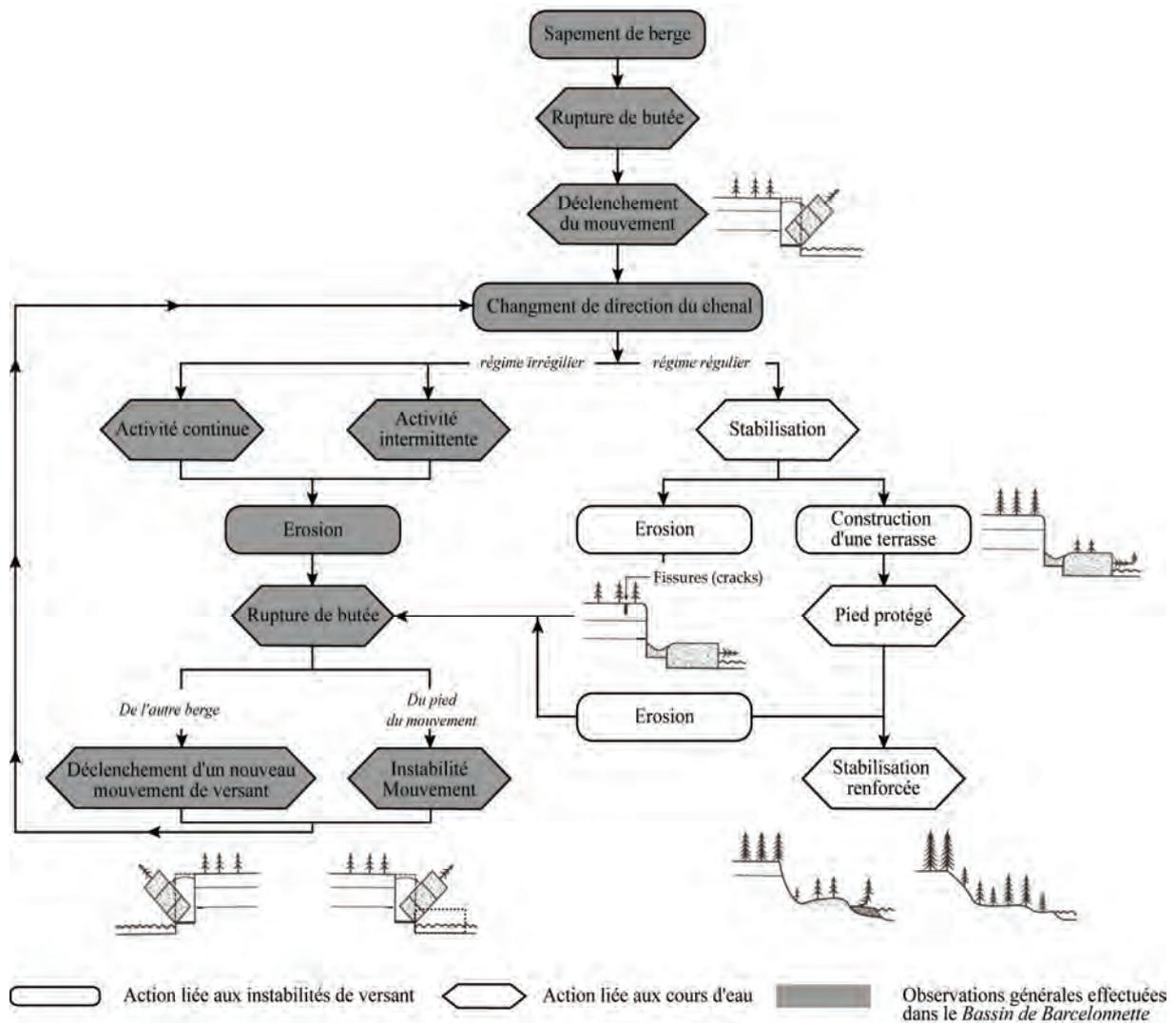


Fig. 2.25. Schéma conceptuel de la relation torrents 'mouvements de versant' dans le bassin de Barcelonnette (dessins adaptés de Dikau et al., 1996).

2.2.1.2. Les degrés d'activité des 'mouvements de versant'

Face au manque d'information sur les dates de déclenchement ou de réactivation des phénomènes, l'échelle des degrés d'activité doit souvent être simplifiée (Maquaire, 2002). Ainsi, les classes d'activité ont été choisies de manière subjective, selon les observations répertoriées pour chaque mouvement et une littérature abondante sur le sujet. Quatre classes d'activité ont été déterminées : *actif permanent*, *actif intermittent*, *latent (dormant)* et *fossile*. La figure 2.26 présente les différents degrés d'activité choisis en fonction de la morphologie (fraîcheur des formes). Elle met en relation ces quatre degrés d'activité avec un âge estimé du déclenchement et/ou des périodes de retour.

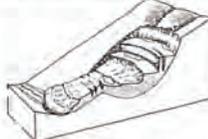
ACTIVITE	INACTIF			ACTIF	
	Fossile	Latent (dormant)		Intermittent	Continu
AGE ESTIME	Pléistocène 20 000 B.P.	10 000 B.P.	Holocène	Historique 150 B.P.	Actuel Présent
PERIODE DE RETOUR	Inconnue			10 ans	1 an 1 jour
MORPHOLOGIE	 Les formes sont légèrement perceptibles, il ne reste que des traces morphologiques du phénomène	 Les formes sont modifiées par un drainage de surface, de l'érosion, le glissement se recouvre de végétation.	 La morphologie reste différente des alentours, cependant, les formes sont plus douces que précédemment.	 Formes fraîches, la morphologie est distincte des alentours, les fissures sont bien visibles.	

Fig. 2.26. Légende adoptée pour les degrés d'activité des 'mouvements de versant' selon caractéristiques morphologiques associées (adapté de M^c Calpin, 1984).

2.2.2. Formes et formations associées

Les formes et les formations sont représentées en signes noirs (Annexe 2.2). Ils sont inspirés par des taxons décrits par Joly (1997) et Reynard *et al.* (2005) et adaptés au site d'étude. Chaque famille de formes et formations est dérivée des processus morphogénétiques retenus. On trouve donc : (i) les formes et formations de 'mouvements de versant', (ii) les formes et formations dues à l'action glaciaire, (iii) les formes et les formations dues à l'action périglaciaire, (iv) les formes et formations torrentielles, (v) les formes et formations alluviales, (vi) les autres types de formes et formations, (vii) les aménagements humains.

De même, les formations affectées par les 'mouvements de versant' sont signalées par un système de lettres : **Ma** pour marnes noires ; **F** pour les flyschs ; **Mo** pour les moraines ; **Cm** pour les colluvions sur marnes ; **Cf** pour les colluvions sur flyschs ; **E** pour les éboulis ; **A** pour les formations alluviales ou torrentielles. Si le mouvement s'est déclenché dans deux formations différentes les deux lettres correspondantes seront apposées sur le phénomène avec dans l'ordre les formations superficielles et le substrat²⁵.

2.2.3. Du document papier au format numérique

Quatre étapes sont suivies pour passer du document papier à un document numérique prêt à servir de base à la production de couches vectorielles générées sous environnement SIG :

- (i) La carte est d'abord levée sur le terrain à l'échelle du 1/5 000^{ème} ;
- (ii) Les diverses informations sont mises au propre sur des planches papier à l'échelle du 1/10 000^{ème} (agrandissement IGN des cartes topographiques au 1/25 000^{ème}) pour les aplats de couleurs et sur un film plastique superposé pour les signes en noirs représentant les formes et les formations superficielles ;
- (iii) Les cartes papier sont mises en format vectoriel sous DAO (Adobe Illustrator ®), soit en scannant les cartes, soit en les dessinant directement à l'écran. La seconde méthode a été préférée afin d'éviter de trop grandes déformations dues au scanner ;
- (iv) Les cartes vectorielles sont transformées en raster, puis géoréférencées et exportées sous SIG.

²⁵ Par exemple pour un mouvement déclenché dans des moraines et dans les flyschs → **MoF**.

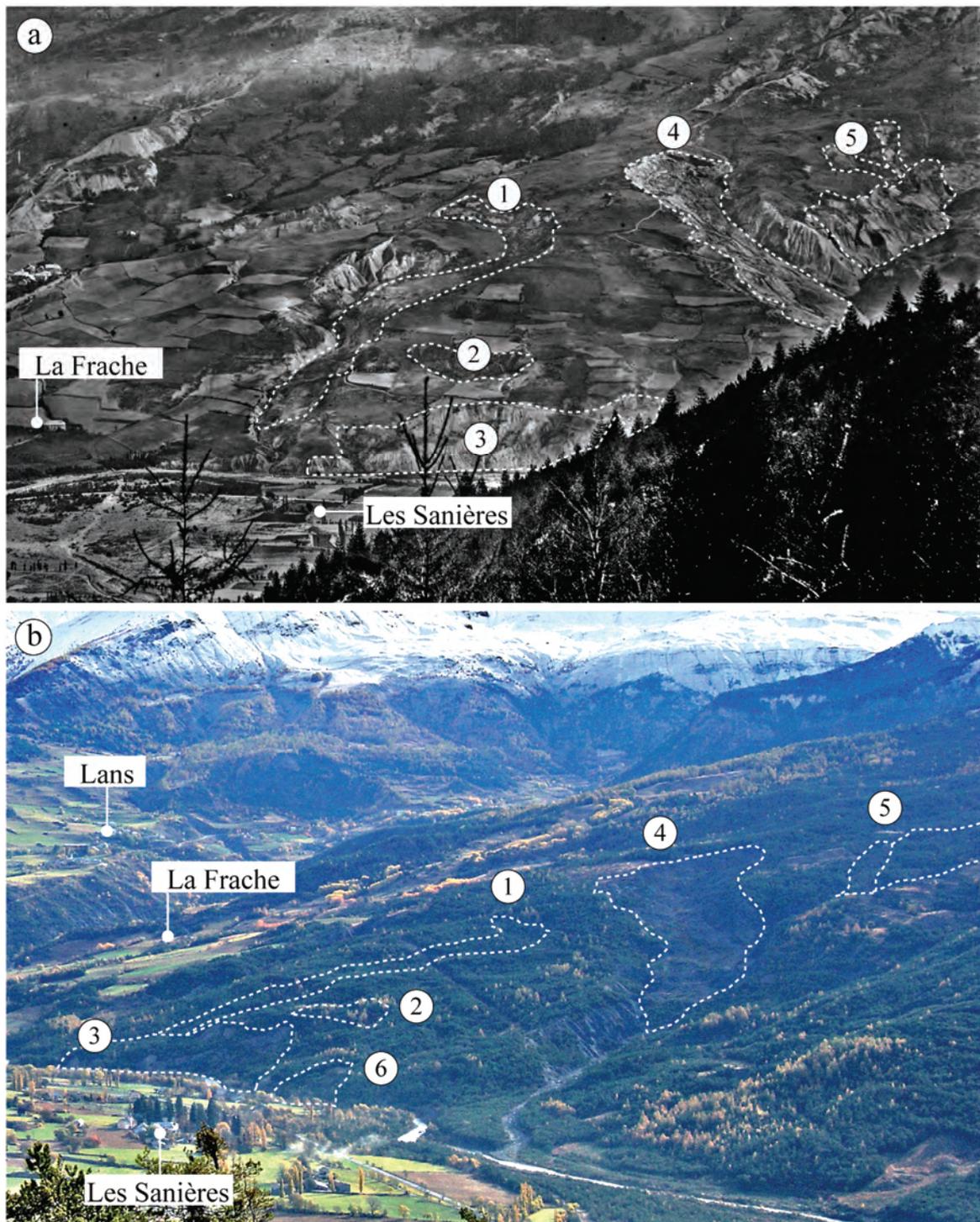
La carte morphodynamique sert de base pour la digitalisation des 'mouvements de versant' (variable à modéliser, *VM*) **mais aussi pour celle des variables prédictives** (*VP*) comme les formations superficielles, les affleurements rocheux, etc. Ces différentes variables prédictives sont détaillées dans le chapitre 4.

2.3. Application aux sites de recherches

2.3.1. Le bassin de Barcelonnette (site principal)

Pour le bassin de *Barcelonnette*, la carte a été dressée sur la base de campagnes de terrain effectuées entre juillet 2002 et octobre 2004. Les informations liées aux formes et aux formations superficielles ont été localisées par un *GPS* de randonnée (type *Garmin*®, précision de 5 m en *x* et en *y*) ou par un *dGPS* (type *Trimble*®, précision au cm en *x* et en *y*). Les documents utilisés pour compléter ces levés de terrain sont :

- (i) Les bases de données *IGN* : la *BD Carto* ® (*IGN*, 2006b), la *BD Alti* ® (*IGN*, 1998), la *BD Ortho* ® (*IGN*, 2000, 2004) ;
- (ii) Plusieurs jeux de photographies aériennes des années 1956 (totalité du bassin), 1971 (surface partielle du bassin), 1978 (surface partielle du bassin), 1982 (totalité du bassin), 1991 (surface partielle du bassin), 1995 (surface partielle du bassin), 1997 (surface partielle du bassin), 2000 (totalité du bassin) et la carte géologique (*BRGM*, 1974) ;
- (iii) Les travaux de recherches universitaires de cartographie géomorphologique et/ou morphodynamique (Légier, 1977 ; Augier et Rebmann, 1990, Augier et Flageollet, 1992 ; Kirchoffer, 1994 ; Koehle, 1994 ; Amiot et Nexon, 1995 ; Bossu, 1996 ; Quintlé, 1995, 1996 ; Manne et Schwinn, 1998 ; Rickenmann, 1999 ; Pierre et Remaître, 1999 ; Weber, 2001 ; Beck, 2002) ;
- (iv) Les archives du *RTM* qui comportent de nombreuses photographies du début du 20^{ème} s. Toutefois, les clichés sont surtout centrés sur les torrents corrigés. Quelques panoramas du versant *Ubac* sont disponibles, mais ils ne sont pas toujours exploitables et fournissent une information essentiellement qualitative (Fig. 2.27).



- | | | |
|-------------------------------------|---|------------------------------------|
| ① Mouvement translationnel complexe | ② Mouvement rotationnel | ③ Mouvements rotationnels de berge |
| ④ Glissement-coulée de Poche | ⑤ Mouvements translationnels complexes (1894 : érosion ?) | ⑥ Mouvement rotationnel de berge |

a. Versant de Poche en 1894 (Cliché RTM, 1894). Les pentes douces sont cultivées, les pentes plus fortes sont instables ou ravinées. b. Le même versant en 2004 : la plupart des 'mouvements de versant' existaient déjà en 1894. Si la forêt plantée par les services du RTM joue bien son rôle face au ravinement, elle apparaît peu performante contre les mouvements déclarés et actifs.

Fig. 2.27. Panorama du versant de Poche en 1894 et en 2004.

Les figures 2.28 et 2.29 présentent la légende ainsi qu'un extrait de la carte morphodynamique.

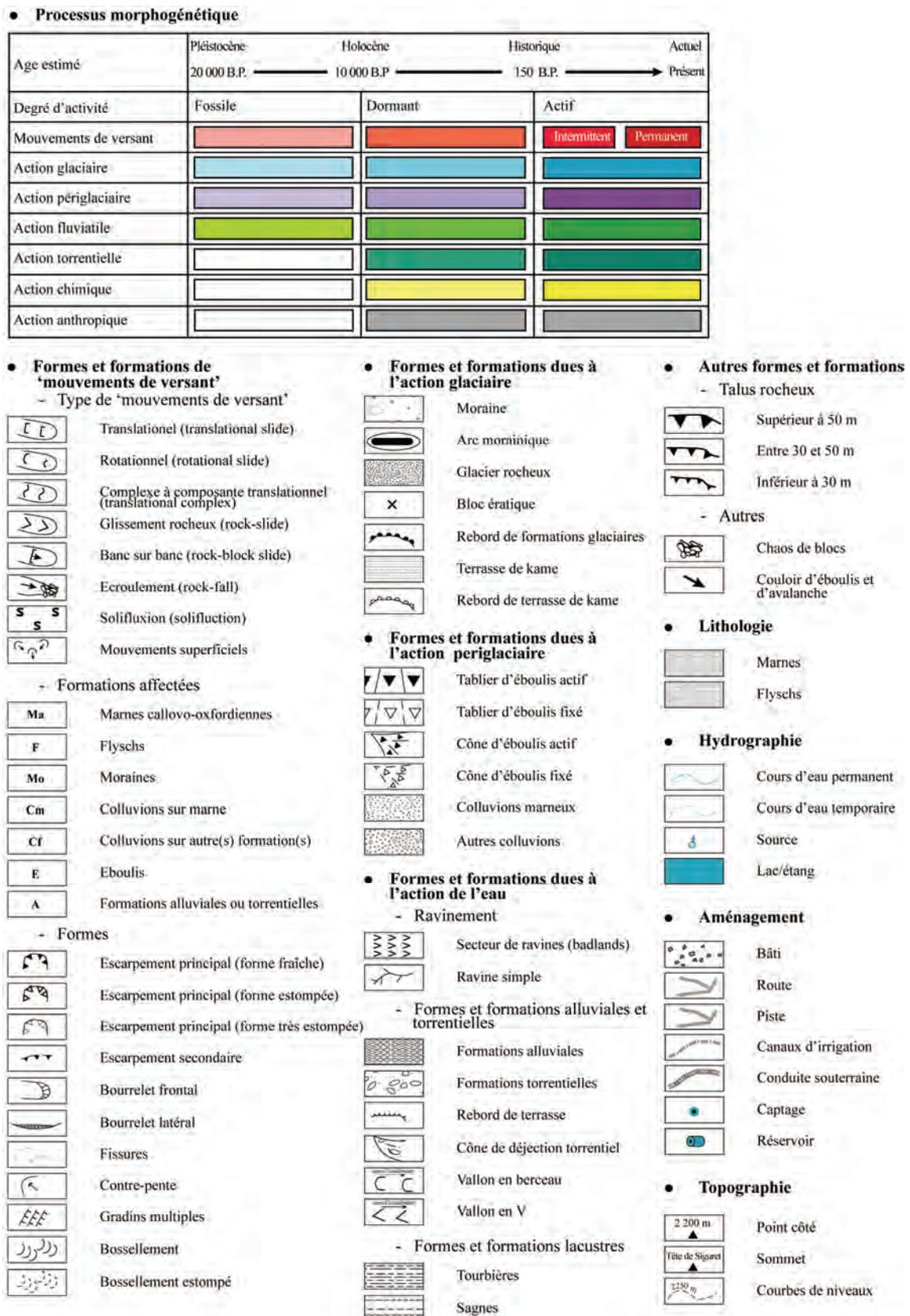
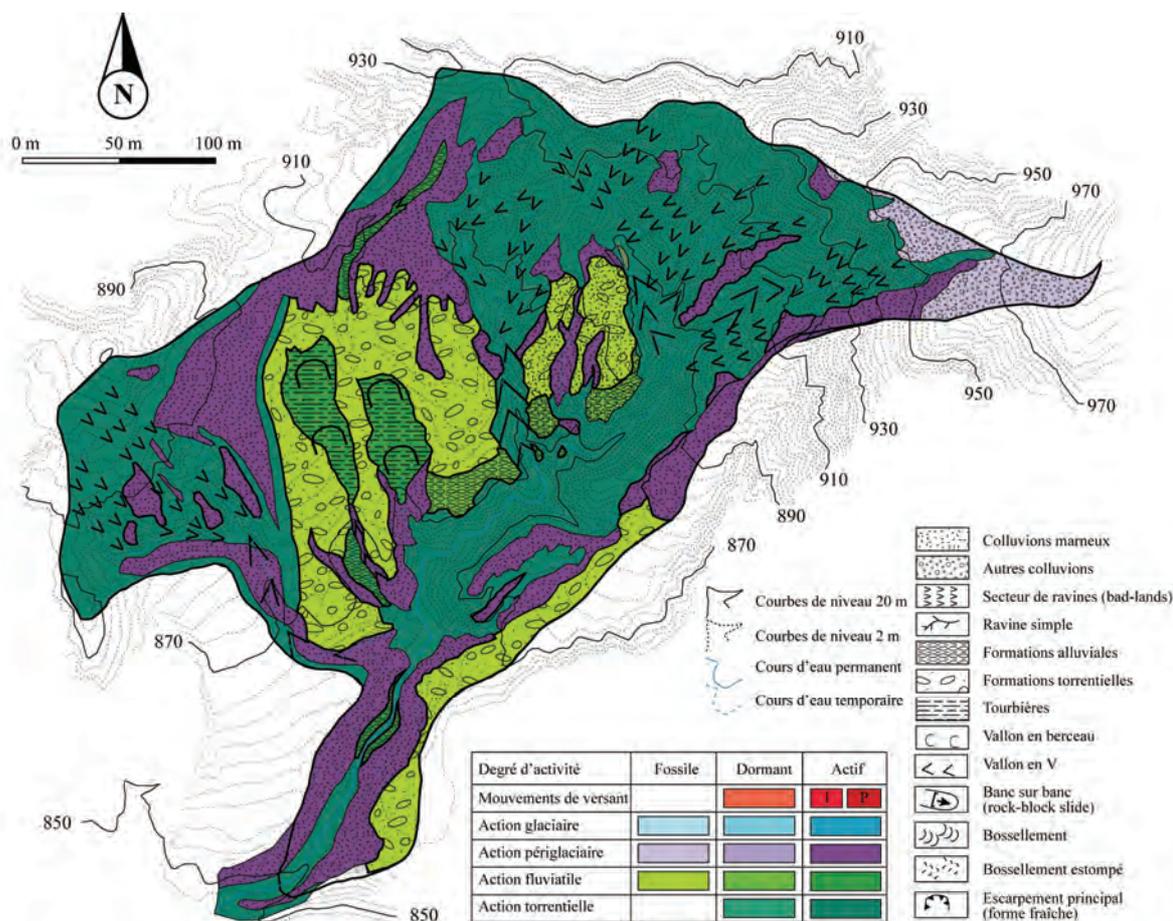


Fig. 2.28. Légende de la carte morphodynamique.



I = intermittent ; P = Permanent. La légende est adaptée à la légende cartes des formations superficielles levées au 1/2 000^{ème} par Thiery (2000).

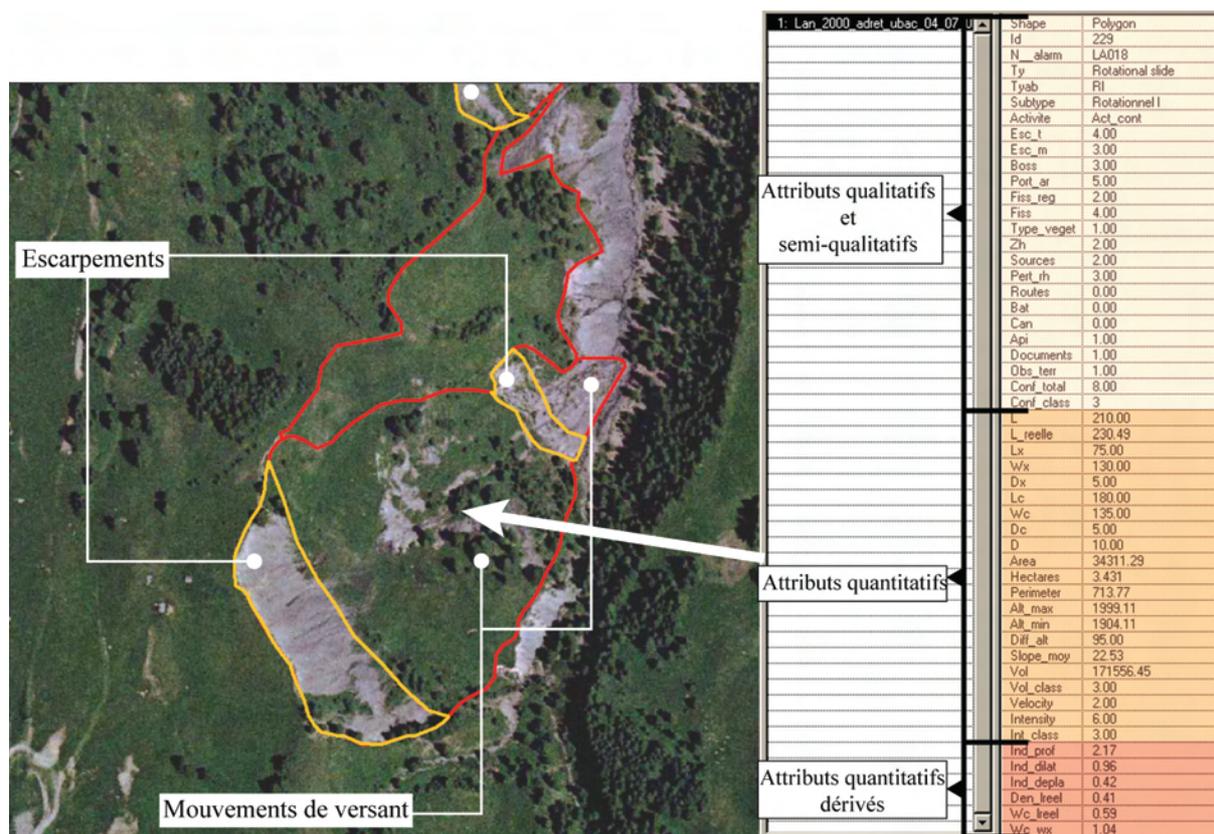
Fig. 2.30. Carte morphodynamique du BVRE du Moulin (adapté de Thiery, 2000).

2.4. Bases de données spatiales et attributaires 'mouvements de versant'

La surface totale des 'mouvements de versant' a d'abord été digitalisée (BD 2000). Puis, sur la base de ce polygone, une deuxième base de données spatiale représentant la zone de départ (d'ablation) de chaque phénomène est créée (Fig. 2.31).

Chaque objet est décrit et porte un numéro d'identification (ID). Deux autres bases de données spatiales ont été créées suite à cette numérisation : une base de données créée à partir des photographies orthorectifiées de 1982 (BD 82) et une base de données créée à partir des photographies orthorectifiées de 1971 (BD 71).

Trois bases de données attributaires peuvent être reliées à la BD 2000. Centrées sur les phénomènes du versant Ubac (site de calage), elles sont détaillées ci-après.



Chaque polygone digitalisé est relié à trois bases de données attributaires : une base de données principale dont les attributs sont qualitatifs et semi-qualitatifs, une base de données aux attributs quantitatifs (paramètres morphométriques) et une base de données aux attributs dérivés de la base précédente. La base de données spatiale concernant les escarpements ne contient que les informations de base des 'mouvements de versant' (ID, N°, Type).

Fig.2.31. Cartographie et base de données relationnelles des 'mouvements de versant' et des escarpements dans un environnement SIG.

Le choix des attributs d'une base de données est généralement subjectif et fait l'objet de discussions et de confrontations permettant de définir les meilleures variables qualificatives nécessaires. Il s'agit de disposer d'une série de variables la plus précise possible et pouvoir, par la suite valider les informations retenues pour qualifier les 'mouvements de versant' observés par des analyses statistiques descriptives et multidimensionnelles (cf. Chap. 3),

Les informations reportées pour chaque objet sont décomposées en **trois bases de données** attributaires soit : (i) **une base de données attributaires avec des informations qualitatives et semi-qualitatives**, (ii) **une base de données aux informations quantitatives** et, (iii) **une base de données dérivées des informations quantitatives de la base précédente**.

Pour la **base de données qualitative et semi-qualitative**, les attributs sont :

- (i) Le type de phénomène (dérivé de la typologie de la carte géomorphologique) ;
- (ii) L'activité déterminée de manière experte ;
- (iii) Une série d'attributs correspondant à l'état de surface de l'objet (état de dégradation de l'escarpement, état des fissures de distension et traction, fissures de régression, état du bossellement, port des arbres, existence de zones humides –sagnes-, présence de sources) ;
- (iv) La végétation observée sur l'objet ;

- (v) La dégradation d'objets anthropiques éventuellement présents (routes, bâtis, canalisations) ;
- (vi) Les indices de confiance cartographique (existence des phénomènes sur d'anciens documents, observation par analyse de photographies aériennes, observation de terrain).

Les informations liées à l'état de surface permettent de qualifier l'activité des objets observés sur la base des différents indicateurs décrits précédemment.

Pour la deuxième base, dite **base de données quantitatives**, les attributs reprennent des informations mesurées sur le terrain, déduites ou extrapolées des différents documents photographiques ou cartographiques. Ces attributs sont les suivants :

- (i) La longueur projetée de l'objet (m) ;
- (ii) La longueur réelle (m) de l'objet tenant compte de sa pente moyenne (°) ;
- (iii) La longueur projetée de la zone de départ (ou d'ablation ; m) ;
- (iv) La largeur de la zone de départ (ou d'ablation ; m) ;
- (v) L'épaisseur estimée des matériaux avant la rupture pour la zone de départ (m) ;
- (vi) La longueur projetée de la zone d'accumulation (m) ;
- (vii) La largeur de la zone d'accumulation (m) ;
- (viii) L'épaisseur estimée du matériau déplacé (m) ;
- (ix) La surface des objets (m²) ;
- (x) L'altitude amont de l'objet (m) ;
- (xi) L'altitude aval de l'objet (m) ;
- (xii) Le dénivelé de l'objet ;
- (xiii) Le périmètre de l'objet (m) ;
- (xiv) La pente moyenne (°) ;
- (xv) Le volume estimé de l'objet (m³) ;
- (xvi) La vitesse estimée de l'objet (par classes estimées ; Cruden et Varnes, 1996) ;
- (xvii) L'intensité (volume X vitesse) du phénomène estimé (par classes).

De cette deuxième base de données quantitatives, plusieurs informations sont dérivées. Ces informations sont regroupées dans une troisième base **de données quantitatives dérivées** dont les attributs sont :

- (i) Un indice de profondeur ;
- (ii) L'indice de dilatation ;
- (iii) L'indice de déplacement ;
- (iv) L'indice de ténuité ;
- (v) L'indice d'écoulement plastique ;
- (vi) L'indice de largeur de la zone d'accumulation sur la longueur totale ;
- (vii) L'indice de largeur de la zone d'ablation sur la longueur totale ;
- (viii) L'indice de largeur de la zone d'ablation sur la largeur de la zone d'accumulation.

Les indices (i), (ii), (iii), (iv), et (v) sont repris des travaux de Crozier (1973). Les indices (vi), (vii) et (viii) sont repris des travaux de Quintlé sur la cartographie des '*mouvements de versant*' dans le bassin de *Barcelonnette* (Quintlé, 1995 et 1996). Grâce à ces attributs, il est possible de qualifier les '*mouvements de versant*' avec d'avantage d'objectivité que ce que permet la méthode '*experte*'. Les paramètres morphométriques seront analysés par la suite (cf. *Chap. 3*). Ils permettent

une classification, dans la mesure où les classes de valeurs obtenues sont rapportées aux différents types de mouvements.

3. CONCLUSION DU CHAPITRE 2

La description des caractéristiques physio-géographiques générales (caractéristiques morphologiques, climatiques et anthropiques) **des deux sites d'étude de Barcelonnette et de Draix montre que leurs contextes géologique et géomorphologique sont assez proches.** Ces sites sont particulièrement intéressants pour la recherche envisagée en raison de l'importance et de la diversité des '*mouvements de versant*'.

La grande superficie du bassin de Barcelonnette permet de disposer d'un site de recherche suffisamment vaste pour y localiser un site de calage (versant *Ubac*) **et un site de validation** (versant *Adret*) aux dimensions suffisantes et représentatives des phénomènes observés. Ainsi, **le site principal de la recherche (site de calage) correspond à une partie représentative du versant Ubac de 100 km² environ**, dans lequel les '*mouvements de versant*' sont assez nombreux (plus de 300 '*mouvements de versant*' de tous types), **permettant ainsi d'établir des règles expertes et statistiques valables pour appliquer les différentes méthodes de cartographie de susceptibilité choisies au chapitre 1.** Le versant *Adret* (site de validation) correspond à un ensemble de trois bassins versants qui ont été étudiés par Remaître (2006) et dont l'inventaire des '*mouvements de versant*' étaient déjà établi.

Malgré l'opposition entre les pentes relativement douces du versant *Ubac* et les pentes un peu plus raides du versant *Adret*, **les informations relevées pour les phénomènes des deux versants semblent similaires pour pouvoir obtenir des résultats transposables entre les deux sites.**

Il s'agit donc maintenant de décrire et d'analyser plus précisément ces sites de recherche pour proposer des hypothèses réalistes relatives aux différents facteurs de prédisposition et aux mécanismes de déclenchement. Pour se faire, **il est nécessaire de déterminer une typologie des phénomènes observés commune à chaque site et de choisir un jeu de données optimum afin de caractériser ces facteurs de prédisposition pour chacun des types de phénomènes.**

Ces sites seront décrits précisément dans le troisième chapitre, en s'appuyant sur des extraits de la carte morphodynamique à l'échelle du 1/10 000^{ème}, dont les principes de réalisation ont été exposés précédemment.

PARTIE II : TYPOLOGIE DES PHENOMENES ET VARIABLES RETENUES

La **deuxième partie** est consacrée au choix des variables à retenir pour les différentes approches de cartographie. Sont successivement décrites les variables à modéliser (*i.e.* les '*mouvements de versant*') puis les variables prédictives (*i.e.* les facteurs de prédisposition). Avant d'utiliser une stratégie spécifique fondée sur le croisement des variables à modéliser et des variables prédictives, les problèmes relatifs à leur qualité et à leur choix sont discutés.

Le **troisième chapitre** décrit plus précisément les caractéristiques géographiques et morphologiques du site principal (versant *Ubac* et versant *Adret* du bassin de *Barcelonnette*) en se fondant sur la cartographie morphodynamique. Une typologie et une description synthétique des '*mouvements de versant*' du bassin de *Barcelonnette* sont ensuite présentées. La description permet d'analyser des caractéristiques morphologiques et morphométriques de chaque type de phénomènes du site de calage (versant *Ubac*). Ces analyses sont discutées afin de démontrer dans quelles mesures certains attributs peuvent aider à qualifier les '*mouvements de versant*' du secteur étudié afin d'établir un premier jeu de variable(s) à modéliser.

Les variables prédictives sont présentées dans le **quatrième chapitre**. Les différentes caractéristiques (acquisition, résolution et nomenclature) de chaque variable sont définies. Les données disponibles sont comparées à celles produites spécifiquement pour cette recherche, en confirmant une certaine différence entre les versants *Adret* et *Ubac* du bassin de *Barcelonnette*. Ce chapitre ouvre sur une discussion à propos du choix des variables à retenir.

Le **cinquième chapitre** est consacré aux choix des différentes variables à retenir (variables à modéliser et variables prédictives). Une stratégie originale, fondée sur des analyses statistiques descriptives et aidée par notre connaissance du site, est décrite pour ensuite effectuer une première sélection des variables propres à chaque type de phénomène observé.

CHAPITRE 3 : LES 'MOUVEMENTS DE VERSANT' : DESCRIPTION, TYPOLOGIE ET ANALYSE

L'analyse de la susceptibilité aux 'mouvements de versant' nécessite une bonne connaissance des phénomènes d'instabilités. Cette connaissance, fruit de plusieurs méthodes et techniques d'acquisition de l'information, est une étape indispensable pour choisir au mieux la/les variable(s) à modéliser (V_m).

Les deux premières sections de ce chapitre décrivent précisément le bassin de *Barcelonnette* (site d'étude principal), le versant *Ubac* (site de calage) puis le versant *Adret* (site de validation local) en utilisant largement des extraits de la carte morphodynamique à l'échelle du 1/10 000^{ème}. La troisième section fournit une typologie et une description synthétique des 'mouvements de versant' affectant le bassin de *Barcelonnette*. Enfin, la quatrième section traite de l'analyse des caractéristiques spatiales morphologiques et morphométriques des 'mouvements de versant' du site de calage (versant *Ubac*). Cette analyse se divise en deux points successifs avec (i) l'analyse spatiale des phénomènes (par types, par secteurs, fréquence, etc.) et (ii) l'analyse de l'information qualitative et quantitative des bases de données attributaires. Cette section démontre dans quelles mesures certains attributs peuvent aider à qualifier les 'mouvements de versant' du secteur étudié pour établir un premier jeu de variable(s) à modéliser.

La description du versant *Ubac* (site de calage) est fondée sur la cartographie morphodynamique au 1/10 000^{ème} levée entre juillet 2002 et août 2003. La description du versant *Adret* s'appuie sur les travaux de Remaître (2006). Ces observations de terrain ont été complétées entre juillet 2002 et juillet 2005 par nos propres observations de terrain afin de mettre à jour certaines informations nécessaires pour les objectifs assignés à ce travail de recherche.

1. LE VERSANT UBAC : SITE DE CALAGE

1.1. Un versant, des versants ?

Le versant *Ubac*, en rive gauche de l'*Ubaye*, se situe sur la totalité de la commune d'*Enchastrayes* et une partie de la commune de *Jausiers* (Fig. 3.1). D'une orientation nord-est/sud-ouest, il couvre une surface d'environ 100 km² entre les altitudes 1000 m et 3000 m. Ce versant est fortement marqué par une tectonique cassante, visible surtout à l'est dans la vallée de l'*Abriès* et en amont de la vallée du torrent du *Riou Versant*. Cette tectonique se manifeste par des champs de failles d'orientation nord-est/sud-ouest et/ou nord-ouest/sud-est.

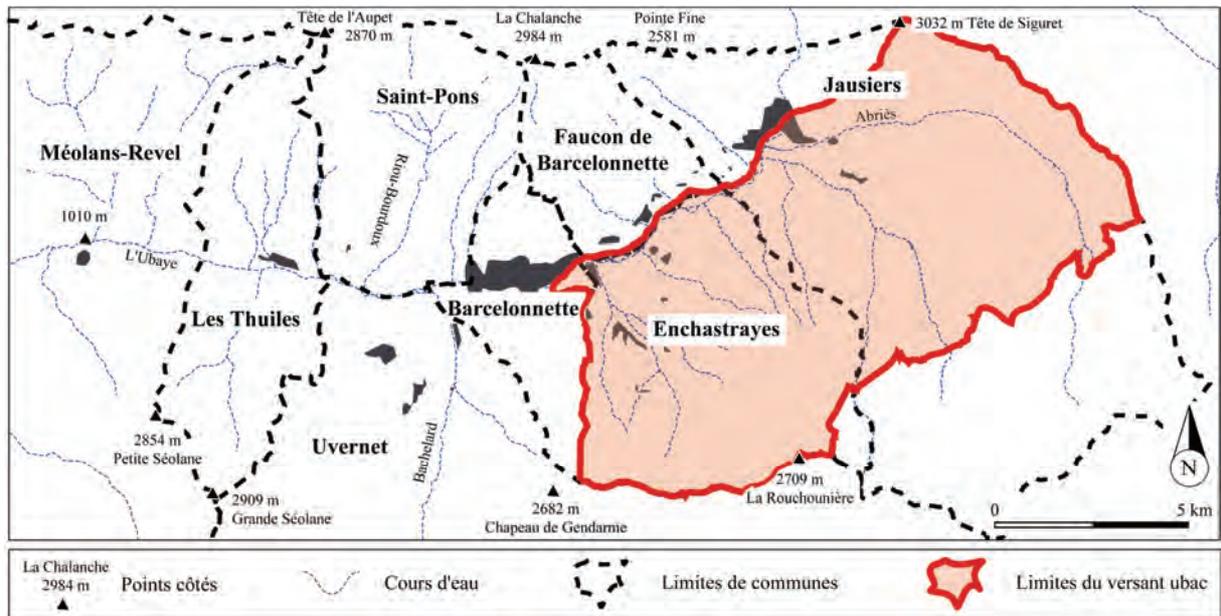


Fig. 3.1. Bassin de Barcelonnette secteur de recherche principal : limites des communes et localisation du secteur Ubac (site de calage).

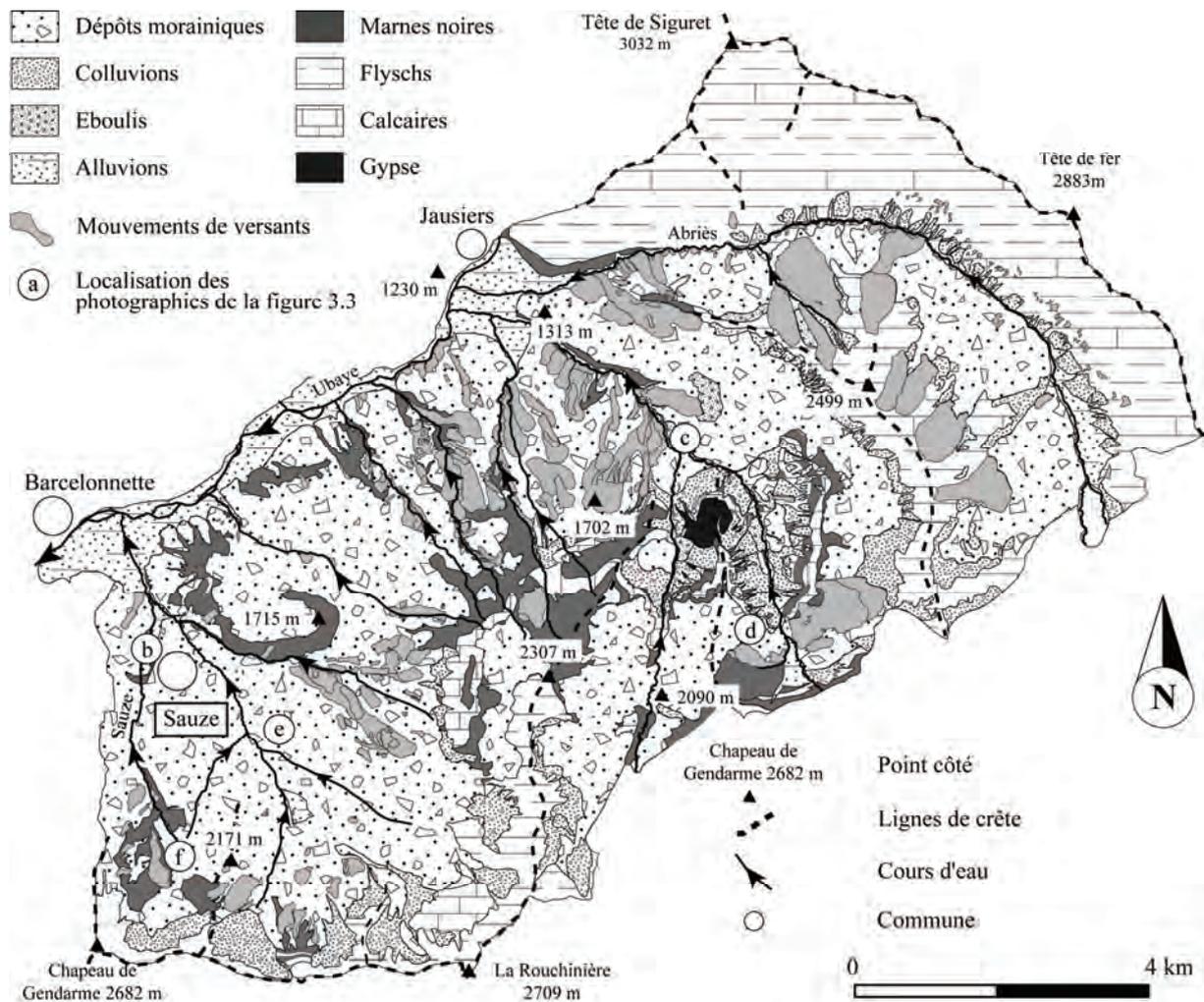
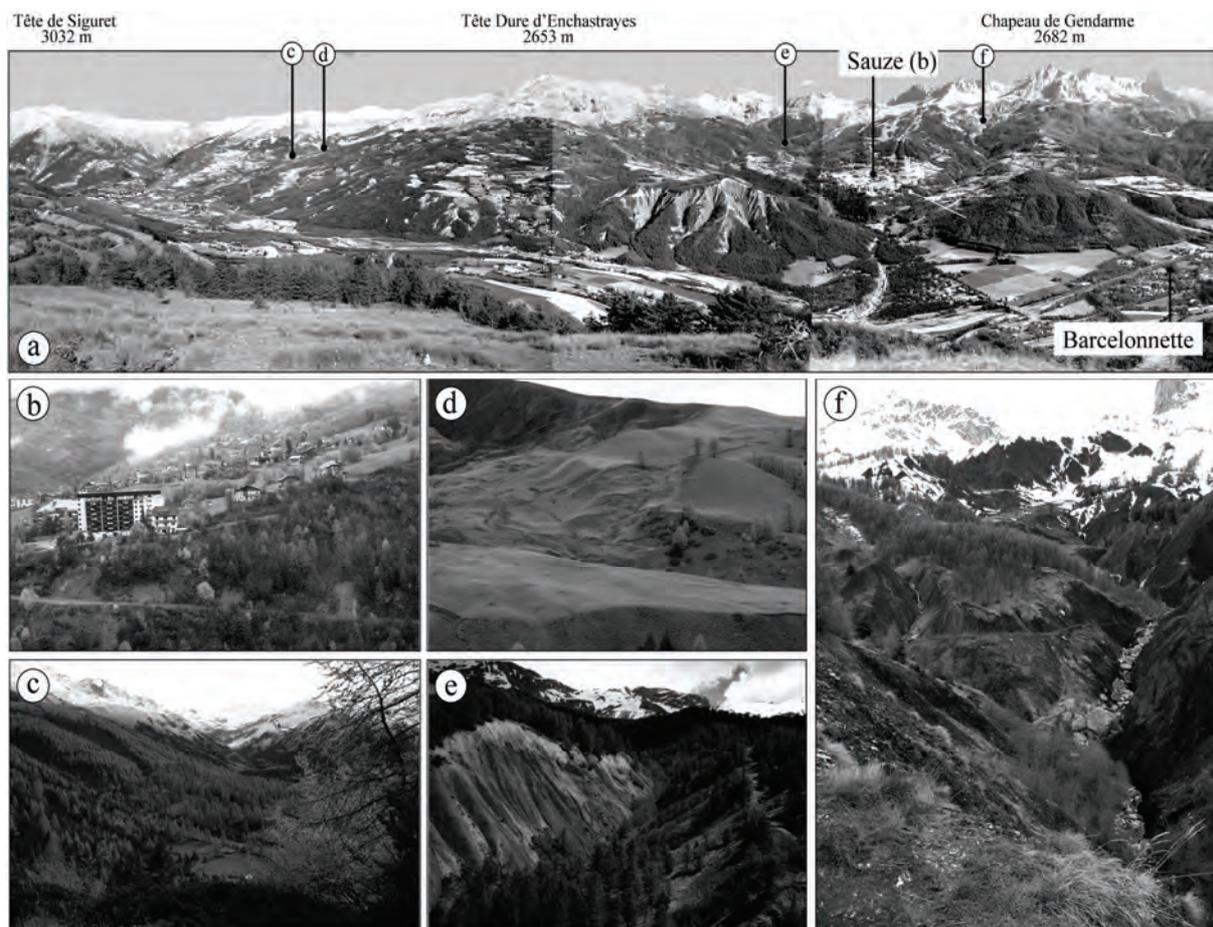


Fig. 3.2. Carte géomorphologique simplifiée du versant Ubac (modifié de Thiery et al. 2007).

La limite occidentale de la zone d'étude correspond à celle du bassin versant du torrent du *Sauze*, où la distance entre l'*Ubaye* et les crêtes les plus méridionales est maximum. La limite méridionale coïncide, à l'ouest, avec la ligne de crêtes d'orientation est-ouest dont les principaux sommets sont le *Chapeau de Gendarme* (2682 m), *Brec second* (2596 m) et *La Rouchinière* (2700 m). Au *Rocher de Tête de Clapouse* (2750 m), la limite s'oriente alors vers le nord-est en direction de la *Pelounière* (2562 m) en passant par le *Vallon de Terres Plaines*, vallée d'altitude formée par un ancien glacier. Enfin, cette limite méridionale se termine au *Lac des Sagnes* (1905 m) en contournant le *Gerbier* (2772 m). Au nord/est, les contreforts, armés dans les flyschs à *Helminthoïdes*, dominent le torrent de l'*Abriès* et forment une limite visible depuis le fond de la vallée de l'*Ubaye* à *Barcelonnette* (Figs. 3.2 et 3.3). La ligne de crête prend une forme curviligne se terminant en aval de la *Tête de Siguret* (3032 m). Enfin, la limite nord/ouest est formée par l'*Ubaye*.



a. Panorama du versant Ubac et localisation des photographies, les pentes les plus douces sont mises en culture alors que les pentes plus fortes sont recouvertes par la forêt ou mises à nues par le ruissellement intense. b. Vue sur le village du Sauze. c. Vue sur le col de Restefond. d. Loupes de solifluxion dans les dépôts morainiques affectant une pelouse alpine. e. Vue sur le torrent des Bouboutes, la couverture morainique recouvre les marnes noires. f. Vue sur le glissement coulée de Super-Sauze.

Fig. 3.3. Photographies illustrant les principales caractéristiques morphologiques du versant Ubac.

Les pentes moyennes du versant *Ubac* sont de 19° . Plus en détail, sous les crêtes, les hauts de versant ont une pente moyenne à forte (40° de moyenne), puis entre 1800 m et 1000 m, les pentes sont faibles à moyennes (17° de moyenne). Le versant est drainé par plusieurs torrents dont les principaux sont : l'*Abriès*, le *Riou versant*, le torrent de *Poche*, le *Riou des Ribes*, le torrent des *Galamonds* et le torrent d'*Enchastrayes*. Ils prennent leurs sources entre 2000 m et 2400 m d'altitude au contact des terrains autochtones et allochtones (marne noires/flyschs). S'ils sont moins actifs

que les torrents du versant *Adret*, ils sont néanmoins le lieu de crues de grande ampleur comme celle de juin 1957 (Lecarpentier, 1963 ; Sivan, 2000 ; Weber, 2001).

Enfin, cette vaste zone est occupée majoritairement par la forêt (35% de la surface totale), principalement des conifères issus des travaux du *RTM*. Les pentes les plus faibles sont souvent mises en culture ou affectées à l'élevage (Fig. 3.3a).

Le versant *Ubac* peut être divisé en trois secteurs distincts bien visibles dans le paysage (Fig. 3.4) :

- (i) **La vallée de l'Abriès** (32 km²), à l'est, est caractérisée par de hautes crêtes (culminant à plus de 3000 m d'altitude) armées dans les flyschs à *Helminthoïdes*. Le caractère escarpé des pentes et la minéralité du paysage sont des traits caractéristiques de cette vallée ;
- (ii) **Le secteur 'intermédiaire'** (38 km²) aux pentes plus douces, est couvert en majorité par la forêt. Il est le plus touché par les phénomènes d'instabilité. Il se subdivise en cinq sous-secteurs ;
- (iii) **Le bassin versant d'Enchastrayes** (30 km²), au sud-ouest, se localise sur la commune d'*Enchastrayes* où se situe le glissement coulée de Super-Sauze étudié depuis plusieurs années (Malet, 2003 ; Malet *et al.*, 2000, 2002a, 2002b, 2005, 2006 ; Maquaire *et al.*, 2003).

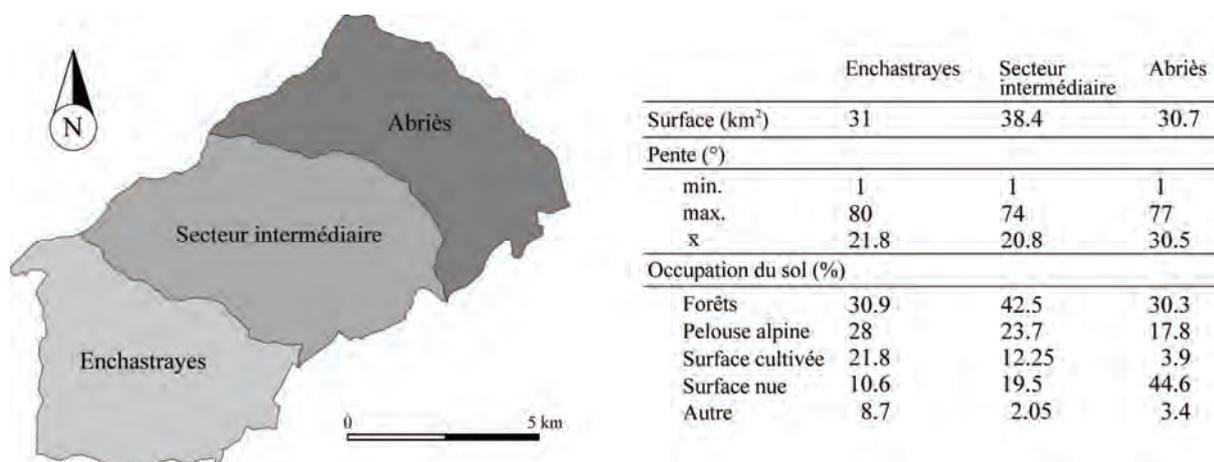


Fig. 3.4. Localisation et caractéristiques principales des trois secteurs du versant *Ubac* (site de calage).

1.1.1. La vallée de l'Abriès

Le torrent d'*Abriès* prend sa source au *lac des Sagnes* à 1900 m d'altitude au pied du *Tour des Sagnes* (2363 m). Inscrit dans les terrains allochtones de la nappe du *Parpaillon*, ce bassin versant est limité par deux lignes de crêtes parallèles de direction nord/est. Les versants exposés à l'ouest et à l'est se distinguent par une forte dissymétrie (Fig. 3.5).

La rive droite est limitée par une ligne de crête dont les sommets principaux sont le *Cuguret* (2912 m), le *Siguret* (3022 m) et le *Bec de l'Aigle* (2815 m). La crête est marquée par une série de plis anticlinaux déversés et/ou chevauchants, visibles dans le *Combe de Chave*. Sous ces sommets, les pentes moyennes sont assez fortes ($\pm 40^\circ$) et marquées par un réseau dense de failles d'orientation nord-est/sud-ouest. Ces failles se manifestent dans le paysage par de petits escarpements et par de larges cicatrices d'arrachement liées à des écroulements de blocs rocheux (Fig. 3.5 et 3.6b). Le réseau de failles a favorisé l'encaissement de profonds ravins (Fig. 3.6a). Les matériaux, arrachés au flyschs friables, sont entraînés par les cours d'eau intermittents et se déposent en contrebas, en vastes cônes de déjection torrentiels qui adoucissent la pente (Fig. 3.6d et 3.6e).

La **rive gauche**, est délimitée par une ligne de crête occidentale, moins haute que le versant exposé à l'ouest (maximum 2772 m au sommet du *Gerbier*). Le versant se distingue du versant opposé par des formes plus douces et moins acérées (Fig. 3.6f), par une végétation de landes alpines (à l'ouest et au sud-est) et par des forêts dans sa partie centrale. Les terrains allochtones sont peu visibles, souvent recouverts par des formations d'origine glaciaire et/ou post glaciaire, des colluvions ou des éboulis plus ou moins fixés. Au sud-est, les pentes, de 21° en moyenne, alternent des séries de bossellements et de ruptures de pente.

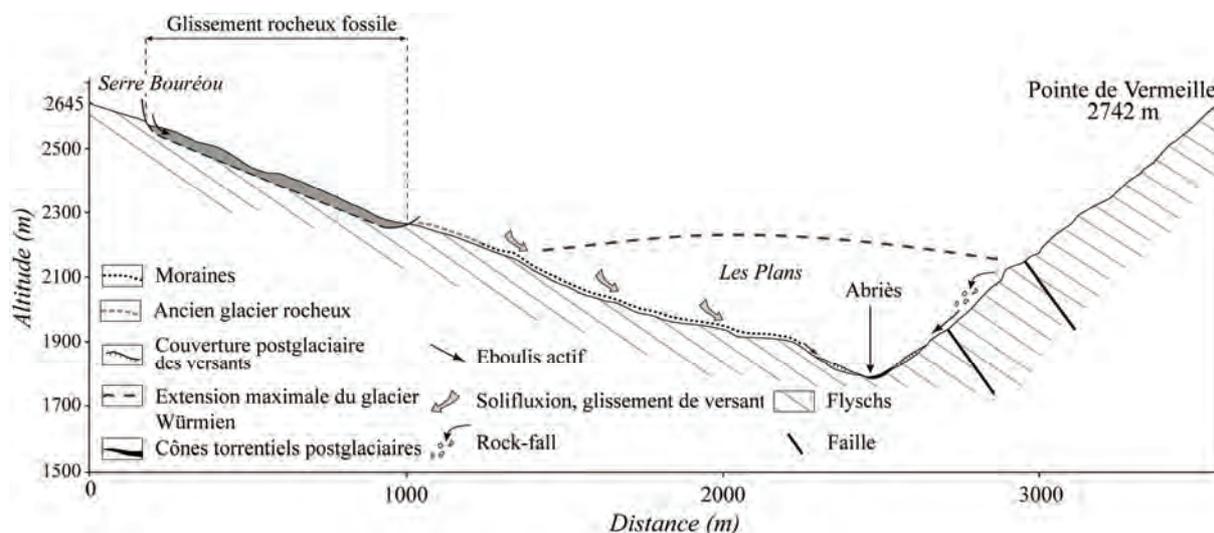


Fig. 3.5. Coupe géologique simplifiée de la vallée de l'Abriès (localisation de la coupe sur la Fig. 3.6).

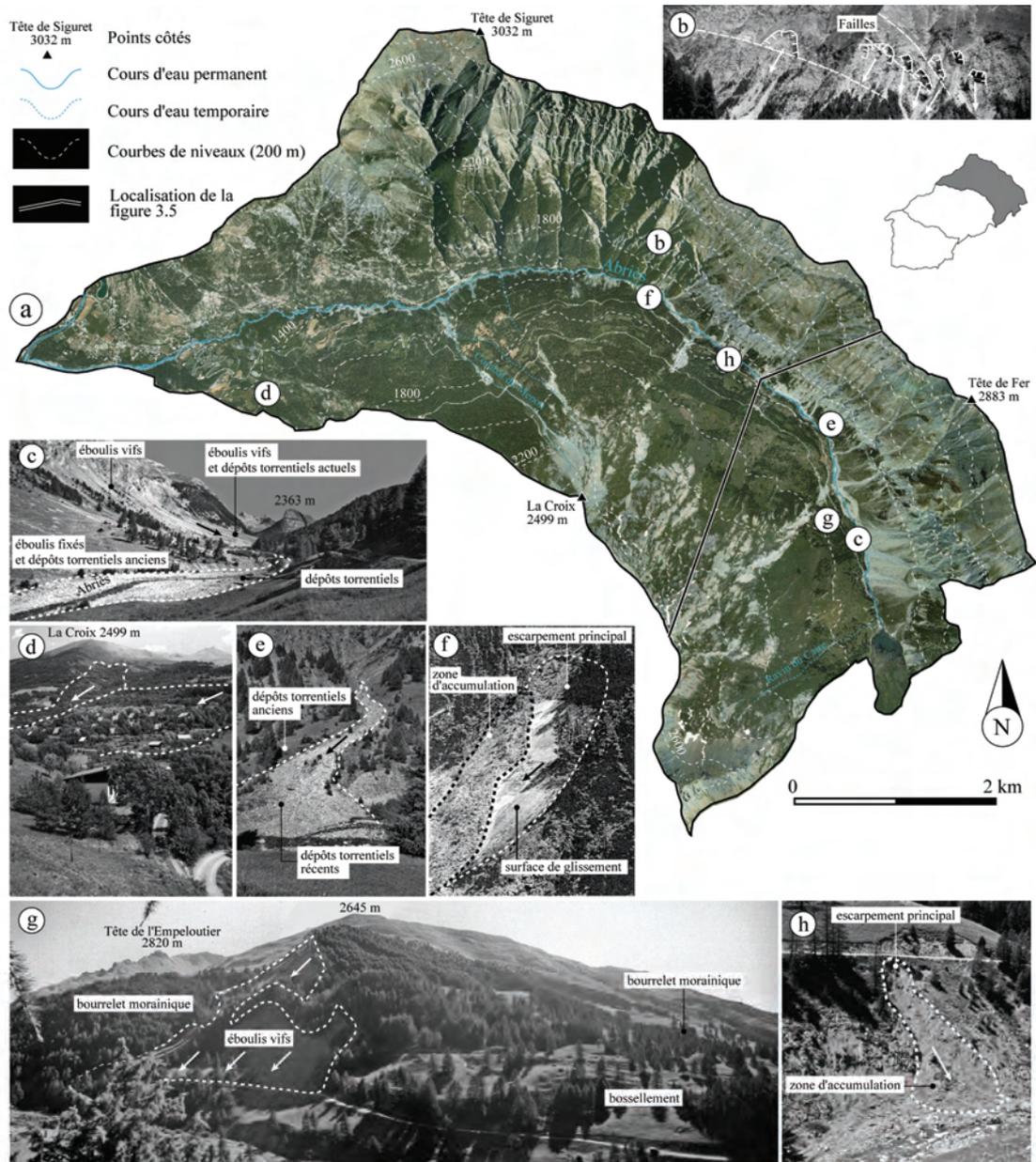
Deux formes d'accumulation glaciaires se distinguent avec : (i) **un glacier rocheux** sous le *Gerbier* à l'extrême sud-est du bassin à 2650 m d'altitude et (ii) **une série de bourrelets morainiques** plus ou moins perpendiculaires à la pente se situant entre 1900 m et 2150 m sur environ 2.5 km de long.

- (i) **Le glacier rocheux** dans le *vallon de l'Empeloutier*, situé entre 2250 et 2500m, est colonisé par de la pelouse alpine. Il est considéré comme un glacier rocheux totalement dégelé (Evin, 1987) ne faisant pas partie des glaciers rocheux *stricto sensu* défini par Assier (1993). Ce glacier rocheux est probablement un aquifère du torrent du *ravin du Caïre* se jetant dans le lac des *Sagnes* à 1900 m d'altitude.
- (ii) **Six bourrelets morainiques** sont observés entre le lac des *Sagnes* et le *Saret*. Ces formes linéaires sont perpendiculaires au cours de l'*Abriès* (Fig. 3.6g). Entre ces bourrelets, des surfaces plus ou moins planes, affectées localement par des loupes de solifluxion, peuvent être assimilés à des terrasses de kame (Bossu, 1995). Cette hypothèse confirmerait le retrait des glaciers latéraux de l'*Ubaye* par plusieurs stades successifs (Weber, 2001).

Dans la partie centrale, sous le sommet de *la Croix* (2499 m) entre le *Grand Bois* et le *Fond de l'Ane* (entre 2000 m et 2500 m environ), les pentes assez fortes (35° en moyenne) offrent un paysage plus minéral avec des colluvions et des éboulis sans végétation. Ces pentes sont affectées localement par un ravinement plus intense que les autres parties du secteur.

En aval, ces ravines se regroupent pour former le *Combal du Manon*, qui, sur 1500 m, à partir de 2000 m d'altitude, entaille de plusieurs mètres les dépôts morainiques ainsi que les flyschs sous-jacentes jusqu'à l'*Abriès*. De part et d'autre de ce torrent temporaire, la morphologie se distingue par : (i) une topographie chaotique, en rive droite, alternant des surfaces plus ou moins planes et des ruptures de pentes, les terrains anciennement cultivés y sont à l'abandon ; (ii) une

topographie moins tourmentée, en rive gauche, avec des pentes plus fortes recouvertes par la forêt.



a. Orthophoto (IGN, 2004) du secteur d'Abriès et localisation des photographies. b. Vue sur la rive droite de l'Abriès. Ce secteur fortement marqué par une tectonique cassante est soumis à de multiples écroulements (rock-falls) généralement localisés près des lignes de failles. c. Vue vers le Sud du secteur en direction du torrent des Sagnes. d. Vue sur le glissement de Lans et le glissement des Cocody. La déstabilisation générale et lente du versant se manifeste par des fissures sur les habitations et des affaissements de la route. e. Cône de déjection torrentiel en rive droite de l'Abriès. f. Instabilité de la couverture morainique sur le substratum (versant de Beaumont cliché : Bossu, 1995). g. Bourrelets morainiques transversaux issus des multiples phases de déglaciation. Les dépôts morainiques sont actuellement soumis à des phénomènes de solifluxion qui confèrent une morphologie bosselée au versant. h. Glissement translationnel superficiel (debris slide) en rive gauche de l'Abriès ; les dépôts morainiques sont déstabilisés par le sapement torrentiel.

Fig. 3.6. Photographies illustrant les principales caractéristiques morphologiques du secteur de la vallée de l'Abriès.

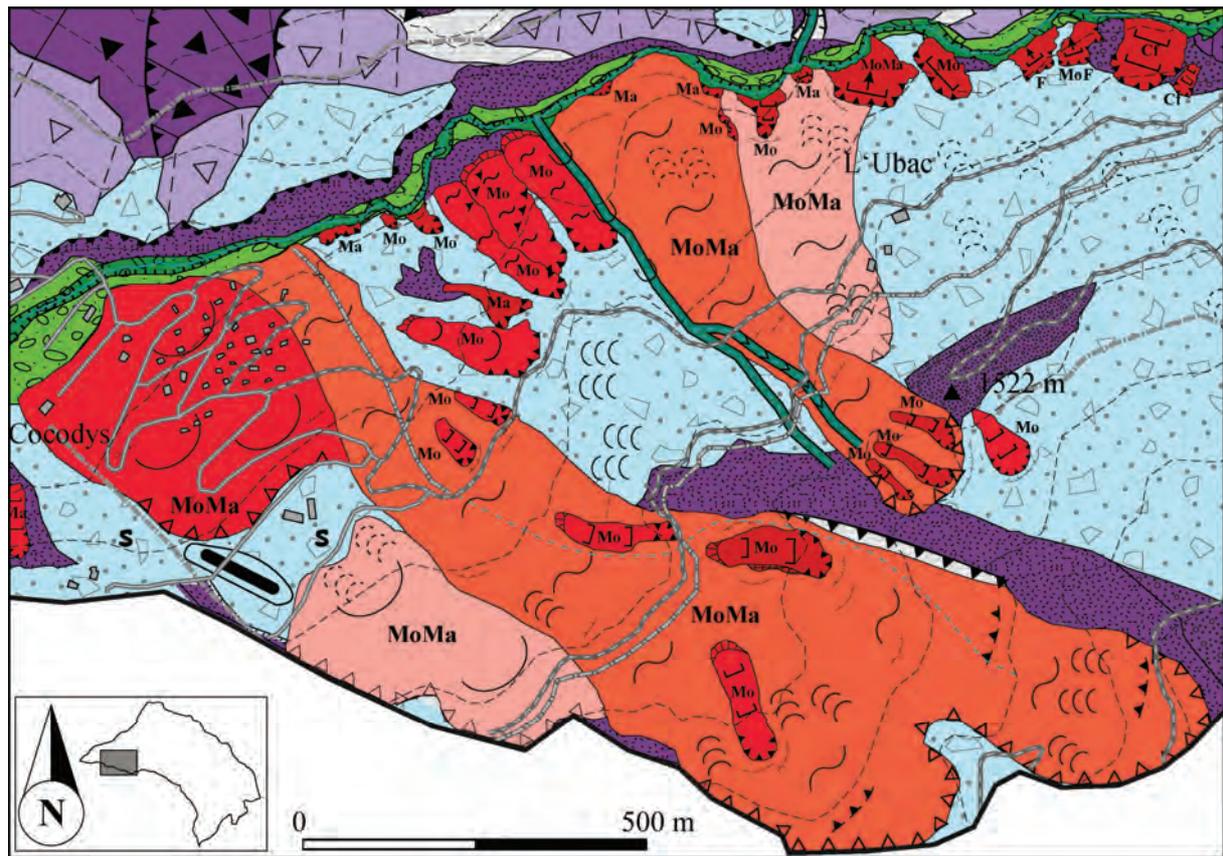


Fig. 3.7. Extrait de la carte géomorphologique au 1/10 000^{ème} du secteur d'Abriès.

Enfin, la partie nord de ce secteur est marquée par un changement de paysage avec de larges surfaces planes (champs cultivés ou pâturages) séparées par des ruptures de pentes convexo-concaves dans des dépôts morainiques d'une épaisseur de 5 m maximum. Les ruines et les nombreux canaux de drainage, peu ou non entretenus, attestent que ce secteur a été abandonné principalement en raison de son isolement. A l'ouest, la **proximité de Jausiers et de la route menant au col de Restefond (Col de la Bonnette) fait que le secteur est beaucoup plus anthropisé (Fig. 3.6c) malgré son caractère instable. Ce dernier se manifeste par de multiples fissures et affaissements de la route ou des fissures sur les habitations du lotissement des Cocody.**

La rive gauche de l'Abriès est marquée par de **nombreux 'mouvements de versant' dormants ou actifs (Fig. 3.7)**. Les plus remarquables sont les grands mouvements de *Serre Boureou*, les mouvements de *Grand Bois* et celui de *Lans* (Fig. 3.7). Moins spectaculaires, **des mouvements actifs (translationnels et rotationnels) se localisent sur quelques interfluves ou le long de l'Abriès** : le sapement de berge favorisant l'instabilité des flyschs (au pendage conforme à la pente) et/ou des dépôts morainiques sur le substratum (Fig. 3.6g).

1.1.1.1. Grands glissements translationnels rocheux de Serre-Boureou et de Grand Bois

Les mouvements de *Serre-Boureou* sont **de grands glissements translationnels rocheux et profonds (rock slide ; Dikau et al., 1996)**. Localisés le long de failles, ils semblent favorisés par la structure interne des flyschs. Leurs formes et leurs modes de glissement sont contrôlés par un pendage parallèle à la pente. Considérés comme **stabilisés**, leurs formes sont très estompées : les escarpements et les zones d'accumulation sont difficilement discernables sur le terrain. Le recours à l'analyse stéréoscopique permet alors à distinguer plus précisément les formes. Probablement déclenchés lors des périodes de déglaciation, ces mouvements seraient liés à une certaine décompression du substratum après la fonte de la glace (Légier, 1977, Weber, 2001). Plus

en aval, entre 1640 m et 1900 m, le glissement translationnel de *Grand Bois* possède les mêmes caractéristiques que ces grands mouvements rocheux. Toutefois, les formes étant moins estompées, il est considéré comme **dormant**.

1.1.1.2. Glissement translationnel complexe de Lans

Localisé au nord de *Serre-Riche*, le **glissement de Lans** (Fig. 3.7 et Fig. 3.8) est un **glissement translationnel complexe qui associe, en amont, des caractéristiques d'un glissement rotationnel** (avec deux escarpements en forme de demi-cercle juxtaposés et deux secteurs légèrement en contre-pente en aval) et **des caractéristiques d'un glissement translationnel**, en ce qui concerne le corps du glissement. Considéré comme **dormant** (Légier, 1977 ; Bossu, 1996), ce glissement affecte profondément les moraines et les marnes, sur une longueur de 1500 m pour une largeur de 350 m en moyenne. Proche de la zone de contact entre les marnes *callovo-oxfordiennes* et les flyschs à *Helminthoïdes*, il est probablement favorisé par la déstructuration du substratum, le contact moraines/substratum et un pendage conforme à la pente.

La **déstabilisation du versant** pourrait être conséquente au sapement basal du torrent de *l'Abriès*. Actuellement, ce glissement présente des signes de réactivation locale (comme le glissement des *Cocodys*). Par exemple, des glissements translationnels de faible ampleur se localisent entre 1500 m et 1550 m d'altitude ou en aval du chemin de *Villard à l'Ubac* vers 1450 m d'altitude. Ces petits mouvements, développés dans les formations morainiques, sont liés à un mauvais entretien des canaux de drainage et des canalisations souterraines.

A l'est du mouvement de *Lans*, un glissement sensiblement similaire, mais de taille plus petite, affecte le chemin de *l'Ubac*. A l'amont de ce dernier, trois glissements translationnels actifs se développent. La rupture et le mauvais entretien d'un drain de captage en amont en sont probablement la cause.

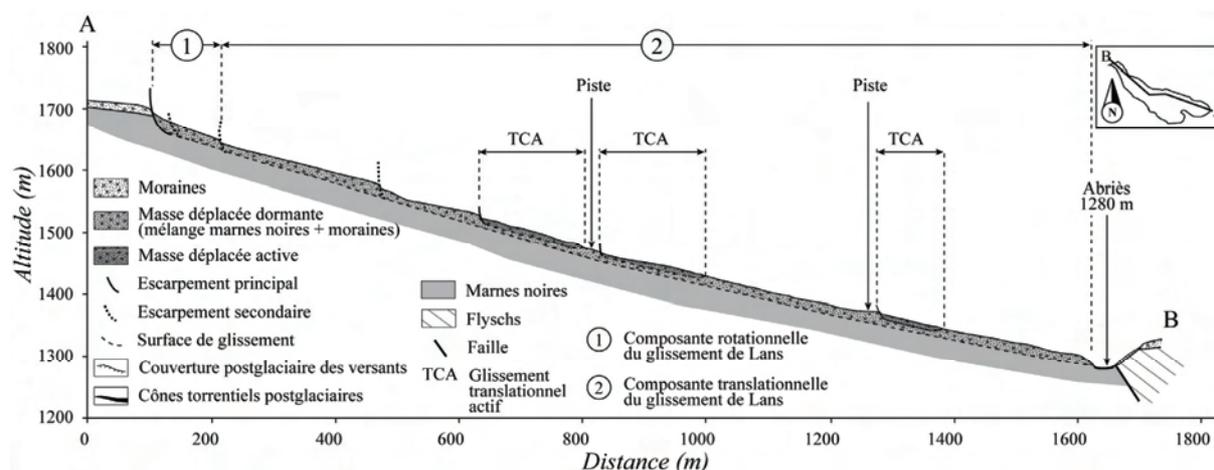


Fig. 3.8. Coupe schématique du glissement translationnel complexe de Lans.

1.1.1.3. Glissements translationnels superficiels le long du torrent de l'Abriès

Le long de *l'Abriès*, plusieurs mouvements actifs de type translationnels superficiels et banc sur banc ont été observés (Fig.3.7). Les premiers sont favorisés par le pendage des flyschs conforme à la pente et par une discontinuité entre les formations superficielles (moraines ou colluvions) et le substratum. Les seconds sont favorisés par le pendage et des plans de schistosité des flyschs conformes à la pente. L'activité de ces glissements est favorisée par le sapement du torrent de *l'Abriès*.

1.1.2. Le secteur intermédiaire

Ce secteur (Figs. 3.9.a et 3.9.b) est le plus touché par les instabilités de versants (Fig. 3.10). Pas moins de 65 % des glissements rotationnels, 64.5 % des glissements translationnels complexes (Fig. 3.9g) et 25 % des glissements superficiels translationnels superficiels s'y localisent. En comptabilisant les mouvements dormants et fossiles, 33% de la surface du secteur est ou a été déstabilisée par des 'mouvements de versant'. Les glissements fossiles et dormants ont la particularité d'être très longs (Quintlé, 1995 et 1996). Leurs formes et leurs topographies évoquent d'anciens glissements complexes mêlant une composante rotationnelle en amont et une composante translationnelle en aval. La majorité de ces anciens 'mouvements de versant' forme une topographie chaotique, alternant bossellements et ruptures de pente. Cette topographie est recouverte par la forêt et/ou par des anciens pâturages et est localement soumise à d'intenses ravinements. Reboisés et drainés par de nombreux canaux issus de la politique de *Restauration des Terrains en Montagne* au cours du 19^{èmes.}, ces versants sont actuellement laissés à l'abandon, ce qui se manifeste par un réseau de drainage et/ou d'irrigation non entretenu et localement par une colonisation des anciennes pâtures par une forêt pionnière (Fig. 3.9).

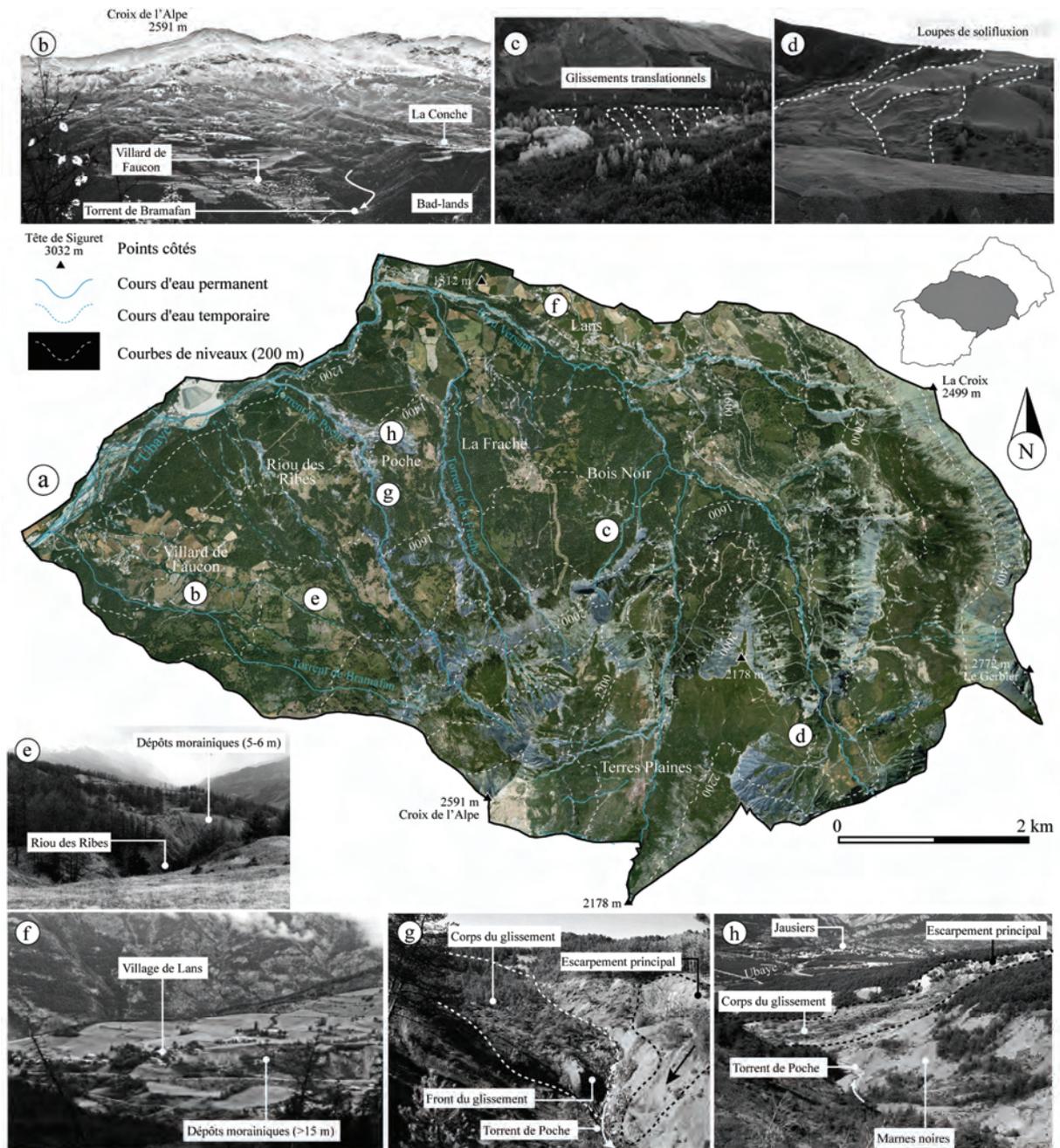
D'est en ouest, cinq grandes zones ont été observées : au nord-est, la zone de *Lans* ; à l'est, la zone de *Bois Noir* ; au centre, la zone de *la Frache* ; à l'ouest, les zones de '*Poche-Riou des Ribes*' et de *Villard de Faucon* (Fig. 3.9).

1.1.2.1. La zone de Lans

Limitée au nord par l'interfluve de *Serre Riche* et au sud par le *Riou Versant*, la morphologie générale est marquée par des successions de bourrelets, de replats et de ruptures de pente façonnées dans les dépôts morainiques d'une épaisseur maximale d'une vingtaine de mètres. Cinq replats plus ou moins étagés et séparés par des bourrelets topographiques sont observés : le replat de *la Douçonne* (vers 1310 m d'altitude, dominant le *Riou Versant* et l'*Abriès*), le replat des *Buissons* aménagé et cultivé (1370 m), le replat du '*cimetière de Lans*' (1430m), celui de *Pouzévians* (1550 m) se prolongeant de l'autre côté du *ravin de Fern* vers les *Caïres* et enfin le replat des *Meyries* vers 1800 m d'altitude.

1.1.2.2. La zone du versant de Bois Noir

La zone est limitée en amont (au sud et à l'est) par la *crête de Barraus* qui forme un V avec le *Bec de l'Aigle* (1978 m) et en aval (au nord) par le *torrent de Clapouse* relayé par le *Riou Versant*. Ce versant de 3 km² est marqué par une forte exploitation humaine (exploitation agricole, terrassements, épierrements, canaux de drainage en activité, secteurs routiers, habitations, etc.) et par de nombreuses instabilités de versant. Divers indices morphologiques et indices de végétation (topographie chaotique, alternance de bossellements, replats et ruptures de pente, végétation désordonnée mêlant forêt ivre, arbres morts et sagnes) montrent que plusieurs glissements rotationnels (emboîtés ou successifs) ou translationnels sont encore actifs. Localisés au sud-est de *Serre Corbeau* (Fig. 3.11), les terrains mobilisés semblent correspondre à l'épaisseur de la couverture morainique (entre 4 m et 10 m). Toutefois, **le glissement de Bois Noir, survenu en avril 1993, montre que le substratum peut aussi être localement affecté** (Fig. 3.12). Plus à l'ouest, deux replats marquent une rupture nette avec cette topographie chaotique (replat de *Serre Maurin* entre 1520 m et 1550 m d'altitude et replat de *Serre du Corbeau* entre 1520 m et 1560 m d'altitude). Ces replats anciennement cultivés ou pâturés, sont abandonnés avec une colonisation progressive par la forêt. Ils sont chacun marqués en bordure ouest par un bourrelet topographique perpendiculaire à la pente. Ce sont des bourrelets morainiques (parfois remaniés) liés aux glaciers latéraux de l'*Ubaye* (Fig. 3.9f). Ils témoignent du relief hérité du dernier englacement et des de retrait successifs du glacier de *Restefond* (Weber, 2001).



a. Orthophoto (IGN, 2004) du secteur intermédiaire et localisation des photographies. b. Vue panoramique sur Villard de Faucon : zone fortement cultivée et relativement préservée des 'mouvements de versant'. c. Vue sur le versant de Bois Noir et des glissements translationnels complexes. d. Loupes de solifluxion dans les moraines au Riou des Rangis près de la route menant au col de la Bonnette. e. Dépôts morainiques stables en amont du Riou des Ribes. f. Partie médiane de la zone de Lans. g. Corps et front d'un mouvement complexe poussant le torrent de Poche vers la rive gauche. A droite de la photographie, un mouvement superficiel dans les moraines et les marnes noires déstabilisées par le sapement basal du torrent. h. Glissement complexe et profond de Poche.

Fig. 3.9. Photographies illustrant les principales caractéristiques morphologiques du secteur intermédiaire.

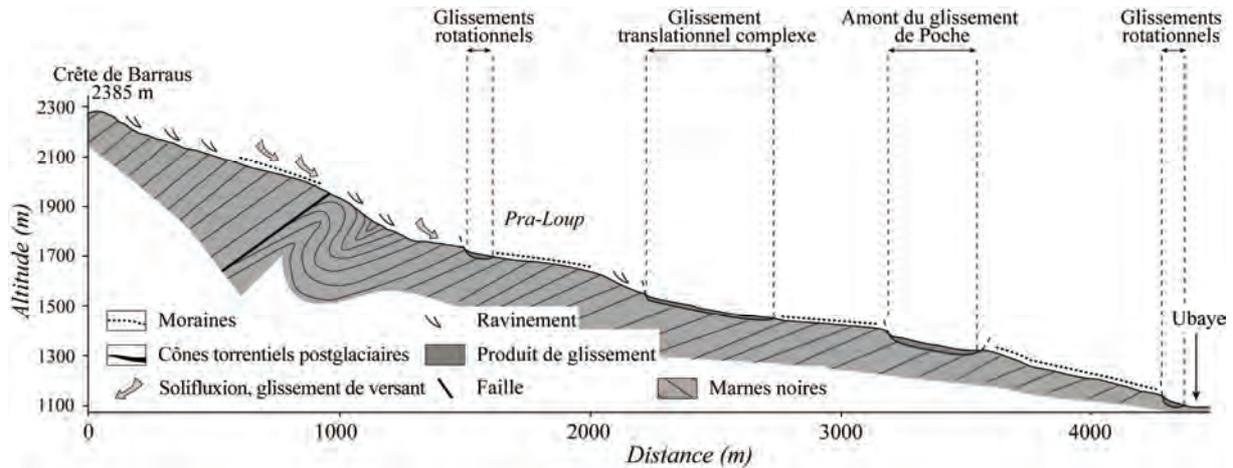


Fig. 3.10. Coupe géologique simplifiée du secteur intermédiaire.

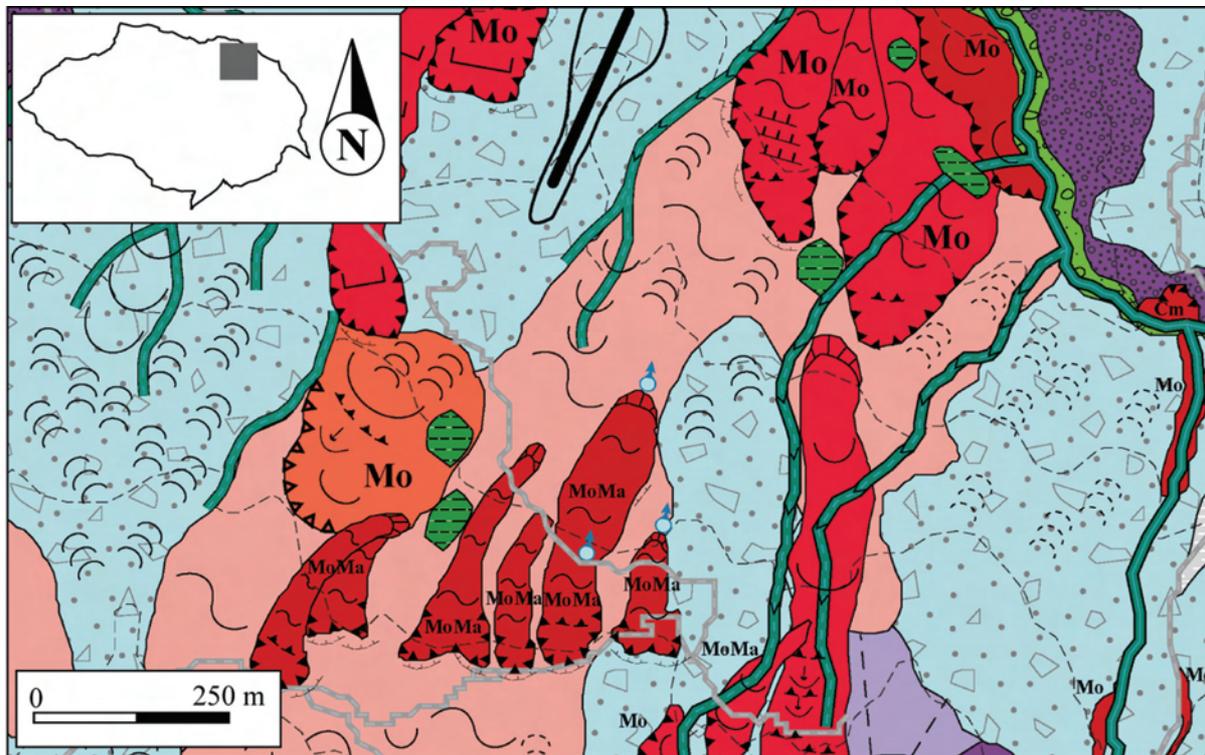
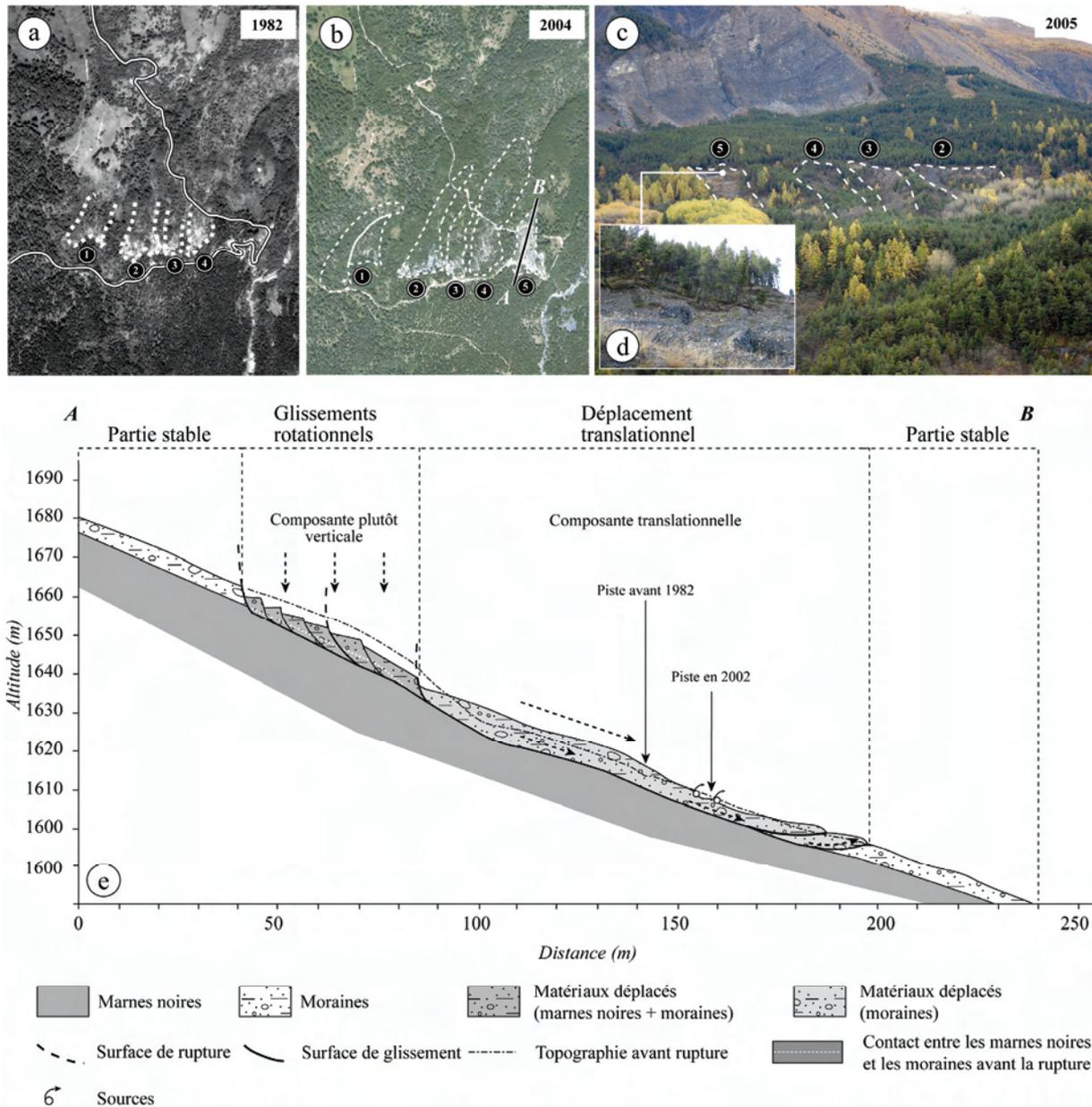


Fig. 3.11. Extrait de la carte morphodynamique du secteur intermédiaire : le versant de Bois Noir.

1.1.2.3. La zone de La Frache

La zone de *La Frache* est marquée par la juxtaposition (i) de grands glissements translationnels ou rotationnels fossiles et/ou dormants, qui confèrent une topographie générale bosselée aux versants et (ii) des glissements translationnels actifs vers 1740 m d'altitude. L'abandon récent de toute activité agricole et son cortège de conséquences négatives pour l'entretien du milieu naturel (recolonisation forestière anarchique, abandon des canaux de drainage,...) apparaissent comme les facteurs essentiels dans le déclenchement de nouvelles instabilités le long de l'ancien chemin forestier. Plus en aval, le long du torrent de *La Frache*, les formations morainiques sont déstabilisées par le sapement basal du torrent ce engendrant des séries de glissements rotationnels sans réel danger pour l'homme.



a. Versant en 1982 (photographie aérienne ; IGN, 1982). b. Versant en 2004 (orthophoto ; IGN, 2004). c. Versant vu du secteur de Lans et localisation des numéros des 'mouvements de versant'. d. Partie amont du mouvement de Bois Noir (n°5). e. Coupe géologique du mouvement de Bois Noir (n°5).

Fig. 3.12. Versant de Bois Noir et mouvement déclenché en avril 1993.

1.1.2.4. Le versant de 'Poche-Riou des Ribes'

Ce secteur comprend deux bassins versants : celui du torrent de *Poche* et celui du *Riou des Ribes*. Les versants sont globalement orientés vers le nord-nord-ouest. Profondément entaillé par les torrents de *Poche* et le *Riou des Ribes*, ce **secteur est particulièrement instable**. On y dénombre pas moins de 92 'mouvements de versant' soit environ 20 % des phénomènes inventoriés pour le versant *Ubac*.

D'aval en amont du torrent de *Poche*, on distingue le grand glissement-coulée de *Poche* d'une superficie de 16 ha (Fig. 3.9h) et plusieurs instabilités superficielles ou profondes (Fig. 3.13).

Le **glissement-coulée de Poche** a fait l'objet de nombreuses investigations qui sont détaillées dans Kirchoffer (1994), Schmutz (1995), Manne et Schwinn, (1998), Guillon (2001), Le Mignon et Cojean (2002) et Malet (2003). Les résultats de ces travaux sont repris ici pour le décrire. La topographie de la zone d'ablation est chaotique, mêlant d'énormes panneaux de marnes glissées, des paquets de moraines ainsi que des pans entiers de végétation herbacées et/ou forestières (Weber, 2001). L'escarpement principal, d'une largeur de 100 m environ, entaille les marnes noires surmontées par une épaisseur discontinue de moraines (entre 1 et 5 m). Il a la particularité de reculer progressivement par glissements rotationnels emboîtés sur les flancs situés au nord-est et par des glissements banc sur banc sur le flanc sud-est. En aval, une coulée s'étend sur 855 m de longueur pour une largeur moyenne de 160 m. Le volume de la masse en écoulement est estimé à 700 000 m³ (Malet, 2003). Cette masse s'encaisse entre des échines et des versants raides empruntant, en aval, le chenal d'écoulement du torrent de *Poche* (vers 1340 m d'altitude). La topographie de la coulée est, elle aussi, très chaotique avec un profil en '*marches d'escalier*'. Enfin, des écoulements intermittents zèbrent la topographie et créent à leurs confluences des zones humides (sagnes) colonisées par une végétation herbacée et/ou arbustive (Kirchoffer, 1994).

Les berges des torrents de *Poche* et du *Riou des Ribes*, parfois fortement encaissées (jusqu'à 60 m) offrent des conditions propices à **d'autres types de 'mouvements de versant'**. On distinguera : (i) **les glissements de berges** (rotationnels ou translationnels superficiels) favorisés par le sapement des torrents et la discontinuité entre les moraines et le substrat ; (ii) **les glissements superficiels au sein des marnes noires comme les glissements banc sur banc** ; (iii) **les grands glissements rotationnels emboîtés, profonds et actifs par intermittence et/ou latents** et (iv) **des glissements translationnels complexes actifs profonds** (Figs. 3.9g et 3.13).

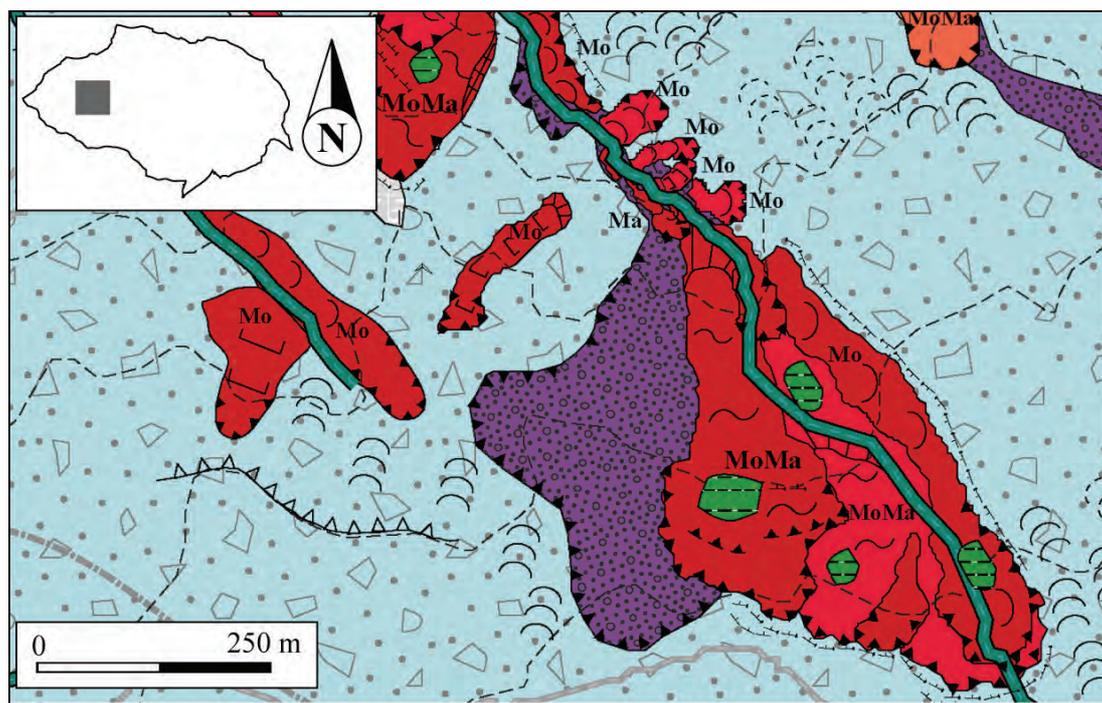


Fig. 3.13. Extrait de la carte morphodynamique du secteur intermédiaire : le Riou des Ribes.

Parmi ces '*mouvements de versant*', certains se déclenchent dans les moraines alors que d'autres sont plus profonds et affectent aussi les marnes noires sous jacentes.

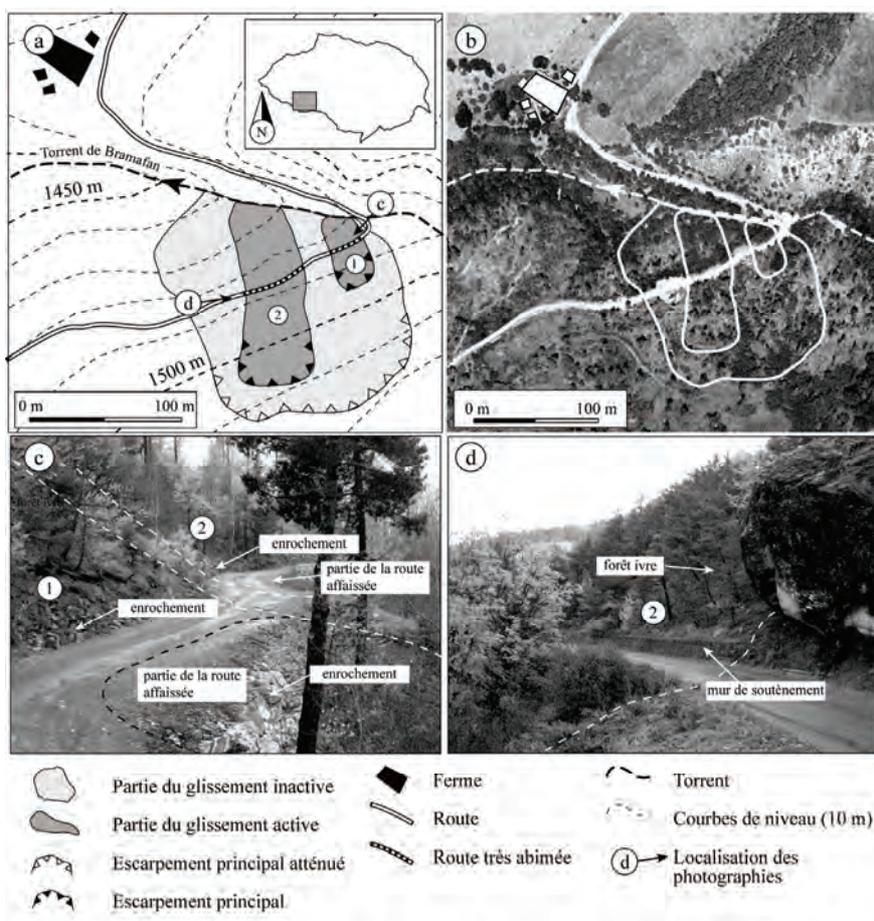
Pour les **glissements superficiels**, les ruptures sont souvent proches de cours d'eau intermittents ou en interfluve près des drains non entretenus. Il n'est pas rare d'observer, localement, des écoulements d'eau de sub-surface et des stagnations d'eau dans les creux. L'influence de cette eau courante ou stagnante sur le matériau morainique, souvent fissuré et

perméable, et la discontinuité moraines/substrat sont autant de facteurs qui favorisent alors les ruptures.

Les **glissements profonds** affectent aussi bien le matériau morainique que les marnes noires dégradées et/ou saines. Si l'on tient compte de la carte géologique au 1/50 000^{ème} (BRGM, 1974), la majorité de ces glissements est proche d'accidents tectoniques (Weber, 2001). Quelques observations sur des coupes naturelles (failles, bombements anticlinaux et/ou synclinaux) permettent de le confirmer. Beaucoup de ces mouvements sont actifs et l'analyse diachronique des photographies aériennes, malgré la présence de la forêt, permet d'avoir une certaine idée de leur vitesse de progression.

1.1.2.5. La zone de Villard de Faucon

D'une superficie de 5 km², la zone s'étend entre la *Croix de l'Alpe* (2591 m), en amont, jusqu'à la confluence avec l'*Ubaye* (1163 m). Elle est drainée par les torrents des *Flourats* et de *Bramafan*. **Cette zone est peu affectée par les 'mouvements de versant'**. Trois raisons principales peuvent expliquer la relative stabilité de ce secteur : (i) des pentes moyennes assez faibles (< 10°) ; (ii) un encaissement moins prononcé des torrents et (iii) une forte anthropisation avec des secteurs agricoles entretenus et drainés. Deux secteurs rappellent néanmoins que la susceptibilité de ces terrains aux 'mouvements de versant' reste assez forte.



a. Localisation des phénomènes. b. Orthophoto (IGN, 2000b). c. Vue sur le secteur du glissement n°1. d. Vue sur le secteur du glissement n°2.

Fig. 3.14. Mouvements des Patignons dans la zone de Villard de Faucon : localisation et enjeux.

Sous *Font Freida*, vers 1900 m d'altitude, un grand glissement translationnel de 755 m de long pour 320 m de large en moyenne, se manifeste depuis plusieurs années. Ce mouvement, déclenché sur une pente faible (10° en moyenne), est à mettre en relation avec un mauvais drainage des matériaux morainiques peu épais et constamment humidifiés par une source présente en amont.

Au lieu dit des *Patignons* (Fig. 3.14), un glissement translationnel complexe menace la route qui relie *Villard de Faucon* à la *Conche*. D'après l'observation des photographies aériennes, ce glissement existait déjà avant 1956. Les conditions de déclenchement sont mal connues, mais il semble que le sapement du torrent et une humectation permanente des dépôts morainiques peu épais (3 m environ) soient les principaux facteurs de déstabilisation du versant. Une nouvelle déstabilisation du versant après 1988, suite au défrichement d'une partie de la forêt en amont, a été observée et ce, malgré les ouvrages de confortement (mur de soutènement, enrochement). La route y est d'ailleurs en réfection permanente (Fig. 3.14).

1.1.3. Le bassin d'Enchastrayes

D'une superficie de 30 km², le bassin regroupe les torrents de *Boure*, d'*Enchastrayes* et de *Sauze* qui confluent en amont du cône de déjection pour former le torrent des *Galamonds*. Il s'étend entre 1140 m et 2700 m d'altitude (Fig. 3.15).

Fondée sur les travaux de Weber (2001) et Malet (2003), la description du secteur distingue **quatre types de formes et formations** avec : les formes et les formations périglaciaires, les formes et les formations glaciaires, les formes et les formations issues du ruissellement et les '*mouvements de versant*'.

1.1.3.1. Les formes et les formations périglaciaires

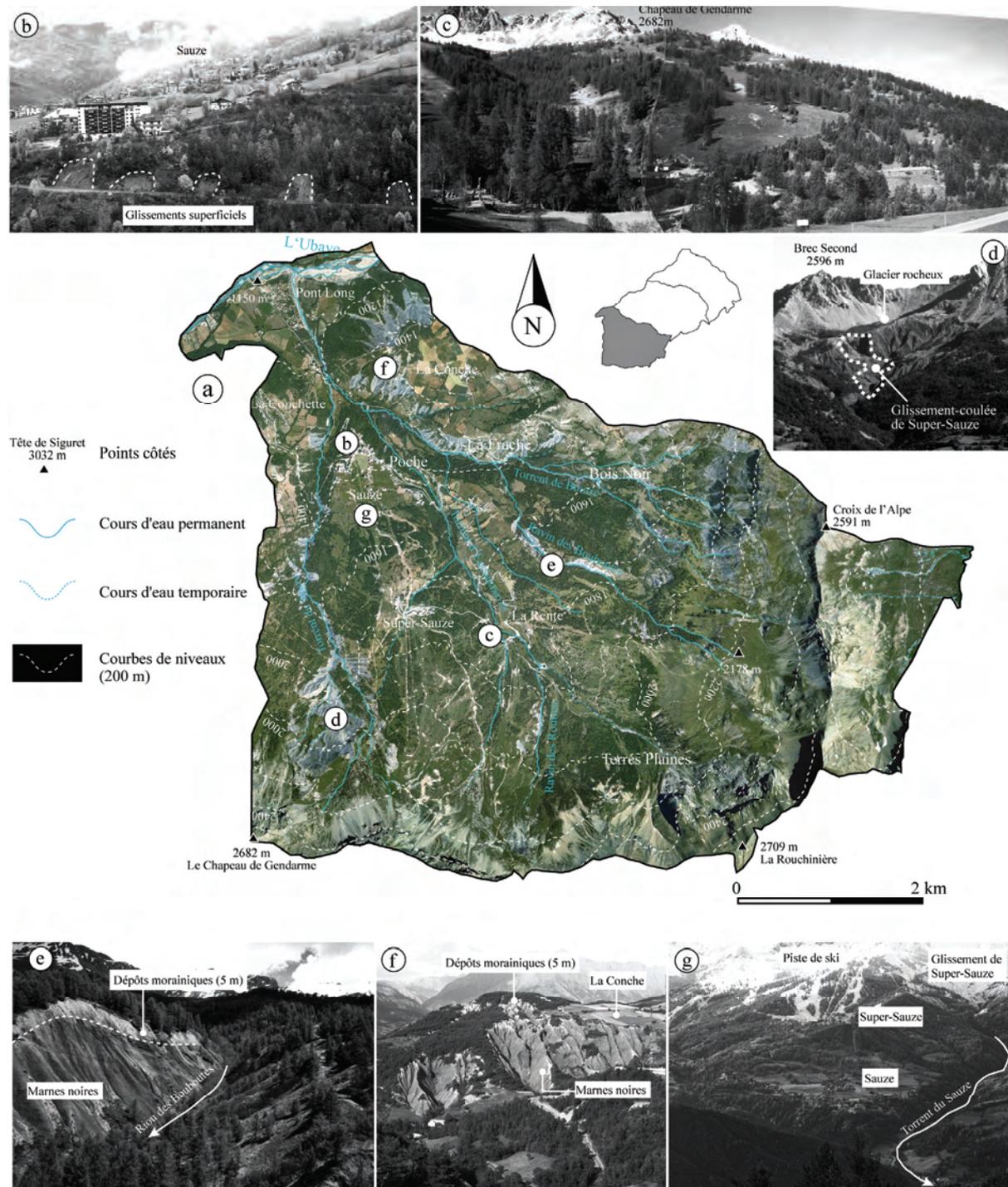
Elles regroupent des **tabliers d'éboulis fixés ou vifs**, jusqu'à 2200-2100 m d'altitude environ, et des **glaciers rocheux**. Localisés au fond de dépressions jusqu'à une altitude minimum de 2050 m, ces glaciers rocheux sont colonisés par la pelouse alpine et parfois par des mélèzes (Weber, 2001 ; Malet, 2003). Le glacier rocheux de la *Goutta* (2200 m), avec des blocs de grandes tailles, est considéré par Malet (2003) comme un aquifère alimentant la source de la *Goutta*, partiellement captée 200 m en aval. L'alimentation en eau de ces anciens glaciers rocheux s'effectue en amont, dans les talus d'éboulis au pied des parois rocheuses qui constituent l'impluvium. Les fontes des neiges saisonnières augmentent cette alimentation. Ainsi, en moyenne 300 m en aval, se forment les torrents du bassin d'*Enchastrayes*.

1.1.3.2. Les formes et les formations glaciaires héritées

De part et d'autre des anciens glaciers rocheux, des vestiges de cordons morainiques latéraux et de moraines de fond témoignent des stades de retraits successifs des glaciers locaux (Malet, 2003). Trois formes remarquables de ces types d'accumulation sont identifiables : glaciers rocheux, bourrelets morainiques, langues morainiques (Weber, 2001). On retiendra principalement que la moraine recouvre directement les '*Terres noires*' sur des épaisseurs ne dépassant pas 15 m (Malet, 2003). Cette superposition induit une discontinuité hydrogéologique majeure à l'origine de nombreuses instabilités de terrain superficielles (bossellements, creux, petites coulées, sagnes, arbres inclinés) et favorise l'exhumation du soubassement rocheux. Les infiltrations, au sein des moraines, entretiennent l'humectation des '*Terres noires*' et leur altération physico-chimique. La paléo-topographie fossilisée par la moraine et mise à jour montre une succession de crêtes et de vallons. Leurs dispositions correspondent à l'orientation des roubines en activité, plus à l'ouest.

Localement, entre 1800 m et 2200 m d'altitude, les dépôts morainiques sont affectés par des loupes de solifluxion favorisées : (i) par la dégradation du sol, (ii) la déformation de la

morphologie initiale par l'aménagement des pistes de ski, (iii) la faible épaisseur des moraines à certains endroits, et (iv) l'humectation permanente des terrains.



a. Orthophoto (IGN, 2004) du secteur d'Enchastrayes et localisation des photographies. b. Vue sur le Sauze. Multiples glissements superficiels le long du versant exposé vers l'Ouest. c. Vue sur le domaine skiable de la Rente. d. Glissement-coulée de Super-Sauze. e. Ravin des Bouboutes encaissé dans les 'Terres noires' surmontées par les moraines. f. Vue sur la Conche et ses ravines. g. Vue générale sur le bassin d'Enchastrayes et son domaine skiable.

Fig. 3.15. Photographies illustrant les principales caractéristiques morphologiques du secteur d'Enchastrayes.

1.1.3.3. Les formes et formations issues du ruissellement

Elles se déclinent entre le ravinement et les formes d'accumulation de type cônes et terrasses.

Les ravinements se situent dans les 'Terres noires' le long des torrents et/ou sur les versants à pentes fortes (Fig. 3.16). Ce modelé d'érosion linéaire se localise essentiellement autour de la Conche, le long du torrent de Sauze au lieu dit des Roubines. Il s'agit d'interfluvies aigües et pentues ($> 45^\circ$) espacées de 50 m à 80 m par de profonds ravins, et alimentées par des cours d'eau saisonniers. Les Roubines (0.9 km²) constituent un ensemble géomorphologique et hydrologique particulier puisque c'est dans cet amphithéâtre que s'est déclenché, dans les années 60, le glissement-coulée de Super-Sauze (Flageollet *et al.*, 1999 ; Malet, 2003 ; Maquaire *et al.*, 2003).

Les formes d'accumulation torrentielles sont essentiellement représentées par des terrasses récentes le long des torrents et par le vaste cône torrentiel des Galamonds (1.2 km², pente en long de 5% ; Fig. 3.15). Si sur ce cône, le torrent des Galamonds est canalisé par des ouvrages destinés à empêcher tout débordement, son lit en amont reste encombré de blocs hétérométriques et de troncs d'arbres. Le torrent étant aménagé (lotissement, routes) et connaissant des épisodes d'écoulement hyper-concentrés fréquents (une crue majeure tous les 15 ans en moyenne), le risque d'embâcle et de submersion est considérable. Il est accentué par la présence des ponts de la Conchette et du torrent de Boure qui constituent deux obstacles à l'écoulement (Malet, 2003).

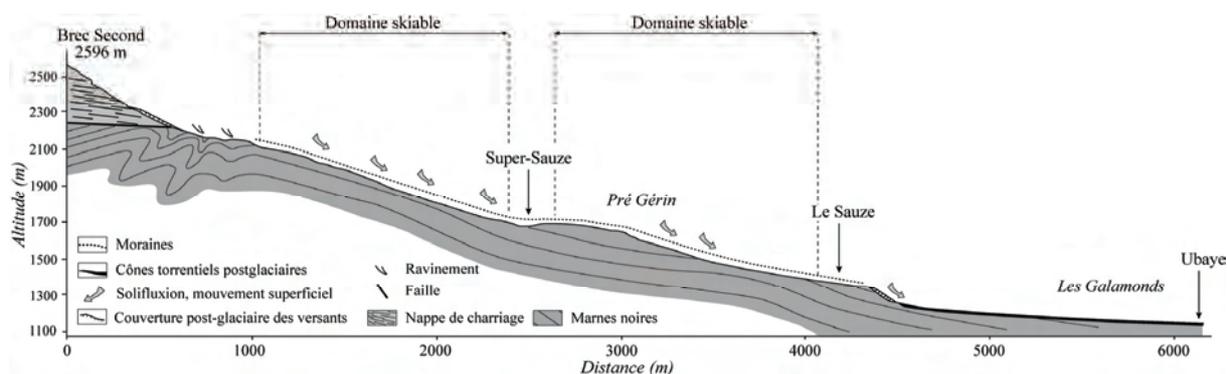


Fig. 3.16. Coupe géologique simplifiée du secteur d'Enchastrayes.

1.1.3.4. Les 'mouvements de versant' du bassin d'Enchastrayes

Des 'mouvements de versant' d'assez grandes dimensions sont localisés en trois secteurs principaux : aux alentours des Roubines, entre le ravin des Bouboutes et l'Aupillon et au ravin des Routres. De nombreux autres, de tailles plus modestes, s'observent le long des torrents.

a. Aux Roubines : le glissement-coulée de Super-Sauze

Ce glissement, d'une longueur de 820 m entre les altitudes de 1740 m, au pied de la coulée, et 2105 m, à la couronne, possède une pente moyenne de 25° et une superficie de 17 ha. Son volume est estimé à 750 000 m³ (Malet, 2003). Trois grandes parties peuvent être distinguées de l'amont vers l'aval avec : **une partie supérieure** (couronne et escarpement –zone d'ablation-) ; **la partie médiane** (corps de la coulée, zone d'accumulation) ; et la **partie terminale** (pied de la coulée) terme ultime du remaniement. Malet (2003) donne une description détaillée de la morphologie du glissement ainsi que les différentes caractéristiques géotechniques et hydrogéologiques.

b. Une instabilité récurrente entre le ravin des Bouboutes et l'Aupillon

Le versant entre le ravin des Bouboutes et l'Aupillon présente une topographie particulièrement chaotique alternant des pentes convexes et plusieurs contre-pentes. Les formes estompées

suggèrent une **série de glissements rotationnels successifs** (Fig. 3.17). Ces **mouvements, supposés dormants, pourraient se réactiver si certaines conditions environnementales venaient à changer**. Par exemple, en amont du torrent de *Boure*, l'abandon des terrains et la présence de secteurs plus humides ont favorisé une certaine réactivation d'un glissement. Vers 1650 m d'altitude, l'abandon récent du canal de drainage principal et le sapement basal du torrent ont provoqué une série de glissements rotationnels emboîtés actifs.

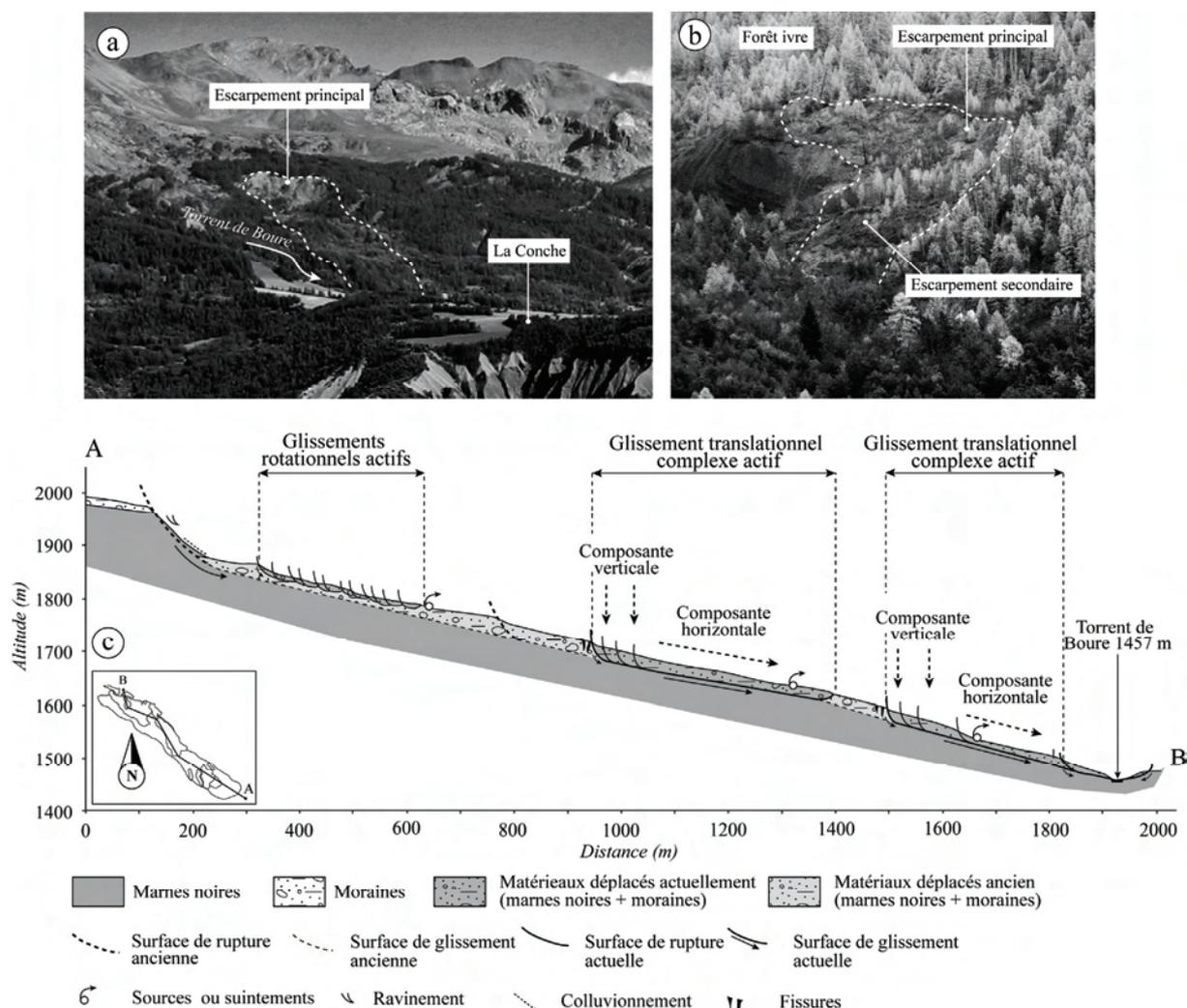


Fig. 3.17. Coupe géologique simplifiée du glissement de Bourre.

Au sud, l'interfluve entre les ravins des *Granges Blanches* et des *Bouboutes* témoigne d'une **activité gravitaire ancienne et récente**. Entre 1960 m et 1460 m (au torrent des *Bouboutes*), **un grand glissement translationnel complexe dormant, localement réactivé, occupe la majorité de la surface du versant**. L'escarpement, en amphithéâtre, est rafraîchi par un ravinement intense laissant apparaître le substratum de marnes noires. Recouvert par des colluvions marneuses, adoucissant la pente en partie basse, cet escarpement présente une pente légèrement concave en partie basse. Succède à cet escarpement, une contre-pente, large de 200 m pour une longueur de 80 m, occupée par une sagne permanente. La zone d'ablation est remaniée par une série de glissements rotationnels et translationnels complexes qui affectent les moraines et les marnes sous-jacentes. A partir de 1720 m, la zone est affectée par deux grands glissements translationnels complexes aux pentes moyennes de 15 et 20° et à la topographie chaotique. En amont, les pentes, plus fortes, présentent deux zones d'ablation constituées de multiples glissements rotationnels emboîtés. En aval, les corps des deux mouvements sont parsemés de nombreux indicateurs

d'instabilité 'frais' (fissures de cisaillements et de friction, fractures, bourrelets, forêt ivre, suintements, eaux stagnantes). La forte humidité du versant due à un réseau de drainage abandonné, la discontinuité moraines/substratum et la localisation de plis et de failles parfois visibles le long des berges du torrent de *Boure* sont probablement les principaux facteurs de cette déstabilisation. Enfin, dans la partie la plus aval, le sapement basal du torrent de *Boure* provoque de multiples glissements rotationnels de plus faibles ampleurs affectant la couverture morainique et le substratum (Fig. 3.17).

c. *Le long du ravin des Routres : glissement rotationnel actif*

Le glissement des *Routres* est situé le long du torrent des *Routres*, au nord de la *Tête des Fanets*, entre le *Clot de Preyre* et le *Pré aux Chèvres*. Il s'agit d'un **glissement rotationnel actif** dont l'escarpement principal, d'un commandement de 30 m environ, possède un profil concave et laisse apparaître les marnes noires. Cet escarpement, d'une pente de 50°, est fortement raviné (Augier et Flageollet, 1992).

Sous cet escarpement, un replat (50 m de large pour 25 m de long) caractérise le volume principal déplacé. Cette masse déplacée est limitée par un escarpement secondaire, d'une pente de 45°, entaillé par de petites dépressions en entonnoir d'où s'écoulent les eaux stagnantes en fin d'hiver. La masse déplacée se caractérise par une topographie fortement bosselée, le nombre de bourrelets s'accroissant vers l'aval. A l'aval, la pente s'adoucit mais reste marquée par des traces d'activité récente comme des fissures de distension, de compression et des bourrelets latéraux et transversaux. Enfin, sur une quinzaine de mètres, la partie aval des masses glissées évolue en coulées successives remaniées, qui encombrant le talweg. La forte humidité du replat supérieur et une alimentation en eau quasi-permanente entretiennent l'activité du mouvement.

d. *Une multitude de glissements translationnels superficiels*

Une multitude d'autres 'mouvements de versant' de tailles plus modestes s'observe le long des torrents. Ces glissements translationnels superficiels (*debris-slides*) ou banc sur banc (*rock-block-slides*) se déclarent au contact moraines/marnes noires ou dans les marnes noires. Sur les pentes plus faibles, les glissements superficiels affectent les moraines dans les secteurs proches de circulation d'eau saisonnière, notamment au printemps lors de la fonte de la couverture neigeuse.

Au dessus de 2000 m d'altitude, des loupes de solifluxion, plus ou moins étendues, engendrent une topographie bosselée. Ces loupes sont favorisées par le gel puis le dégel des formations morainiques au printemps. En effet, au dégel, les formations superficielles gorgées d'eau et alimentées par l'eau de fonte fluent sur le substrat. En été, ces instabilités superficielles sont alimentées par des circulations hydrogéologiques favorisées par le fort degré de tectonisation des roches de la nappe de *Parpaillon* et des marnes noires (Augier et Flageollet, 1992).

1.2. En conclusion

Cette description indique que les différents secteurs, à la morphologie contrastée, sont affectés par de nombreux 'mouvements de versant' qui se déclinent essentiellement en **glissements translationnels, rotationnels, et/ou complexes**. Ils peuvent s'étendre sur de très grandes superficie, parfois être coalescents, ou plus ou moins emboîtés les uns dans les autres, entraînant une morphologie très complexe et caractéristique. Cette richesse des formes et des processus est couplée à une activité diverse selon les secteurs et les facteurs de prédisposition et déclenchant. Ainsi, des mouvements fossiles et/ou dormants peuvent cohabiter à quelques mètres de mouvements actifs. Face à cette diversité des phénomènes et en fonction de leur activité, le choix du versant *Ubac* comme secteur de calage apparaît comme particulièrement bien

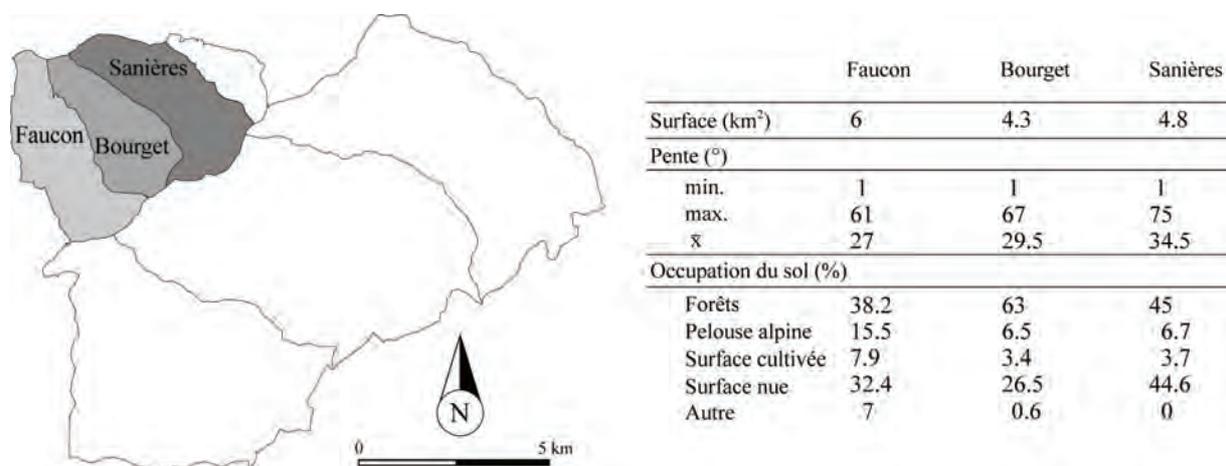
adapté à la recherche engagée. Il s'agit maintenant de décrire le versant *Adret* qui servira de site de validation local.

2. LE VERSANT ADRET : SITE DE VALIDATION LOCAL

Le versant *Adret* correspond à l'extension de trois bassins versants (Figs. 3.18 et 3.19) caractérisés par une forte activité torrentielle (Remaître, 2006). De nombreuses instabilités affectent les versants et les berges des torrents. Elles peuvent (i) nourrir les laves torrentielles ou (ii) affecter les divers aménagements (Remaître, 2006 ; Fig. 3.19h).

Sur une période récente, entre 1996 et 2004, quatre torrents ont été le siège de crues et/ou de laves torrentielles : les torrents de l'*Abéous*, de *Faucon*, du *Bourget* et de *Sanières*. Parmi ces quatre torrents, trois ont bénéficié de la construction de bases de données spatialisées à l'échelle du 1/10 000^{ème} dans le cadre du programme *ALARM* : les torrents de *Faucon*, du *Bourget*, et de *Sanières*. Ces données disponibles nous ont permis d'envisager plus facilement une tentative de transposition des résultats pour une validation à un niveau local, sans avoir à conduire de lourdes collectes d'informations.

Les descriptions des différentes caractéristiques morphologiques (Fig. 3.18) et hydrologiques de chacun de ces bassins versants sont reprises des travaux de Remaître (2006) et illustrées par la figure 3.19 et les cartes morphodynamiques levées par Remaître (2006 ; Figs. 3.21, 3.22 et 3.23). Les différents types d'instabilité de versant observés pour les trois bassins versants seront détaillés en conclusion.

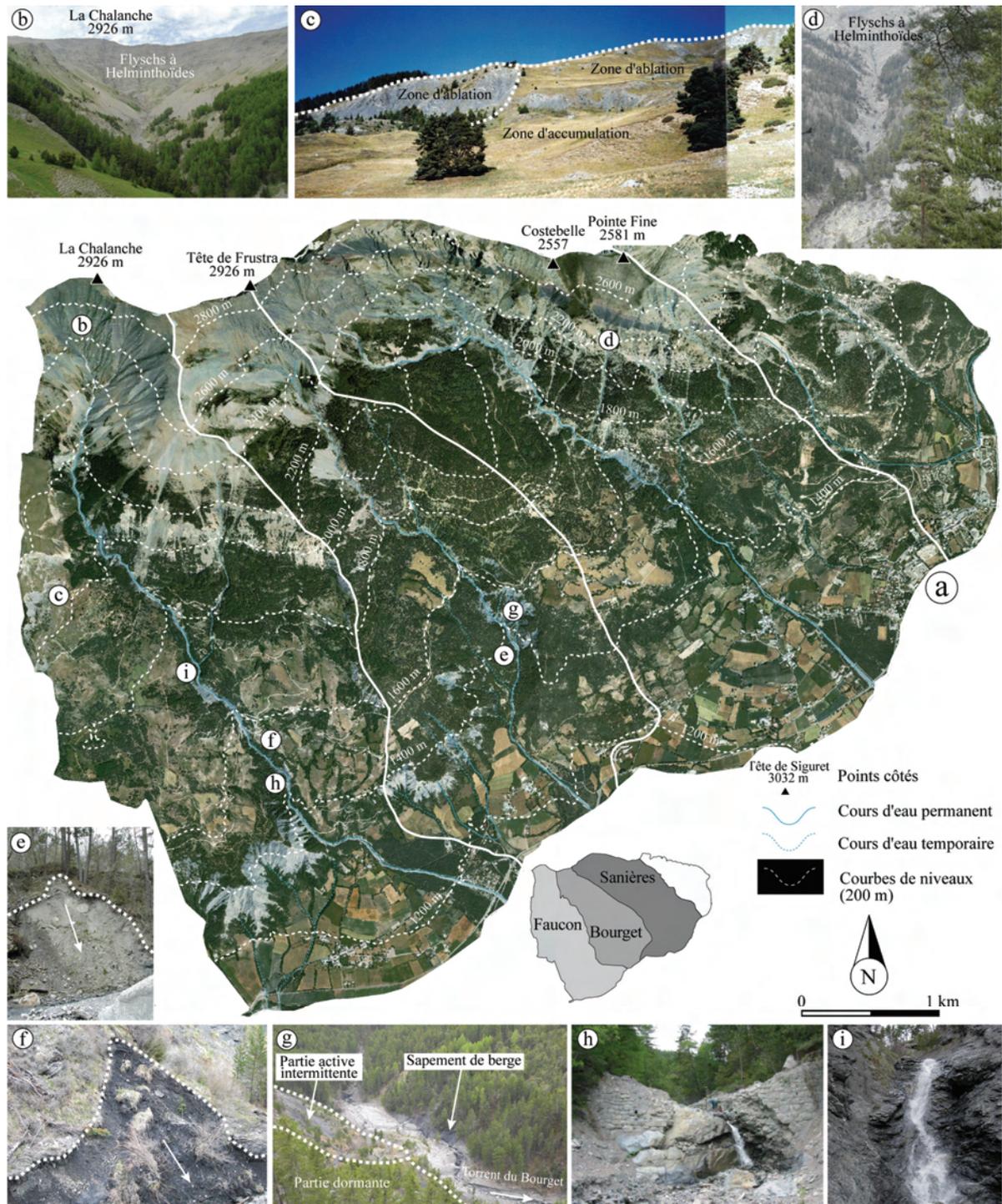


Remarque : les caractéristiques de chaque bassin ne tiennent pas compte de la surface des cônes de déjection.

Fig. 3.18. Localisation et caractéristiques principales des trois bassins versants de l'Adret.

2.1. Le bassin versant du Faucon

Sa limite septentrionale correspond à la *Crêtes des Trois Hommes*. Le bassin versant, de forme très allongée, est assez étroit en partie amont (750 m de largeur environ), et s'évase progressivement jusqu'à son cône de déjection. En amont, le vaste bassin de réception (0.25 km²), en forme d'amphithéâtre et aux crêtes escarpées, culmine à 2984 m (Fig.3.19b). Surcreusé dans un cirque glaciaire, le chenal prend véritablement naissance à 2250 m d'altitude dans les flyschs à *Helminthoïdes* de la nappe de *Parpaillon*. De nombreux ravins escarpés espacés d'une dizaine de mètre jalonnent les pentes abruptes du bassin de réception.



a. Orthophoto (IGN, 2004) du versant Adret et localisation des photographies. b. Vue sur le bassin de réception du torrent de Faucon (Cliché : Remaître, 2004). c. Glissement rotationnel dormant de Soleil-Bœuf (Cliché : Remaître, 2004). d. Vue sur le ravin de Costebelle, affluent du torrent de Sanières (Cliché : Remaître, 2004). e. Glissement translationnel superficiel de berge dans des colluvions morainiques (Cliché : Remaître, 2004). f. Glissement translationnel de berge dans des colluvions marneux (Cliché : Remaître, 2004). g. Vue sur la partie basse du glissement translationnel complexe de la Rata et du chenal du torrent du Bourget. h. Barrage en moellon, le barrage est très endommagé par les contraintes qu'exercent les répétitions d'évènements torrentiels exceptionnels (crues, laves torrentielles ; Cliché : Remaître, 2004). i. Seuil naturel le long du torrent de Faucon (Cliché : Remaître, 2004).

Fig. 3.19. Photographies illustrant les principales caractéristiques morphologiques du versant Adret.

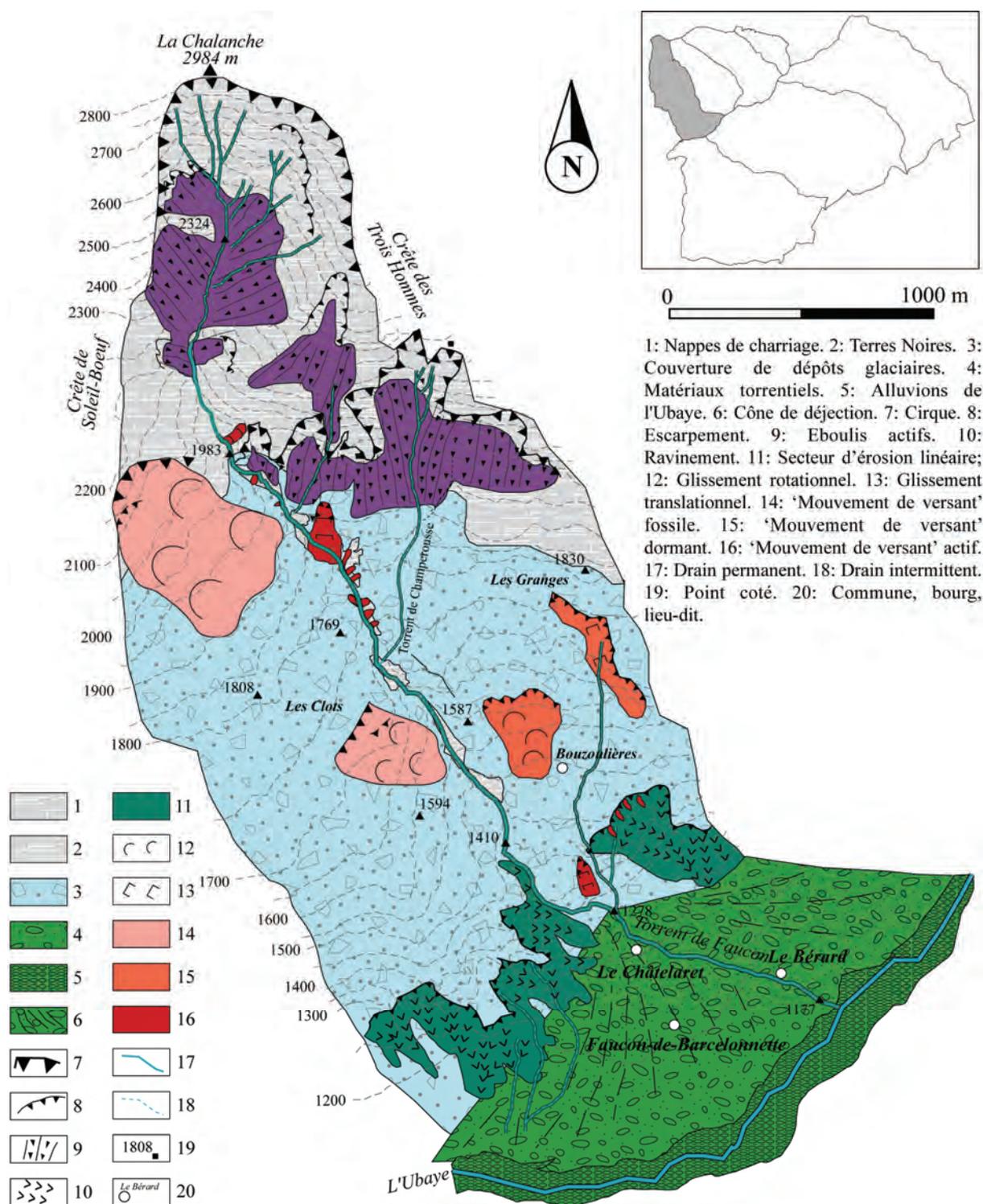


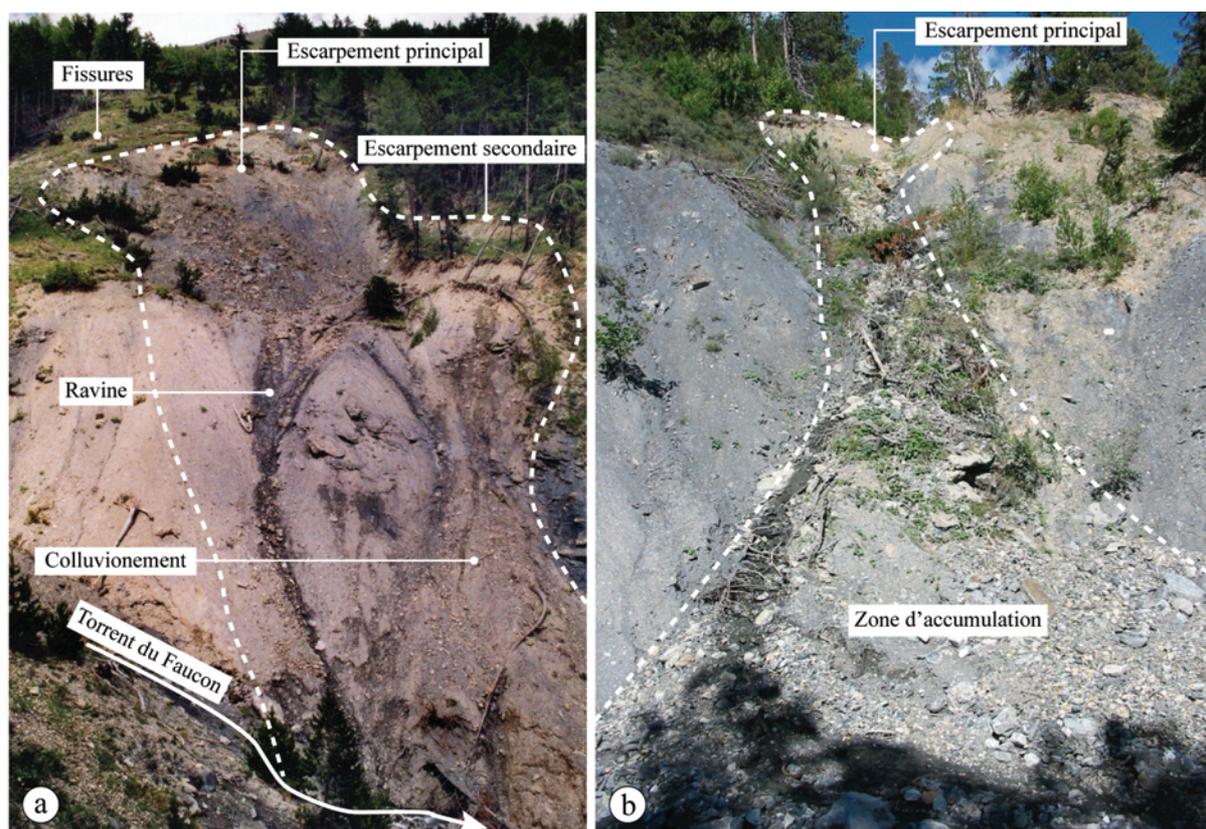
Fig. 3.20. Carte morphodynamique du bassin versant du torrent de Faucon (adapté de Remaître, 2006).

D'une longueur de 6 km, le torrent s'écoule dans un long et profond ravin et dévale 1420 m de dénivellation sur une pente moyenne de 17°. La morphologie du chenal est variée, alternant des sections aux pentes faibles à moyennes (10° à 25°) et des sections à pente forte (> 25°). Drainant une surface de 8.2 km² en amont du cône de déjection, le torrent affouille, de l'amont vers l'aval, les calcaires et les flyschs des nappes de l'Autapie et du Parpaillon (entre 3000 m et 1900 m d'altitude, Figs. 3.19b et 3.20) puis en partie médiane les 'Terres noires' et les formations morainiques (Figs. 3.19d et 3.19e). D'une pente moyenne de 13°, le chenal d'écoulement présente

un profil en long irrégulier dû à des seuils naturels et/ou anthropiques. **Les seuils naturels** sont d'origine structurale (Fig. 3.19i) et sont surtout localisés dans la zone de contact entre les 'Terres noires' autochtones et les nappes de charriage. **Les seuils anthropiques** ont été construits (Fig. 3.19h) et rénovés par le service du RTM afin de limiter les dégâts des laves torrentielles.

Le chenal découlement présente trois grands types de profils transversaux : profil en V, profil à fond plat et profil dissymétrique. Des 'mouvements de versant', plus particulièrement des glissements translationnels superficiels (*debris-slides*), affectent fréquemment la partie inférieure des ravins comme le glissement des *Trois Hommes* (Fig. 3.21) et le glissement de *Champerousse* (Remaître, 2006). **Ces deux glissements ont fait l'objet d'attention particulière en ce qui concerne leur apport en matériaux lors de laves torrentielles.** Leurs descriptions détaillées peuvent être trouvées dans la thèse de Remaître (2006).

Quatre 'mouvements de versant' de grande taille ont été observés sur les interfluves : *Bouzoulières*, *les Clots*, *Les Granges* et *Soleil-Bœuf* (Figs. 3.19c et 3.20). En rive droite de *Faucon*, *Soleil-Bœuf* et *les Clots* sont des successions de plusieurs glissements rotationnels fossiles (Fig. 3.19c). Le premier affecte les flyschs, alors que le second affecte les marnes noires et les dépôts morainiques sous-jacents. En rive gauche, les glissements de *Bouzoulières* et *des Granges* sont considérés comme dormants. Le premier est de type rotationnel, le second de type translationnel. Quelques signes d'instabilité sont perceptibles au niveau de l'escarpement principal où des traces d'érosion récentes mais modérées sont visibles.



a. Glissement des *Trois Hommes* dans les moraines. b. Glissement superficiel dans les moraines.

Fig. 3.21. 'Mouvements de versant' du bassin versant du Faucon (clichés : Remaître, 1998).

2.2. Le bassin versant du Bourget

Le bassin versant du **Bourget** occupe sur une surface de 5.5 km². Le torrent prend sa source à 2800 m environ sous la *Tête de Frustra* (2926 m) et s'écoule sur 5 km dans une vallée encaissée dont la pente moyenne est de 17° environ (Fig. 3.22).

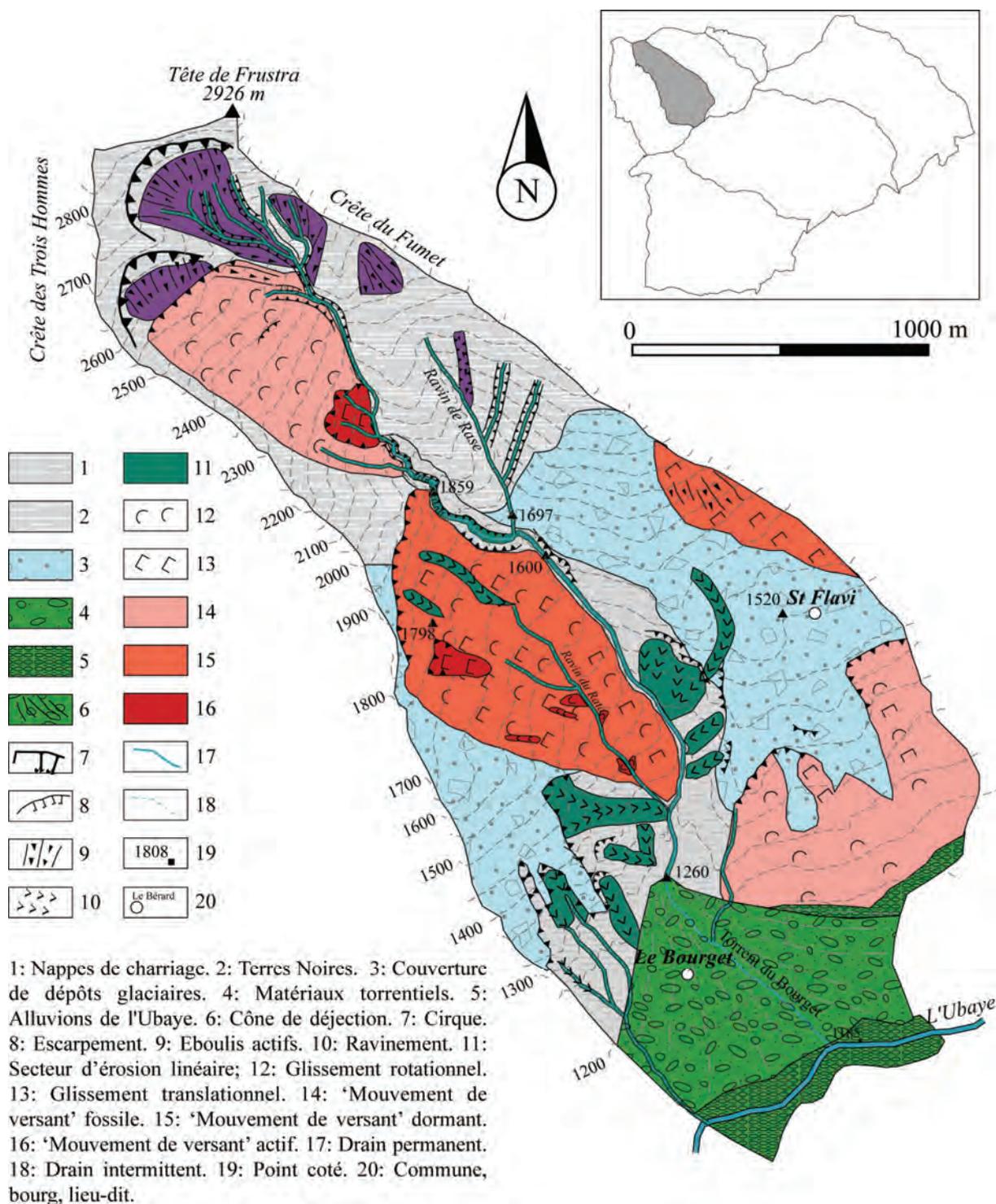


Fig. 3.22. Carte morphodynamique du bassin versant du torrent du Bourget (adapté de Remaître, 2006).

La forme du bassin versant est très allongée avec une partie amont étroite (250 m de large) et une partie aval plus large (1000 m). Le bassin de réception est vaste (3 km²) et est marqué par de

nombreux couloirs d'éboulis vifs. Taillé dans les calcaires et les flyschs de la nappe de *Parpaillon*, il se compose de deux anciens cirques glaciaires convergents vers le torrent à 2350 m d'altitude environ. Plus bas, en rive droite, un vaste glissement translationnel actif affecte les matériaux de la nappe de *Parpaillon*.

Sous le bassin de réception, le chenal d'écoulement incise profondément les '*Terres Noires*' et les formations morainiques particulièrement ravinées. Ces dernières drapent l'essentiel des versants en dessous de 1900 m. Entre 1650 m et 1900 m d'altitude, le torrent forme un ravin délimité par des escarpements actifs. L'interfluve de rive droite est marqué par deux grands glissements fossiles ou dormants. Le premier glissement amont est une succession de glissements rotationnels alors que le second, le glissement *de la Rata*, situé plus en aval, est une succession de glissements translationnels et rotationnels. Ce dernier s'étend sur près d'un kilomètre pour un dénivelé de 700 m environ et affecte les '*Terres Noires*' et les formations morainiques. En amont, ce glissement est localement réactivé par un abandon des terrains comme par exemple à *Rata Haut* où le drain principal, détournant une partie des eaux du torrent, est laissé à l'abandon. L'eau s'infiltre alors dans les dépôts morainiques entretenant une nappe permanente. Plus en aval, à *Rata Bas*, quelques glissements de faibles ampleurs, affectent ce glissement dormant. Ces glissements rotationnels se localisent surtout le long des petits ravins où des cours d'eau intermittents ou permanents entretiennent une instabilité récurrente des formations morainiques. **Seul le glissement de *Rata Haut* présente un danger pour le chemin reliant le village de *Faucon* à *Flavi* (Fig. 3.22).**

2.3. Le bassin versant de *Sanières*

Le bassin versant de *Sanières*, situé plus à l'est, occupe une surface de 6 km² environ entre 1215 m et 2874 m d'altitude. Comme les deux bassins versants précédents, sa forme est allongée avec une partie amont étroite (750 m de large) et une partie avale large (3 km). Entre 2900 m et 1750 m d'altitude le bassin versant est taillé dans les calcaires et les flyschs de la nappe du *Parpaillon*, entre 1350 m et 1200 m d'altitude le torrent affouille les '*Terres Noires*' du *Callovo-Oxfordien*. Les formations glaciaires recouvrent par endroit la lithologie (en dessous de 2100 m d'altitude en rive droite et 1700 m en rive gauche). Le bassin de réception, marqué par de fortes pentes, s'étend sur 0.8 km² entre 2900 m et 1900 m d'altitude (Fig. 3.23). Le torrent prend naissance vers 1900 m d'altitude à la confluence de plusieurs ravins qui incisent deux cirques glaciaires entre la *Tête de Crouès* et le *Brec Aneline*. Le chenal d'écoulement s'étend entre 1360 m et 1900 m d'altitude sur 2500 m environ. La partie supérieure affouille les flyschs et les calcaires alors qu'en aval, à partir de 1750 m d'altitude, ce sont les '*Terres noires*' qui sont érodées. Les versants le long du torrent sont dissymétriques et les versants de rive droite (20-40°) sont plus pentus que les versants de rive gauche (15-25°). Quelques mouvements de terrain sont connectés au chenal du torrent (Fig. 3.23).

L'interfluve du bassin versant de *Sanières* est marqué par deux grands glissements dormants. Le premier à l'ouest de *Rochefer*, entre 1560 m et 1870 m d'altitude, prend naissance dans les flyschs à *Helminthoïdes*, probablement le long d'une faille. De type translationnel, sa zone d'initiation d'une pente moyenne de 40° est recouverte par des éboulis. En aval, la zone d'accumulation de profil longitudinal concave passe de 35° à 5° pour une pente moyenne de 16°. Elle est formée par un chaos de blocs entre 1560 m et 1690 m d'altitude. Le pied du glissement recouvre les pentes plus planes, cultivées. Le second glissement se situe plus en aval. Il prend naissance à la limite de l'épaulement du glacier de l'*Ubaye* et du ravin de *Sanières* à 1510 m d'altitude. De type rotationnel, ce glissement, d'une longueur de 400 m environ, affecte des dépôts morainiques remaniés et les marnes sous-jacentes.

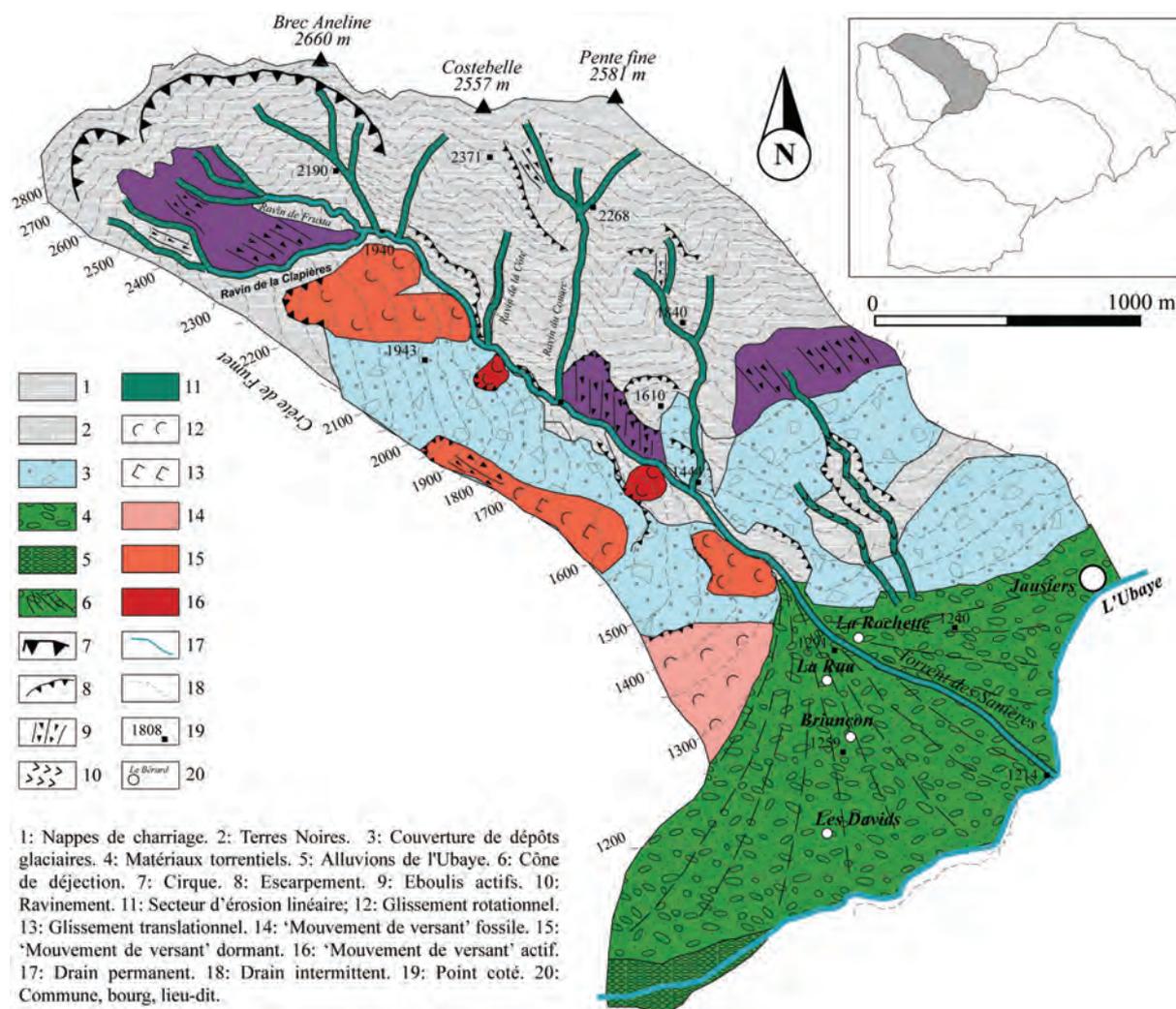


Fig. 3.23. Carte morphodynamique du bassin versant du torrent de Sanières (adapté de Remaître, 2006).

2.4. En conclusion : les 'mouvements de versant' de l'Adret

Quatre vingt dix neuf 'mouvements de versant' affectent le versant *Adret*. La majorité est située le long des berges (66%) et participent à la morphogenèse des ravins. Les autres sont situés sur les interfluves. Ces 'mouvements de versant' peuvent être qualifiés de fossiles (5%), de dormants (13%) ou d'actifs (81%).

Les 'mouvements de versant' dans les ravins sont actifs ou dormants. Il s'agit le plus souvent de glissements superficiels de type translationnel se localisant dans la zone de contact entre les marnes noires et les nappes de charriage ou le long des discontinuités entre les formations superficielles et la roche en place (formations périglaciaires liées au processus d'ébouilisation sur flyschs ou colluvions et/ou des formations de pente sur marnes noires). Ces glissements translationnels superficiels, entretenus par l'érosion torrentielle constante (sapement de berge), confèrent une topographie chahutée aux berges comme, par exemple, près du glissement des *Trois Hommes*, dans le bassin du *Faucon* (Fig. 3.21) ou encore les glissements de *Belmont* dans le torrent du *Bourget*. Quelques glissements rotationnels sont observés dans le bassin de *Sanières*. Comme pour le versant *Ubac*, les zones d'ablation des glissements rotationnels de berge se localisent sur les convexités des versants formant une rupture entre les interfluves et les pentes plus raides. Les matériaux affectés sont de types morainiques. Ces glissements présentent un réel danger en nourrissant les laves torrentielles par un apport de matériaux comme en 2003 pour le glissement des *Trois Hommes* (Remaître, 2006).

Entre 1550 m et 1700 m d'altitude, **les interfluves** sont marqués par les vestiges des épaulements du glacier de l'*Ubaye*, qui forment des pentes faibles (*Bouzoulières, Flavi*). Les formations superficielles de type morainiques y sont épaisses (d'une dizaine de mètre environ, Remaître, 2006). Hors de ces surfaces planes, les pentes plus fortes (entre 5° et 20° en moyenne) sont marquées par des bossellements et des ruptures de pentes **résultats de 'mouvements de versant' dormants ou actifs. Ce sont des glissements translationnels ou rotationnels** se développant sur des surfaces de quelques dizaines à quelques centaines d'hectares dans des formations morainiques discontinues plus minces (5-6 mètres maximum). Au total, trente trois 'mouvements de versant' ont été inventoriés sur ces interfluves (33% des 'mouvements de versant' inventoriés pour le versant *Adret*).

3. TYPOLOGIE DES 'MOUVEMENTS DE VERSANT'

Après cette description des sites de recherche et cet inventaire des différentes instabilités de versant, nous établissons dans un premier temps **une typologie des phénomènes présents dans le bassin de Barcelonnette. Cette typologie est fondée sur : (i) les critères de forme, (ii) la profondeur considérée des phénomènes** (très superficiel, *very shallow*, superficiel *shallow*, profond, très *deep-seated*, profond, *very deep-seated*), **(iii) le type de matériau affecté** (roche dégradée, *weathered bedrock*, formations superficielles autochtones/allochtones, *autochthonous/allochthonous superficial deposits*) et **(iv) la localisation** (interfluves, versants proches des torrents ; Maquaire et Malet, 2006). Le tableau 3.1 résume la typologie des 'mouvements de versant' inventoriés ainsi que les caractéristiques associées observées lors des différentes campagnes de terrain.

Au total, **sept types** de 'mouvements de versant' sont définis : (i) les écroulements (*rock-falls*), (ii) les glissements banc sur banc (*rock block slides*), (iii) les glissements translationnels rocheux (*translational rock slide*); (iv) les glissements complexes et composites; (v) les glissements translationnels (*translational slides*), (vi) les glissements rotationnels (*rotational slide*); (vii) la solifluxion.

Tab. 3.1. Typologie des 'mouvements de versant et caractéristiques observées sur le terrain dans le bassin de Barcelonnette.

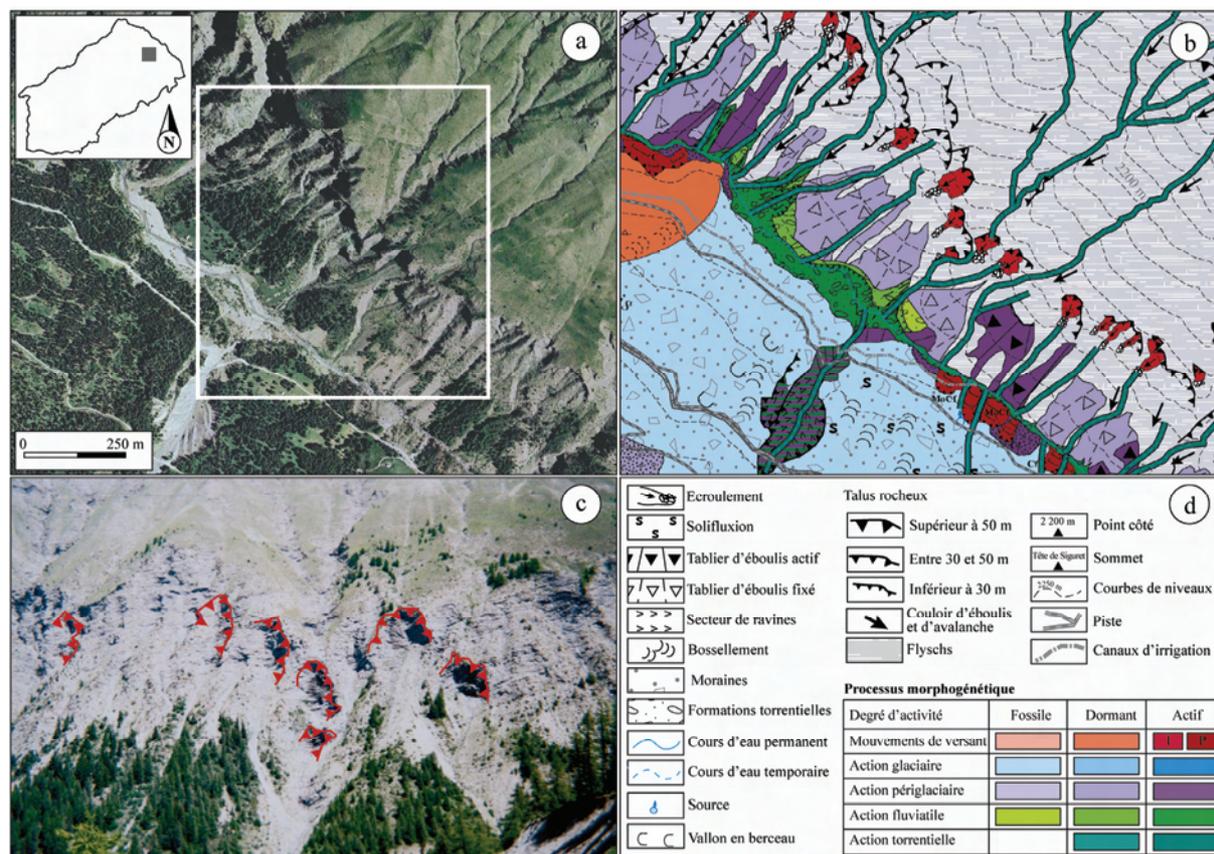
Ab. = Abréviation ; α = pentes généralement observées sur le terrain ; Pr. = profondeur considérée ; n.d = non déterminé ; TS= Très superficiel (< 2m) ; S = Superficiel (2-6 m) ; P = Profond (6-10 m) ; Très profond (> 10m) ; Ac = Activité estimée : F = Fossile ; L= Latent ; AI = Actif intermittent ; 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 (°)	Pr.	Ac.	
(i) Eroulement (rock fall)**	EC	Déclenchement dans les flyschs, proche des failles, la l'escarpement principal est vertical de forme plane ou triangulaire, la zone d'accumulation comporte des blocs hétérométriques. Localisé principalement dans la vallée de l'Abriès.	> 30	n.d	AI-AC	
(ii) Glissement banc sur banc (rock block slide)*** ^d	GBB	Déclenchement dans les marnes noires dénudées, l'escarpement principal est vertical de forme plane ou triangulaire, 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'Abriès.	15-20	TP	F	
(iv) Glissement-coulée (earthflow)***	GC	Déclenchement dans les marnes noires, l'escarpement est vertical. Ce type de glissement associe en amont un glissement banc sur banc et en aval une zone d'accumulation sous la forme 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 (debris 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 (debris 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 à l'interface entre avec la roche saine (généralement des marnes noires) et les dépôts morainiques. Ce type de glissement se compose 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 glissements rotationnels de berge. 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	

3.1. Les écoulements

Les écoulements (rock-falls) sont localisés principalement dans la vallée de l'Abriès, dans les flyschs à *Helminthoides* très fracturés (Fig. 3.24) et à proximité de failles visibles dans le relief. Ils

présentent une zone d'ablation avec un escarpement quasi-vertical de forme plane à triangulaire. La zone d'accumulation est en contrebas et présente un chaos de bloc et de débris reposant parfois sur un cône d'éboulis ou chenalisée dans un couloir torrentiel ou couloir d'avalanche. Les débris les plus fins sont alors repris par le ruissellement, alimentant un cône torrentiel en contrebas.

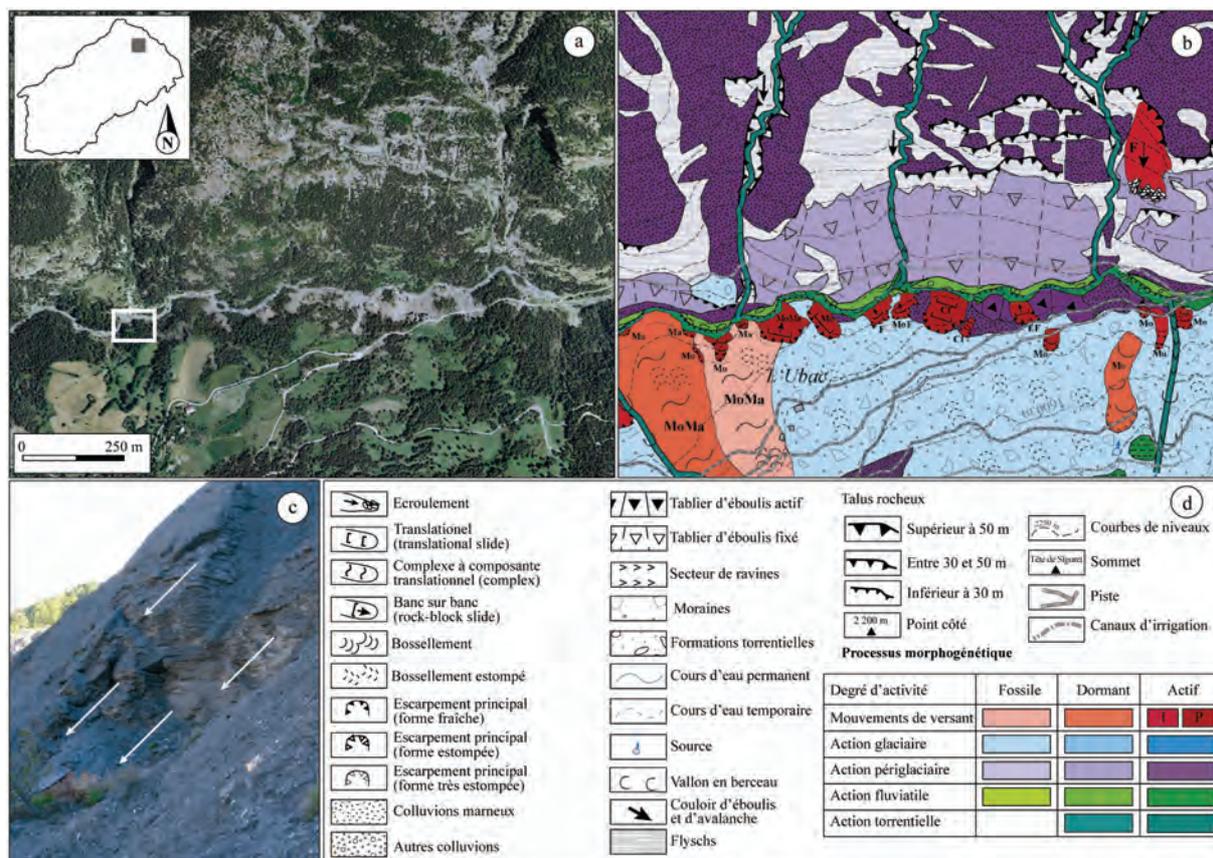


a. Orthophoto (IGN, 2000b) et localisation d'éroulements dans la vallée de l'Abriès (versant Ubac). b. Carte morphodynamique du secteur. c. Photographie du secteur (2002). d. Extrait de la légende de la carte morphodynamique.

Fig. 3.24. Fiche descriptive synthétique des écoulements (rock falls).

3.2. Les glissements banc sur banc

Les glissements banc sur banc ou *rock block slides* sont localisés dans les secteurs de 'badlands', dans les marnes noires, plus rarement dans les schistes noirs. Ils se développent (i) le long d'une discontinuité lithologique, (ii) d'un joint de stratification ou (iii) des diaclases perpendiculaires au pendage. La zone d'ablation présente un escarpement plus ou moins rectiligne suivant les diaclases (Fig. 3.25). La zone d'accumulation présente un amas de blocs hétérogènes plus ou moins désagrégés. Lorsque le phénomène est proche d'un torrent, la zone d'accumulation peut avoir été entraînée par l'eau. Plutôt de superficiels, il est possible d'observer quelques glissements banc sur banc plus profonds.

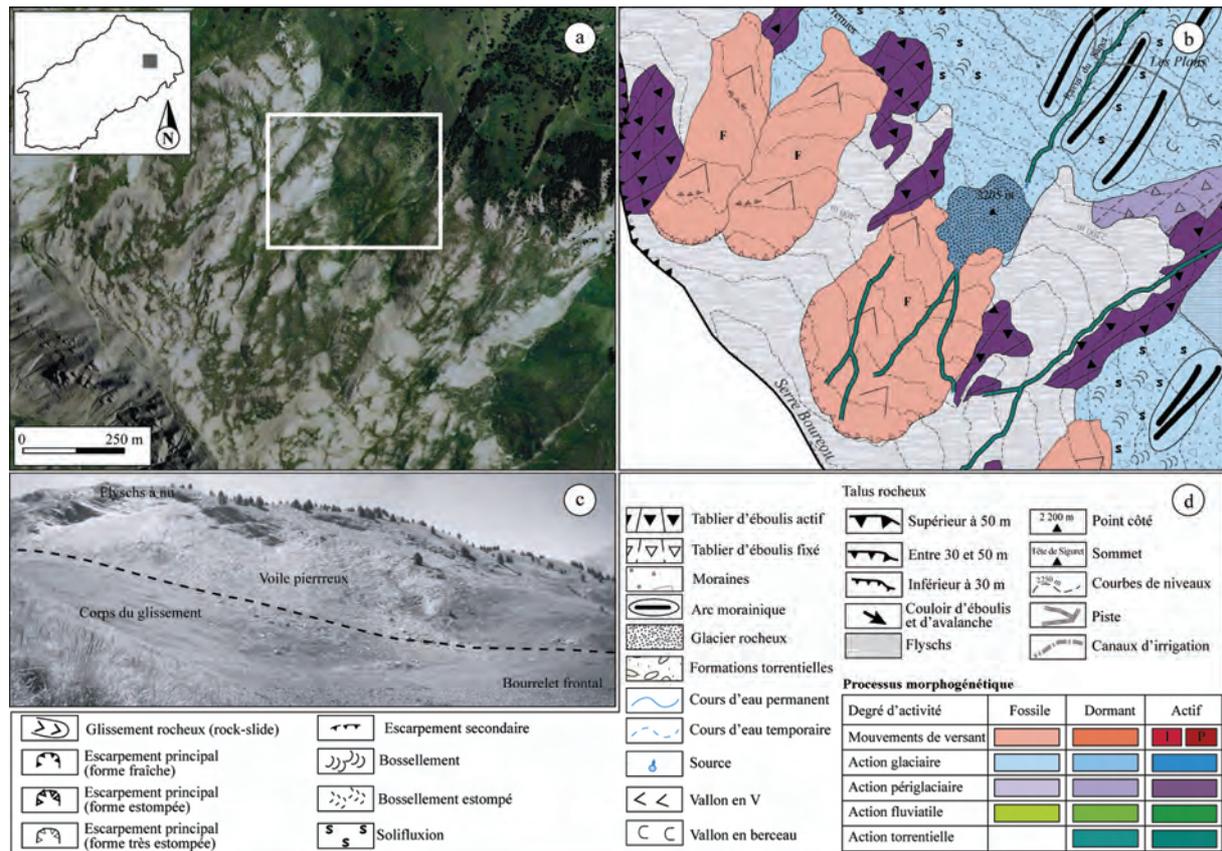


a. Orthophoto (IGN, 2000b) et localisation de quelques glissements banc sur banc sur le versant Ubac. b. Carte morphodynamique du secteur. c. Photographie du secteur (2002). d. Extrait de la légende de la carte morphodynamique.

Fig. 3.25. Fiche descriptive synthétique des glissements banc sur banc (rock block slides).

3.3. Les grands glissements translationnels rocheux

Les grands mouvements rocheux sont difficilement reconnaissables sur le terrain. L'analyse stéréoscopique est donc requise dans un premier temps afin de les différencier du paysage alentour. Une vérification 'terrain' est alors réalisée, pour confirmer l'interprétation. Ces glissements sont situés sur la rive gauche du torrent de l'Abriès, entre 1800 m et 2200 m d'altitude (Fig. 3.26). Ces glissements profonds se sont probablement déclenchés lors de la fonte du glacier de l'Abriès. Le mouvement a été favorisé par : (i) la décompression, due au retrait du glacier (favorisant le fluage des flyschs à *Helminthoides*) ; et (ii) un pendage conforme à la pente (par les multiples plans de foliation et par les failles perpendiculaires aux plans de foliation). La zone d'ablation présente un escarpement au tracé plus ou moins circulaire, souvent masqué par un 'voile pierreuse' formé de roche saine légèrement désagrégée. La zone d'accumulation est caractérisée par une alternance de secteurs plus ou moins plans dont la pente est parallèle au pendage. Quelques ruptures de pentes sont parfois visibles (probablement des escarpements secondaires). La zone d'accumulation est recouverte par : (i) des débris rocheux (inférieurs à une trentaine de centimètres) ou (ii) une pelouse alpine, parfois quelques bosquets. Les flancs externes de la zone d'accumulation sont recouverts par un 'voile pierreuse'.

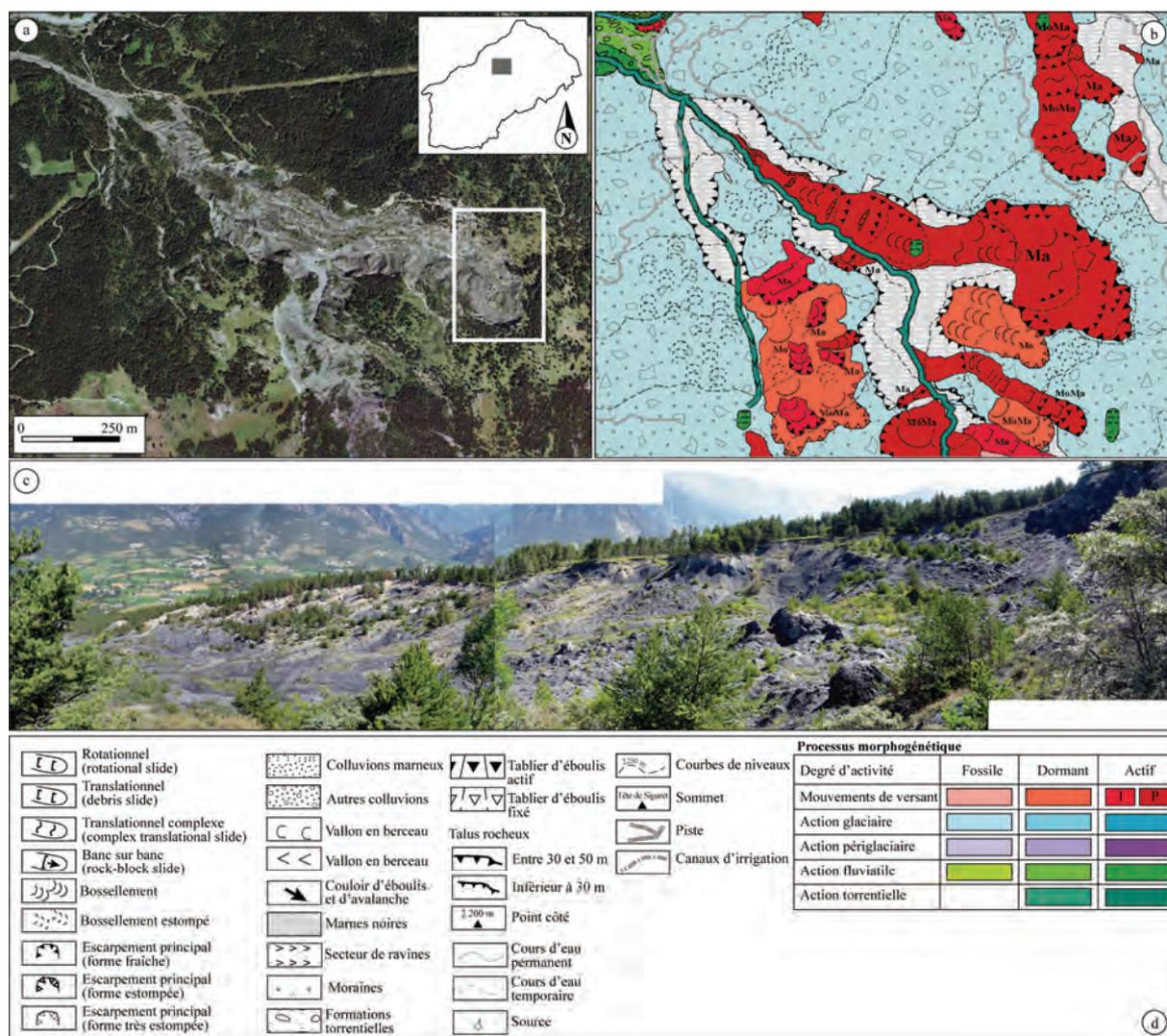


a. Orthophoto (IGN, 2004) et localisation de quelques grands glissements rocheux dans la vallée de l'Abriès (versant Ubac). b. Carte morphodynamique du secteur. c. Photographie du secteur (2002). d. Extrait de la légende de la carte morphodynamique.

Fig. 3.26. Fiche descriptive synthétique des glissements translationnels rocheux (rock slides).

3.4. Les glissements-coulées

Les glissements-coulées associent un glissement (banc sur banc ou rotationnel) en amont et une coulée en aval (Fig. 3.27). Les caractéristiques géomécaniques des marnes favorisent la désagrégation en coulée des panneaux glissés (Malet, 2003). Généralement, ces phénomènes se déclenchent dans des secteurs de 'badlands' affectant des marnes noires. La zone d'ablation est semi-circulaire et d'une hauteur variable suivant le phénomène. La zone d'accumulation présente un aspect chaotique avec des lobes, des fissures radiales et des bourrelets frontaux. Dans le Bassin de Barcelonnette, trois cas principaux sont observés : les glissements-coulées de Super-Sauze, de Poche et de la Valette. Chacun est susceptible de déclencher des laves torrentielles (Malet, 2003 ; Maquaire et al., 2003 ; Malet et al., 2005 ; Remaître, 2006)



a. Orthophoto (IGN, 2000b) et localisation de quelques mouvements complexes (glissement-coulée de Poche). b. Carte morphodynamique du secteur. c. Photographie du secteur (2002). d. Extrait de la légende de la carte morphodynamique.

Fig. 3.27. Fiche descriptive synthétique des mouvements composites et complexes (complex slides – earthflow).

3.5. Les glissements translationnels

Les glissements translationnels se caractérisent par une surface de glissement plane. En amont, la couronne n'a pas de forme particulière et l'escarpement est plus ou moins développé suivant le glissement observé (Fig. 3.28). La majorité d'entre eux, se développent sur (i) une discontinuité lithologique ou (ii) au contact formations superficielles/roche saine. On distingue les glissements translationnels superficiels (*debris slide*), et les glissements translationnels complexes superficiels à profonds (*complex translational slide*).

3.5.1. Les glissements translationnels superficiels

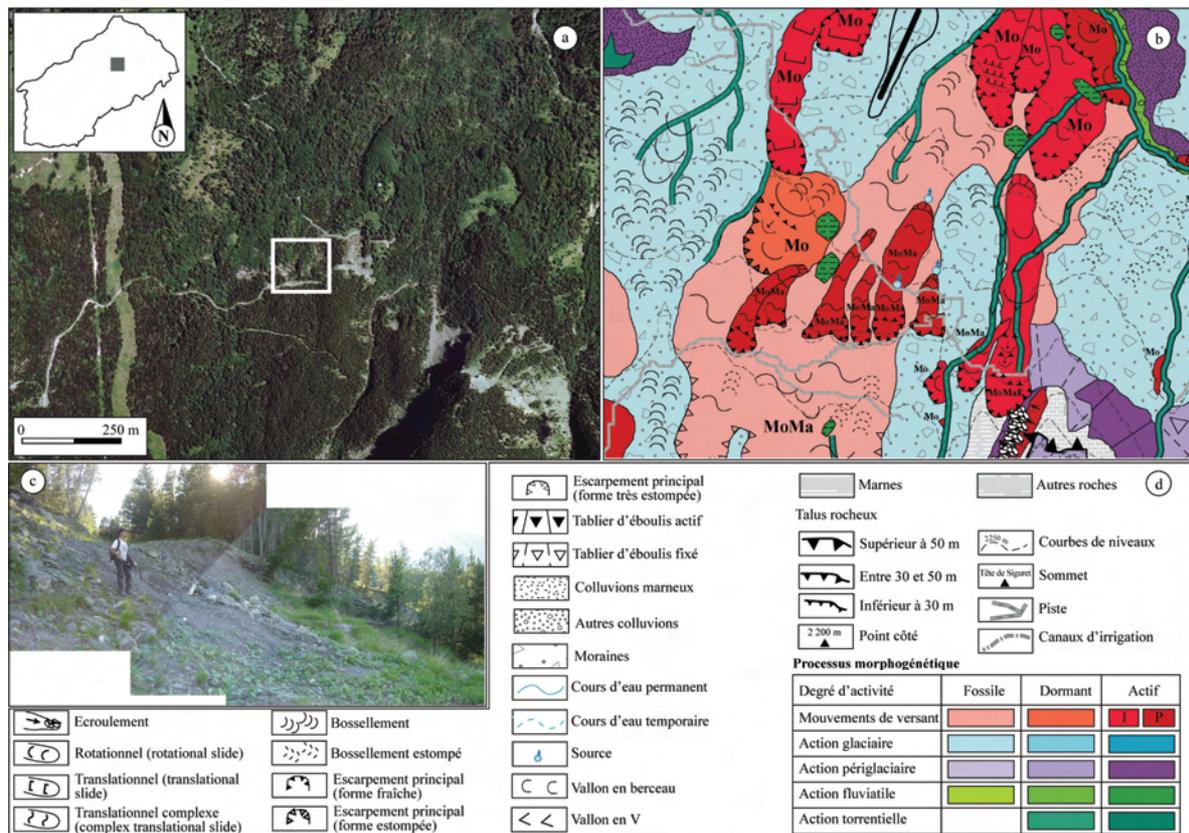
Les **glissements translationnels superficiels** ou *debris-slides* affectent des dépôts morainiques peu épais ou des colluvions. Ce sont généralement des mouvements très superficiels (< 2 m) favorisés par une discontinuité entre les formations superficielles et la roche saine. La zone

d'ablation ne présente pas de forme particulière et la hauteur de l'escarpement varie de 0.5 à 3 m maximum, la surface de glissement y est parfois visible. La zone d'accumulation forme un tablier de débris hétérogènes, sans tri apparent.

Deux types de *debris-slide* peuvent être distingués suivant la localisation : le premier type se situe **le long des berges des torrents**, où le sapement torrentiel favorise leur déclenchement. Le second type est localisé sur **les interfluves** sur des pentes souvent supérieures à 20°.

3.5.2. Les glissements translationnels complexes

Ils sont superficiels à profonds (> 2 m d'épaisseur). Ils se déclarent dans des dépôts morainiques à l'interface moraines/roche saine (Fig. 3.28). Ces mouvements manifestent une double composante verticale et horizontale. La composante verticale est représentée généralement par une succession de glissements rotationnels. La composante horizontale est représentée par un glissement translationnel. La zone d'ablation présente un escarpement à géométrie variable. Sous l'escarpement principal, il est possible d'observer un ou des grabens et des contre-pentes.



a. Orthophoto (IGN, 2000b) et localisation de quelques glissements translationnels complexes (versant de Bois Noir). b. Carte morphodynamique du secteur. c. Photographie du secteur (2007). d. Extrait de la légende de la carte morphodynamique.

Fig. 3.28. Fiche descriptive synthétique des glissements translationnels complexes (complex translational slides).

La zone d'accumulation est rectangulaire ou triangulaire. Elle peut-être marquée par de multiples fissures latérales, des bourrelets et présenter un aspect chaotique lorsque le mouvement

est actif. Les pentes affectées varient entre pentes faibles (5°) et pentes assez fortes (35°). C'est le type de mouvement le plus couramment observé dans le bassin.

3.6. Les glissements rotationnels

Les glissements rotationnels sont caractérisés par une surface de glissement plus ou moins circulaire (Buma et Van Asch, 1996), une couronne et un escarpement à la forme semi-circulaire, et un corps de mouvement à la topographie plus ou moins plane avec ou sans contre-pente (replat de glissement marqué parfois par une zone humide – sagne). Ces glissements peuvent être suivis en aval par une coulée avec des lobes et des bourrelets. Ces glissements, en majorité superficiels (entre 2 et 6 m d'épaisseur), se déclenchent essentiellement dans les moraines, matériau cohérent sans discontinuité. Deux sous-types peuvent être distingués : **les glissements rotationnels de berges** (Fig. 3.29) et **les glissements rotationnels d'interfluve**. A l'échelle du 1/10 000^{ème}, étant donné les petites tailles des glissements rotationnels simples, emboîtés et successifs, il est difficile de les représenter par des signes distinctifs. Ainsi, sur la carte morphodynamique ils ne sont pas distingués.

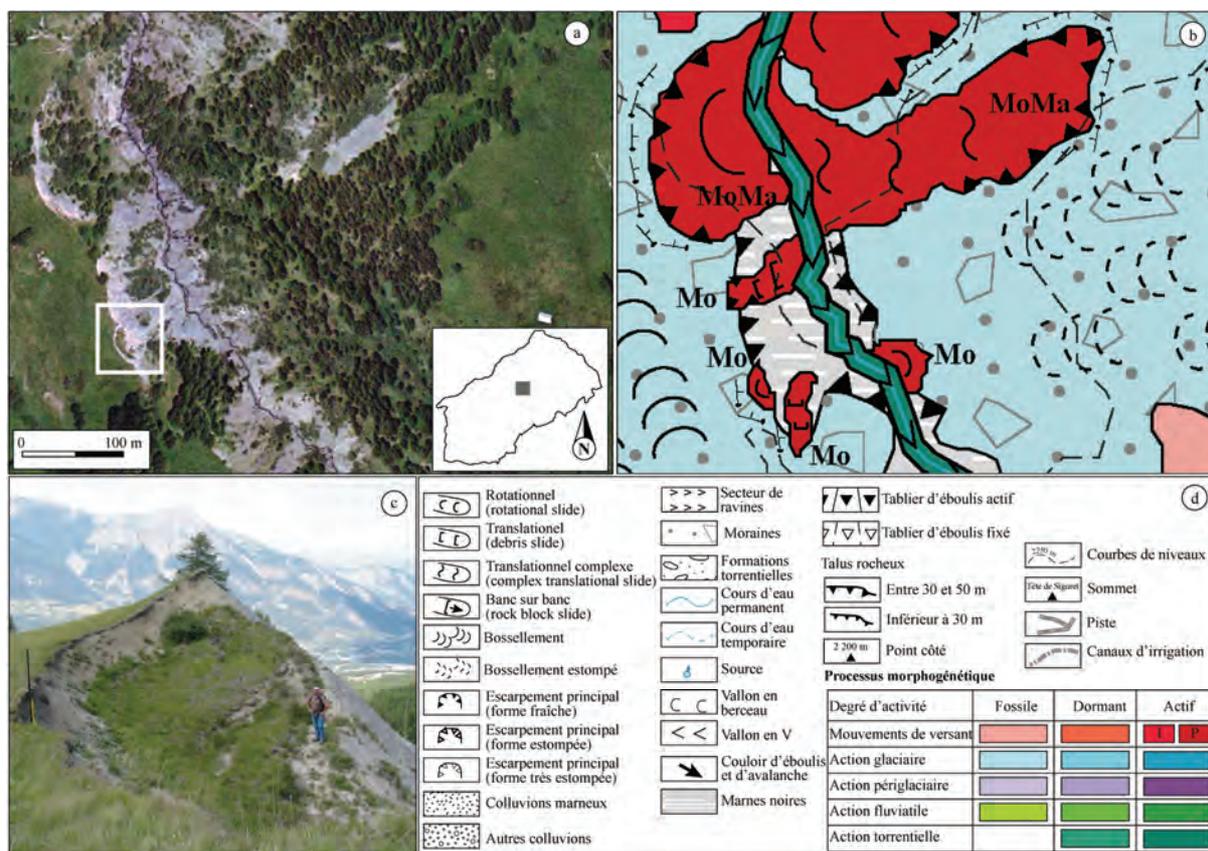


Fig. 3.29. Fiche descriptive synthétique des glissements rotationnels de berge (rotational slides).

3.6.1. Les glissements rotationnels de berge

Ils se situent le long des berges des torrents (surtout le long des torrents de la Frache, de Poche et du Riou des Ribes). La zone d'ablation présente un escarpement principal à l'aspect semi-circulaire et de multiples escarpements secondaires formant des gradins plus ou moins plans

avec parfois un regard vers l'amont (Fig. 3.29). La zone d'accumulation présente une topographie bosselée avec de multiples fissures transversales et radiales, des bourrelets transversaux et un pied comportant lobes et bourrelets. La zone d'accumulation peut avoir disparu : le matériau déplacé ayant été entraîné par les cours d'eau.

3.6.2. Les glissements rotationnels d'interfluve

Ils sont présents lorsque les dépôts morainiques sont assez épais (jusqu'à 10 m d'épaisseur). Dans la majorité des cas, il s'agit de **glissements rotationnels simples**. La zone d'ablation présente un escarpement principal à l'aspect circulaire, une zone de replat avec ou sans contre-pente. La zone d'accumulation forme une topographie bosselée, avec des fissures transversales et radiales lorsque le mouvement est actif. Le pied du mouvement est reconnaissable par des bourrelets et des lobes frontaux.

3.7. La solifluxion

On retrouve ces phénomènes d'instabilité superficiels au dessus de 1800 m d'altitude dans des secteurs à la végétation herbacée rase. On reconnaît ces formes par les multiples bourrelets parallèles à la pente. Sur le versant *Ubac* ces instabilités sont localisées le long des pistes de ski.

4. ANALYSE DE LA VARIABLE A MODELISER

Les différentes informations collectées pour les 'mouvements de versants' ont été répertoriées sous SIG (cf. Chap. 2). Chaque phénomène a été représenté par un polygone associé à une base de données attributaires. Des analyses statistiques descriptives et multidimensionnelles ont été réalisées sur la base de ces informations. Ces analyses permettent (i) de compléter la connaissance experte des phénomènes, (ii) de quantifier certaines informations de manière moins subjective et (iii) de valider les informations retenues pour qualifier les 'mouvements de versant' observés.

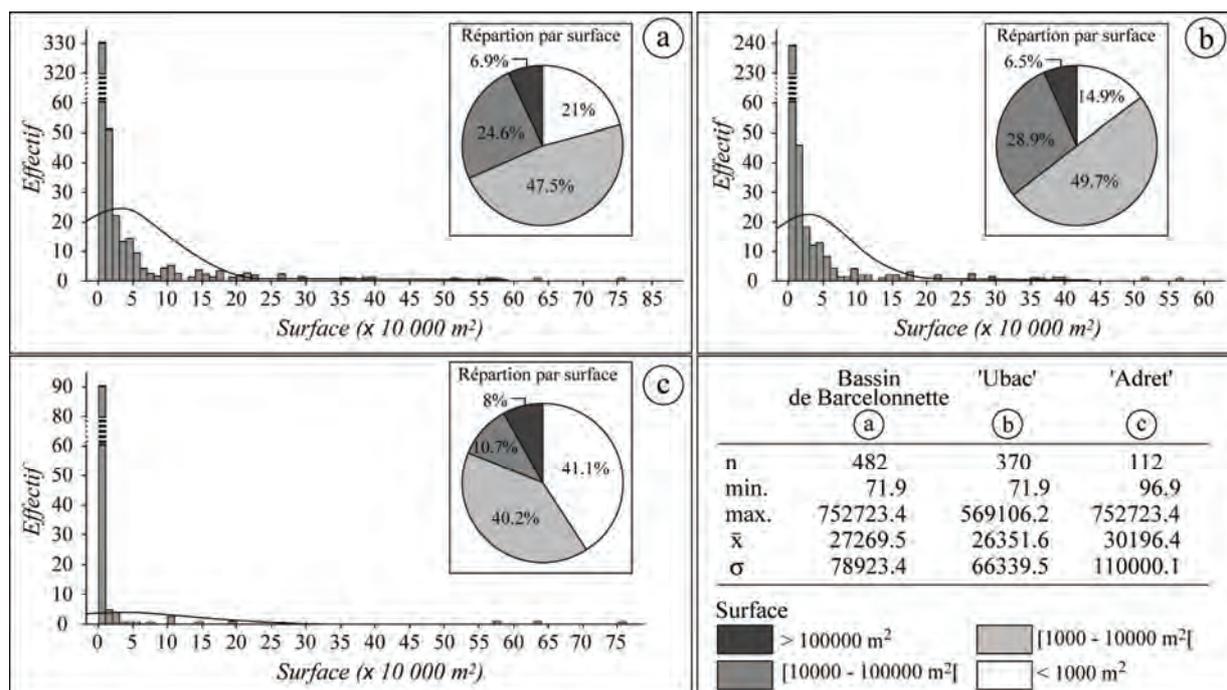
4.1. Analyse spatiale des phénomènes

La carte morphodynamique met en valeur la localisation des phénomènes et leur activité. Si cette information directe est essentielle dans l'analyse de la susceptibilité/aléa puis des risques, les informations des bases de données attributaires permettent, entre autre, de renforcer la connaissance des phénomènes. Par exemple, si une analyse croisée de plusieurs attributs ne permet pas de créer des cartes de susceptibilité ou d'aléa *stricto sensu*, elle peut aider à discriminer et classer les phénomènes à prendre en compte pour les modélisations ultérieures.

Ainsi, la distribution des phénomènes à l'échelle du bassin puis à l'échelle du versant *Ubac* est étudiée. Les informations des bases de données attributaires sont ensuite analysées grâce à des techniques statistiques de classement, calées sur un nombre restreint de phénomènes. L'objectif est de pouvoir désigner qualitativement et quantitativement les objets cartographiés en réduisant l'incertitude liée à la subjectivité de l'expert.

4.1.1. Analyse des données sur l'ensemble du bassin de Barcelonnette

Pour l'ensemble du bassin de *Barcelonnette*, 562 phénomènes d'instabilités ont été répertoriés et reportés sous SIG. Parmi ces phénomènes, les écroulements (*rock-falls*) et les phénomènes de solifluxion (avec respectivement 50 et 30 objets) ne sont pas retenus pour l'analyse car leur processus et leur mode de fonctionnement sont différents des autres types de 'mouvements de versant' de l'ensemble du bassin de *Barcelonnette*. Ce sont donc 482 'mouvements de versant' qui seront étudiés.



n = nombre de 'mouvements de versant' ; Taille de l'objet en m^2 : min = valeur minimum ; max. = valeur maximum ; \bar{x} = moyenne ; σ = écart-type.

Fig. 3.30. Distribution par taille des 'mouvements de versant' dans le bassin de Barcelonnette.

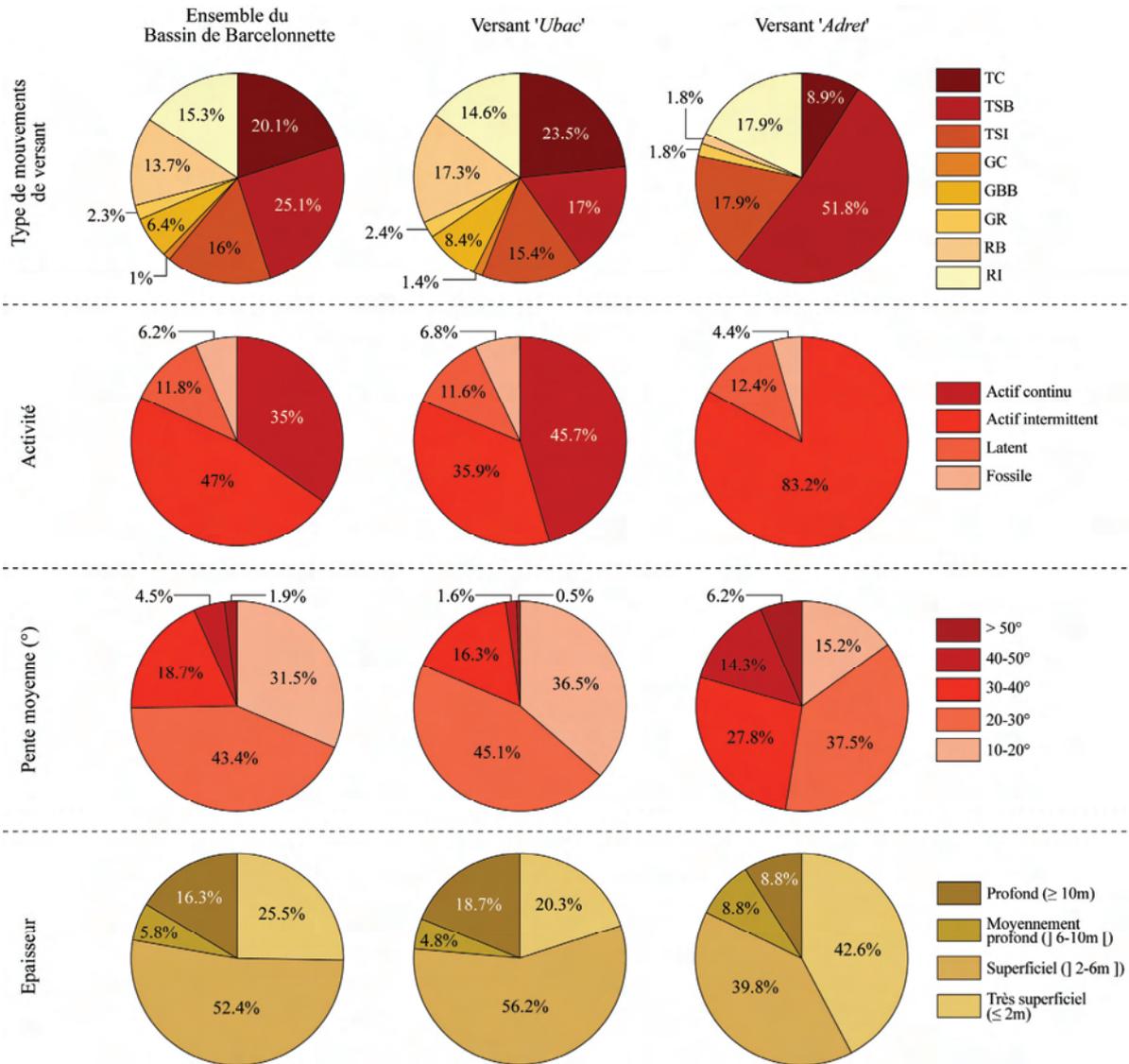
La figure 3.30 illustre les caractéristiques générales des 'mouvements de versant' du bassin de Barcelonnette :

- (i) **La surface totale couverte par les 'mouvements de versant' est de 13.14 km²** dont 74.2% sur le versant Ubac (9.75 km²) et 25.2% sur le versant Adret (3.39 km²) ;
- (ii) **La taille maximum des mouvements enregistrée est de 752 723.4 m² pour un minimum de 71.9 m²** (Fig. 3.30). Les 'mouvements de versant' les plus grands (> 100 000 m²) sont généralement localisés sur le versant Ubac avec un total de 5% du total de l'inventaire (24 mouvements) alors que sur le versant Adret, ils ne représentent que 1.9% du total de l'inventaire (9 mouvements). **Les 'mouvements de versant' de petite taille (< 10 000 m²) représentent la majorité des phénomènes inventoriés** avec 68.5% soit 0.88 km² dont 72.4% sur le versant Ubac et 27.6% sur le versant Adret.
- (iii) Enfin, **le versant Ubac est plus sensible aux instabilités** : avec 370 'mouvements de versant' inventoriés les phénomènes du versant Ubac représentent 76.7% de l'inventaire total (Fig. 3.30).

Les figures 3.31 et 3.32 illustrent la répartition des phénomènes par type d'activité, pente moyenne et profondeur par secteur :

- (i) **82% des phénomènes sont actifs** (actifs continus et permanents). Ce constat est également valable pour les deux versants avec 81.6% pour le versant Ubac et 83.2% pour le versant Adret. **Ils se localisent sur des pentes moyennes à fortes (10-40°)** avec une majorité localisée sur les versants aux pentes inférieures à 30° (74.9%, Fig. 3.31). Enfin, **les phénomènes inventoriés sont superficiels ou très superficiels** (77.9% < 6m d'épaisseur et 20.3% < 2 m d'épaisseur) ;
- (ii) Les 'mouvements de versant' actifs (continus et intermittents) sont plutôt superficiels (20.1% et 35% < 2 m d'épaisseur et 61.5% et 53.1% sont compris entre 2 et 6 m ;

Fig. 3.32). Ils correspondent notamment aux glissements translationnels superficiels (190 soit 48%) et aux glissements rotationnels de berge (79 soit 20%). Les mouvements fossiles et profonds correspondent aux grands glissements translationnels rocheux dont le nombre s'élève à 9.



Type de glissement : TC = translationnel complexe ; TSB = translationnel superficiel de berge ; TSI = translationnel superficiel d'interfluve ; GC = glissement-coulée ; GBB = glissement banc sur banc ; GR = glissement translationnel rocheux ; RB = rotationnel de berges ; RI = rotationnel d'interfluve.

Fig. 3.31. Pourcentage de 'mouvements de versant' selon le type, l'activité, la pente moyenne et leur profondeur pour les versants Ubac, Adret et pour l'ensemble du Bassin de Barcelonnette.

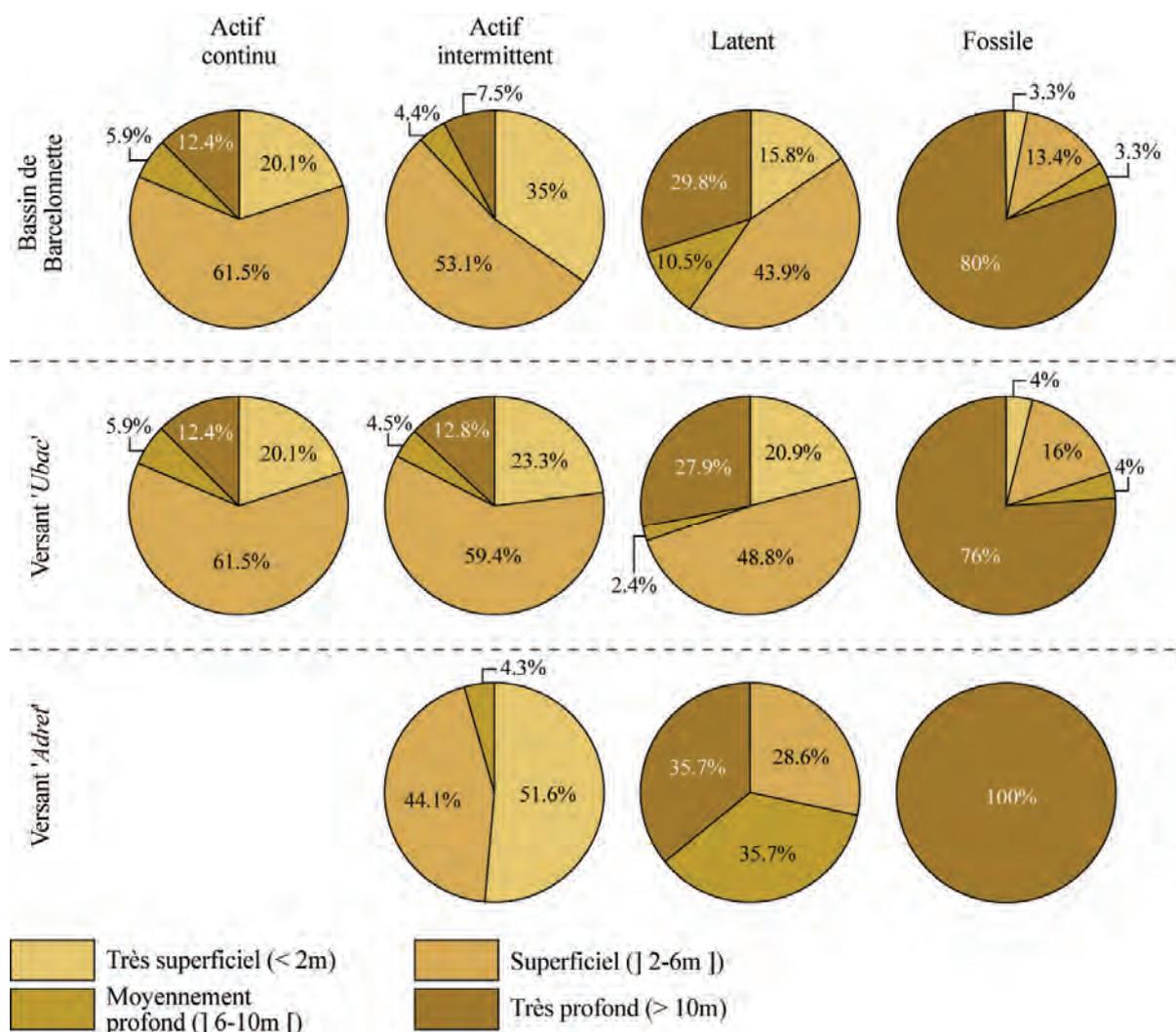


Fig. 3.32. Relation entre la profondeur et l'activité des 'mouvements de versant' pour les versants Ubac, Adret et pour l'ensemble du bassin de Barcelonnette.

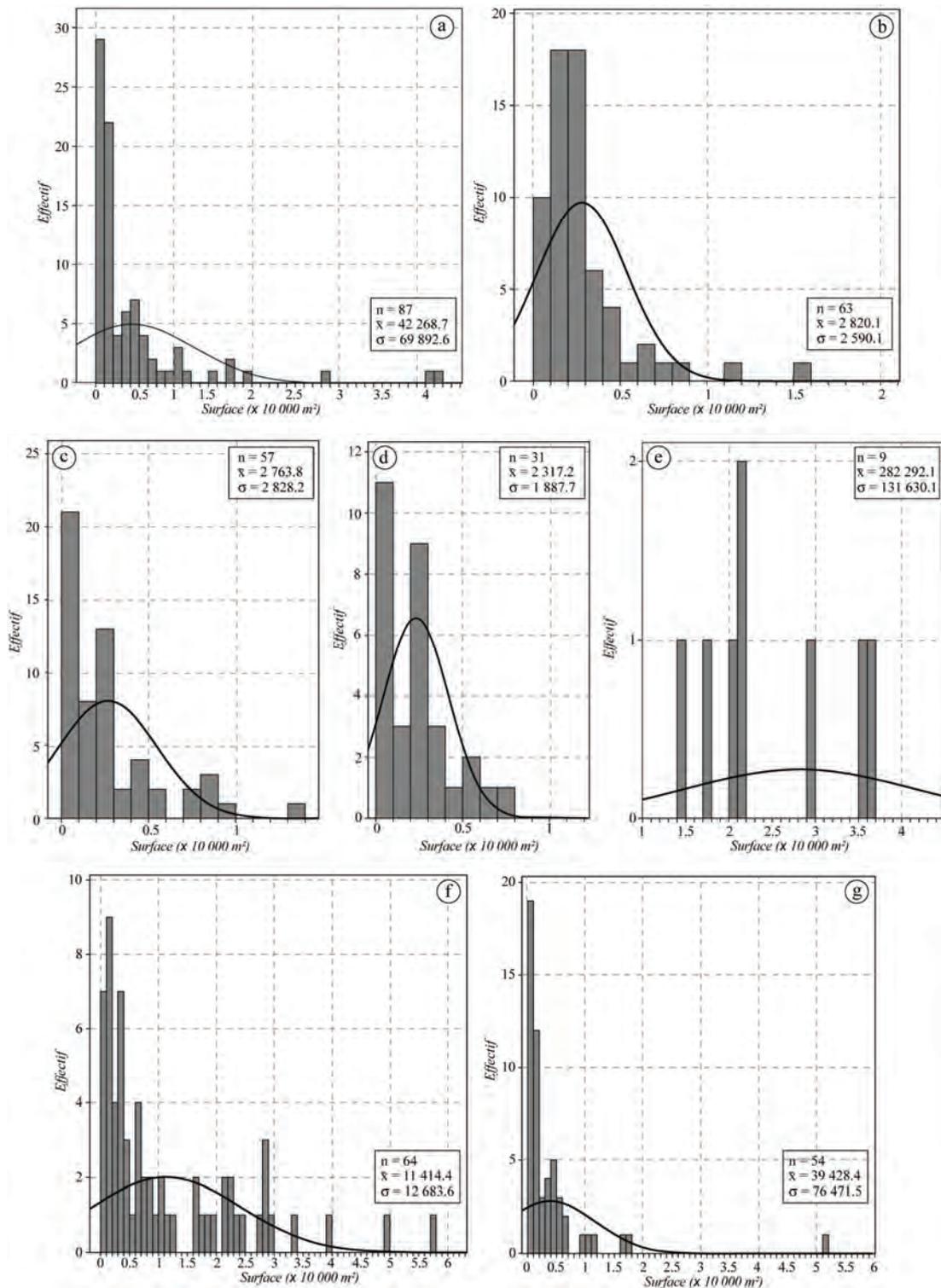
4.1.2. Analyse des 'mouvements de versant' du versant Ubac (site de calage)

4.1.2.1. Généralités

Environ 10 % de la surface du versant Ubac est affectée par des 'mouvements de versant'. Parmi ces mouvements, 6.8% sont considérés comme fossiles, 11.6% comme latents (dormants) et 81.6% comme actifs (dont 35.9% intermittents et 45.7% comme permanents ; Fig. 3.31).

Ce secteur Ubac est occupé par la plus grande diversité de phénomènes (huit types différents contre six pour le versant Adret, Fig. 3.31, Annexe 3.1). Parmi ces instabilités, les glissements *stricto sensu* (translationnels superficiels et complexes et rotationnels de berges et d'interfluve) représentent une large majorité (78.8% de l'inventaire) dont les deux tiers sont des glissements translationnels.

La figure 3.33 présente la distribution par taille de chaque type de phénomènes. Les glissements fossiles (6.8% des 'mouvements de versant') occupent une surface largement supérieure aux autres avec 4.43 km² en totalité, soit 45% de la surface totale des instabilités inventoriées. Les glissements superficiels, plus nombreux (283), occupent 2.34 km², soit 24% de la surface totale des instabilités inventoriées. Leur taille moyenne est de 8 275 m².

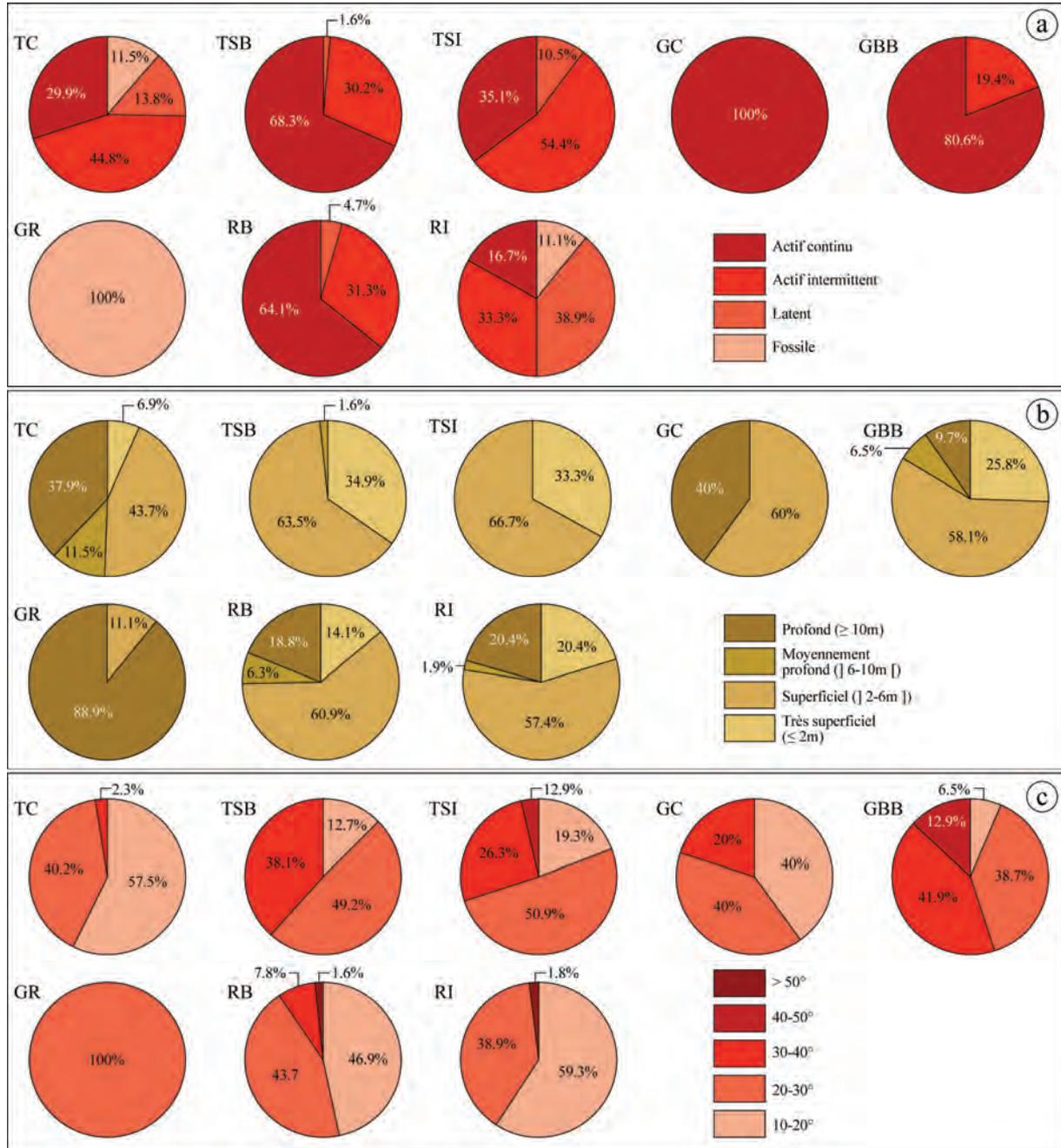


a. Glissement translationnel complexe. b. Glissement translationnel de berge. c. Glissement translationnel superficiel d'interfluve. d. Glissement banc sur banc. e. Glissement translationnel rocheux. f. Glissement rotationnel de berge. g. Glissement rotationnel d'interfluve. Les glissements-coulées n'ont pas été représentés en raison de leur faible nombre (n = 5). n = nombre ; \bar{x} = moyenne ; σ = Ecart-type.

Fig. 3.33. Distribution par taille de la totalité des 'mouvements de versant' du versant Ubac.

La figure 3.34 présente la distribution des différents types de 'mouvements de versant' selon leur activité, leur profondeur et le gradient de pente moyen observé sur le terrain. **Une très nette**

corrélation est observée entre le type 'mouvements de versant' et leur profondeur : la plupart des glissements translationnels et rotationnels sont très superficiels à superficiels et actifs, alors que les glissements translationnels rocheux et certains glissements rotationnels d'interfluve sont latents ou fossiles et plus profonds (ces derniers étant issus des grandes phases de fonte du glacier de l'Ubaye).



a. Activité des 'mouvements de versant'. b. Profondeur des 'mouvements de versant'. c. Pente moyenne des 'mouvements de versant'. Type de glissement : TC = translationnel complexe ; TSB = translationnel superficiel de berge ; TSI = translationnel superficiel d'interfluve ; GC = glissement-coulée ; GBB = glissement banc sur banc ; GR = glissement rocheux ; RB = rotationnel de berges ; RI = rotationnel d'interfluve.

Fig. 3.34. Proportion des différents types de 'mouvements de versant' selon leur activité, leur profondeur et leur pente moyenne (versant Ubac).

4.1.2.2. Analyse des 'mouvements de versant' des trois secteurs de l'Ubac

Certains secteurs se révèlent plus actifs que d'autres, comme par exemple le secteur de l'Abriès pour les glissements superficiels translationnels ou le secteur de Poche et Riou des Ribes pour les glissements translationnels complexes et rotationnels de berge (Fig. 3.35).

Pour le secteur de l'Abriès, 3.58 km² de la surface est couverte par des 'mouvements de versant' dont 78.7% pour les glissements rocheux fossiles (2.54 km²) et les grands glissements complexes latents (0.27 km² ; Annexe. 3.2). Ces glissements représentent un peu plus de 6% de la totalité de l'inventaire de ce secteur. Le reste est représenté pour les deux tiers (61.5%), par des glissements proches des berges (translationnels, superficiels, ou banc sur banc).

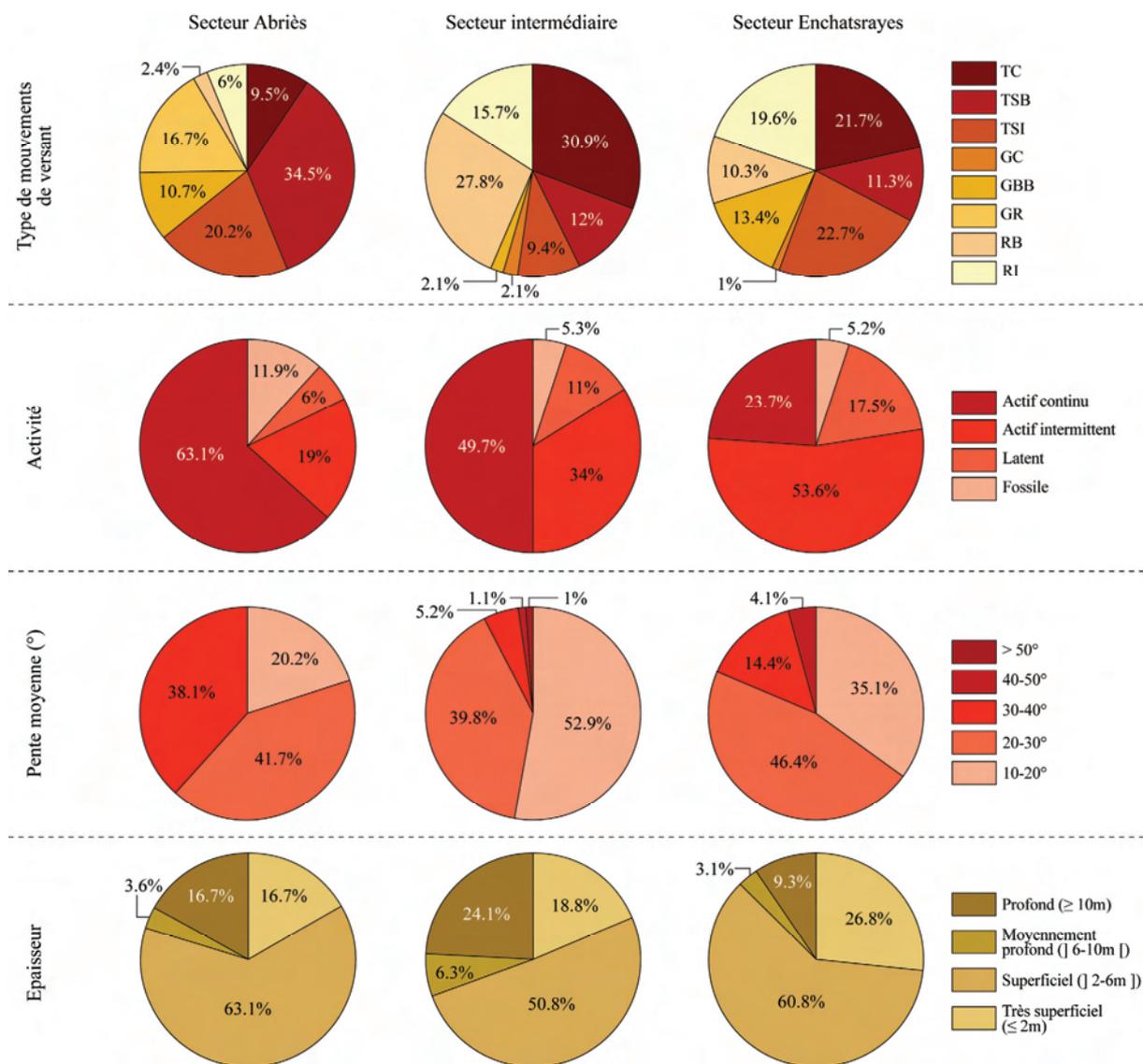


Fig. 3.35. Proportion de 'mouvements de versant' selon le type, l'activité, la pente moyenne et l'épaisseur pour les trois grands secteurs du versant Ubac.

Pour le secteur de Poche, deux secteurs se distinguent : le long du torrent de Poche et le versant de Bois Noir. Sur les interfluves s'observent de grands glissements translationnels complexes (54.3%) et des glissements rotationnels fossiles et actifs (33.5%). Les mouvements sont, pour la plupart, superficiels (soit 58.7% des instabilités recensées le long des torrents du secteur

intermédiaire). Enfin, pour le secteur d'*Enchastrayes*, la majorité des mouvements sont translationnels et rotationnels (86.6%).

4.2. Pertinence des attributs : analyse statistique multidimensionnelle (ASM)

4.2.1. Indice de confiance cartographique (ICC)

Dans le cadre d'analyse spatiale par approches semi-quantitative ou quantitative, un des paramètres essentiels à ne pas négliger est la qualité de la représentativité de la variable à modéliser. Si cette variable présente de fortes incertitudes (localisation, type, etc.), les résultats des modèles peuvent être biaisés (Bonham-Carter, 1994).

L'élaboration d'un *indice de confiance cartographique (ICC)* est alors justifiée pour minimiser un biais introduit dans les différentes analyses. Cet indice repose sur la qualité des informations collectées. Trois types d'information sont retenus :

- (i) Les observations de terrain ;
- (ii) La pertinence des observations effectuées par l'analyse de photographies aériennes ;
- (iii) La pertinence des informations collectées dans les documents annexes (rapports ; articles, cartes géomorphologiques, etc.).

Chaque variable (observation) est affectée d'un code, d'un coefficient de pertinence (*Cpe*) et d'un coefficient pondérateur (*Cpo*) (Tab. 3.2). L'**indice de confiance cartographique (ICC)** est le produit de ces deux coefficients. La variable '*observations de terrain*' est **considérée comme essentielle** dans l'élaboration de cet indice, elle est affectée d'un **coefficient pondérateur fort** (x 6). Pour les deux autres variables, le coefficient est de 1²⁶.

Tab. 3.2. Variables et coefficients retenus pour l'élaboration d'un Indice de Confiance Cartographique (ICC).

Cpe. = Coefficient de pertinence ; *Cpo* = Coefficient pondérateur.

Variables	Cpe		Cpo.
	Valeur	Signification	
<i>Observations de terrain</i>	1	Formes nettes : aucune ambiguïté sur la reconnaissance du phénomène.	x 6
	0.5	Formes nettes ou estompées : le type, l'état d'activité posent des problèmes d'interprétation et sont sujets à discussion.	
	0	Formes peu visibles sur le terrain : le type, l'état d'activité posent des problèmes d'interprétation et sont sujet à discussion.	
<i>Interprétation des photographies aériennes</i>	1	Formes bien visibles sur les photographies aériennes (topographie chaotique, ruptures de pentes, etc.) : une distinction avec l'environnement alentour est visible.	x 1
	0	Les formes sont assez peu distinguées : elles sont très estompées ou elles sont recouvertes par la forêt. Les traces d'instabilité sont indécélables.	
<i>Analyse de documents (cartes topographiques, rapports, documents anciens, etc.)</i>	1	Plus de 50% des documents consultés mentionnent l'existence d'un phénomène.	x 1
	0	Plus de 50% des documents consultés ne mentionnent pas l'existence d'un phénomène.	

²⁶ Ces coefficients sont subjectifs, ils ont été utilisés essentiellement pour cette recherche. Pour d'autres sites d'études ou d'autres types de phénomènes ayant une typologie et/ou des degrés d'activité définis différemment, il convient de les utiliser avec prudence voir de changer les valeurs.

Trois classes d'ICC sont déterminées : un **indice de confiance fort (ICC1)**, un **indice de confiance moyen (ICC2)** et un **indice de confiance faible (ICC3)**. Les règles pour classer chaque indice sont données dans le tableau 3.3. Parmi les 370 mouvements inventoriés, 245 sont ICC1, 106 sont ICC2 et 19 sont ICC3. 88.8% des mouvements ICC1 sont actifs (continus et intermittents).

Pour les différentes analyses statistiques, le calage s'effectue avec un échantillon de 'mouvements de versant' ayant un fort ICC. La validation est réalisée ensuite avec un second échantillon de mouvements à fort ICC ou combinant plusieurs ICC.

Tab. 3.3. Règles retenues pour élaborer les classes d'ICC.

ICC = Indice de confiance cartographique ; OT = Observations de terrain ; IPA = Interprétation de photographies aériennes ; AD = Analyse de documents ; Cpo = Coefficient pondérateur.

ICC	OT	Cpo	IPA	Cpo	AD	Cpo	Pondération finale
ICC1	1	x 6	1 ou 0	x 1	1 ou 0	x 1	[8-7]
ICC2	1	x 6	0	x 1	0	x 1	[6-4]
	0.5		1 ou 0		1 ou 0		
	0		1 ou 0		1 ou 0		
ICC3	0.5	x 6	0	x 1	0	x 1	[3-0.5]
	0		1		1		

4.2.2. Choix de la méthode ASM

La statistique descriptive, utilisée précédemment, permet de représenter de manière simple des informations statistiques en schématisant certaines informations. Toutefois, dans la majorité des cas pour comprendre, regrouper, analyser plus précisément les objets d'étude, une simple statistique descriptive n'est plus assez performante : c'est le cas lorsque les informations regroupent plusieurs variables ou dimensions. Le recourt à la statistique exploratoire multidimensionnelle ou 'data mining' (fouille de données) est alors indispensable (Lebart *et al.*, 2006). Parmi ces méthodes, trois grandes familles se distinguent :

- (i) Les **méthodes d'analyse factorielle** qui cherchent à **réduire le nombre de variables** en les synthétisant sous la forme de facteurs, axes ou composantes hiérarchisées ;
- (ii) Les **méthodes de classification non supervisées** produisant des **regroupements en classes d'objets** pour les méthodes de partitionnement, ou en famille de classes hiérarchisées pour les méthodes de classification hiérarchique. Les éléments sont groupés à partir de vecteurs de description ;
- (iii) Les **méthodes de discrimination ou de classification supervisées** qui visent à **affecter des individus dans des classes connues a priori à partir de variables**.

Pour ce travail, plusieurs techniques ont été choisies parmi les méthodes d'analyse factorielle et de discrimination. Ci-après, seule **l'analyse discriminante linéaire (ADL)** est utilisée ; les méthodes factorielles sont réservées pour l'approche quantitative entre les variables à modéliser et les variables prédictives (Chap. 7). **L'analyse discriminante linéaire** est une méthode à la fois descriptive et décisionnelle. Elle permet de :

- (i) **Synthétiser et discriminer l'information** contenue dans les variables explicatives qui correspondent à certaines classes choisies *a priori* et confirmer le choix de ces classes désignées de manière experte ;
- (ii) **Connaître la classe d'affectation** de nouveaux individus, objets, décrits par les variables explicatives. En ce sens, les résultats de l'analyse sont utilisés pour classer les individus dans des classes préexistantes.

Tab. 3.4. Description des 11 variables explicatives pour l'activité des 'mouvements de versant' et coefficients affectés selon les différentes classes retenues.

Variable explicative	Code	Classes	Coefficient
(i) Etat de dégradation de l'escarpement de tête	ET	1. Forme fraîche complètement déstructurée par des mouvements adjacents	5
		2. Forme nette	4
		3. Forme dégradée par l'érosion / recouverte par des dépôts corrélatifs pour moins de la moitié de sa hauteur / la végétation recouvre peu à peu la forme	3
		4. Forme très dégradée / la pente est très émoussée / la végétation le recouvre	2
		5. Forme à peine visible / l'escarpement est convexe en amont et concave en aval / recouvert par des dépôts corrélatifs / la végétation le recouvre	1
(ii) Etat de dégradation des escarpements mineurs	EM	1. Forme fraîche /déstructuration du sol / sol complètement nu	4
		2. Forme atténuée / recouvert de dépôts corrélatifs / reprise de la végétation	3
		3. Forme très atténuée / la végétation recouvre totalement la forme dégradée	2
		4. Forme très atténuée à peine visible	1
(iii) Etat du bossellement	Bo	1. Topographie très chaotique / roche nue / blocs anguleux bien visibles	4
		2. Topographie chaotique / blocs émoussés / colonisation par une végétation pionnière	3
		3. Topographie bosselée mais les formes douces sont recouvertes par la végétation (landes, arbustes, etc.)	2
		4. Topographie légèrement ondulée recouverte par une végétation abondante ou mise en culture	1
(iv) Etat des fissures de tractions	F	1. Visibles très nettes	4
		2. Emoussées sur les bords / partiellement remplies de sédiments	3
		3. Remplies de sédiments / végétation les recouvrant	2
		4. Peu ou pas visible / forment de très légères saignées dans la masse déplacée (confusion possible avec d'anciens drains)	1
(v) Etat de fissures de régression	FR	1. Présence	2
		2. Absence	1
(vi) Présence de sources	So	1. Présence	2
		2. Absence	1
(vii) Présence de sagnes	Sa	1. Présence	2
		2. Absence	1
(viii) Etat de la végétation (essentiellement les arbres)	V	1. Arbres tous déracinés	6
		2. Arbres déracinés et penchées	5
		3. Arbres penchés	4
		4. Arbres redressés	3
		5. Lande, pelouse alpine dégradées	2
		6. Arbres au port droit	1
		7. Lande, pelouse alpine conservées	1
(ix) Dégradation des routes	R	1. Fortement dégradée / destruction	3
		2. Moyennement dégradée	2
		3. Non dégradée	1
(x) Dégradation du bâti	Ba	1. Fortement dégradée / destruction	3
		2. Moyennement dégradée	2
		3. Non dégradée	1
(xi) Etat des canalisations	C	1. Fortement dégradées / destruction	3
		2. Moyennement dégradées	2
		3. Non dégradées	1

C'est pour ces deux raisons que l'ADL est utilisée dans ce travail. L'affectation d'un degré d'activité des phénomènes d'instabilité, comme cela a été vu précédemment (cf. Chap.2), est empreinte de subjectivité, notamment lorsque peu d'informations sont disponibles. Le choix de ce degré d'activité demeure donc une étape difficile de la cartographie. Rappelons que l'objectif de cette analyse est d'essayer de donner des éléments 'objectifs' pour pouvoir retenir les attributs les plus pertinents afin de qualifier précisément et objectivement : (i) l'activité des phénomènes et (ii) le type de phénomène observé.

Les deux analyses sont effectuées sous SPSS® en deux temps avec une phase de calage et une phase de validation. La méthode choisie est une méthode d'**analyse discriminante pas à pas** : la combinaison linéaire de variables (fonction discriminante) est recherchée par itérations successives. Cette méthode permet de discriminer au mieux les groupes définis *a priori* en maximisant le rapport de variance intergroupes et intra-groupes à chaque pas. La variable qui améliore le plus la distinction entre ces groupes est reconnue comme une variable discriminante supplémentaire (selon les coefficients de *Wilks*, *F de Fisher* ; *pseudo F* ; Tomassone, 1988). Les individus sont alors reclassés dans les groupes en fonction de la nouvelle combinaison linéaire (Viville *et al.* 1986 ; Tomassone, 1988 ; Malet *et al.*, 2003 ; Lebart *et al.*, 2006).

4.2.3. Analyse de l'information qualitative : l'activité des phénomènes et relation avec les indices morphologiques

4.2.3.1. Les variables

Les variables retenues sont détaillées dans le tableau 3.4. Elles reposent sur (i) cinq indices morphologiques décrits précédemment, (ii) un indice d'état de végétation fondé notamment sur le port des arbres, (iii) deux indices d'état d'humidité du phénomène, (iv) trois indices de dégradation des aménagements anthropiques. Chaque classe est affectée d'un coefficient représentant l'activité du 'mouvement de versant' observé.

4.2.3.2. Résultats

Pour caler au mieux la fonction discriminante, 80% des mouvements ICC1, tirés au sort de manière aléatoire, sont introduits dans l'analyse (classement original et validé-croisé ; Romeder, 1973). La validation de la fonction s'effectue en deux temps : (i) avec l'introduction du reste des individus non pris en compte pour la phase de calage (validation originale) ; (ii) avec la totalité des 'mouvements de versant' du versant *Ubac*, y compris ceux à faible ICC (validation globale). Le tableau 3.5 indique les meilleurs classements obtenus par rapport à notre classification 'expert' :

- (i) Au total, 72.6% de l'échantillon de calage sont bien classés ;
- (ii) 83.3% des individus sont bien classés en ajoutant les individus non introduits initialement ;
- (iii) 71.1% sont bien classés avec la totalité des individus inventoriés.

Tab. 3.5. Résultats par itérations successives et variables discriminantes retenues de l'ADL pas à pas pour l'activité des 'mouvements de versant'.

F = Etat des fissures de distensions et de tractions ; *V* = état de la végétation ; *ET* = Etat de dégradation de l'escarpement de tête ; *Co* = classement original ; *Cvc* = classement validé-croisé ; *Vo* = Validation originale ; *Vg* = Validation globale ; *Vr* = Variable retenues ; % = pourcentage d'individus bien classés.

		Type de Classement			
		<i>Co</i>	<i>Cvc</i>	<i>Vo</i>	<i>Vg</i>
Itération n°	<i>Vr</i>	%	%	%	%
1	<i>F</i>	60.4	60.4	70.8	60.4
2	<i>V</i>	71.1	71.1	79.2	67.1
3	<i>ET</i>	72.6	72.1	83.3	71.1

Quelques itérations suffisent pour obtenir ces résultats, globalement bons (Tab. 3.5). Les itérations supplémentaires n'apportent qu'une amélioration mineure voire nulle²⁷. Pour les trois premiers pas, on peut retenir :

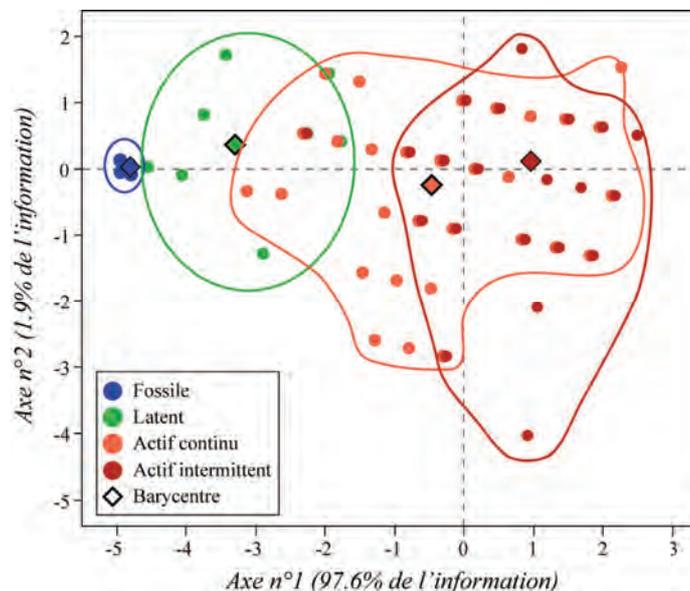
²⁷ Le nombre d'itérations maximum est de 18.

- (i) **Au pas n°1, la variable *F*** (état des fissures de distensions et de tractions) est retenue, elle détermine 55.3% des actifs continus, 64.4% des actifs intermittents, 43.8% des latents et 100% des fossiles ;
- (ii) **Au pas n°2, la variable *V*** (état de la végétation) est retenue, 73.8% des actifs continus, 65.8% des actifs intermittents, 75% des latents et 100% des fossiles sont reconnus ;
- (iii) **Au pas n°3, la variable *ET*** (état de dégradation de l'escarpement de tête) est retenue, 73.8% des actifs continus, 68.5% des actifs intermittents, 87.5% des latents et 100% des fossiles sont reconnus.

Ainsi, une combinaison linéaire de trois premières itérations est suffisante pour obtenir un classement acceptable de l'échantillon de calage par niveau (soit 72.6% de classement original, 72.1% de classement validé/croisée, 83.3% de validation originale et 71.1% de validation globale, Tab. 3.6). Les variables retenues sont deux variables morphologiques (*F* et *ET*) et une variable végétation (*V*). Que seulement deux variables morphologiques soient retenues est peu étonnant : les indices morphologiques relatant souvent la même information sur l'activité des phénomènes.

En gardant *F* et *ET*, les composantes amont et aval des mouvements sont retenues, comme leur évolution peut être différente dans le temps (par exemple avec un estompage plus rapide des formes pour les glissements superficiels ; van Westen, 1993) l'utilisation de ces deux variables dans la fonction discriminante apparaît intéressante. Toutefois, le gain obtenu avec *ET* est compris entre 1% et 1.5% pour chaque étape de calage/validation, ce qui rend son apport minime. Les variables *So* (présence de sources), *Sa* (présence de sagnes) *R*, (dégradation des routes) *Ba* (dégradation du bâti) et *C* (état des canalisations), sont écartées du processus de classement car :

- (i) Un mouvement, même actif, ne connaît pas obligatoirement la présence d'une source ou d'une sagne sur son corps ou à son pied ;
- (ii) Chaque mouvement n'affecte pas obligatoirement une route, une maison ou un drain d'irrigation.



Le plan factoriel est construit avec les deux premiers axes discriminants. Le faible nombre d'individus sur le graphique est dû à leur superposition.

Fig. 3.36. Classification de l'activité des 'mouvements de versant' avec le meilleur jeu de variables discriminantes suivant le premier plan factoriel.

De manière graphique deux axes sont suffisants pour résumer l'information obtenue. Le plan factoriel n°1 (fig. 3.36) illustre l'information obtenue avec très peu de variables, par exemple l'axe n°1 représente 97.6% de la variance (fig. 3.36). Sur ce graphique, on remarque que certains phénomènes actifs continus et actifs intermittents ou actifs intermittents et latents peuvent se confondre.

Cette confusion se remarque sur le tableau 3.6 qui tient compte des classifications *a priori* et *a posteriori* des individus introduits ou non dans l'ADL. De manière générale, pour la phase de calage (Tab. 3.6) : 73.8% sont bien classés pour les actifs continus, 68.5% pour les actifs intermittents, 81.3% pour les latents et 100% pour les fossiles.

Tab. 3.6. Résultats intra groupes de l'ADL pas à pas pour l'activité des 'mouvements de versant'.

Le tableau met en valeurs les différentes étapes de classement afin de valider l'ADL. F = fossile ; L = latent ; AI = actif intermittent ; AC = actif continu. Co = Classement original ; Cvc = Classement validé-croisé ; Vo = Validation originale ; Vg = Validation globale ; 5 = nombre d'individu reconnu ; 100% = proportion reconnue par rapport au total en ligne.

		Type de classement	Classification a posteriori				Total
			F	L	AI	AC	
Classification a priori	F	Co	5 100%	-	-	-	5 100%
		Cvc	5 100%	-	-	-	5 100%
		Vo	1 100%	-	-	-	1 100%
		Vg	12 60%	8 40%	-	-	20 100%
	L	Co	2 12.5%	14 87.5%	-	-	16 100%
		Cvc	2 12.5%	13 81.3%	1 6.3%	-	16 100%
		Vo	-	3 100%	-	-	3 100%
		Vg	6 22.2%	21 77.8%	-	-	29 100%
	AI	Co	-	12 16.4%	48 68.5%	13 17.8%	73 100%
		Cvc	-	12 16.4%	48 68.5%	13 17.8%	73 100%
		Vo	-	1 5.3%	14 73.7%	4 21.1%	19 100%
		Vg	1 1.7%	5 8.5%	45 76.3%	8 23.6%	59 100%
	AC	Co	-	1 1%	26 25.2%	76 73.8%	103 100%
		Cvc	-	1 1%	26 25.2%	76 73.8%	103 100%
		Vo	-	-	3 12%	22 88%	25 100%
		Vg	-	1 1.5%	21 31.3%	45 67.2%	67 100%
Total	Co	7 3.5%	27 13.8%	74 37.5%	89 45.2%	197 100%	
	Cvc	7 3.5%	26 13.2%	75 38.1%	89 45.2%	197 100%	
	Vo	1 2.1%	4 8.3%	17 35.5%	26 54.1%	48 100%	
	Vg	19 11%	35 20.2%	66 38.2%	53 30.6%	173 100%	

L'analyse intra-groupe confirme la confusion entre le groupe actif continu et le groupe actif intermittent et entre le groupe actif intermittent et le groupe latent (Tab. 3.6). Ces erreurs se situent en majorité pour les glissements de type superficiel, de petites tailles dont les formes s'estompent rapidement après leur déclenchement (stabilisation et recouvrement par la végétation). De ce fait, pour certains types de 'mouvements de versant', notamment les glissements superficiels, les indices morphologiques relevés ne sont pas d'une grande fiabilité. Des confusions entre les classes d'activité sont alors possible. Ainsi, un suivi régulier serait nécessaire pour établir l'activité réelle de ce type de 'mouvements de versant' comme ce qui est réalisé depuis 2000 dans le bassin du Moulin (Ritzenthaler, 2000, 2001 ; Moreno, 2004).

Pour la validation globale, le classement est beaucoup moins bon (Tab. 3.6). Entre les mouvements actifs continus et intermittents, la différenciation des indices sur le terrain est difficile, et la différence de classement est considérée comme mineure. En revanche, pour les

mouvements latents et fossiles, le classement se révèle moyen. Il apparaît que les individus à ICC2 et ICC3 biaisent le classement, révélant une forte incertitude entourant la qualification de leur activité (formes estompées, etc.), lorsque peu de documents sont disponibles.

4.2.4. Analyse de l'information quantitative : les types de phénomènes et relation avec les indices morphométriques

La qualification des 'mouvements de versant' par des indices morphométriques n'est pas nouvelle. En 1973, Crozier propose quelques indices pour qualifier les 'mouvements de versant' de Nouvelle-Zélande (Crozier, 1973). Chaque indice est censé donner une indication des processus responsables des variations pour un 'mouvement de versant'. **La distinction finale s'effectue alors par le trajet parcouru par le phénomène ou par l'indice de profondeur** (Tab. 3.7). Quintlé (1995, 1996), sur la base d'une photo-interprétation, présente le même type d'étude pour qualifier de manière systématique les instabilités de versant actives du *Bassin de Barcelonnette*. Les indices sont adaptés en fonction de l'inventaire effectué. Cette tentative se révèle intéressante et limitée à la fois :

- (i) **Intéressante car les glissement-coulées actifs sont aisément reconnus grâce à quelques indices ;**
- (ii) **Limitée car une grande incertitude entoure la localisation et la typologie de certains mouvements**, particulièrement pour la reconnaissance des mouvements fossiles et latents. De plus, le nombre restreint d'individus réduit la validité statistique de l'étude.

Avec les outils actuels et l'inventaire exhaustif effectué, il est désormais intéressant de renouveler l'exercice avec (i) un plus grand nombre d'individus et (ii) une confiance accrue dans la localisation et la typologie des phénomènes. L'objectif est légèrement différent de celui de Quintlé (1995) : il s'agit toujours de pouvoir classer automatiquement un phénomène cartographié grâce aux paramètres morphométriques ; mais les difficultés rencontrées pour classer les mouvements latents et fossiles incitent à se focaliser sur les seuls mouvements actifs.

4.2.4.1. Caractéristiques morphométriques des phénomènes

Les caractéristiques morphométriques sont dérivées des mesures des zones de déclenchement et d'accumulation (Fig. 3.37). Les neuf indices morphométriques sont résumés dans le tableau 3.7 et sont utilisés avec les mesures morphométriques de base des zones de déclenchement (d'ablation) et d'accumulation (Fig. 3.37).

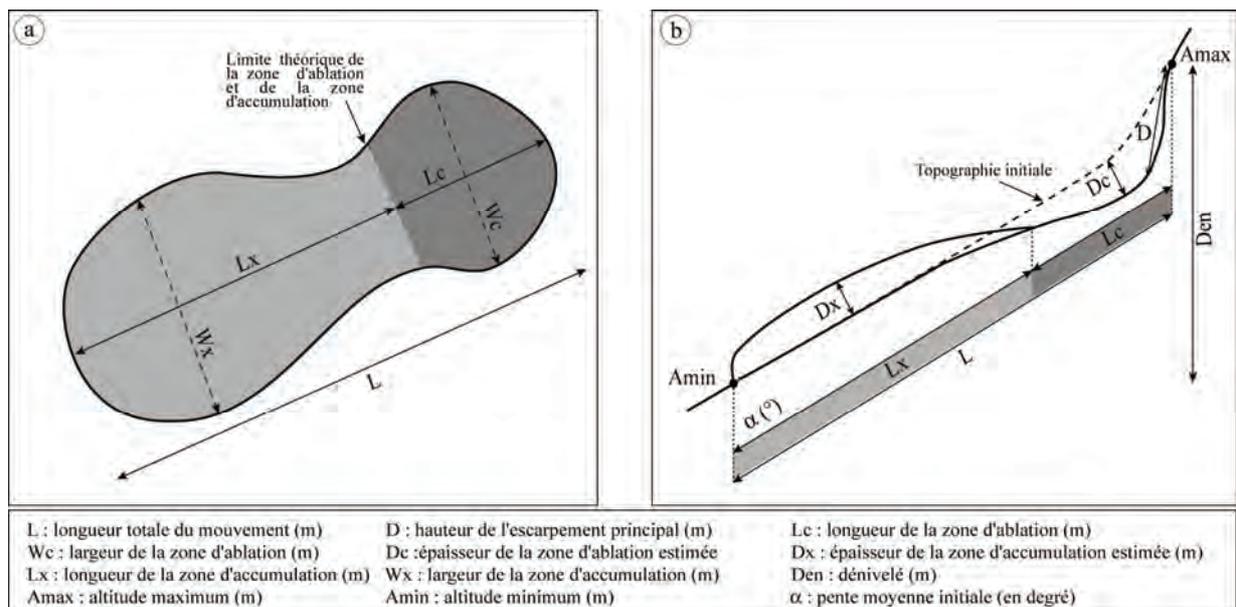
Pour cette analyse, seuls les mouvements de terrain actifs à fort ICC sont introduits. Ainsi, 220 mouvements sont retenus. La typologie utilisée pour la carte géomorphologique est légèrement simplifiée : les glissements translationnels superficiels de berge et d'interfluve sont réunis et les glissements rotationnels de berge et d'interfluve aussi. Ils ne sont pas distingués car leur différenciation 'experte' découle de leur localisation le long des torrents et aucune variable morphométrique mesurée et calculée n'en tient compte.

Le tableau 3.8 résume les types de 'mouvements de versant', leurs nombres et quelques indices morphométriques dérivés (les autres indices sont donnés en annexe (Annexes 3.3 et 3.4). Parmi ces indices, l'indice *P* est le plus couramment utilisé pour définir quelques grands types de 'mouvements de versant' (Cruden et van Westen, 1996). On observe une bonne adéquation entre le *P* calculé pour notre échantillon et le *P* donné à titre indicatif par Soeters et van Westen (1996).

Tab. 3.7. Indices morphométriques pour l'analyse discriminante.

Signification des indices de la Fig.3.37. b. En gris, les indices spécifiques au bassin de Barcelonnette (adaptés de Quintlé, 1995).

Indice	Code	Formules	Signification pour le bassin de Barcelonnette
(i) Indice de profondeur	P	D/L	Plus P est faible, moins le mouvement est profond : cela correspondra aux glissements translationnels complexes ou aux glissements translationnels d'interfluve
(ii) Indice de dilatation	Di	W_x/W_c	Lorsque Di est faible, le mouvement possède une base étroite signifiant une chenalisation des matériaux déplacés. Correspond souvent aux glissements-coulées, parfois à des glissements rotationnels d'interfluve.
(iii) Indice de déplacement	Dé	L_c/L	Si Dé est proche de 1, le mouvement aura une zone d'ablation prépondérante.
(iv) Indice de ténuité	T	L_x/L_c	Plus T est grand plus la zone d'accumulation est étendue ; les glissements d'interfluve comme les glissements translationnels complexes ou rotationnels et les glissements-coulées ont un ratio proche de 1.6.
(v) Indice d'écoulement plastique	EP	$| (W_x/W_c) - 1 | (L_x/L_c) \times 100$	EP représente un indice d'écoulement plastique théorique, plus EP est petit, plus le glissement est plastique, plus EP est grand, plus le glissement est considéré comme fluide.
(vi) Indice de compacité aval	Cav	W_x/L	Cav indique si le glissement est plus long que large, et si la base est étroite. Un ratio proche de 0 signifie un mouvement étroit dans la partie aval : les glissements chenalisés ou très longs ont un ratio proche de 0.2/0.3 ; au dessus de 1, le mouvement est très large et correspond souvent aux glissements rotationnels ou banc sur banc.
(vii) Indice de compacité amont	Cam	W_c/L	Cam indique si le mouvement est plus long que large comme Cav mais il indique si le mouvement est large dans sa partie amont : un ratio proche de 0 signifie un mouvement étroit de la partie amont et correspond aux mouvements d'interfluve.
(viii) Indice d'étalement	E	W_c/W_x	Lorsque E est supérieur à 1 le mouvement est peu étalé en aval, si E est très grand le mouvement est probablement chenalisé. Ce ratio discrimine très bien les glissements-coulées des autres.
(ix) Dénivelé du glissement.	Den	$A_{max} - A_{min}$	Den représente le dénivelé du mouvement.



a. Vue de haut. b. Vue de profil.

Fig. 3.37. Mesures nécessaires pour le calcul des indices morphométriques.

Tab. 3.8. Quelques indices morphométriques dérivés pour les 'mouvements de versant' du versant Ubac.

Type de glissement : GBB = glissement banc sur banc ; GC = glissement-coulée ; TSB = translationnel superficiel de berge ; TSI = translationnel superficiel d'interfluve ; TC = translationnel complexe ; RB = rotationnel de berges ; RI = rotationnel d'interfluve.

Indice : P = indice de profondeur ; EP = indice d'écoulement plastique ; Cav = indice de compacité aval ; E = indice d'étalement.

min. = minimum ; max. = maximum ; \bar{x} = moyenne ; σ = écart-type. En gris clair les moyennes sont en adéquation avec celles données dans la littérature (Soeters et van Westen, 1996). En gris foncé quelques chiffres caractéristiques pour quelques mouvements du Bassin de Barcelonnette. Les 220 individus ont un ICC1.

	N.	P				EP				Cav				E			
		min.	max.	\bar{x}	σ	min.	max.	\bar{x}	σ	min.	max.	\bar{x}	σ	min.	max.	\bar{x}	σ
GBB	18	3.53E-02	0.25	0.12	0.06	8.00	273.00	88.39	65.16	0.57	4.00	1.29	0.70	0.56	2.14	1.16	0.32
GC	4	1.42E-02	0.12	0.05	0.04	28.00	178.50	123.42	56.91	0.06	0.71	0.23	0.28	0.50	5.50	3.25	1.82
TSB	44	8.99E-03	0.11	0.05	0.03	0.99	180.00	36.78	38.25	0.18	4.33	1.05	0.97	0.60	3.33	1.14	0.49
TSI	31	5.88E-03	0.16	0.06	0.04	3.28	219.00	66.12	55.47	0.12	2.86	0.59	0.57	0.33	3.67	1.15	0.63
TC	54	9.09E-03	0.13	0.03	0.02	0.79	167.00	47.44	45.47	0.11	1.09	0.33	0.22	0.29	3.33	1.32	0.68
RB	49	1.08E-02	0.67	0.09	0.10	0.80	125.00	17.77	23.91	0.25	9.53	2.74	2.21	0.64	1.88	1.08	0.19
RI	20	5.71E-03	0.12	0.03	0.02	1.68	81.84	17.61	19.17	0.23	5.11	1.69	1.77	0.89	1.83	1.17	0.24
Total	220	5.71E-03	0.67	0.06	0.06	0.79	273.00	43.35	48.73	0.06	9.53	1.25	1.57	0.29	5.50	1.21	0.62

4.2.4.2. ADL pour identifier les types de 'mouvements de versant'

Les variables discriminantes choisies sont les mesures morphométriques indiquées dans la figure 3.37 et les indices morphométriques dérivés (soit 17 variables). Le calage est effectué avec 80 % des individus tirés au sort de manière aléatoire. Le calage de la fonction (classement) est effectué avec les individus introduits (classement original et validés-croisés). La validation est réalisée avec les 20% des individus mis de côté pendant la phase de calage (validation originale). Le tableau 3.9 indique les meilleurs classements obtenus par rapport à notre classification 'expert' (Tab. 3.9) :

- (i) 71.3% de l'échantillon de calage est bien classé ;
- (ii) 65.5% des individus sont bien classés en ajoutant les individus non introduits initialement.

Cinq itérations suffisent pour obtenir ces résultats moyens à bons²⁸ (Tab. 3.9), les itérations supplémentaires n'apportent qu'une amélioration mineure voire nulle. On peut donc retenir :

- (i) **Au pas n° 1, la variable Lx (longueur de la zone d'accumulation)** est retenue. Elle distingue les glissements-coulées, les glissements banc sur banc et les translationnels complexes avec respectivement 71.4%, 66.7% et 52.4% d'individus reconnus dans leur groupe ;
- (ii) **Au pas n° 2, la variable T (indice de ténuité)** est retenue. Elle améliore largement le classement des glissements rotationnels avec 61.2% des individus reconnus, ce qui est proche du classement final pour ces phénomènes ;
- (iii) **Au pas n° 3, la variable P (indice de profondeur)** est retenue. Elle permet de faire gagner 14% d'individus reconnus pour les glissements translationnels mais surtout elle permet de discriminer les glissements translationnels superficiels des autres phénomènes. Les glissements banc sur banc sont reconnus à 78.6% soit à un taux proche du maximum obtenu ;

²⁸ 34 itérations sont nécessaires pour obtenir des résultats optimaux.

- (iv) **Au pas n° 4, la variable E (indice d'étalement)** est retenue. Elle permet d'améliorer considérablement le classement des glissements-coulées (100%). Une légère amélioration du pourcentage obtenu est aussi observée pour les glissements translationnels complexes ;
- (v) **Au pas n° 5, la variable Di (indice de dilatation)** est retenue. Le taux de reconnaissance des glissements translationnels complexes est de 76.2%. Une faible amélioration du taux de reconnaissance est observable pour les glissements translationnels superficiels (53.3% reconnus).
- (vi) **Les autres itérations améliorent légèrement les taux de reconnaissance.** L'avant-dernière (itération n°8), introduisant Cav (Indice de compacité aval) permet aux glissements translationnels superficiels de gagner 12% de reconnaissance atteignant alors 65% d'individus reconnus.

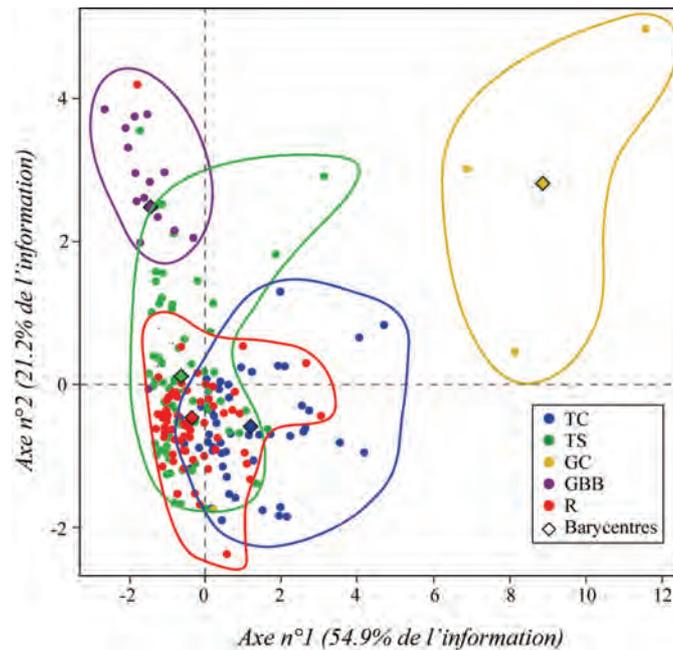
Tab. 3.9. Résultats par itérations successives et variables discriminantes retenues de l'ADL pas à pas pour la typologie des 'mouvements de versant'.

Lx = longueur de la zone d'accumulation ; T = Indice de ténuité ; P = Indice de profondeur ; E = Indice d'étalement ; Di = Indice de dilatation ; Dx = Epaisseur de la zone d'accumulation estimée ; D = Hauteur de l'escarpement principal ; Cav = Indice de compacité aval ; Lc = Longueur de la zone d'ablation ; Co = Classement original ; Cvc = Classement validé-croisé ; Vo = Validation originale ; Vr = Variable retenue ; % = pourcentage d'individus bien classés.

		Type de Classement		
		Co	Cvc	Vo
Itération n°	Vr	%	%	%
1	Lx	33.9	33.9	45.7
2	T	56.9	55.2	56.5
3	P	62.1	61.5	58.7
4	E	63.2	62.1	62.1
5	Di	63.8	62.4	63
6	Dx	67.2	62.6	63
7	D	67.8	62.2	65.2
8	Cav	70.7	63.7	65.2
9	Lc	71.3	65.5	65.2

Les variables retenues sont en majorité des indices complétées par quelques variables morphométriques simples (L, Dx, D, respectivement longueur totale du phénomène, épaisseur de la zone d'accumulation estimée, hauteur de l'escarpement principal). Les indices les plus influents retenus par l'ADL sont liés aux paramètres morphométriques de la zone d'accumulation. L'indice P (Indice de profondeur) est confirmé comme étant un bon discriminateur.

Sur la figure 3.38, construite avec les deux premiers axes et résumant 76.1% de l'information, on remarque la difficulté pour bien différencier certains types de phénomènes. L'axe 1 (54.9% de l'information) oppose nettement les glissements-coulées des autres glissements. L'axe 2 (21.2%) discrimine les glissements banc sur banc et les glissements rotationnels et translationnels. Les barycentres des glissements-coulées et des glissements banc sur banc sont bien discernables, alors qu'au centre de la figure, les barycentres des glissements translationnels superficiels complexes et glissements rotationnels sont assez proches. **A travers ce graphique, la difficulté de discriminer les glissements translationnels superficiels des glissements rotationnels est bien perceptible.**



Type de 'mouvement de versant' : TC = translationnel complexe ; TS = translationnel superficiel ; GC = glissement coulée ; GBB = glissement banc sur banc ; R = rotationnel. Le plan factoriel est construit avec les deux premiers axes discriminants.

Fig. 3.38. Classification des 'mouvements de versant' avec le meilleur jeu de variables discriminantes suivant le premier plan factoriel.

Le tableau 3.10 présentant la classification originale, la classification validée/croisée et la validation originale confirme cette tendance. **En tenant compte des individus dans leurs classes respectives** (Tab. 3.10) : 78.6% sont bien classés pour les translationnels complexes, 66.7% pour les translationnels superficiels, 100% des glissements-coulées, 85.7% des glissements banc sur banc et 65.5% pour les glissements rotationnels.

Pour le classement original, l'analyse intra-groupe indique qu'une certaine **confusion est possible entre les glissements translationnels superficiels et les glissements rotationnels** : 23.6% des glissements rotationnels introduits initialement dans le calage de l'analyse sont classés dans les translationnels superficiels (Tab. 3.9). L'analyse des glissements rotationnels mal classés indique que 80% d'entre eux correspondent à des séries de petits glissements rotationnels difficilement discernables à l'échelle du 1/10 000^{ème}. De ce fait, lors de la digitalisation, il a été décidé de les réunir en un seul polygone. Ainsi, à cette échelle de travail et pour ce type d'analyse il subsiste un biais lorsque les phénomènes de petites taille sont agrégés. **L'analyse discriminante n'est donc pas en mesure d'aider le géomorphologue dans ce cas.** Pour les des glissements translationnels complexes, 21.4% sont classés dans les glissements translationnels superficiels. **Ce mauvais classement est dû aux indices morphométriques des zones d'accumulation qui sont proches des moyennes des glissements translationnels superficiels.** Ces glissements complexes sont moins profonds que la moyenne de leur groupe et possèdent une zone d'accumulation proche de celle observée pour les glissements translationnels superficiels. C'est le cas de certains glissements complexes et des glissements-coulées. La validation croisée par groupe de 'mouvements de versant' (Tab. 3.9) indique que 25.5% des glissements rotationnels sont reclassés dans les glissements complexes.

La validation originale, réalisée avec les individus non introduits initialement dans l'analyse, **se révèle moyenne** (Tab. 3.10). Les raisons de ce classement moyen sont double : (i) peu de phénomènes sont pris en compte pour cette validation ; (ii) des morphologies semblables de certaines zones d'accumulation biaisent les résultats. Par exemple, pour la première raison, pour

les glissements banc sur banc, seuls quatre mouvements sont pris en compte pour la validation : les deux glissements mal classés suffisent à influencer la proportion d'individus mal classés. Pour la seconde raison, par exemple, **50% des glissements translationnels complexes et 50% des glissements banc sur banc sont reconnus dans le groupe des glissements translationnels superficiels**. Ce mauvais classement pour les glissements translationnels complexes est le résultat d'une morphologie de la zone d'accumulation proche de celle des glissements translationnels superficiels.

Tab. 3.9. Résultats intra groupe de l'ADL pas à pas pour la typologie des 'mouvements de versant'.

Le tableau met en valeurs les différentes étapes de classement afin de valider l'ADL. Type de 'mouvements de versant' : TC = translationnel complexe ; TS = translationnel superficiel ; GC = glissement-coulée ; GBB = glissement banc sur banc ; R = rotationnel. Co = classement original ; Cvc = classement validé-croisé ; Vo = Validation originale ; 5 = nombre d'individu reconnu ; 100% = proportion reconnue par rapport au total en ligne.

		Classification a posteriori						Total
		Type de classement	TC	TS	GC	GBB	R	
Classification a priori	TC	Co	33 78.6%	9 21.4%	-	-	-	42 100%
		Cvc	30 71.4%	12 28.6%	-	-	-	
		Vo	6 50%	6 50%	-	-	-	12 100%
	TS	Co	5 8.3%	40 66.7%	-	8 13.3%	7 11.7%	60 100%
		Cvc	5 8.3%	40 66.6%	-	8 13.3%	7 11.7%	
		Vo	2 13.3%	12 80%	-	-	1 6.7%	15 100%
	GC	Co	-	-	31 100%	-	-	3 100%
		Cvc	2 66.7%	-	1 33.3%	-	-	
		Vo	1 100%	-	-	-	-	1 100%
	GBB	Co	-	2 14.3%	-	12 85.7%	-	14 100%
		Cvc	-	3 21.4%	-	11 78.6%	-	
		Vo	-	2 50%	-	2 50%	-	4 100%
	R	Co	4 7.3%	13 23.6%	-	2 3.6%	36 65.5%	55 100%
		Cvc	7 12.7%	14 25.5%	-	2 3.6%	32 58.2%	
		Vo	2 14.3%	2 14.3%	-	-	10 71.4%	14 100%
Total	Co	42 24.1%	64 36.8%	3 1.7%	22 12.6%	43 24.7%	174 100%	
	Cvc	44 25.3%	69 39.6%	1 0.6%	21 12%	39 22.4%	174 100%	
	Vo	11 6.3%	22 12.6%	-	2 1.2%	11 6.3%	46 100%	

Pour conclure, la classification originale et validée/croisée est correcte à moyenne pour trois types de 'mouvements de versant' (les glissements translationnels complexes, les glissements complexes et les glissements banc sur banc). La classification avec les 20% d'individus non sélectionnés pour produire la fonction discriminante est plus mitigée. Ces résultats sont parfois liés à un grand nombre de mouvements qui, malgré un processus de déclenchement différent et des formes bien discernables sur le terrain, ont des caractéristiques morphométriques semblables. Ce constat expose bien la difficulté de classer les phénomènes d'instabilité et leurs caractéristiques retranscrites par de simples mesures, et qui ne traduisent pas obligatoirement les observations de terrain et la vision experte associée.

4.2.4.3. Discussion

L'objectif de ces deux analyses multidimensionnelles sur les 'mouvements de versant' était d'aider l'expert à classer les phénomènes (i) selon un degré d'activité et (ii) dans une famille de 'mouvements de versant'. Pour l'activité, les résultats peuvent être considérés comme bons

avec des taux de classement globaux et inter groupes très bons, pour la typologie, ils sont plus mitigés avec des difficultés pour interpréter certains classements.

Ceci indique la pertinence des attributs choisis pour discriminer l'activité des 'mouvements de versants'. Toutefois, ces attributs sont directement liés à notre vision experte des phénomènes, il faudrait maintenant confronter la méthodologie et ces attributs avec des phénomènes semblables sur d'autres sites pour confirmer les résultats acquis pour le versant *Ubac*.

5. CONCLUSION DU CHAPITRE 3

Les objectifs de ce chapitre étaient de :

- (i) **Compléter la connaissance experte des phénomènes ;**
- (ii) **Quantifier certaines informations de manière la plus objective qui soit ;**
- (iii) **Valider les informations retenues pour qualifier les 'mouvements de versant' observés.**

Ces trois objectifs ont été réalisés sur la base de statistiques descriptives et multidimensionnelles.

Ainsi, au terme de ce chapitre, la description détaillée des deux secteurs d'étude montre bien la diversité et la richesse des phénomènes. **Sur l'ensemble du bassin de Barcelonnette, 482 'mouvements de versant' ont été inventoriés**, décrits et liés à une base de données attributaires. Il apparaît clairement **une nette différence entre les phénomènes observés sur les versants *Ubac* et *Adret***. Le bassin est surtout affecté par des **glissements superficiels actifs de petite et moyenne taille**. Le versant *Ubac*, par exemple est le plus affecté par les 'mouvements de versant' de toutes sortes, avec une prédominance pour les glissements translationnels très superficiels et superficiels ou complexes. **Plusieurs autres secteurs plus actifs** se distinguent comme (i) le long de *l'Abriés* pour les glissements superficiels, (ii) le secteur de *Bois Noir* pour les glissements complexes, (iii) le secteur de *Poche/Riou des Ribes* pour les glissements rotationnels actifs.

Au final, pour le versant *Ubac*, huit types de 'mouvements de versant' et quatre classes d'activité sont distingués. La localisation des 'mouvements de versant' a été confirmée pour 80% par un indice de confiance cartographique (*ICC*) spécifiquement élaboré pour le site. Les classifications expertes ont été confirmées par une confrontation avec des analyses discriminantes linéaires pas à pas, permettant de hiérarchiser l'information contenue dans les bases de données. **Seuls les 'mouvements de versant' actifs (continus et intermittents) à *ICC1* disposent d'une information spatiale et attributaire fiable calée et validée.**

Ainsi, un premier choix des phénomènes à modéliser est réalisé et parmi les 370 individus à *ICC1*, **220 sont retenus pour être confrontés avec les variables prédictives** (*Chap. 5*).

CHAPITRE 4 : LES VARIABLES PREDICTIVES : ACQUISITION ET DESCRIPTION

La variable à modéliser (*i.e.* les '*mouvements de versant*') étant détaillée (*Chap. 3*), il convient maintenant de **décrire les différentes variables prédictives, dont la connaissance est également nécessaire pour les analyses de susceptibilité choisies** (*Chap. 1*). Comme il est précisé dans le chapitre 1, le choix de ces variables est le fruit d'un compromis entre le(s) problème(s) considéré(s), les questionnements spécifiques, l'échelle de la recherche, la taille du site d'étude, l'accessibilité du site, et certaines considérations économiques (Maquaire, 2002). Encore récemment, les variables prédictives (données spatiales et attributaires) sous format numérique pour une échelle large comme le 1/10 000^{ème} n'étaient disponibles que pour quelques centres urbains et certains secteurs de plaines. En secteurs montagneux, il était nécessaire de :

- (i) Compléter et d'affiner la précision spatiale et attributaire des bases de données existantes pour des échelles plus larges ;
- (ii) Produire des données adaptées à l'échelle de travail choisie.

Pour cette recherche, et dans la cadre du programme ALARM, peu de données spatiales étaient disponibles sauf une base de données pour le MNT (*Modèle Numérique de Terrain ; i.e.* la *BD Alti* ®) et deux bases de données pour l'occupation du sol (*BD CORINE Land Cover* et la *BD CRIGE PACA*). Pour l'élaboration de la carte morphodynamique, les informations relatives aux '*mouvements de versant*' (*stricto sensu*) ont dû être complétées par des informations relevées sur le terrain. Certaines de ces informations ont été reportées sur la carte morphodynamique et ont servi à préparer des bases de données, intégrées dans un environnement *SIG*, pour trois groupes de variables prédictives à savoir : (i) la géologie (lithologie, pendage, tectonique, et formations superficielles), (ii) l'occupation du sol et (iii) l'hydrologie de surface (zones humides et cours d'eau). Ces bases de données sont comparées aux bases de données existantes.

Ce chapitre présente donc les différentes bases de données des variables prédictives acquises et produites pour cette recherche. Quatre sections détaillent chacune un groupe de variables prédictives et les moyens mis en œuvre pour les obtenir. Ainsi, la première section met l'accent sur les paramètres géométriques de terrain soit les bases de données altimétriques et les *MNT (Modèle Numérique de Terrain)*. La seconde section se concentre sur les bases de données relatives à l'occupation du sol. La troisième section présente les variables géologiques et enfin, la quatrième section concerne l'hydrologie et les variables associées.

1. LES PARAMETRES GEOMETRIQUES DE TERRAIN : BASES DE DONNEES ALTIMETRIQUES ET MNT

Les paramètres géométriques de terrain sont essentiels dans le cadre d'analyses qualitatives, semi-quantitatives et quantitatives de la susceptibilité et de l'aléa '*mouvements de versant*' par *SIG*. Ces variables dérivées des *MNT* sont utilisées pour :

- (i) **Suivre l'activité des 'mouvements de versant'** (Iwahashi *et al.*, 2001 ; Corsini *et al.*, 2006 ; Schulz, 2007) ;
- (ii) **Reconstituer une vue du terrain en images de synthèse**, déterminer des trajectoires, effectuer automatiquement des coupes topographiques de terrain (Longley *et al.*, 2001) ;
- (iii) **Extraire des formes du terrain** (pente, exposition, formes des versants, Fleming et Hoffer, 1979 ; Evans, 1980 ; Horn, 1981 ; Zevenbergen et Thorne, 1987 ; Wood, 1996 ; Schmidt et Dikau, 1999 ; Weiss, 2001) ;
- (iv) **La modélisation déterministe** et le calcul de flux de surface (Beven et Kirkby, 1979 ; Montgomery et Dietrich, 1994 ; Soeters et van Westen, 1996 ; Taborton, 1997 ; Walker et Willgoose, 1999 ; Carrara *et al.*, 1997 ; Claessens *et al.*, 2005) ou encore le calcul de l'énergie reçue au sol (Dubayah et Rich, 1995 ; Fu et Rich, 2000).

Les *MNT* utilisés sont disponibles (comme la *BD Alti* ®) ou peuvent être produits spécifiquement. Un des objectifs de cette recherche étant de vérifier si les bases de données disponibles peuvent être utilisées au 1/10 000^{ème}, nous avons comparé la *BD Alti* ® avec un *MNT* créé et optimisé pour le bassin de *Barcelonnette*. Cette section présente dans un premier point la *BD Alti* ® et dans un deuxième point, la méthodologie utilisée pour obtenir un *MNT* local adapté aux conditions topographies particulières du bassin de *Barcelonnette* est détaillée. Enfin, dans un troisième point, le *MNT* utilisé pour la transposition des modèles d'analyse spatiale calés sur le bassin de *Barcelonnette* est décrit.

1.1. La base de données disponible : la *BD Alti* ®

En France, dès 1998, une base de données altimétriques a été créée par l'*IGN* : la *BD Alti* ®. Elle sert de base pour l'élaboration de *MNT* au pas de 50 m minimum pour tout le territoire avec une précision maximum de 25 m en altitude. « Cette base de données est disponible sur la totalité du territoire français (France métropolitaine et DOM/TOM). Elle est constituée de fichiers vecteurs issus de la numérisation de l'ensemble des courbes de niveau (d'équidistance 5 à 40 m), saisies sur des cartes au 1/25 000^{ème} au 1/50 000^{ème} et à partir de prises de vues aériennes sur les massifs montagneux » (*IGN*, 1998).

En outre, la *BD Alti* ® (*IGN*, 1998) sert de base à la *BD Topo* ® (*IGN*, 2006a) produite, elle aussi par l'*IGN* mais incluant en plus du *MNT* une description vectorielle des éléments d'une région donnée à une précision métrique et exploitable pour les échelles du 1/500 000^{ème} au 1/50 000^{ème}. Pour les zones urbaines, le *MNT* est amélioré avec une maille de 25 m de côté (*IGN*, 2004). La *BD Alti* ® (*IGN*, 1998) utilisée pour cette recherche a été mise à disposition gracieusement par le *CRIGE-PACA*, sa résolution spatiale initiale de 50 m a été ré-échantillonnée à 30 m pour pouvoir être utilisée pour l'élaboration d'une base de données sur l'occupation du sol (*Chap. 4, §.2*). L'erreur altimétrique du *MNT* est de 15 m au maximum par rapport à des points *GPS* enregistrés en 2002.

1.2. La base de données altimétrique et le *MNT* spécifique

La qualité d'un *MNT* est liée (Carter, 1992 ; Chang et Tsai, 1991 ; Carrara *et al.*, 1997 ; Florinsky, 1998 ; Hengl *et al.*, 2003 ; Buckley *et al.*, 2004) :

- (i) A la technique d'acquisition de la base de données spatiale (densité des données et précision) ;
- (ii) A la technique de construction du *MNT* (algorithme d'interpolation) ;
- (iii) A la complexité du terrain à modéliser.

Chacun de ces points doit être vérifié, surtout lorsque le site est large avec une topographie complexe²⁹. Il est donc indispensable de :

- (i) **Connaitre le nombre minimum de données à introduire** pour obtenir un maillage adapté et un MNT le plus précis possible (Zhang et Montgomery, 1994 ; Florinsky, 1998 ; Claessens *et al.*, 2005) ;
- (ii) **Confronter plusieurs techniques d'interpolation** afin de retenir celle qui traduira le mieux la complexité du terrain.

Ainsi, pour obtenir un MNT adapté au bassin de *Barcelonnette* et reflétant sa topographie complexe, une stratégie par étapes emboîtées est utilisée sur trois sites de calage représentatifs. Après avoir décrit l'acquisition de la base de données altimétrique, cette stratégie est détaillée. Les résultats sont ensuite présentés et appliqués à l'ensemble du bassin de *Barcelonnette*.

1.2.1. Acquisition du semi de points

A l'échelle d'un bassin versant, les méthodes les plus couramment utilisées pour acquérir un semi de points sont la **photogrammétrie numérique** à partir de couple de photographies aériennes au 1/25 000^{ème} ou au 1/30 000^{ème} (Walker et Willgoose, 1999), la technique du **LIDAR** (Ackermann, 1999 ; Rousseaux, 2004) ou encore la **digitalisation des courbes de niveaux** à partir de la numérisation de cartes topographiques (Hutchinson et Gallant, 2000 ; van Westen *et al.*, 2006 ; Annexe 4.1).

Le programme *ALARM* étant limité financièrement, l'acquisition et le traitement d'un semi de points par photogrammétrie numérique ou par levés *LIDAR* ou l'achat d'un MNT précis n'ont pu être envisagés. **Le semi de points a donc été acquis par digitalisation des courbes de niveaux à partir de cartes topographiques.** Les documents de base ont été des cartes *IGN* au 1/25 000^{ème}, agrandies au 1/10 000^{ème} par l'*IGN*, scannées puis géoréférencées. **Les courbes de niveaux ont été digitalisées à l'échelle du 1/5 000^{ème}** pour les zones planes et/ou peu accidentées. L'équidistance des courbes digitalisées est de 10 m. En cas d'éloignement trop important des courbes, une ou deux courbes intermédiaires ont été ajoutées. **Pour les zones fortement accidentées, un agrandissement au 1/2 000^{ème} voire au 1/1 000^{ème} a été effectué dans le but de discerner les courbes de niveaux.** Lorsque les courbes de niveaux étaient trop rapprochées, il a été décidé de n'en digitaliser qu'une sur deux. **Enfin, pour les secteurs où les courbes n'apparaissent pas, des courbes de niveaux supplémentaires ont été ajoutées suivant la connaissance du terrain et une analyse du relief par photo-interprétation.** Les 'nœuds' de chaque ligne constituent des séries de triplets équidistants de 50 m en moyenne, soit 5 mm à l'échelle du 1/10 000^{ème}. Pour les vallées fortement encaissées, les 'badlands' et les versants fortement accidentés, dans un souci de précision, la quantité de triplets a été augmentée avec un 'nœud' tous les 10 m en moyenne.

1.2.2. Acquisition d'un MNT optimum

Une première recherche sur la technique d'interpolation optimale a été engagée dans le cadre du programme *ALARM* (Beck, 2002 ; Maquaire *et al.*, 2003 ; Thiery *et al.*, 2003). Cette recherche était centrée sur le secteur de l'*Abriès* et le secteur du torrent de *Poche*. Une analyse de sensibilité sur les méthodes d'interpolation exactes et les coordonnées issues des courbes de niveaux tous les 50 m, 20 m et 10 m a alors été réalisée. La validation des différents MNT obtenus a été effectuée suivant deux des recommandations de Wood (1996) soit : (i) une validation visuelle et (ii) une comparaison des MNT avec des points de contrôle (12 points *GPS* et 20 points *IGN*).

²⁹ Plusieurs articles font référence à des stratégies diverses pour des sites larges et à la topographie plus ou moins complexes comme par exemple : Zhang et Montgomery, 1994 ; Florinsky, 1998 ; Florinsky et Kuryakova, 2000 ; Thompson *et al.*, 2001 ; Wise, 2002 ; Kienzle, 2004 ; Deng *et al.*, 2007.

Les résultats apparaissaient convaincants (Beck, 2002), cependant, peu de secteurs fortement accidentés, aux fortes variations de pentes, étaient inclus dans le secteur. Or, ces derniers posent des problèmes, lorsque :

- (i) Les 'nœuds' sont très rapprochées et que la maille de calcul est plus large que la distance entre les points ;
- (ii) Les 'nœuds' sont trop éloignés (formations d'artefacts : de puits -pit-, de terrasses, etc. ; Wood, 1998 ; Rousseaux, 2003).

Une nouvelle recherche fondée sur les résultats et les limitations antérieures, focalisée sur la maille minimum à produire, le nombre minimum de triplets et les méthodes d'interpolation, a donc été engagée.

1.2.2.1. Analyse de sensibilité

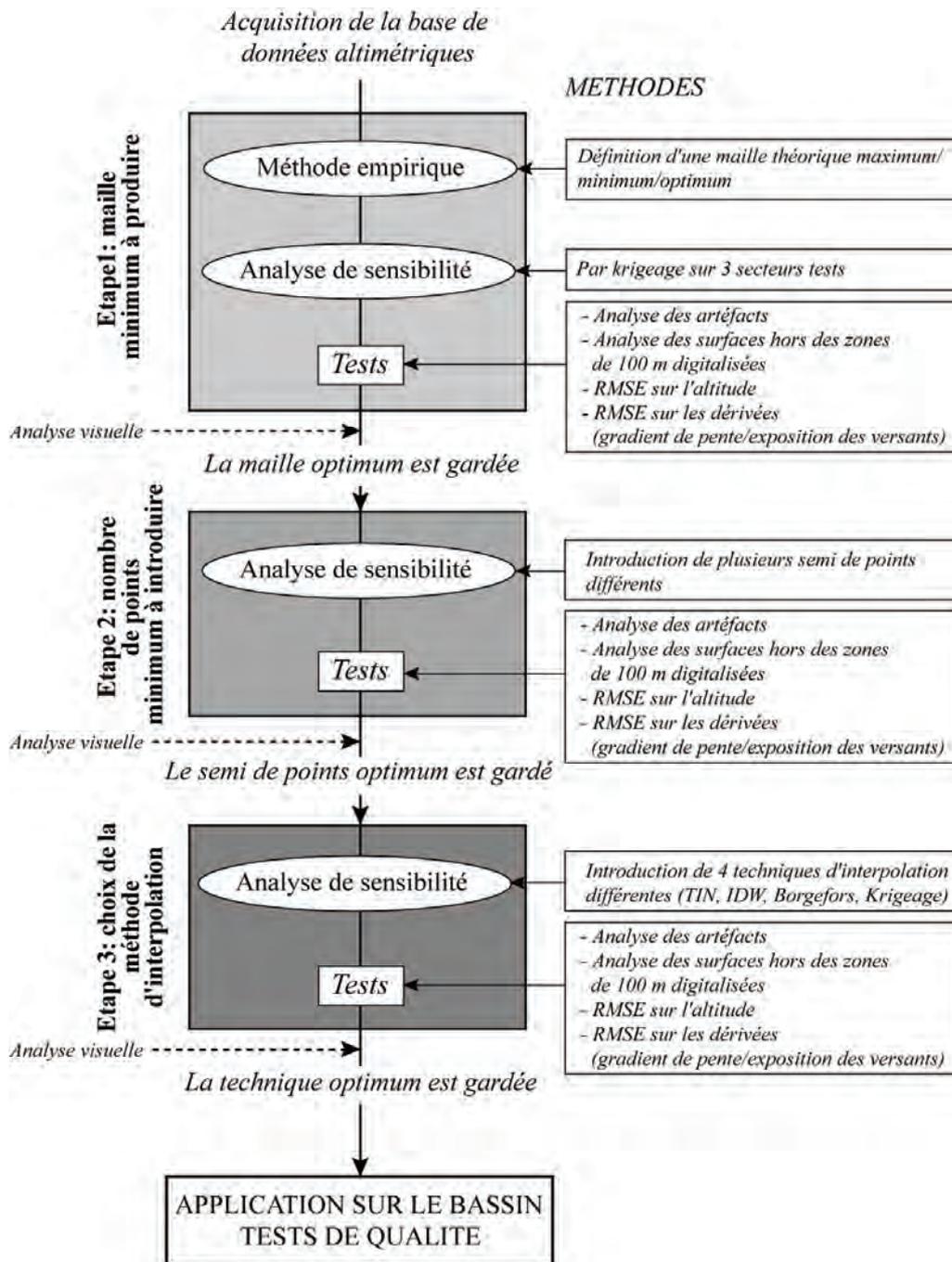
La stratégie pour améliorer la base de données altimétrique et le MNT interpolé a été divisée en trois étapes successives (Fig. 4.1) :

- (i) **La première étape** concerne la taille minimum de la maille à produire pour obtenir d'une part des valeurs altitudinales simulées proches de la réalité et d'autre part, des dérivées conformes à la réalité du terrain (Kienzle, 2004 ; Hengl *et al.*, 2003, 2004 ; Claessens *et al.*, 2005). **Deux méthodes complémentaires ont été utilisées successivement.** La première méthode définit la maille minimum (5 m), maximum (20 m) et optimum (10 m) selon trois formules empiriques (Hengl, 2006 ; Annexe 4.2). La seconde méthode tient compte de ces résolutions spatiales théoriques (50 m, 20 m, 10 m, 5 m) et les compare, après interpolation, sur les trois secteurs tests. L'interpolation s'exécute par *krigeage ordinaire*³⁰ calé avec un semi-variogramme³¹ spécifique à chaque site. Au total, 36 MNT sont produits et comparés, le meilleur semi-variogramme et la résolution optimum sont conservés pour les étapes suivantes ;
- (ii) **La seconde étape** repose sur le nombre de triplets ('nœuds', points) à introduire (Kienzle, 2004). Dans l'ordre sont introduits le semi de points original et deux semis de points densifiés d'un point tous les 20 m et d'un point tous les 10 m ;
- (iii) **La troisième étape** est centrée sur la meilleure technique d'interpolation à retenir à partir des résultats des étapes (i) et (ii). Les quatre techniques retenues sont l'interpolation par : Réseau de Triangulation Irrégulière (*Triangular Irregular Network, TIN* ; Peucker *et al.*, 1978) ; par Distance Inverse Pondérée (*Inverse Distance Weighting, IDW* ; Shepard, 1968) ; *krigeage ordinaire par point* calé avec le meilleur semi-variogramme (*ordinary kriging* ; Krige, 1966 ; Baillargeon, 2005) ; Distance de Borgefors (*Borgefors distance method* ; Borgefors, 1986). Le détail de chaque technique se trouve en annexe (Annexe 4.3).

³⁰ La fonction de krigeage retenue pour les trois sites est fondée sur un modèle dit de 'puissance'. Le paramètre h retenu doit être compris entre 1 et 2, soit $\gamma(h) = C[h^n]$ avec $0 < n < 2$ et $1 < h < 2$. Les différents paramètres retenus pour estimer les valeurs sont : diamètre du cercle de recherche : 500 m ; nombre de secteurs : 4 ; nombre de triplets par secteur : 8 ; minimum de triplets par secteur pour éviter d'avoir une valeur nulle : 4. Pour plus de détails sur le krigeage et les semi-variogrammes, le lecteur peut se référer à Baillargeon (2005).

³¹ Le semi-variogramme permet de tenir compte des effets de discontinuité du relief représenté par le semi de points. Un semi-variogramme isotrope dépend uniquement de la variable h , c'est-à-dire du vecteur de translation entre un point s et $s+h$. Ce vecteur contient l'information sur la distance entre ces deux points, par l'intermédiaire de sa norme, et l'orientation de h . Un semi-variogramme anisotrope y additionnera l'effet de discontinuité comme dans notre cas des directions préférentielles de la distribution des points. Les semi-variogrammes calculés dans cette recherche sont anisotropes, il existe des préférences directionnelles dans la distribution des triplets. Les caractéristiques pour tenir compte de cette anisotropie sont notées en annexe 4.4. La portée des semi-variogrammes est de 500 m, aucun effet de pépite et de palier n'est à noter.

A chaque étape quatre tests de qualité sont réalisés, sur la base de tests visuels et statistiques (Annexe 4.4). Ces tests sont effectués sur trois secteurs représentatifs d'une surface de 6.5 km² chacun (Fig. 4.2). Le site n°1 est situé autour du glissement de *Poche*, le site n° 2 est situé à *la Conchette*, le site n° 3 est centré sur *Bois Noir*.



Les différents tests sont décrit en annexe (Annexe 4.3), le RMSE (Root Mean Square Error, Erreur quadratique moyenne) y est aussi détaillée.

Fig. 4.1. Représentation schématique de la stratégie d'acquisition d'un MNT adapté au site d'étude pour une échelle du 1/10 000^{ème}.

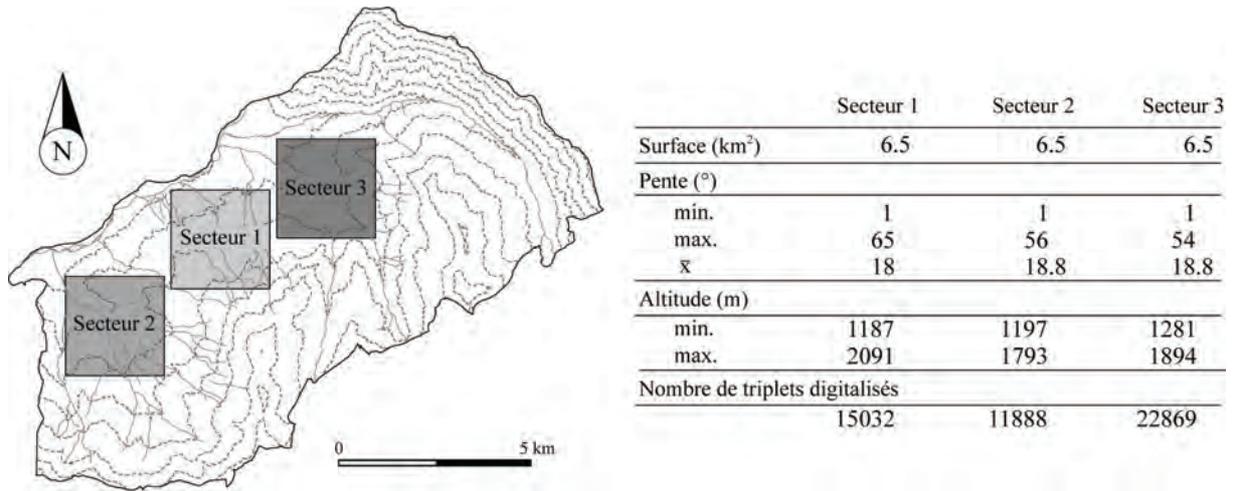
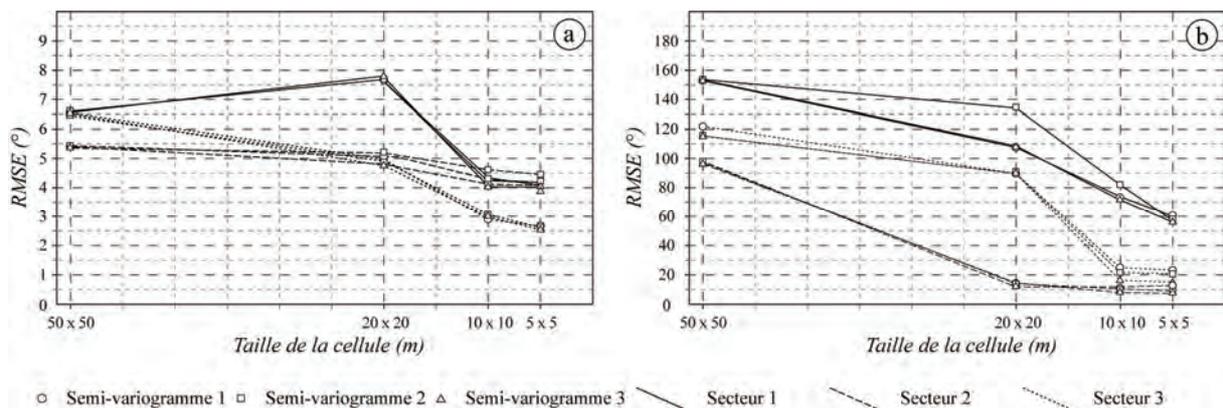


Fig. 4.2. Localisation et caractéristiques des secteurs tests pour l'acquisition du MNT adapté.

1.2.2.2. Résultats de l'analyse de sensibilité

Les résultats sont présentés successivement pour la maille optimum, le semi de points optimum et le meilleur interpolateur. Etant donné le nombre conséquent de tests réalisés pour obtenir une stratégie adaptée à notre site, seuls quelques exemples sont présentés.

Les différents tests indiquent que des résolutions spatiales de 50 m et de 20 m ne sont pas assez précises (RMSE comprises entre 3.7 et 1.6 pour tous les points et comprises entre 6.7 et 3 pour les points IGN et GPS). Avec des résolutions spatiales de 10 m et de 5 m, les résultats sont améliorés : le nombre d'artéfacts diminuent et les RMSE calculées sur les points IGN et GPS ou sur les dérivées (gradient de pente et exposition des versants) sont très proches (Fig. 4.3). Enfin, les différents tests montrent pour les trois sites représentatifs que les erreurs minimum sont obtenues avec le semi-variogramme calculé pour le site n° 3. Au final, le semi-variogramme n°3 et une cellule de 10 m sont retenus.



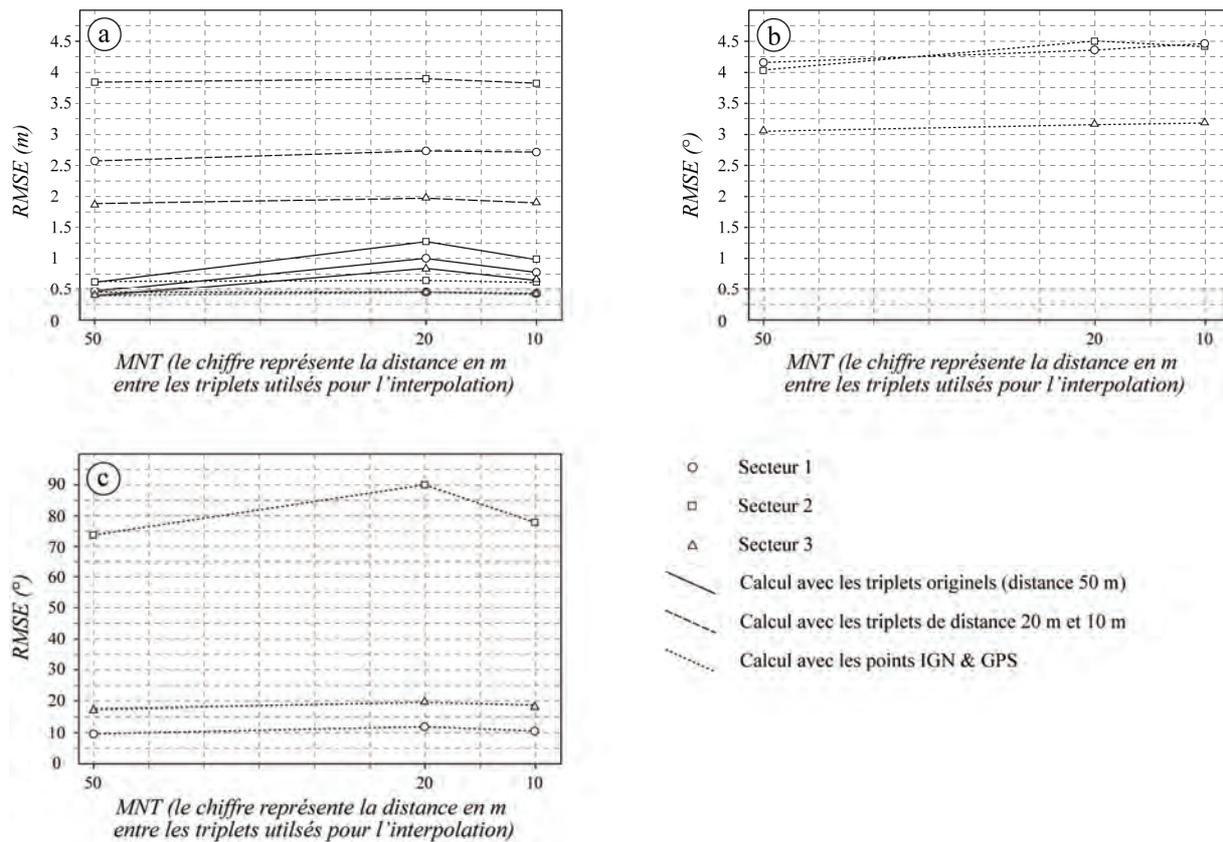
a. RMSE calculée pour le gradient de pente. b. RMSE calculée pour l'exposition des versants.

Fig. 4.3. RMSE calculées sur les dérivées pour différentes résolutions de MNT issues d'interpolations par la technique de krigeage.

L'introduction de points tous les 20 m et tous les 10 m ne génère pas une précision et une qualité de MNT supérieures au semi de points initial. Les artéfacts générés avec des points supplémentaires sont largement supérieurs au semi de points initial et les RMSE calculées avec les altitudes et les dérivatives sont équivalentes (Fig. 4.4). Ainsi, sont retenus le semi de points

initial produit avec des points tous les 50 m et une densité de points accrue lorsque la topographie est complexe.

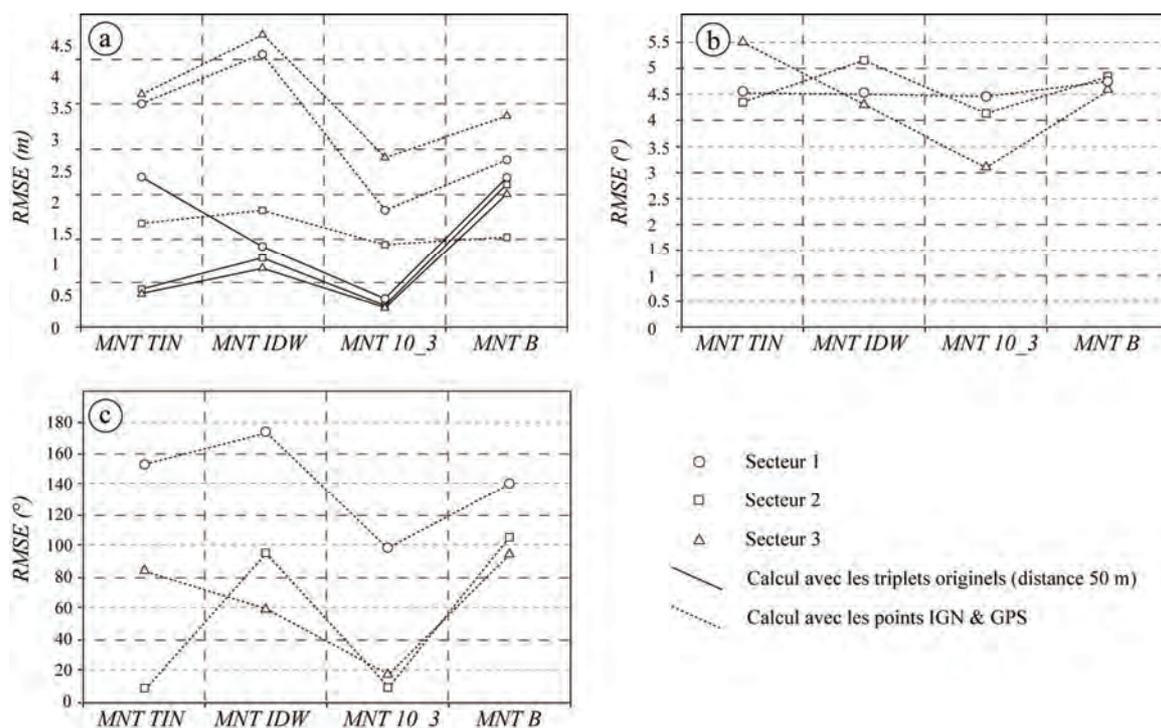
De manière générale, les résultats sur les **interpolateurs** varient en fonction du site test retenu³². Les résultats les plus mauvais sont obtenus avec le technique *IDW*. Les **meilleurs résultats sont acquis avec les MNT produits par krigeage ordinaire et le semi-variogramme n°3** (Fig. 4.5). La figure 4.6, centrée sur le secteur n° 1, illustre les erreurs que peuvent générer chaque algorithme d'interpolation pour la dérivée 'exposition des versants'. Les secteurs fortement ravinés dans les talwegs encaissés sont mal représentés pour le MNT interpolé par *TIN* (Fig. 4.6a). A l'inverse pour le MNT interpolé par *IDW* (Fig. 4.6b), ce sont les versants en interfluve qui présentent de brusques variations d'exposition alors que la topographie est relativement rectiligne sans changement de direction.



a. RMSE calculée pour les altitudes. b. RMSE calculée pour les gradients de pente. c. RMSE calculée pour l'exposition des versants.

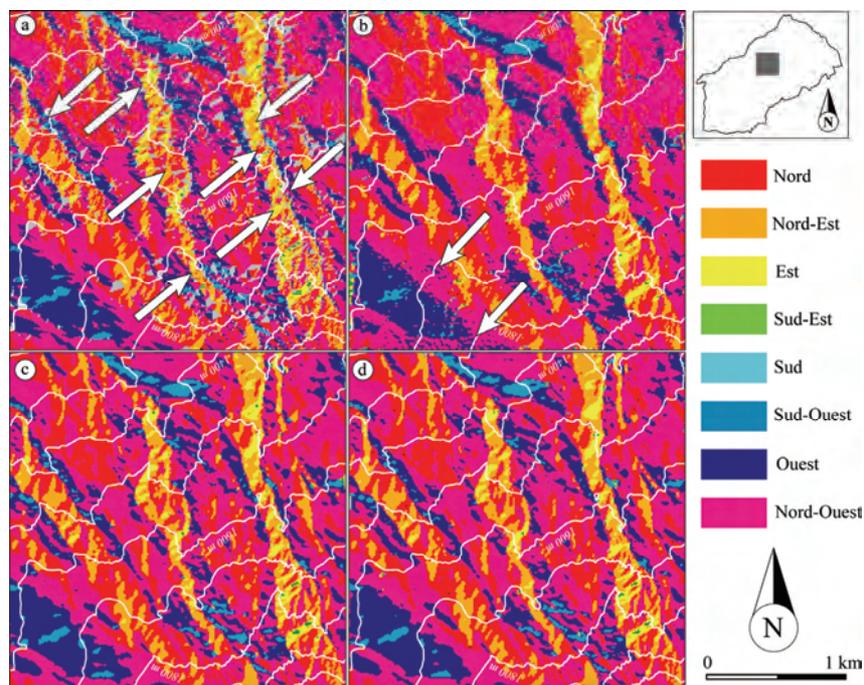
Fig. 4.4. RMSE calculées pour les MNT d'une maille de 10 m générés avec différentes séries de triplets.

³² D'un point de vue statistique, l'interpolation par TIN peut être une alternative, le nombre de triplets digitalisés étant assez dense pour obtenir un MNT précis. Toutefois, dans le cadre d'une modélisation numérique, les codes de calculs sont développés pour fonctionner en format raster. Une conversion est donc nécessaire pour utiliser ce MNT. Cette conversion engendre des erreurs qui se remarquent sur les RMSE des secteurs à la topographie complexe comme le secteur n°1 et n°3. La méthode de distance de Borgefors fonctionne convenablement lorsque les courbes de niveaux sont assez éloignées ($d > 10$ m). Cependant, lorsque les courbes sont très proches, l'algorithme d'interpolation génère des erreurs. Il en résulte alors des secteurs avec de fortes variations d'altitude et des résultats sans rapport avec la réalité. Cette méthode a donc été éliminée.



MNT TIN = MNT produit par TIN, MNT IDW MNT produit par IDW, MNT 10_3 = MNT produit par krigeage ordinaire calé avec le semi-variogramme $n^{\circ}3$, MNT B = MNT produit par méthode de Bogerfors.

Fig. 4.5. RMSE calculées pour les MNT interpolés par différentes techniques (maille de 10 m).



a. Carte des expositions des versants dérivées du MNT TIN. b. Carte des expositions des versants dérivées du MNT IDW. c. Carte des expositions des versants dérivées du MNT par krigeage ordinaire à une maille de 10 m. d. Carte des expositions des versants dérivées du MNT B. Les flèches représentent les localisations des erreurs générées lors du calcul de la dérivée.

Fig. 4.6. Exemples d'erreurs générées par les différents algorithmes d'interpolation sur les dérivées.

Au final, une résolution spatiale de 10 m constitue un bon compromis entre la résolution, le temps de calcul, la qualité et une précision optimum. Les triplets digitalisés spécifiquement pour représenter la complexité du terrain apparaissent aussi suffisants. Une augmentation du nombre de point n'engage pas un gain de précision mais au contraire augmente le nombre d'artéfacts. Enfin, des quatre méthodes choisies, **le krigeage ordinaire calé avec le semi variogramme n° 3 est de qualité supérieure aux trois autres.** Logiquement, c'est cette méthode qui est appliquée à l'ensemble du bassin de *Barcelonnette*. Afin d'éviter les artéfacts qui s'avèrent être nombreux dans les talwegs, un filtre est appliqué après interpolation (Schmidt, 2001).

1.2.2.3. Application à l'ensemble du bassin de *Barcelonnette*

Afin de comparer et valider les résultats sur les secteurs représentatifs et le bassin entier, un indice de qualité final σ_h est calculé :

$$\sigma_h = b \cdot CI + \sigma_r \cdot \text{tg}(\alpha) \quad [\text{Eq. 4.2}]$$

où σ_h est l'indice de qualité générale ; σ_r est l'erreur de lecture de carte (0.2 mm du facteur d'échelle) ; b est un nombre empirique compris entre 0.16 et 0.33 ; CI est l'intervalle entre les courbes digitalisées ; et α la pente locale du *MNT*.

Cet indice de précision générale proposé par Pilouk (1992) et Li (1992, 1994 ; Eq. 4.2) tient compte des courbes de niveaux digitalisées et de la pente locale du *MNT* (plus précisément la pente moyenne du *MNT*). σ_h est calculé pour un facteur minimum et maximum b de 0.16 et 0.33 et pour la pente moyenne de chaque *MNT* (D'Agata et Zanutta, 2006). Il est comparé aux *RMSE* altitudinales : (i) si $RMSE < \sigma_{h-0.16}$ alors le *MNT* est considéré comme très bon, (ii) si $\sigma_{h-0.16} < RMSE < \sigma_{h-0.33}$ alors le *MNT* est considéré comme bon, enfin (iii) si $RMSE > \sigma_{h-0.33}$ alors le *MNT* est considéré comme moyen et il est rejeté.

Tab. 4.1. *RMSE et indice de qualité pour les MNT interpolé avec le semi-variogramme n°3.*

S1 = MNT produit pour le secteur 1 ; S 2 = MNT produit pour le secteur 2 ; S 3 = MNT produit pour le secteur 3 ; MNT BB = MNT produit pour l'ensemble du bassin de Barcelonnette.

<i>MNT</i>	<i>RMSE (m)</i>	σ_h (m)	
		<i>b = 0.16</i>	<i>b = 0.33</i>
<i>S1</i>	0.64	1.67	3.37
<i>S2</i>	0.48	1.66	3.36
<i>S3</i>	0.45	1.67	3.37
<i>bassin de Barcelonnette (MNT BB)</i>	2.16	1.69	3.39

Le tableau 4.1 indique les résultats acquis pour les secteurs tests et le bassin de *Barcelonnette* :

- (i) Les *RMSE* obtenues pour *S1*, *S2* et *S3* sont en deçà de l'indice σ_h , compris entre 1.67 et 3.39. Ainsi, **les MNT obtenus avec le semi-variogramme n°3 ont une précision spatiale suffisante pour travailler à l'échelle du 1/10 000^{ème}** ;
- (ii) La *RMSE* du *MNT* total (*MNT BB*) est comprise entre l'indice σ_h minimum et maximum (Tab. 4.1). **Le MNT est donc considéré comme bon.** La *RMSE* est supérieure à celles obtenues pour *S1*, *S2* et *S3*, car le semi-variogramme utilisé est optimisé pour des versants aux pentes moyennes à fortes. Ainsi, les erreurs brutes entre les points introduits lors de l'interpolation et les altitudes interpolées sont les plus élevées pour les secteurs aux pentes fortes et aux altitudes supérieures à 2500 m (erreur maximum de 12 m). La *RMSE* étant calculée sur la base de ces erreurs brutes, sa valeur finale en est *de facto* augmentée. Toutefois, les 'mouvements de versant' étudiés pour cette recherche se déclenchant sur des pentes moyennes à fortes (10-40°) et sous 2000 m d'altitude (*Chap. 3 ; §2*), cet état de fait n'a donc pas de conséquence pour la suite de notre recherche.

1.3. Discussion : la *BD Alti*® peut-elle être utilisée à l'échelle du 1/10 000^{ème} ?

Initialement, la *BD Alti*® (IGN, 1998) n'est pas créée pour être utilisée une échelle du 1/10 000^{ème}. Pour savoir si cette dernière peut être utilisée à cette échelle de travail, nous l'avons confrontée au même test de qualité final que le *MNT BB*.

1.3.1. RMSE et indice de qualité

Pour la *BD Alti*®, la RMSE est calculée avec des courbes tous les 50 m. Afin de pouvoir comparer l'indice σ_h entre les deux *MNT*, la *BD Alti*® est ré-échantillonnée à une maille de 10 m. Ainsi, les paramètres retenus pour le calcul de σ_h pour la *BD Alti*® sont les mêmes que pour le *MNT BB*. De ce fait, $\sigma_r = 0.2$ mm (ce qui correspond à l'erreur de lecture de la carte pour le 1/10 000^{ème}; Hengl *et al.*, 2003), $b = 0.16$ ou 0.33 , et α est la pente locale moyenne du *MNT*. *CI* est différent puisque seules les courbes équidistantes de 50 m sont utilisées pour interpoler la *BD Alti*®. Les règles pour accepter et rejeter le *MNT* sont les mêmes que celles développées pour le point précédent.

Tab. 4.2. RMSE et indices de qualité pour le *MNT BB* et la *BD Alti*®.

<i>MNT</i>	RMSE (m)	σ_h (m)	
		$b = 0.16$	$b = 0.33$
<i>MNT BB</i>	2.16	1.69	3.39
<i>BD Alti</i> ®	8.63	7.97	16.47

La RMSE de la *BD Alti*® est largement supérieure à celle de *MNT BB* (Tab. 4.2), ce qui signifie que les erreurs d'altitude générées sont plus importantes que pour le *MNT* adapté au site d'étude. L'indice σ_h est aussi beaucoup plus élevé, toutefois la RMSE est en deçà du seuil minimum de rejet. On considère donc que, comme le *MNT BB*, la *BD Alti*® peut être appliquée à l'échelle du 1/10 000^{ème}.

1.3.2. Les dérivées : analyse et comparaison

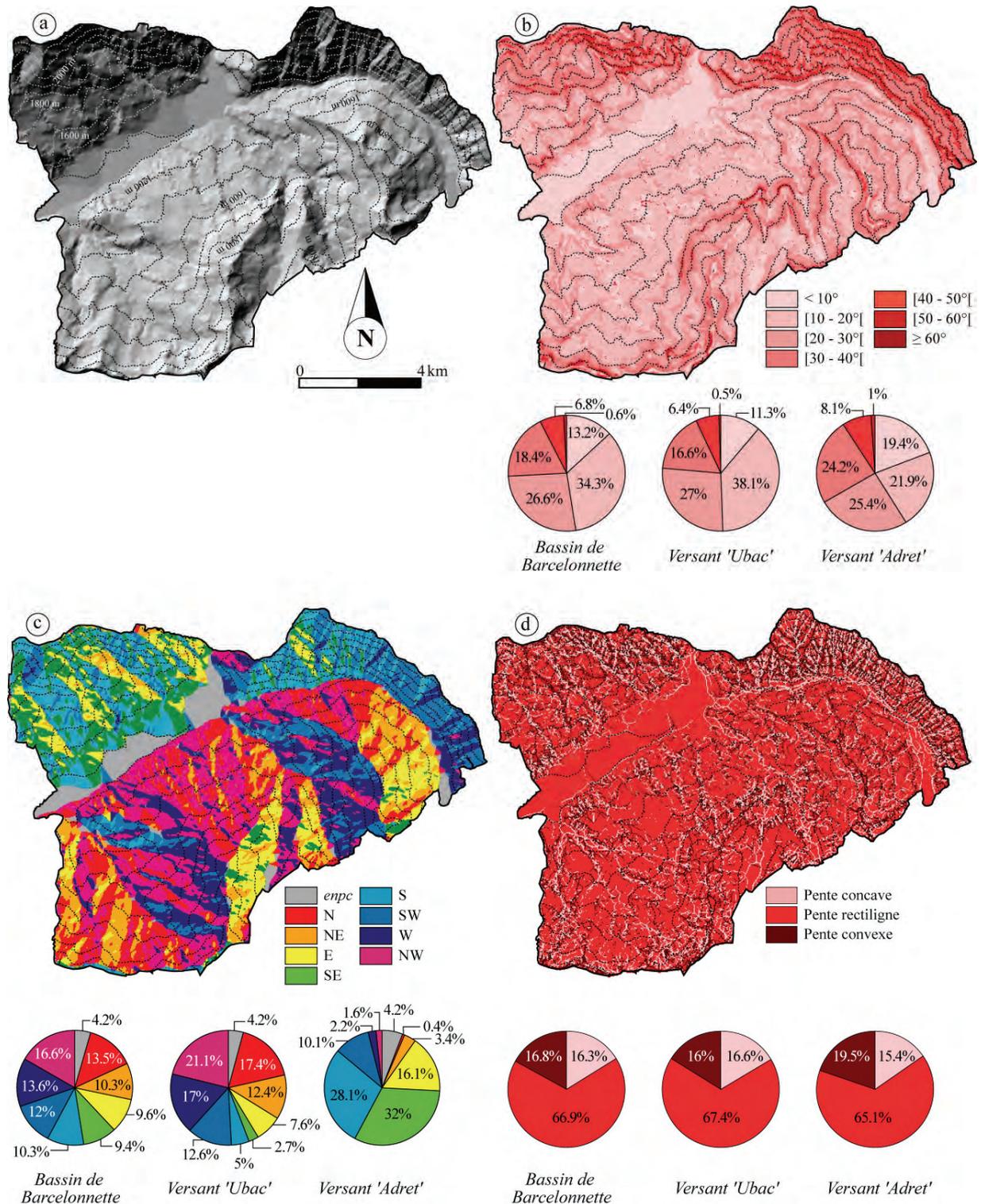
Chaque *MNT* est utilisé pour produire deux dérivées premières (le gradient de pente et l'exposition), et trois dérivées secondes (l'aspect des pentes longitudinales, l'aspect des pentes transversales et l'aspect des pentes combinant les deux ; Horn, 1981 ; Zevenbergen et Thorne, 1987).

Les figures 4.7 et 4.8 présentent les dérivées premières issues de chaque *MNT*. Les résultats indiquent des différences dans la répartition des **gradients de pentes**, particulièrement pour les versants au gradient de pente moyen (classe [10-20°] ; Fig. 4.7b et Fig. 4.8b). Cette différence est la plus nette pour le versant *Ubac* avec 8% d'écart maximum pour ce type de versant aux variations rapides de gradient de pente (secteurs bosselés sur les versants morainiques). **Cet aspect topographique n'est pas pris en compte par la *BD Alti*®, dont la résolution initiale de 50 m n'est pas assez fine. Le relief y est lissé et les variations de pentes sur de courtes distances ne sont pas ou peu visibles.**

Pour l'exposition des pentes, la répartition des 8 classes d'exposition est proche entre les deux *MNT*. Pour les secteurs *Ubac* et *Adret*, les deux dérivées sont bien représentatives de leurs expositions avec des versants exposés au nord et au nord-ouest pour le versant *Ubac* et des versants exposés vers l'est, le sud-est et le sud pour le versant *Adret*.

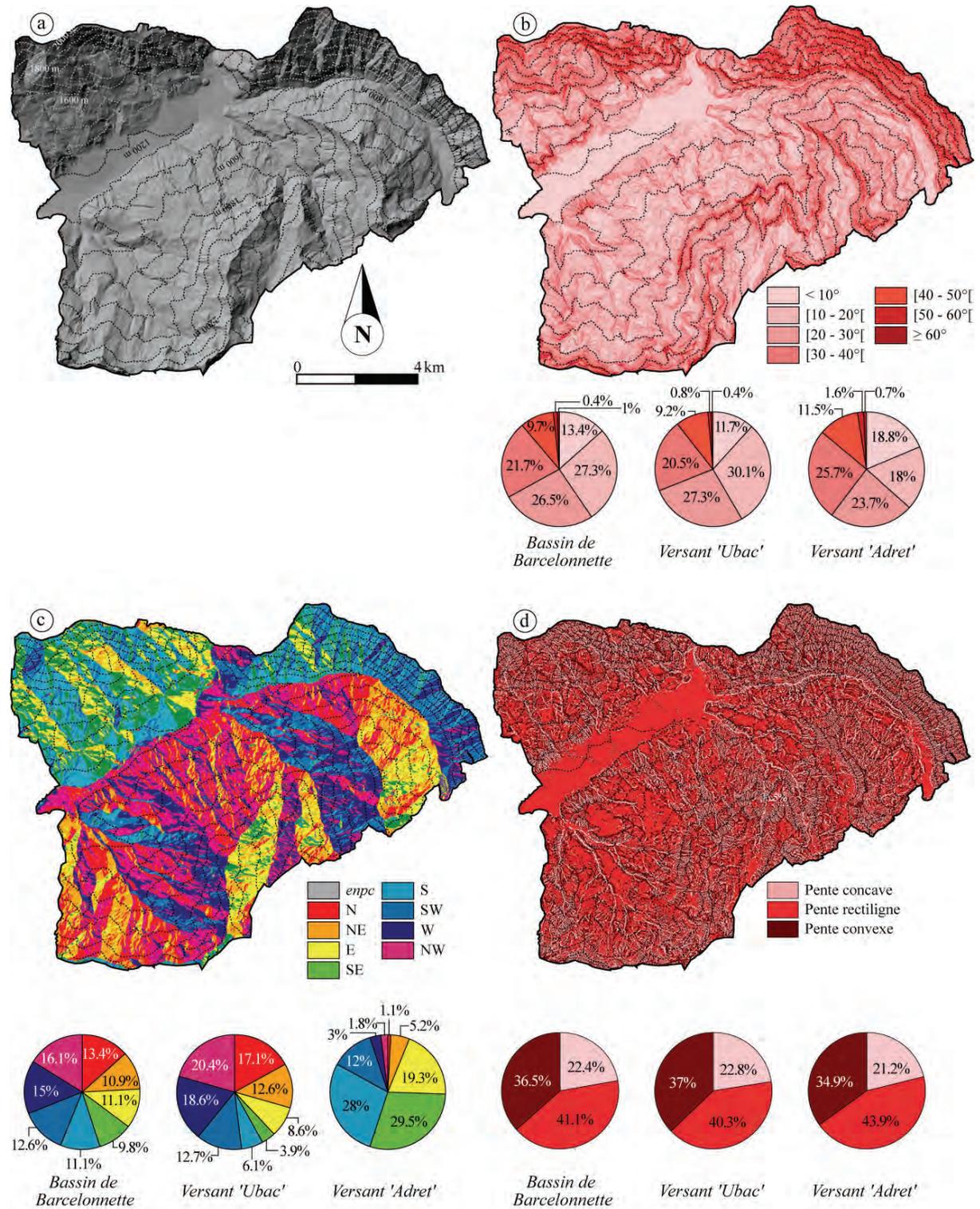
A noter que pour la *BD Alti*®, les cônes de déjection et les plaines alluviales aux pentes faibles (< 5°) ne sont pas classées dans une catégorie d'exposition (en gris, Fig. 4.7c). Cela présenterait un problème pour l'évaluation de l'aléa 'laves torrentielles'. Cependant, pour notre recherche aucune

conséquence n'est à mentionner, dans la mesure où les 'mouvements de versant' se déclenchent sur des pentes plus fortes.



a. Vue en relief. b. Carte des gradients de pentes par classe de 10°. c. Carte de l'exposition des pentes (enpc = exposition non pris en compte). d. Carte de l'aspect des versants (aspects combinés).

Fig. 4.7. MNT dérivé de la BD Alti® ré-échantillonné au pas de 10 m et ses dérivées premières.



a. Vue en relief. b. Carte des gradients de pentes par classe de 10°. c. Carte de l'exposition des pentes (enpc = exposition non pris en compte). d. Carte de l'aspect des versants (aspects combinés).

Fig. 4.8. MNT optimisé pour le bassin de Barcelonnette et ses dérivées premières.

Pour l'aspect des versants³³, les figures 4.7.d et 4.8.d présentent deux cartes 'd'aspects de versants unifiées' (addition des dérivées 'aspect longitudinal des versants' et 'aspect transversal des versants'). Il existe une nette différence entre les deux cartes, notamment pour des pentes rectilignes identifiées après une classification de l'information brute (par exemple, la BD Alti ® présente 25% de pentes rectilignes en plus que le MNT BB). Ce problème d'identification des changements de pente est la conséquence du lissage des pentes après interpolation et ré-échantillonnage de la BD Alti ®. Ainsi, les brusques changements de topographie qui peuvent avoir des conséquences sur la localisation des 'mouvements de versants' (surtout les pentes concaves, Komac, 2006) ne sont pas discernables avec la BD Alti ®.

Au final, la BD Alti ® pose le problème des informations dérivées et de leurs qualités. Compte tenu des caractéristiques topographiques complexes du terrain, les gradients de pente et l'aspect de versant ne sont pas assez précis et lissent l'information. En d'autres termes **pour un environnement topographique complexe avec des changements de topographies nombreux sur quelques mètres (bossellements, ruptures de pentes, nombreux ravins juxtaposant des pentes planes) la BD Alti ® n'est pas assez précise, ce qui justifie l'utilisation d'un MNT adapté au site de d'étude.**

1.4. Le MNT du Moulin

Le MNT du Moulin est issu de la base de données altimétriques des BVRE de Draix levée par LIDAR aéroporté en 2007 (Sté SINTEGRA). Le traitement numérique du semi de points est fondé sur des critères morphologiques (gradients de pente, changements de pente, etc.). Le traitement est effectué sous le logiciel Terra Scan ®. Les effets de 'sur sol' dus à la canopée ont été supprimés. Le tableau 4.3 présente quelques spécifications des levées pour la base de données altimétriques complète et pour celle du Moulin.

Tab. 4.3. Spécificités de la BD altimétrique (Lidar aéroporté) de Draix et du BVRE du Moulin.

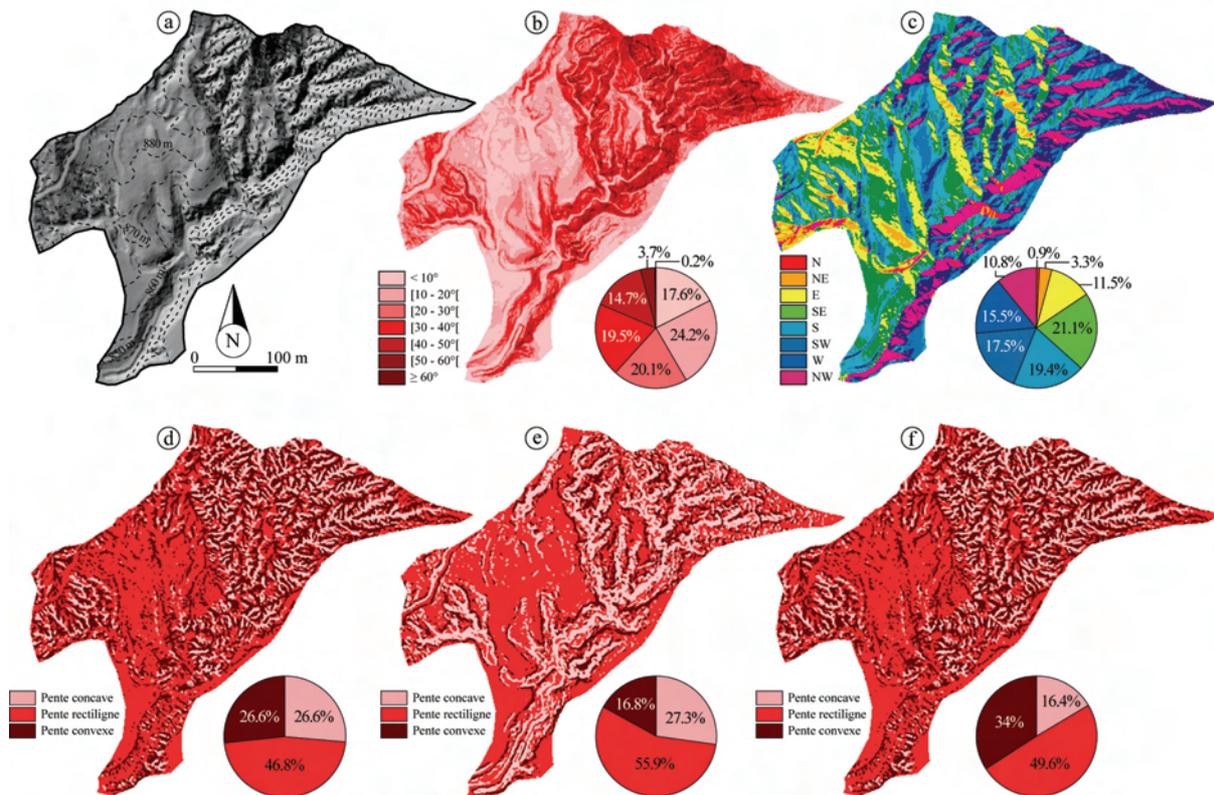
n = nombre de points ; *pt* = point.

	Brut			Filtré		
	<i>n</i> en millions	Surface (km ²)	Densité (pt/m ²)	<i>n</i> en millions	Surface (km ²)	Densité (pt/m ²)
Draix	37	3.7	10	5.95	2.3	2
Moulin	4.8	0.3	16	0.793	0.3	3.5

Tab. 4.3. Spécificités de la BD altimétrique (Lidar aéroporté) de Draix et du BVRE du Moulin.

Le MNT est obtenu après *krigeage ordinaire par point* calé avec un semi-variogramme spécifique au site d'étude (spécifications en Annexe 4.5). Le semi de point utilisé est le semi filtré. La résolution finale est de 1 m. La figure 4.9 présente le MNT obtenu pour le Moulin ainsi que quelques dérivées. Ces variables serviront dans le chapitre 7 pour la transposition des résultats acquis par les modèles d'analyses spatiales choisis au chapitre 1.

³³ Les variables représentant l'aspect des versants sont produites selon les formules de Horn (1981) considérées comme les plus adaptées aux environnements à forte variation de topographie (Burrough et M^e Donnel, 1998).



a. Vue en relief du BVRE du Moulin, la résolution spatiale est de 1 m. b. Carte des gradients de pente du BVRE du Moulin par classe de 10°. c. Carte de l'exposition des pentes du BVRE du Moulin. d. Aspect total des versants (e+f). e. Aspect transversal des versants. f. Aspect longitudinal des versants.

Fig. 4.9. MNT du Moulin et ses dérivées.

2. LA VARIABLE 'OCCUPATION DU SOL'

L'occupation du sol est un paramètre non négligeable dans l'élaboration de cartes de susceptibilité par SIG (van Westen *et al.*, 2006). Comme pour les MNT, cette variable peut être disponible ou produite spécifiquement.

Ainsi, dans le cadre du programme ALARM, deux bases de données 'occupation du sol' disponibles ont été acquises : (i) la base CORINE Land Cover (Coordination de l'information sur l'environnement, *Coordination of information on the environment* ; EEA, 2000) comportant deux nomenclatures différentes, et (ii) la base 'occupation du sol' du CRIGE-PACA. En complément, deux bases de données sur l'occupation du sol ont été produites : (i) une base de données produite de manière semi-automatique (BD ALARM) et (ii) une base de données dérivée de la BD ALARM dont les limites spatiales ont été corrigées manuellement (BD ALARMc). Comme pour les MNT, le but est d'évaluer si ces bases de données disponibles sont adaptées à l'échelle du 1/10 000^{ème}.

Cette section décrit successivement chacune de ces bases de données et leurs caractéristiques. Elles seront comparées dans le chapitre 5 afin de déterminer celle qui est la plus adaptée pour ce travail. Pour le bassin du Moulin de Draix, l'échelle de travail étant différente (1/2 000^{ème}), une seule base de données spécifiquement acquise sera décrite.

2.1. La base de données CORINE Land Cover (CLC)

La base de données CORINE Land Cover³⁴ (CLC) est construite par l'interprétation d'images satellites assistée par ordinateur (pour la France, scènes Landsat MSS et SPOT XS de 1987 et 1988 pour la couverture de 1990, scènes Landsat 5 TM et ETM+ de 2000 pour la mise à jour de 2000). Le travail s'effectue pour une l'échelle du 1/100 000^{ème}, et un secteur cartographié occupe au minimum une surface de 25 ha ou de 5 ha pour certains cas particuliers³⁵. La nomenclature est produite de telle sorte à pouvoir être utilisée par tous les pays partenaires. Pour toutes les bases de données CORINE Land Cover, trois niveaux de nomenclature sont définis avec 5 classes (niveau 1), 15 classes (niveau 2) ou 44 classes (niveau 3). Les différentes classes sont détaillées en annexe (Annexe 4.6). Dans cette recherche, seuls les niveaux 2 et 3 sont utilisés (le niveau 1 étant trop général) et certaines classes n'apparaissent pas car n'étant pas reconnues sur le bassin de Barcelonnette. Ainsi, sont différenciées :

- (i) La base de données CLC1 fondée sur la nomenclature de deuxième niveau (Tab. 4.4 ; Fig. 4.10a) ;
- (ii) La base de données CLC2 fondée sur la nomenclature de troisième niveau, (Tab. 4.4 ; Fig. 4.10b ; Annexe 4.6). Pour cette dernière, seules 20 classes sont représentées dans le bassin de Barcelonnette.

2.2. La base de données du CRIGE-PACA

La base de données CRIGE-PACA a été créée par la région Provence Alpes Côtes d'Azur dans le but de disposer d'une base de données adaptée aux besoins des organismes locaux. La base de données est issue d'une analyse d'images satellites LANDSAT 7 ETM+ et IRS-1D.

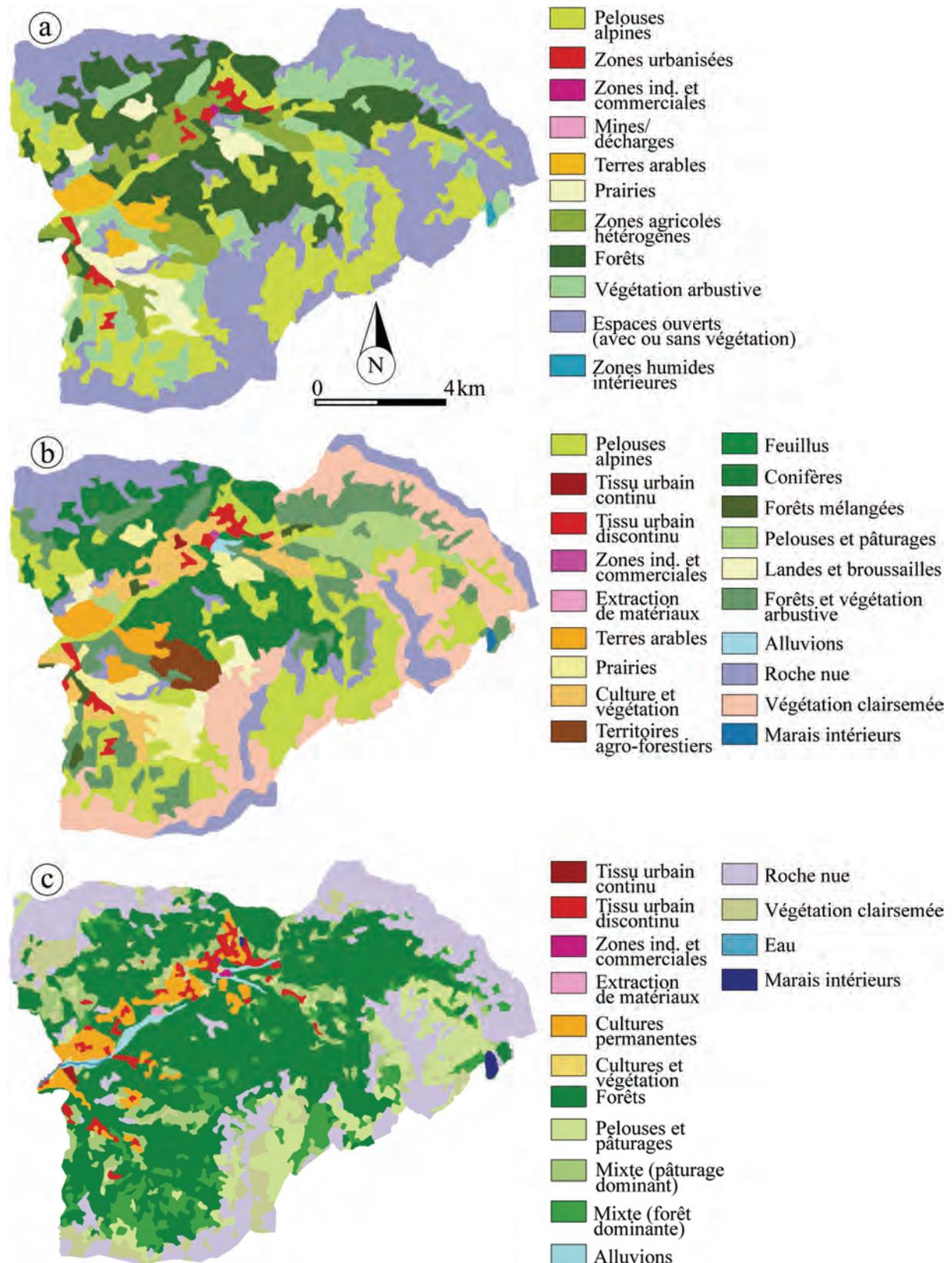
Comme pour CLC, d'autres bases de données et documents sont utilisés pour obtenir un complément d'information, telles que les bases de données IGN (Scan 25 ®, BD Carto ®, BD Alti ®, et BD Ortho ® ; IGN, 1998, 2000, 2004, 2006a et 2006b) et des images SPOT ® (CRIGE-PACA, 2004). La méthode de traitement de l'information est la même que pour CLC. Les traitements sont réalisés à partir d'images de 30 m de résolution, la résolution finale est de 10 m (CRIGE-PACA, 2004). La nomenclature retenue est celle de niveau 3 de CLC (Tab. 4.5) avec quelques modifications :

- (i) Cinq classes sont ajoutés afin de prendre en compte les spécificités régionales et de réduire le grain des images satellites ;
- (ii) Les classes de CLC non présentes dans la région sont supprimées ;
- (iii) Certaines classes sont légèrement modifiées compte tenu de la modification du grain.

Les caractéristiques de cette couverture sont détaillées dans le tableau 4.4. La figure 4.10.c présente la surface occupée pour chaque poste retenu pour le bassin de Barcelonnette.

³⁴ La base de données CORINE Land Cover (CLC) est produite dans le cadre du programme européen CORINE, de coordination de l'information sur l'environnement (IFEN, 2005). Cet inventaire biophysique de l'occupation du sol fournit une information de référence pour 29 pays européens et pour les bandes côtières du Maroc et de la Tunisie. C'est un projet piloté par l'Agence Européenne pour l'Environnement (AEE). La première couverture date de 1990, des mises à jour décennales sont effectuées depuis. Dans la cadre de cette recherche la couverture mise à jour en 2000 a été utilisée.

³⁵ L'occupation biophysique du sol est privilégiée, la nature des objets plutôt que leur fonction est mise en avant (IFEN, 2005). Le contrôle de qualité repose sur une analyse visuelle de l'interprétation. Si des informations, due à une imprécision des images satellites (effet d'ombre, difficulté d'interprétation, etc.), viennent à manquer des analyses de documents supplémentaires comme des cartes de végétation (i.e. France, Portugal), des photographies aériennes, des cartes topographiques peuvent être utilisées pour aider à restituer une information plus précise tant au niveau spatial qu'attributaire. Une fois le contrôle qualité final effectué, les cartes interprétées sont mises automatiquement sous format digital (format vecteur) dans un SIG.



a. CLC1. b. CLC2. c. CRIGE-PACA

Fig. 4.10. Nomenclature et répartition des classes pour les bases de données acquises pour le bassin de Barcelonnette.

Tab. 4.4. Nomenclature des différentes BD 'occupation du sol'.

En gris clair, les bases de données disponibles ; en gris foncé, les bases de données construites.

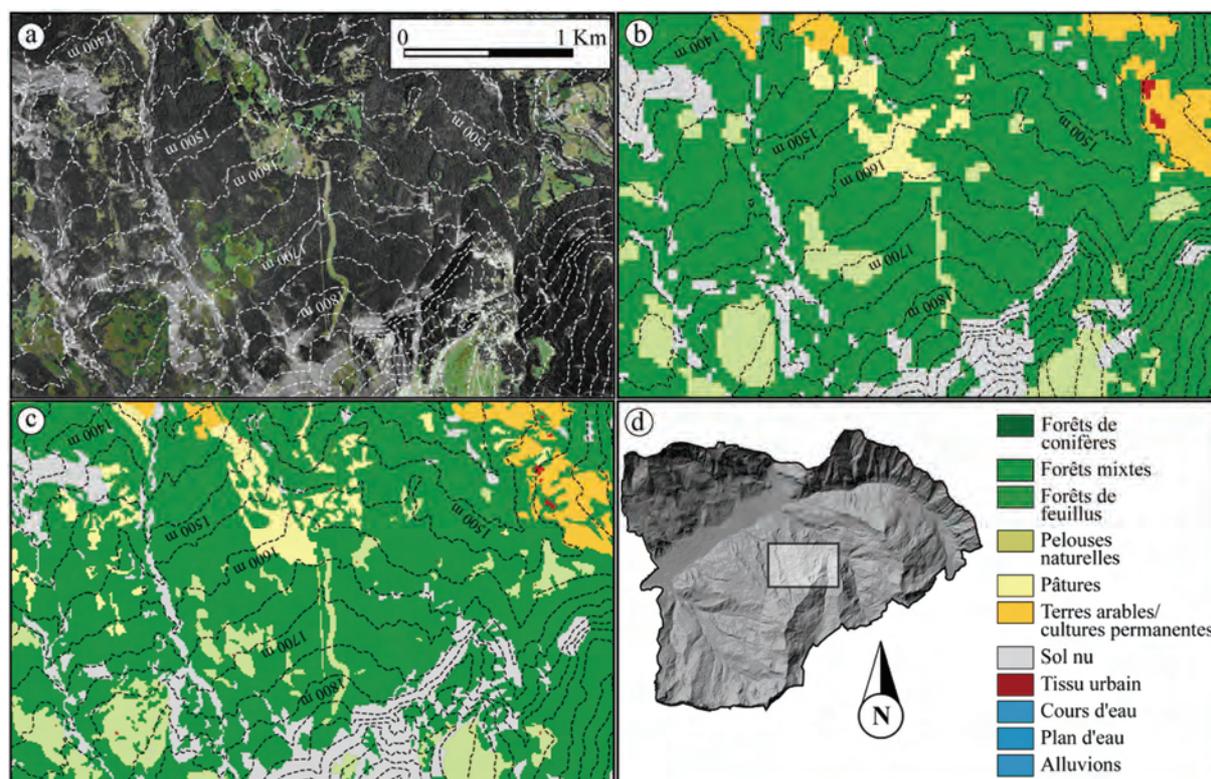
Base de données			
CLC1	CLC2	CRIGE-PACA	ALARM et ALARMc
Pelouses alpines	Pelouses alpines	Tissu urbain continu	Forêts de conifères
Zones urbanisées	Tissu urbain continu	Tissu urbain discontinu	Forêts mixtes
Zones industrielles et commerciales	Tissu urbain discontinu	Zones industrielles et commerciales	Forêts de feuillus
Mines et décharges	Zones industrielles et commerciales	Cultures permanentes	Pelouses naturelles
Terres arables	Extraction de minéraux	Extraction de minéraux	Terres arables/cultures permanentes
Prairies	Terres arables	Cultures et végétation	Pâtures
Zones agricoles hétérogènes	Prairies	Forêts	Sol nu
Forêts	Cultures et végétation	Pelouses et pâturages	Tissu urbain
Milieu à végétation arbustive	Territoires agro-forestiers	Mixte (pâturage dominant)	Cours d'eau
Espaces ouverts (avec ou sans végétation)	Forêts de feuillus	Mixte (forêt dominante)	Plan d'eau
Zones humides intérieures	Forêts de conifères	Alluvions	Alluvions
	Forêts mélangées	Roche nue	
	Pelouses et pâturages	Végétation clairsemée	
	Landes et broussailles	Eau	
	Forêts et végétation arbustive	Marais intérieurs	
	Alluvions		
	Roches nues		
	Végétation clairsemée		
	Marais intérieurs		

2.3. Les bases de données ALARM et ALARM corrigée

La base de données ALARM a été créée par Anne Puissant au sein du *Laboratoire Image et Ville*. Elle est produite automatiquement à partir de la fusion d'une image satellite orthorectifiée Landsat ETM+ de 2000 (résolution de 30 m) avec une image panchromatique orthorectifiée SPOT P de 1994. Cette fusion permet d'obtenir une image multispectrale au pas de 10 m. Les classes d'occupation du sol sont produites à partir d'une procédure automatique de classification supervisée par maximum de vraisemblance (*Erdas Imagine*®). Cette classification est complétée par une procédure semi-automatique d'interprétation assistée par ordinateur afin d'améliorer la qualité finale (versants à l'ombre, fond de vallée). L'utilisation de documents et d'informations exogènes (*BD Alti*®, *BD Ortho*®, la *BD Carto*®, IGN, 1998, 2000, 2004, 2006a et 2006b ; cartes topographiques, IGN, 2000 ; points GPS levés en Mai 2002, cartes de peuplements forestiers) ainsi que des '*retours terrain*' ont largement contribué à améliorer le processus de reclassement. La résolution finale est de 30 m ré-échantillonnée à 10 m. La nomenclature, fondée sur le troisième niveau de CLC, comporte quinze classes spécifiquement adaptées au site (Tab. 4.4). La figure 4.11.b présente un extrait de cette base de données. Les caractéristiques de cette couverture sont détaillées en annexe (Annexe 4.7).

Cependant, la BD ALARM souffre d'une résolution initiale de 30 m qui biaise les limites de certains objets. La comparaison de cette BD ALARM avec l'orthophoto de 2000 (IGN, 2000) montre que certaines limites sont approximatives voire incorrectes et que certains objets sont

oubliés comme par exemple, les petits îlots forestiers et les clairières peu étendues (Fig. 4.11b). Une correction des limites a donc été réalisée sous SIG sur la base de l'orthophoto de 2000 (IGN, 2000). Chaque limite posant problème a été repositionnée correctement et les objets supérieurs à 100 m² ont été intégrés à la nouvelle base de données tout en conservant la même nomenclature. La BD ALARMc (base de données ALARM corrigée) obtenue, d'une résolution de 10 m, est plus fidèle à la réalité (Fig. 4.11c).



a. Orthophoto (IGN, 2000). b. BD ALARM. c. BD ALARMc. d. Localisation de l'extrait et légende.

Fig. 4.11. BD 'occupation du sol' produites spécifiquement pour le bassin de Barcelonnette (localisation centrée sur Bois Noir et le torrent de la Frache).

2.4. La BD 'occupation du sol' pour le Moulin

La base de données pour le BVRE du Moulin a été créée manuellement sur la base des classes définies pour le bassin de Barcelonnette. Certaines classes ont été adaptées pour respecter au mieux la nomenclature créée pour la BD ALARM. La figure 4.12 présente les surfaces occupées pour chaque poste. La résolution finale est de 1 m.

2.5. Discussion/conclusion

Les figures 4.13 et 4.14 présentent la répartition de chaque classe pour chaque base de données. De manière générale, pour chacune d'entre elles, la différence entre l'Ubac et l'Adret est bien visible, notamment pour la répartition des classes de forêts et celles relatives à l'agriculture. Toutefois, la multiplication des classes des bases de données CLC et CRIGE-PACA présente des inconvénients tels que : (i) des proportions relativement faibles pour certaines classes et (ii) une difficulté de lecture des graphiques due au fait que plusieurs occupations du sol se retrouvent dans une seule classe (comme par exemple les classes 'territoires agro-forestiers' pour CLC 2).

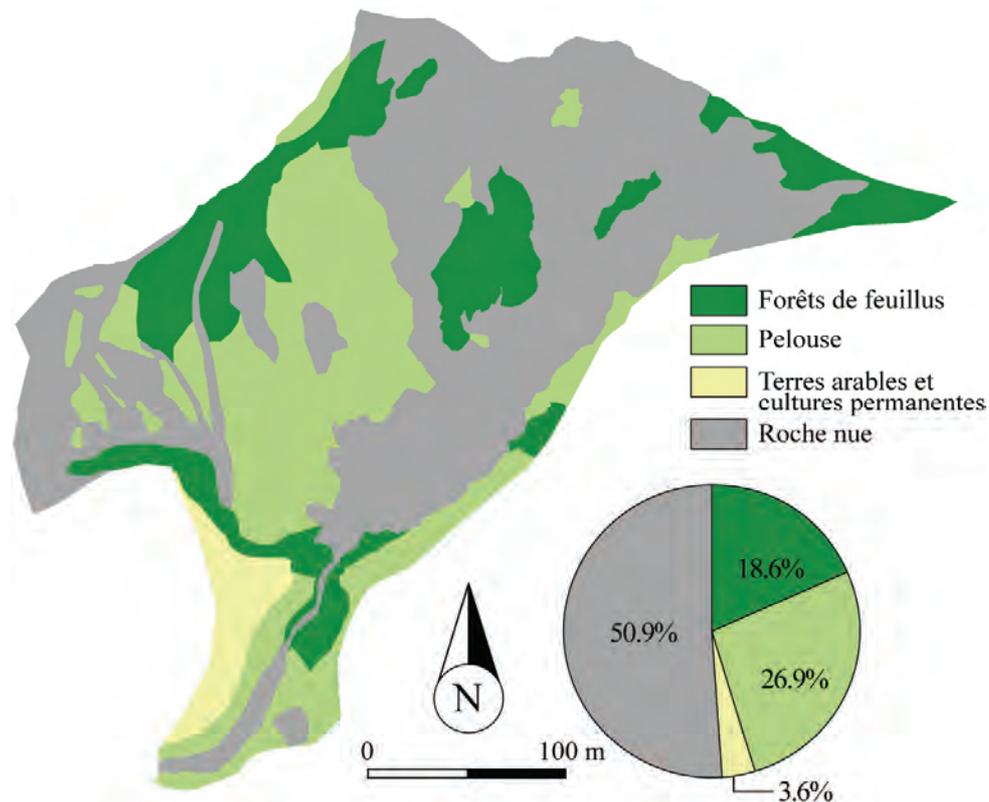


Fig. 4.12. Occupation du sol du BVRE du Moulin.

Pour les *BD ALARM* et *ALARMc*, la correction manuelle a permis une meilleure différenciation des répartitions des classes occupant une grande surface comme les forêts, les pelouses naturelles ou la roche nue (jusqu'à 13% de différence pour la classe 'forêts mixtes' pour l'*Ubac*). Les limites de classes ainsi corrigées permettent une distinction plus nette entre les classes que ce soit pour les versants *Adret* et *Ubac*. Par exemple, avec *BD ALARM*, la proportion de roche nue est de 24.5% pour l'ensemble du bassin et respectivement de 24.2% et 25.2% pour le versant *Ubac* et le versant *Adret*. Avec la *BD ALARMc*, ces proportions passent à 29.1% pour l'ensemble du bassin, à 30% pour le versant *Ubac* et à 27% pour le versant *Adret*.

Pour conclure, **il est évident que les différents moyens d'acquisition, de production et de nomenclatures de chaque base de données 'occupation du sol' influenceront la reconnaissance des 'mouvements de versant'**. Il faut maintenant savoir dans quelle(s) mesure(s) cela peut modifier cette reconnaissance et de ce fait les résultats des modèles d'analyse spatiale (Chap. 5, 6 et 7).

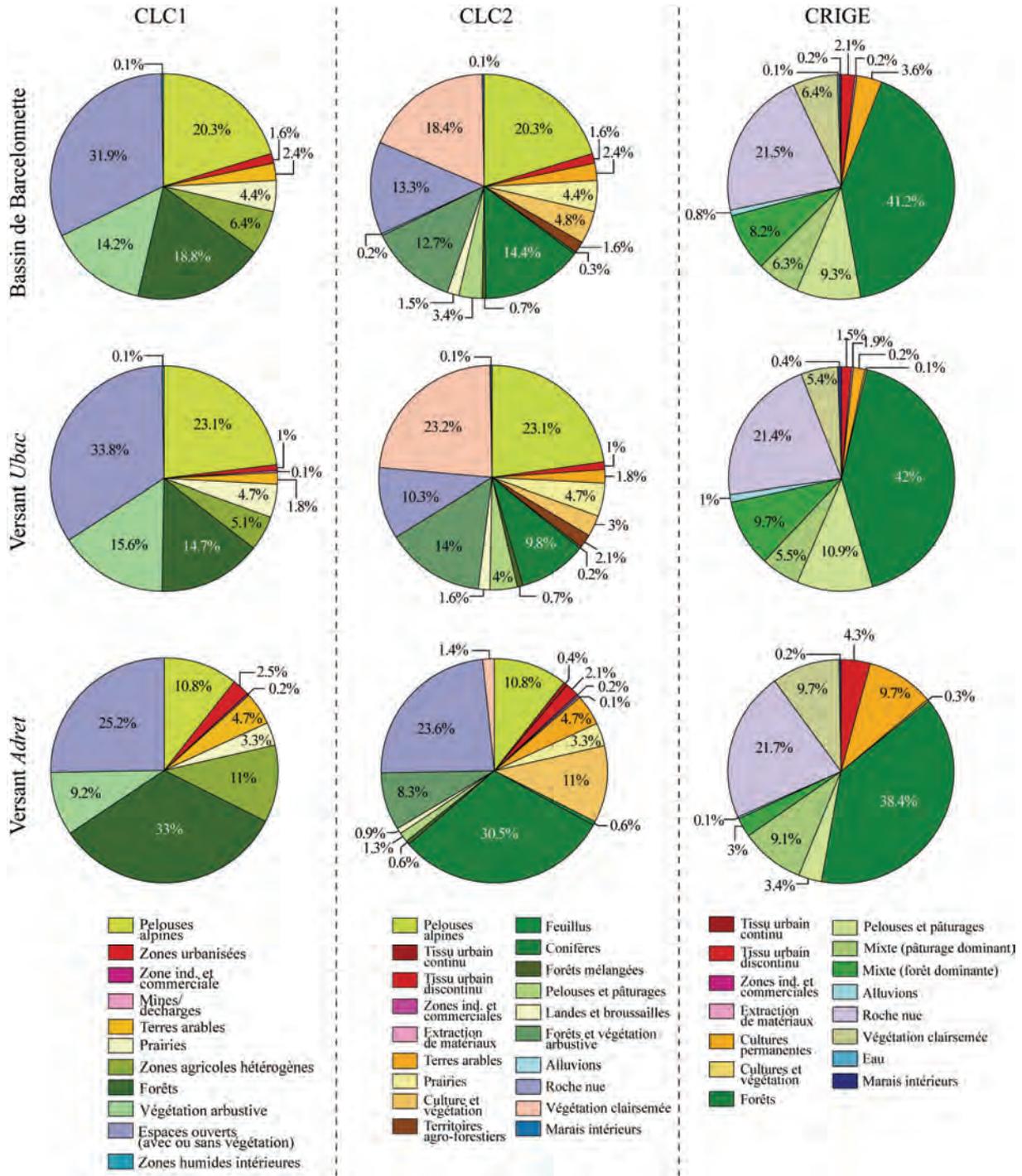


Fig. 4.13. Répartition des classes d'occupation du sol pour chaque base de données acquise.

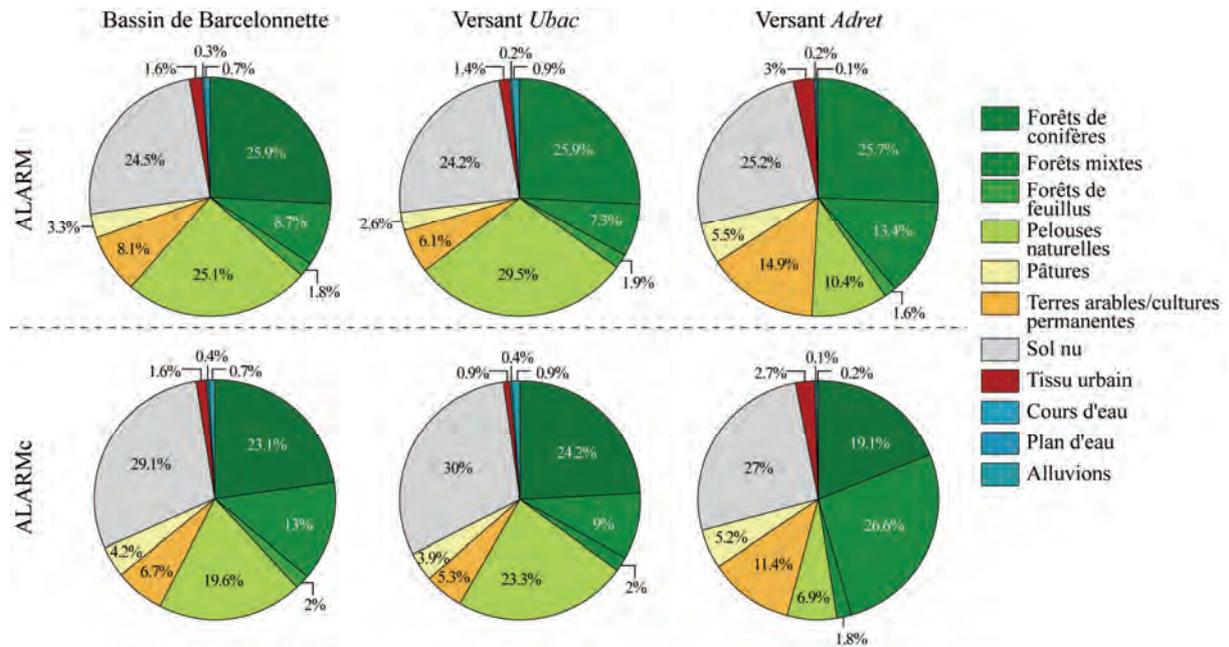


Fig. 4.14. Répartition des classes d'occupation du sol pour chaque base de données construite.

3. LES VARIABLES GEOLOGIQUES

En théorie, le groupe des variables géologiques réunit la lithologie, la structure géologique (dont on peut distinguer les failles, le pendage, la schistosité etc.), les séquences sédimentaires (formations superficielles et leur épaisseur), et les données sismiques (Soeters et van Westen, 1996). Cependant, au regard de la taille et de la complexité du site d'étude, il a été décidé de ne se focaliser que sur (i) **la nature et l'épaisseur des formations superficielles**, (ii) **la lithologie**, (iii) **la structure à travers les failles et le pendage des strates visibles** (c'est-à-dire lorsque les différentes couches lithologiques ne sont pas masquées par des formations superficielles). Les informations sont issues des observations de terrain effectuées pour l'élaboration de la carte morphodynamique, de l'analyse des photographies aériennes, de travaux antérieurs (Maquaire *et al.*, 2003 ; Malet, 2003 ; Remaître, 2006) et d'analyses de documents annexes (rapports de stage d'étudiants, mémoires, etc.). Certaines de ces observations sont indiquées sur la carte morphodynamique (cf. Chap. 2).

3.1. Les formations superficielles

3.1.1. Les formations superficielles du bassin de Barcelonnette

La cartographie morphodynamique a mis en évidence **quatre grands types de domaines morphogénétiques** : les 'mouvements de versant', l'action glaciaire, l'action périglaciaire et l'action de l'eau. Les 'mouvements de versant' bénéficiant étant un groupe de variable à part entière (cf. Chap. 3), pour chacun des autres domaines, plusieurs formes et formations superficielles peuvent être associées. Les limites de chaque formation sont reprises de la carte morphodynamique digitalisée, et sont ensuite découpées selon les formes observées. Ainsi, chaque polygone est affecté d'un code interne (*ID*), du domaine morphogénétique (*Proc*), du type de formations (*Type F*), de la forme associée (*Type For*), de la texture (*Text*) et des caractéristiques géotechniques associées (Maquaire *et al.*, 2003, Malet, 2003 ; Remaître, 2006). Le tableau 4.5 présente les différentes caractéristiques de cette base de données attributive associée à la base de données spatiale. Les différents types de formations sont détaillés dans les points suivants.

Tab. 4.5. Caractéristiques des formations superficielles du bassin de Barcelonnette.

γ^d (kN.m⁻³) = Poids volumique sec ; C' (kPa) = Cohésion effective ; φ' (°) = angle de frottement effectif.

Domaine morphogénétique	Formations superficielles	Formes associées	Caractéristiques géotechniques			
			Texture (USGS)	γ^d (kN.m ⁻³)	C' (kPa)	φ' (°)
Glaciaire	Moraines stables	Langue morainique Arc morainique	SaCL	21	0-10	32-40
	Moraines remaniées	Bloc erratique Glacier rocheux Terrasses de kame				
Périglaciaire	Eboulis vifs	Tablier d'éboulis Cône d'éboulis	GS	-	0	30-43
	Eboulis fixes	Couloir d'éboulis	G	-	0	33-36
	Colluvions marneuses		SaCL	14-16	8-22	31-36
	Colluvions issues de flyschs ou calcaires	Tablier de colluvions Comblement de ravines	SaCL	15-17	10-15	23-25
	Colluvions morainiques		SaCL	21	0-10	32-40
Action de l'eau	Formations alluviales et torrentielles	Terrasses alluviales	G, GS, Sa, SiSa	-	-	-
		Épandages alluviaux	G, GS, Sa, SiSa	-	-	-
		Terrasses torrentielles Cône de déjection torrentiel	SaCL, LSa	-	8-25	23-32
	Formations lacustres	Sagnes Tourbières	-	-	-	-

3.1.1.1. Les formations glaciaires

Les formations du domaine glaciaire regroupent des formations morainiques aux caractéristiques très proches l'une de l'autre en termes de granulométrie ou de comportement géotechnique (Maquaire *et al.*, 2003 ; Malet, 2003). Ces formations peuvent être : stables comme les formations de la langue morainique de Lans ; remaniées et/ou affectées par différents processus de versant (solifluxion, coulées boueuses, glissements de versant superficiels). Ainsi, deux types de moraines ont été différenciés :

- (i) **Les formations morainiques stables** aux pentes faibles (lignes morainiques, arcs morainiques, terrasse de kame) ;
- (ii) **Les formations morainiques remaniées** dont la topographie fortement bosselée est issue du fluage des formations sur la marne saine lors d'épisodes de déglaciations antérieurs (Weber, 2001).

3.1.1.2. Les formations du domaine périglaciaire

Deux grands types de formations superficielles du domaine périglaciaire sont distingués : les formations liées au processus d'éboulisation et les formations issues du colluvionnement.

Les formations **liées au processus d'éboulisation** ont été différenciées suivant leur activité. On distingue donc **les éboulis vifs (actifs) et les éboulis fixes (colonisés par une végétation arbustive)**. La majorité de ces éboulis sont situés en contrebas des escarpements armés par les calcaires et les flyschs des nappes de charriage et dans les bassins de réception de certains

appareils torrentiels (Remaître, 2006). Aucune différenciation du type de substrat affecté n'est mentionnée et les caractéristiques géotechniques sont les mêmes pour chaque polygone digitalisé.

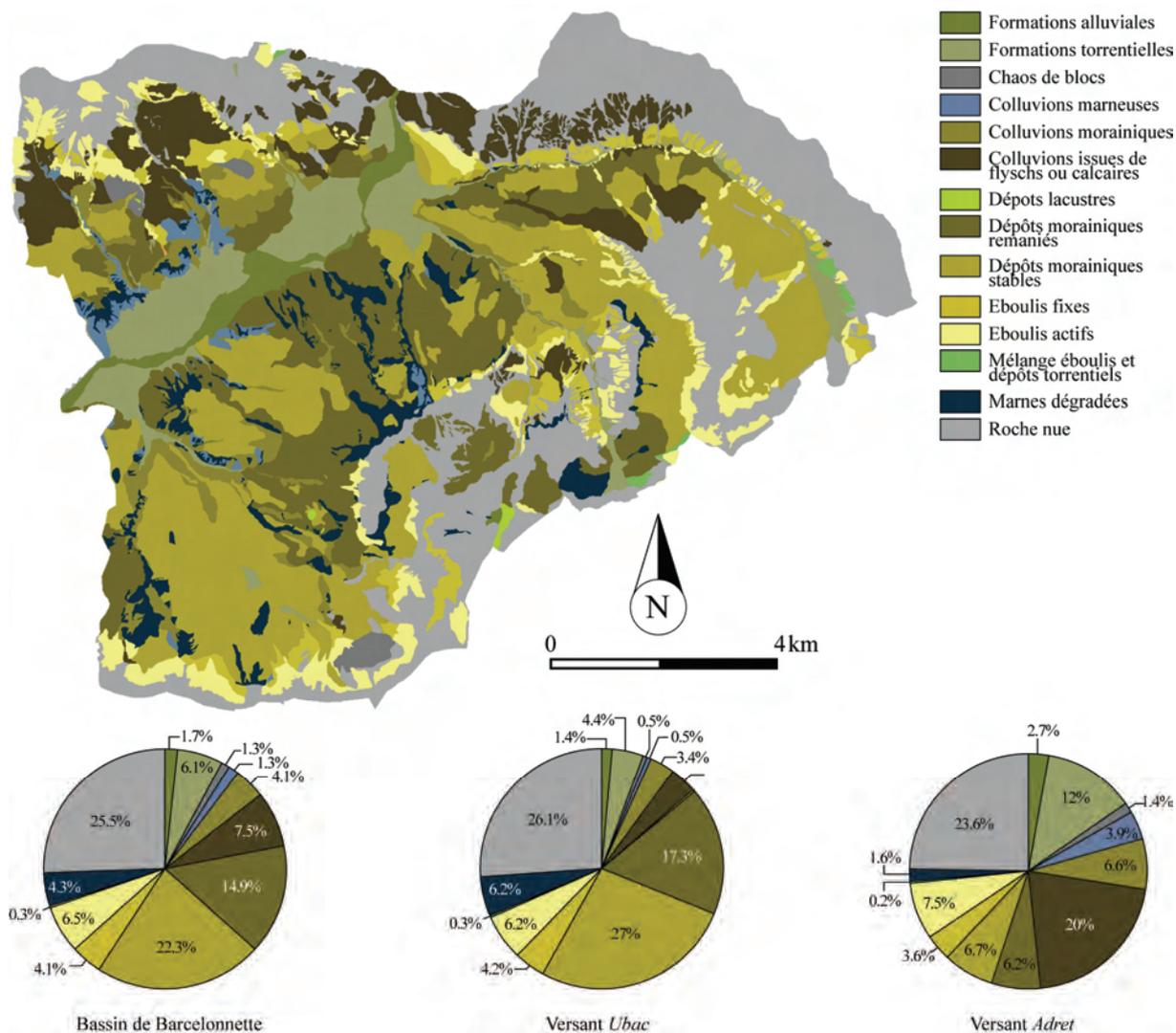


Fig. 4.15. Type et répartition des formations superficielles du bassin de Barcelonnette.

Les **colluvions et les formations de pente** recouvrent et affectent différents substrats comme les marnes noires et les nappes de l'Autapie et du Parpaillon. Suivant le substrat affecté, trois types de formations de pente sont distingués :

- (i) **Les colluvions morainiques** qui dans la majorité des cas, ont été assimilées sur les documents antécédents à la couverture morainique discontinue (Weber, 2001 ; Remaître, 2006). D'un point de vue granulométrique et textural, rien ne les différencie des moraines (Remaître, 2006). Ces dépôts sont proches des versants de torrents (50 % sont à moins de 100 m d'un torrent). Ils résultent de la double conjonction d'une pente forte et d'un sapement basal. Les moraines *stricto sensu* et ces types de dépôts colluviaux ont essentiellement été distingués sur un critère morphologique ;
- (ii) **Les formations de pente sur la lithologie allochtone** (nappes de l'Autapie et du Parpaillon), qui ressemblent fortement aux formations morainiques à ceci près que les éléments grossiers sont anguleux et ne présentent pas de traces liées à l'activité

glaciaire (stries). Ils représentent 7.5% des formations périglaciaires du bassin soit 9.7 km² ;

- (iii) **Les formations de pente sur la lithologie autochtone** essentiellement composées de marnes noires altérées ayant subi un déplacement. Ces formations se situent dans des ravines qu'elles comblent ou sur des pentes monotones qu'elles recouvrent (Maquaire *et al.*, 2003). Ces formations représentent 1.3% des formations soit 1.7 km².

3.1.1.3. Les formations liées à l'action de l'eau

Trois grands types de formations liées à l'action de l'eau peuvent être distingués dans le bassin de *Barcelonnette* : les alluvions, les dépôts torrentiels et les dépôts lacustres.

Les **alluvions** se concentrent essentiellement le long du lit majeur de l'*Ubaye* sous la forme de terrasses holocènes, historiques et actuelles. Les matériaux constituant ces dépôts, pourtant d'âges différents, possèdent des caractéristiques granulométrique et texturale similaires.

Les **dépôts torrentiels** sont représentés par de larges épandages sous forme de cônes, de levées, etc. Les dépôts anciens et récents ne sont pas distingués d'un point de vue textural et granulométrique, car les matériaux constitutifs sont grossièrement les mêmes. Toutefois, les dépôts holocènes, historiques et actuels sont distingués sur la base d'un étagement des formes. De même, les dépôts de laves torrentielles et les dépôts de crues torrentielles ne sont pas distingués. A cette échelle de travail, il est difficile de représenter la morphologie des dépôts et la texture du matériau (Meunier, 1991 ; Bonnet-Staub, 1998 ; Remaître *et al.*, 2002). Pour le détail des dépôts torrentiels, le lecteur pourra se référer à la thèse d'Alexandre Remaître (2006).

Les **dépôts lacustres** sont faiblement représentés. Ils sont essentiellement représentés par des tourbes et des sagnes présentes en altitude dans la vallée de l'*Abriès* et près du *Lac des Terres Pleines*.

3.1.1.4. Conclusion

La figure 4.15 présente les proportions de formations superficielles pour tout le bassin, les versants *Ubac* et *Adret*. Pour le versant *Ubac*, les formations morainiques sont observées jusqu'à 2400 m d'altitude, notamment dans le secteur des *Brechs*. Au dessus de 2400 m, la plupart des crêtes sont recouvertes par des tabliers d'éboulis localisés à l'aval immédiat des crêtes (*Brechs*, *le Lan*, *Pain de Sucre*). Pour le versant *Adret*, les formations morainiques se retrouvent jusqu'à 2000 m d'altitude environ (formations proches de *Champerousse* et du torrent du *Rioclar*). Dans les trois bassins versants, les moraines sont dominées par les tabliers d'éboulis (11.1 % de la surface), ces derniers naissant sous les barres rocheuses de la nappe de l'*Autapie*. Contrairement au versant *Ubac*, ces éboulis ne prennent pas naissance à l'aval immédiat des crêtes, mais une certaine distance les en sépare (200 à 400 m en moyenne). Plus haut en altitude, la roche nue représente 23.6% de la surface du secteur.

3.1.2. Les formations superficielles de *Draix*

La carte des formations superficielles du *BVRE* du *Laval* est disponible depuis 2000 (Thiery, 2000 ; Maquaire *et al.*, 2001) et celle du *BVRE* du *Moulin* depuis 2002. **La nomenclature repose sur une segmentation des formations superficielles en deux ensembles** : (i) **les formations allochtones** (*Fal*) reposant en discordance sur les marnes noires et, (ii) **les formations autochtones** (*Fau*) issues de la dégradation du substratum (Fig. 4.16).

Les formations autochtones peu épaisses ont été caractérisées par pénétrométrie dynamique à énergie variable (Maquaire *et al.*, 2001 ; Ritzenthaler, 2000 et 2001). Ces investigations permettent de caractériser les formations marneuses dégradées (*Fau*), leur épaisseur et le volume susceptible d'être mobilisé. **Les formations allochtones** ont été caractérisées selon leurs faciès observés sur le

terrain et par des essais de laboratoire (texture, porosité, conductivité hydraulique, granulométrie, etc.). Les différentes caractéristiques de ces formations peuvent être trouvées dans Truchet (2000, 2001), Ritzenthaler (2000, 2001) et Thiery (2000).

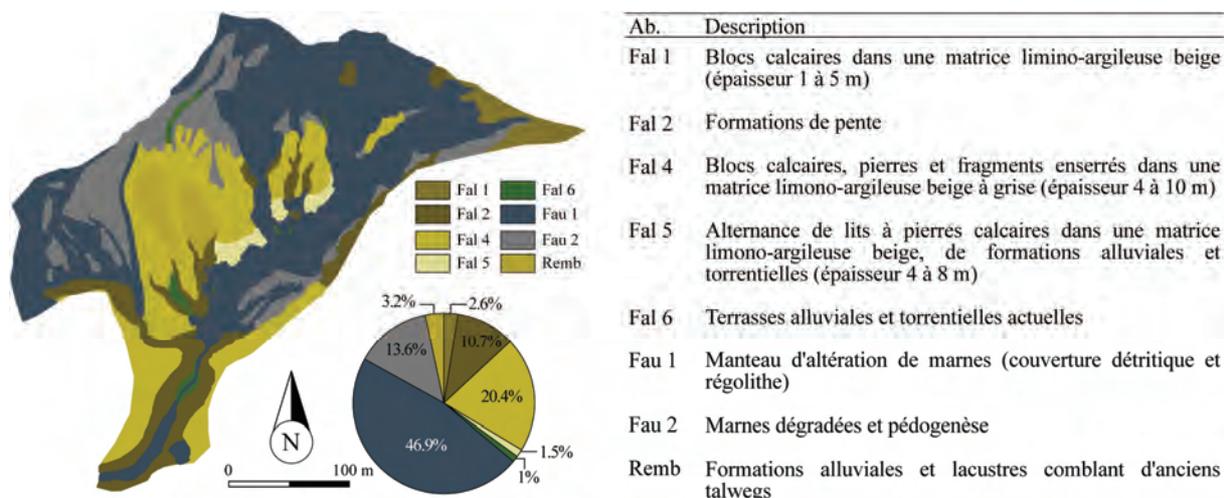


Fig. 4.16. Répartition et description des formations superficielles du BVRE du Moulin.

3.1.3. Les épaisseurs des formations superficielles

L'analyse géomorphologique (cf. Chaps 2 et 3) montre que les 'mouvements de versant' affectent les dépôts morainiques. La littérature sur l'analyse de la susceptibilité et de l'aléa 'mouvements de versant' indique que **l'épaisseur des formations superficielles est un paramètre fondamental dans le calage et la validation des différents modèles** (Soeters et van Westen, 1996, van Westen *et al.*, 2006) :

- (i) **Pour les approches semi-quantitative et quantitative**, cette couche d'information peut permettre de différencier des localisations entre des mouvements profonds ou plus superficiels ;
- (ii) **Pour les modèles déterministes**, cette variable est indispensable pour pouvoir calculer le ratio entre la fluctuation piézométrique d'une nappe phréatique et l'épaisseur des formations superficielles pour obtenir le coefficient de sécurité des pentes (Dietrich *et al.*, 1995 ; van Westen *et al.*, 2006).

Etant donné la taille du bassin, la forte hétérogénéité de certaines formations superficielles (comme les dépôts morainiques, par exemple) et les changements d'épaisseur sur de courtes distances (Flageollet *et al.*, 1999 ; Weber, 2001 ; Maquaire *et al.*, 2003 ; Thiery *et al.*, 2003, 2004, 2006, 2007), il a été décidé de **relever les épaisseurs le long de coupes naturelles** (dans la majorité des cas le long des berges des torrents). Aux endroits, où l'observation directe était difficile, cette épaisseur a été estimée par analogie avec des secteurs proches et aux caractéristiques morphologiques semblables. **Ces points de 'forçage' sont localisés sur les interfluves situés entre les berges des torrents.**

Ces observations ont ensuite été reportées dans un environnement SIG et interpolées par *krigeage ordinaire* (adapté aux données d'entrée) à une maille de 10 X 10 m. La RMSE calculée entre les résultats et les observations montre une bonne précision des épaisseurs interpolées. Pour les interfluves, en dépit d'une information de départ approximative, nous avons considéré que les résultats obtenus étaient corrects. De nouvelles méthodes d'acquisition automatique des épaisseurs pourront être envisagées dans l'avenir (radar, modeleur).

La figure 4.17 présente la carte finale des classes d'épaisseur de dépôts morainiques. Le découpage a été effectué selon les **classes de profondeur retenues pour classer les 'mouvements**

de versant', à savoir très superficiels, superficiels, profonds et très profonds, sauf pour la classe inférieure à 2 m, séparée en deux unités (les dépôts de pentes étant souvent inférieurs à 1 m). Cinq classes sont retenus avec : ≤ 1 m ;] 1 - 2 m] ;] 2 - 6 m] ;] 6 - 10 m] ; > 10 m.

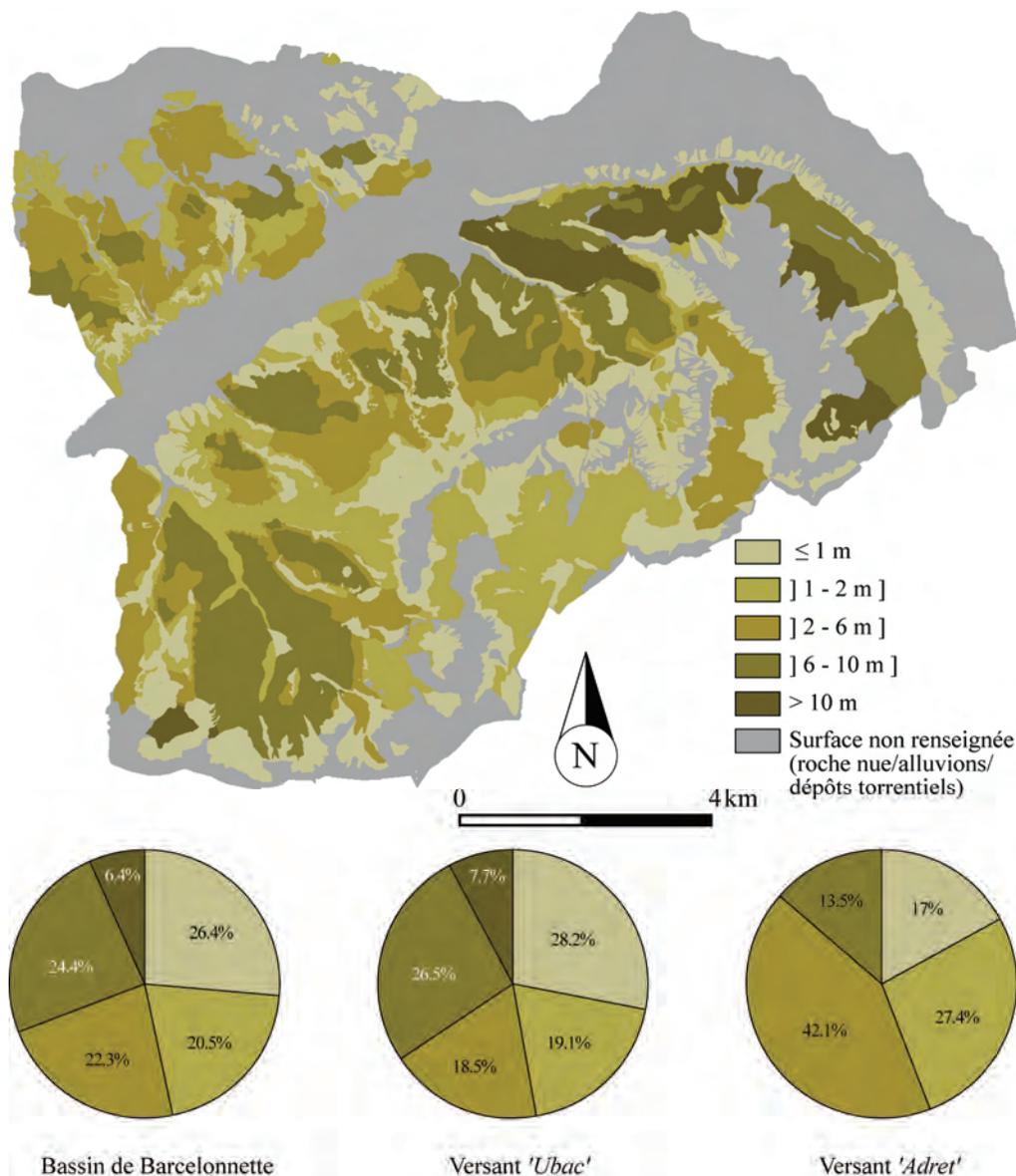


Fig. 4.17. Epaisseurs estimées et répartition des dépôts morainiques du bassin de Barcelonnette.

3.2. La variable lithologie

La variable lithologie se base sur la carte géologique éditée en 1974 par le BRGM. Cette carte levée pour une échelle du 1/50 000^{ème} n'est pas adaptée à notre recherche. En effet, certaines limites lithologiques sont mal placées et des confusions entre la nature de la roche et celle des formations de pente subsistent. De ce fait, une correction de la lithologie a été entreprise sur la base d'observations de terrain, de l'analyse des photographies aériennes (IGN, 2000) et de la *BD Ortho*® (IGN, 2000 et 2004). La correction ne concerne que les limites spatiales des formations lithologiques ; la nomenclature initiale du BRGM (1974) n'a pas été changée. **Sept classes sont distinguées** (Fig. 4.18). La différenciation entre nappe de l'*Autapie* et nappe du *Parpaillon* n'est pas effectuée. Les marnes sont divisées en deux unités avec les marnes *callovo-oxfordiennes stricto*

sensu et les autres marnes. Leurs caractéristiques géotechniques peuvent être trouvées dans Maquaire *et al.* (2003) et Malet (2003).

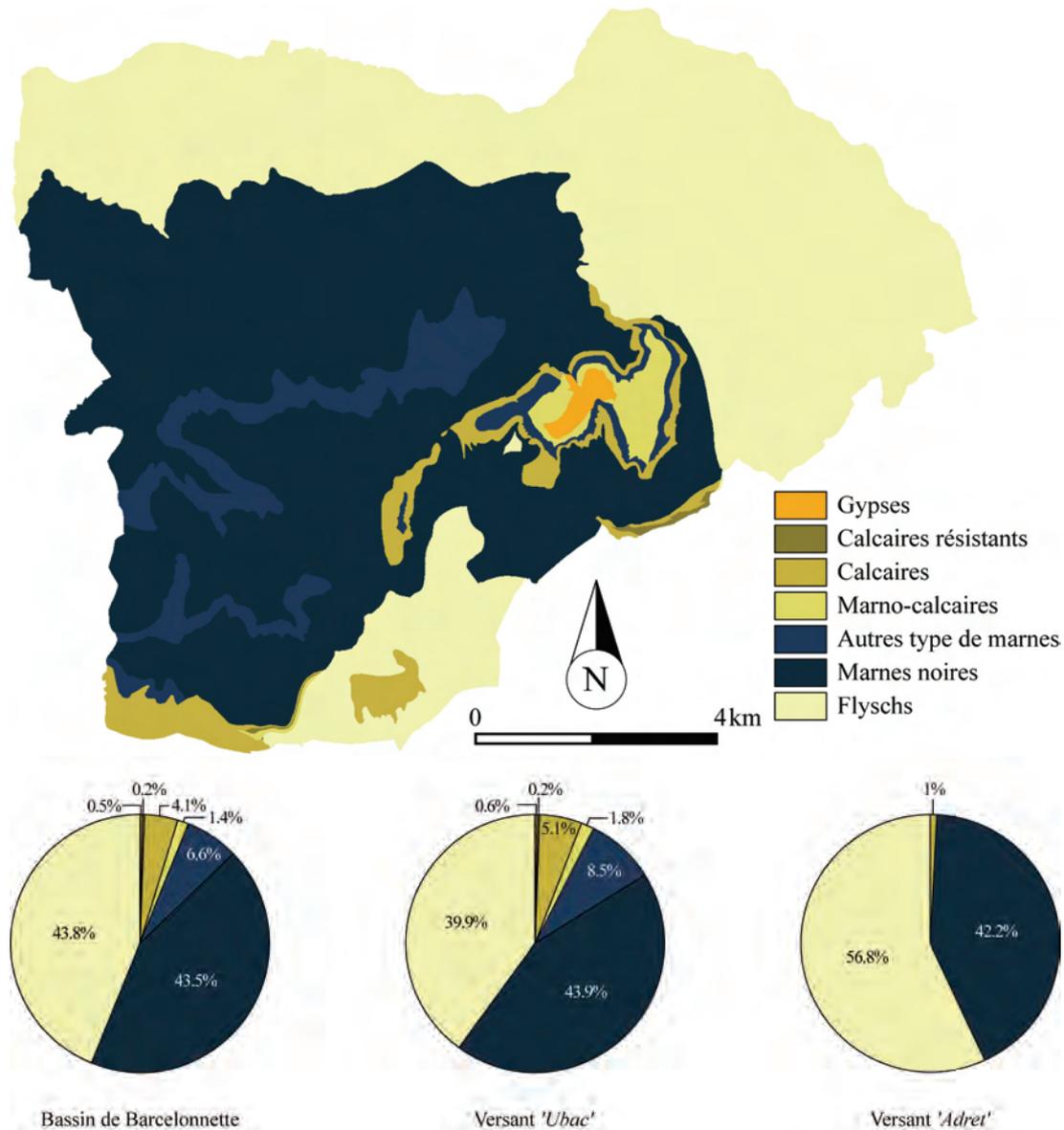


Fig. 4.18. Lithologie du bassin de Barcelonnette et distribution des classes par versant.

Pour le BVRE du *Moulin*, la lithologie est extraite de levés effectués par le Cemagref. Les séries stratigraphiques correspondent à des couches marno-calcaires du *Bathonien inférieur*. Quatre faciès sont différenciés d'ouest en est par leur teneur en carbonate. A l'Ouest se situe le faciès dit du '*Francon supérieur*' dont le taux de carbonates est le plus faible (39%) (Cemagref, 1987). A l'extrême Est, se situe le niveau du '*Laval inférieur*' dont le taux de carbonates est proche de 73%. Ce fort taux expliquerait une certaine résistance à l'érosion et la stabilité de ces hauts de versant (Moreno, 2004). La figure 4.19 présente la répartition des quatre faciès observés.

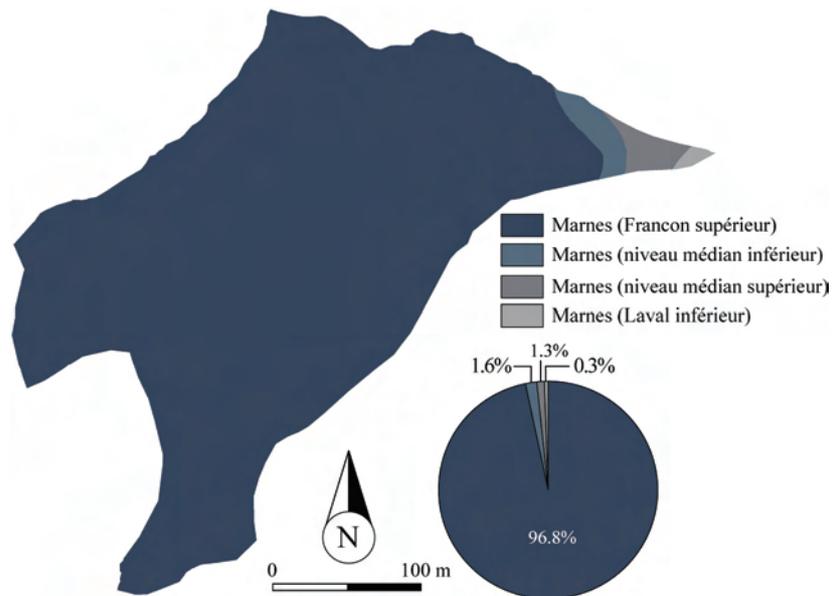


Fig. 4.19. Lithologie du BVRE de Draix.

3.3. La tectonique : failles majeures visibles et supposées

La localisation des failles majeure résulte d'une analyse de documents existants, d'observations de terrain et d'interprétations de photographies aériennes. Deux sortes de failles ont été digitalisées :

- (i) Les **failles mentionnées par les levés du BRGM (1974)** et observées sur le terrain ou visibles par photo-interprétations. Elles sont cartographiées en trait plein sur la figure 4.20 ;

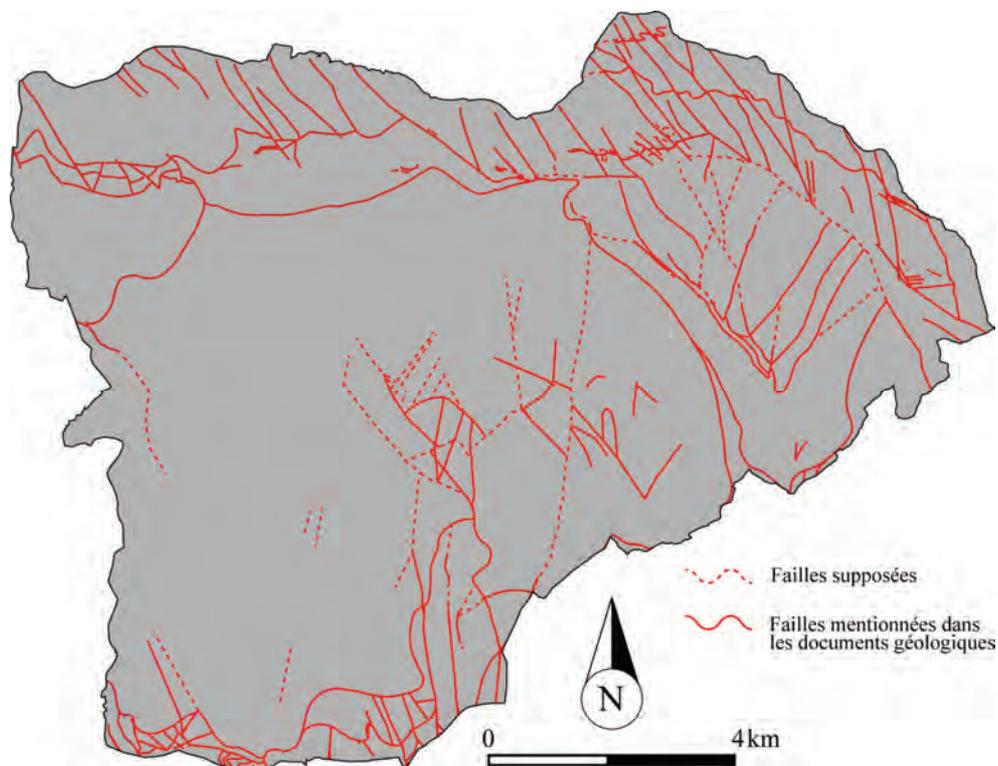


Fig. 4.20. Carte des failles observées et supposées du bassin de Barcelonnette.

- (ii) **Les failles interprétées** cartographiées en traits discontinus (Fig. 4.20). L'étude du relief par photo-interprétation a permis d'observer certaines signatures géomorphologiques comme des changements brusques de la topographie ou des ruptures de pente sans rapport avec un processus géomorphologique présent ou passé. Ces linéaments, proches de réseaux de failles, sont apparus comme d'éventuelles traces d'une tectonique passée et ont donc été représentés comme des failles supposées.

La tectonique étant très complexe, il n'est pas mentionné le type de faille observé ou supposé. Cela nécessiterait un véritable travail de géologue, qui n'entre pas dans le cadre de notre recherche.

Pour le BVRE du *Moulin*, aucune faille majeure n'est observée, de ce fait aucune information sur la tectonique n'a été cartographiée. La variable concernant les failles n'est utilisée qu'en relation avec le pendage des strates visible.

3.4. Le pendage des strates

En raison de l'incertitude liée aux grands recouvrements des formations lithologiques et de la structure complexe des sites de recherche, la **cartographie du pendage des strates a été simplifiée : elle ne prend en compte que les secteurs de roches affleurantes**. Le découpage par classes est effectué suivant (i) le pendage observé sur le terrain, (ii) l'exposition de la pente par rapport au litage et (iii) la proximité par rapport aux failles observées. Cinq classes sont retenues (Fig. 4.21) : (1) pendage conforme (aval pendage), (2) pendage considéré comme nul ($< 5^\circ$), (3) pendage contraire (amont pendage), (4) structure présentant de fortes différences de pendage sur de courtes distances, (5) lithologie complètement déstructurée 100 m autour des failles observées.

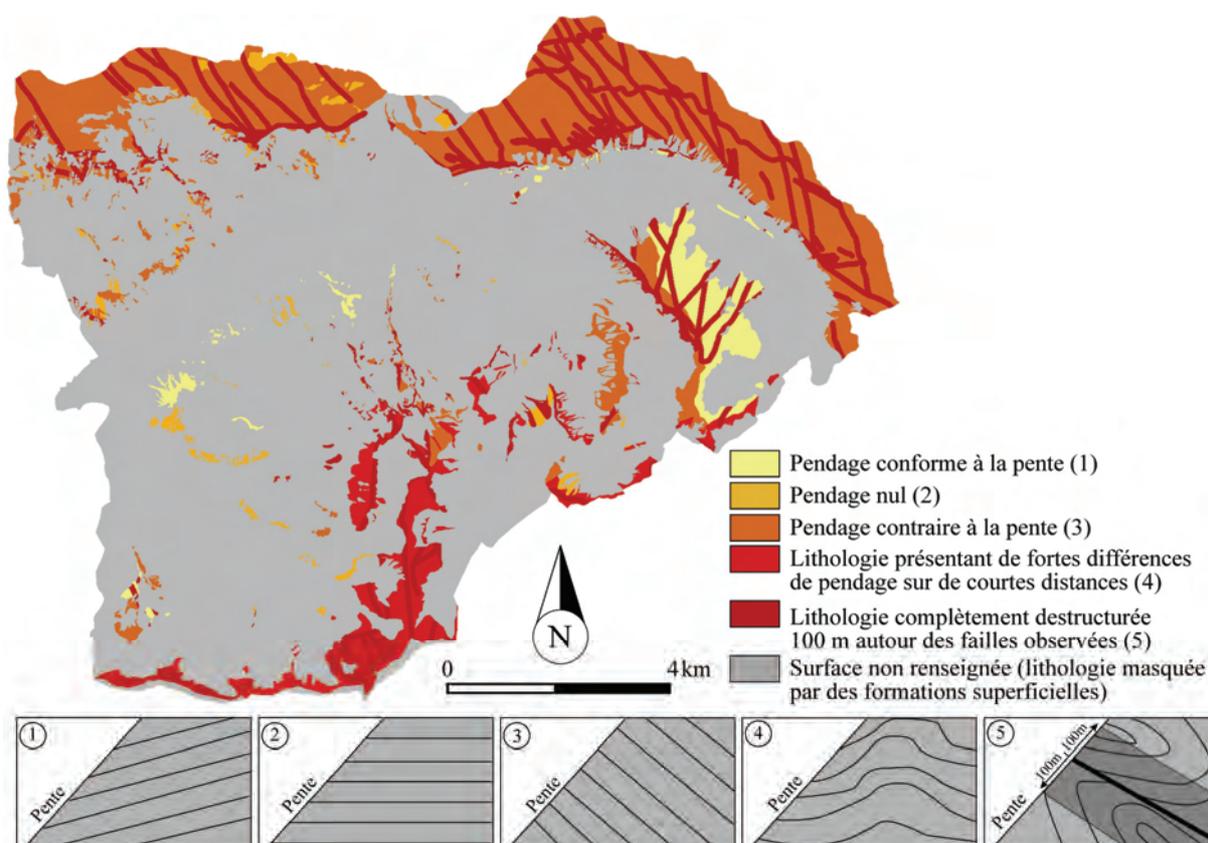


Fig. 4.21. Localisation des affleurements rocheux et de leur pendage par rapport à la pente.

Pour le BVRE du *Moulin*, deux classes de pendage des strates ont été retenues parmi les cinq énumérées ci-dessus. Ainsi, le découpage s'est effectué suivant les l'orientation de la pente et le litage observé (Ritzenthaler, 2000) et sont retenues la classe n°1 (pendage conforme à la pente - aval pendage), et la classe n°3 (pendage contraire à la pente – amont pendage -, Fig. 4.22).

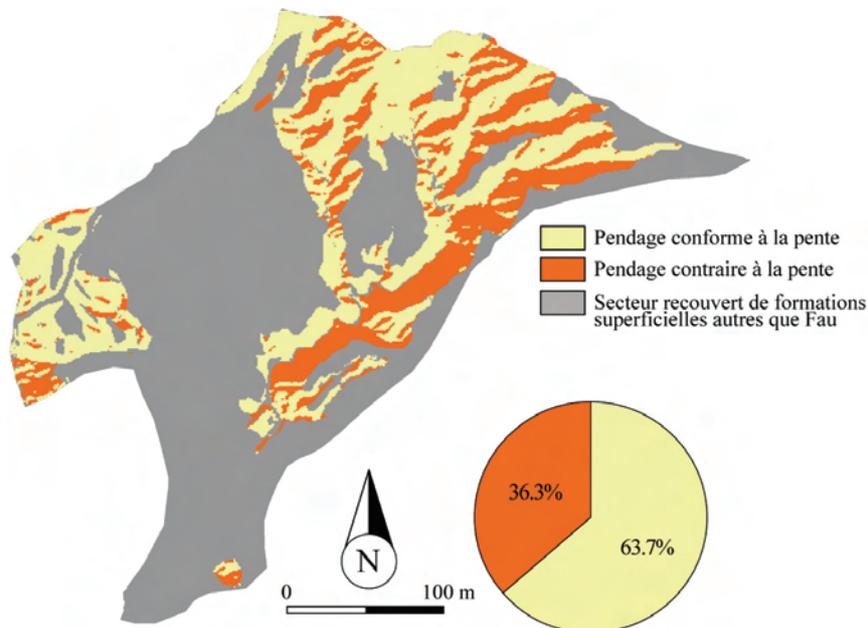


Fig. 4.22. Localisation des affleurements rocheux et de leur pendage par rapport à la pente dans le BVRE du Moulin.

4. L'HYDROGRAPHIE

L'hydrographie se décompose en deux bases de données avec : (i) le **réseau hydrographique permanent et temporaire** et, (ii) les **secteurs humides** tels que sagnes et tourbières.

Pour analyser les relations entre le **réseau de drainage** permanent et les '*mouvements de versant*', l'analyse des cartes topographiques au 1/25 000^{ème} est souvent insuffisante (van Westen, 1993). Une information additionnelle, fondée sur l'analyse de photographies aériennes et d'une orthophoto, est requise pour avoir un réseau de drainage suffisamment précis. Ainsi, le réseau de drainage du bassin est dérivé de la *BD Carto*® (IGN, 2006b). Les ajustements ont été réalisés sur la base de la *BD Ortho*® (IGN, 2000, 2004) dont la précision en x et en y est supérieure.

Les **zones humides** correspondent essentiellement aux sagnes observées sur le terrain. Certaines peuvent être mises en relation avec certains '*mouvements de versant*'. Ces observations n'étant pas toujours valables, les zones humides sont donc reportées sous SIG à titre indicatif.

Pour le BVRE du *Moulin*, cette variable n'est pas utilisée.

Tab. 4.6. Synthèse des variables acquises et produites spécifiquement pour cette recherche.

BB. = bassin de Barcelonnette ; Csp. = Construit spécifiquement ; D. = Disponible ; Nd. = Non disponible ; M = Moyen ; L = Longitudinal ; T = Transversal ; IPA = Interprétation des Photographies Aériennes ; PA = Photographies Aériennes ; BD = Base de données ; G + D + I = Géoréférencement + Digitalisation + Interpolation ; F. = Format de stockage ; V. = Format vecteur ; R. = Format raster ; FS = Formations superficielles par type ; EFS = Epaisseur des formations superficielles par classes ; * = variable à modéliser ; ** = variables prédictives ; en gris = les bases de données acquises.

Variable		Disponibilité		Sources d'information	Méthode d'acquisition	F.
		BB.	Draix			
Géomorphologie*						
'Mouvements de versant'		Csp.	Csp.	PA, Cartes topographiques (1/10 000 ^{ème})	IPA, campagnes de terrain	V./R.
Zone d'ablation des 'mouvements de versant'		Csp.	Csp.	PA, Cartes topographiques (1/10 000 ^{ème})	IPA, campagnes de terrain	V./R.
Topographie**						
BD Alti ®	MNT BD Alti ®	D.	Nd.	Cartes topographiques (1/25 000 ^{ème})	G + D + I (IGN)	R.
	Gradient de pente	Csp.	Nd.	MNT BD Alti ®	SIG	
	Exposition des versants	Csp.	Nd.	MNT BD Alti ®	SIG	
	Aspect des versants (M)	Csp.	Nd.	MNT BD Alti ®	SIG	
	Aspect des versants (L)	Csp.	Nd.	MNT BD Alti ®	SIG	
	Aspect des versants (T)	Csp.	Nd.	MNT BD Alti ®	SIG	
BD altimétrique spécifique	MNT spécifique	Csp.	Csp.	Cartes topographiques (1/10 000 ^{ème})	G + D + I	R.
	Gradient de pente	Csp.	Csp.	MNT spécifique	SIG	
	Exposition des versants	Csp.	Csp.	MNT spécifique	SIG	
	Aspect des versants (M)	Csp.	Csp.	MNT spécifique	SIG	
	Aspect des versants (L)	Csp.	Csp.	MNT spécifique	SIG	
	Aspect des versants (T)	Csp.	Csp.	MNT spécifique	SIG	
Géologie**						
Lithologie		Csp.	Csp.	Cartes géologiques, cartes topographiques (1/10 000 ^{ème}), PA	Interprétation des cartes géologiques, campagnes de terrain, IPA	V./R.
FS		Csp.	Csp.	Cartes géologiques, cartes topographiques (1/10 000 ^{ème}), PA	Interprétation des cartes géologiques, campagnes de terrain, IPA	V./R.
EFS		Csp.	Nd.	Cartes géologiques, cartes topographiques (1/10 000 ^{ème}), PA	Interprétation des cartes géologiques, campagnes de terrain, IPA	V./R.
Tectonique		Csp.	Nd.	Cartes géologiques, cartes topographiques (1/10 000 ^{ème}), PA	Interprétation des cartes géologiques, IPA	V./R.
Pendage des strates		Csp.	CSp	Cartes géologiques, Aspect des versants, cartes topographiques (1/10 000 ^{ème}), PA	Interprétation des cartes géologiques, campagnes de terrain, IPA	R.
Occupation du sol**						
CLC1		D.	Nd.	Images Landsat MSS et TM, images SPOT XS, bases de données publiques, PA	Interprétation visuelle des documents	R.
CLC2		D.	Nd.			
CRIGE		D.	Nd.	Images Landsat 7 ETM (1999)	Processus automatique et semi-automatique	
BD spécifique		Csp.	Nd.	Image Landsat ETM + (2000), images SPOT orthorectifiées (1994), bases de données publiques, cartes de végétation, PA	Processus automatique et semi-automatique	V./R.
BD spécifique modifiée manuellement		Csp.	Csp.	BD spécifique, PA	Manuellement sous SIG	
Hydrologie**						
Rés. hydrologique		Csp.	Nd.	PA (diverses années), Cartes topographiques (1/10 000 ^{ème})	Interprétation des cartes, campagnes de terrain, IPA	V./R.
Zones humides		Csp.	Nd.			

5. CONCLUSION DU CHAPITRE 4

Dans ce chapitre, les différentes bases de données des variables prédictives (VP) ont été présentées. Ces variables, leurs disponibilités, les sources d'information, les méthodes d'acquisition et les formats de stockage sont synthétisés dans le tableau 4.6.

Leurs analyses descriptives ont permis de confirmer quantitativement la **dichotomie entre les versants Ubac et Adret. Cette opposition se remarque particulièrement pour le gradient de pente, l'occupation du sol, la répartition des formations superficielles et de la lithologie.** Toutefois, la multiplication des bases de données disponibles et produites spécifiquement, notamment pour le MNT et l'occupation du sol, pose un problème de choix pour les différentes approches d'analyse de la susceptibilité choisies (*Chap. 1*). Les statistiques descriptives, réalisées pour chacune de ces variables, ne permettent pas de choisir la plus adaptée pour notre recherche.

En effet, en fonction de la qualité des bases de données (**résolution et nomenclature**), les résultats des approches sélectionnées seront différents. De ce fait, il est indispensable d'évaluer l'influence des différentes variables pour les analyses spatiales. **Cette évaluation s'exécutera par un croisement avec les phénomènes d'instabilité. Le chapitre 5 détaille la procédure mise en œuvre pour choisir le jeu de données le plus adapté parmi les données existantes ou construites spécifiquement et pour chaque type de phénomène.**

CHAPITRE 5 : ANALYSE ET IDENTIFICATION D'UN JEU DE VARIABLES DE BASE

La complexité du site de recherche et des phénomènes observés, un manque de connaissance des facteurs de prédisposition et des causes de déclenchement sont des freins à la définition d'une bonne stratégie de cartographie de la susceptibilité (qu'elle soit qualitative, semi-quantitative ou quantitative). **Le choix d'un jeu de variables prédictives (VP ; i.e. les facteurs de prédisposition) adapté à la (aux) variable(s) à modéliser (VM ; i.e. les 'mouvements de versant') revêt un caractère essentiel dans l'élaboration d'une méthodologie de cartographie de susceptibilité objective, reproductible et aisée à mettre en œuvre.** Ce choix est d'autant plus essentiel que, pour cette recherche, plusieurs VP sont disponibles pour représenter une même information. Il faut donc simplifier leur nombre avant de procéder aux analyses d'évaluation de la susceptibilité.

Pour réduire le jeu de VP, quelques stratégies fondées sur leurs relations avec les VM existent. Elles ont été testées dans le cadre :

- (i) D'analyses qualitatives, pour définir des règles subjectives de cartographie ;
- (ii) D'analyses semi-quantitatives pour pondérer le plus objectivement possible les VP les plus influentes ;
- (iii) D'analyses quantitatives, afin d'obtenir un jeu de VP adapté à la VM et limiter le nombre de simulation à analyser.

Très peu d'études présentent une comparaison des relations entre les VP acquises par différentes techniques (i.e. disponibles ou construites spécifiquement) et différentes VM représentant les 'mouvements de versant'. En clair, lorsque plusieurs types de 'mouvements de versant' sont inventoriés ou que les zones d'accumulation et d'ablation sont différenciées, **rares sont les recherches qui s'attachent à définir les VP adaptées spécifiquement à chaque VM.**

Ainsi, ce chapitre se propose d'analyser les relations entre différentes VM et les différentes VP, avec pour double objectif de :

- (i) **Comparer la distribution de chaque VP** disponible et acquise spécifiquement avec chaque VM ;
- (ii) **Définir les différentes VM représentant spécifiquement les 'mouvements de versant'** et éliminer celles qui ne contribuent pas ou très peu aux instabilités de versant afin d'établir des règles subjectives de cartographie ou de calculs.

L'identification s'effectuera selon une stratégie d'analyse de fréquence entre plusieurs VM et les VP énumérées au chapitre 4. Les résultats permettant de diminuer le nombre de VP à utiliser afin d'obtenir un jeu de variables (VP) de base représentatif pour chaque VM retenue. Ce(s) jeu(x) de variables doit(vent) être utilisable(s) pour les différents sites de calage et de validation mais aussi pour les différentes analyses de susceptibilité (qualitative, Chap. 6 ; semi-quantitative, Chap. 6 ; quantitative, Chap. 7 ; et pour la cartographie de l'aléa, Chap. 8).

1. QUELLES VARIABLES RETENIR POUR UNE ANALYSE DE SUSCEPTIBILITE ? CONSTATS ET BESOINS

Aucune règle stricte n'est établie pour retenir un nombre minimum de VM et de VP pour une analyse de la susceptibilité aux 'mouvements de versant'. La quantité et le choix des variables sont souvent guidés par les études antécédentes. De ce fait, un grand nombre de VP n'est pas obligatoirement synonyme de meilleurs résultats (Gokceoglu, 2001, Remondo *et al.*, 2003b). Ainsi, les VP acquises au départ ne sont pas toujours retenues dans l'analyse finale de susceptibilité : d'ailleurs si leur contribution est nulle ou très faible elles sont généralement éliminées. Quelques stratégies pour retenir un jeu de variables adapté ont déjà été proposées (Pistocchi *et al.*, 2002). Elles sont fondées sur des analyses statistiques entre les VP et les VM (Chung et Fabbri, 2003), qui permettent d'acquérir un jeu de variables optimum, avant d'effectuer l'analyse de susceptibilité proprement dite. Pourtant, cette étape est souvent négligée : les VP sont alors choisies en fonction de la connaissance du terrain.

Cette section présente d'abord les VP généralement acquises dans le cadre d'approches qualitative, semi-quantitative et quantitative de la susceptibilité. Puis, les différentes stratégies pour identifier les VP les plus influentes sont présentées pour chacune des méthodes d'analyse spatiale choisies (Chap. 1).

1.1. VP utilisées et stratégie d'identification

1.1.1. A chaque approche ses VP

Suivant la méthode d'évaluation de la susceptibilité, le nombre et le type de VP pris en compte diffèrent (Chap. 1). Ce travail ayant pour objectif l'évaluation et la comparaison de différentes approches d'analyses de la susceptibilité pour une échelle du 1/10 000^{ème}, une recherche sur les VP communes à chaque approche a été entreprise sur la base de publications scientifiques³⁶. Le Tableau 5.1 récapitule les résultats de cette analyse. On retiendra que :

- (i) **Pour une approche qualitative** de type 'expert', les règles établies subjectivement reposent, dans la majorité des cas, sur un nombre limité de VP comme des cartes de gradients de pente, d'occupation du sol, de formations superficielles, de lithologie et des propriétés physiques du type de roche. Suivant les types de 'mouvements de versant', la structure géologique est intégrée à l'analyse ;
- (ii) **Pour une approche semi-quantitative** par *Logiques floues*, les VP utilisées sont les mêmes, auxquelles s'ajoutent parfois des paramètres topographiques (exposition des versants, aspect des versants) ;
- (iii) **Pour les approches quantitatives**, à la fois pour les analyses par *théorie de l'évidence* comme pour celles par *régressions logistiques*, les VP utilisées sont plus nombreuses : avec la prise en compte des localisations des zones tampons dérivées des réseaux de failles, des distances aux routes et aux cours d'eau.

³⁶ Cet inventaire des différentes VP retenues par type d'approche repose sur plusieurs publications scientifiques que nous avons considérées comme majeures pour cette recherche et dont voici les principales : Chung et Fabbri (1993, 1998), van Westen (1993), Carrara *et al.*, (1995), Chung *et al.* (1995), Soeters et van Westen (1996), Yin et Yan (1998), Atkinson et Massari (1998), Binaghi *et al.* (1998), Aleotti et Chowdhury (1999), Guzzetti *et al.* (1999, 2005, 2006), Wachal et Hudak (2000), Clerici (2001), Parise (2001), Parise *et al.* (2001), Pistocchi *et al.* (2002), Dai *et al.* (2001), Clerici *et al.* (2002), Donati et Turrini (2002), Ercanoglu et Gokceoglu (2002), Lee *et al.* (2002) Saha *et al.* (2002, 2005), Gorsveski *et al.* (2003), van Westen *et al.* (2003), Olchmacher et Davis (2003), Park *et al.* (2003), Remondo *et al.* (2003a et b), Süzen et Doyuran (2004a), Ermini *et al.* (2005), Lan *et al.* (2004), Reichenbach *et al.* (2005), Yesilnacar *et al.* (2005), van den Eeckhaut *et al.* (2006).

De manière générale, les **VP gradient de pente, lithologie, formations superficielles et occupation du sol sont toujours utilisées** (Clerici *et al.*, 2002). Les autres variables étant liées aux spécificités du site de recherche.

Tab. 5.1. Variables retenues suivant la méthode d'analyse.

Les chiffres représentent le nombre de fois que la variable est utilisée dans les publications consultées. En gras : variables utilisées par la majorité des méthodes. En gris : variables utilisées le plus souvent pour la théorie de l'évidence.

	Méthode d'analyse				Total
	Qualitative (Expert)	Semi-quantitative (Logiques floues)	Quantitative		
			Théorie de l'évidence	Régression logistique	
Gradient de pente	6	9	11	11	37
Exposition des versants	2	7	9	8	26
Classes d'altitude	-	4	3	8	15
Aspect des versants	-	2	7	10	19
Longueur des versants	-	-	1	1	2
Unités géomorphologiques	5	-	5	-	10
Sous bassin versant	-	-	1	1	2
Formes topographiques	-	1	1	1	3
Rugosité	-	1	1	1	3
Lithologie	8	6	10	11	35
Propriétés physiques des roches	7	-	1	1	9
Réseau de failles	2	2	7	7	18
Densité de failles	-	3	1	2	6
Pendage	1	2	3	2	8
Formations superficielles	6	2	6	2	16
Épaisseur des formations superficielles	3	2	4	2	11
Occupation du sol	6	8	8	8	30
Distance aux cours d'eau	2	2	8	5	17
Densité hydrographique	-	2	3	4	9
Ordre des cours d'eau	-	-	-	1	1
Zones humides	-	-	-	1	1
Index d'humidité (TWI)	-	2	-	1	3
Carte de précipitations	-	-	1	-	1
Ensoleillement	-	1	1	-	2
Distance aux routes	3	1	4	3	11

1.1.2. Stratégies d'identification d'un jeu de VP de base

Le nombre initial de VP peut être assez élevé (e.g. > 20 ; Carrara *et al.*, 1995). Pour les approches dont les combinaisons de VP sont des fonctions linéaires simples ou des fonctions plus complexes, la **multiplication des VP représente un inconvénient dans le processus de calcul : en accroissant le nombre de VP, le nombre de combinaison entre les classes augmente, générant des cellules finales uniques sans véritable signification statistique** (Clerici *et al.*, 2002). Pour éviter cela et définir un jeu de VP de base optimum, plusieurs stratégies existent (Tab. 5.2). Selon la méthode d'analyse de susceptibilité, quatre stratégies principales sont définies : elles se fondent sur un choix expert, sur une analyse de fréquence, sur des analyses de sensibilité par analyse multivariée ou hiérarchique, ou sur l'intégration de variables géomorphologiques.

Dans le cas d'un **choix expert**, les variables sont essentiellement acquises grâce aux connaissances de terrain. Le choix est subjectif et le scientifique estime que seules certaines VP représentent les facteurs de prédisposition principaux et sont nécessaires à l'analyse.

Afin de corriger cette subjectivité, une **analyse des fréquences**, par croisement de la VM et des VP, est proposée par Donati et Turrini (2002). Le ratio obtenu permet de définir le degré d'importance des classes de chaque VP en fonction de leurs relations avec les VM. Pour les approches qualitatives, il est alors possible d'établir des règles de cartographie sur des bases plus objectives (par exemple pour les cartes d'index où ces ratios peuvent être assignés directement pour chaque classe de VP). Le même procédé peut être suivi pour les approches semi-quantitatives notamment lorsque des règles par *Logiques Floues* sont utilisées (Atkinson et Massari, 1998).

Tab. 5.2. Stratégie retenue pour le choix des VP dans le cadre d'une analyse de susceptibilité aux 'mouvements de versant' pour l'inventaire des publications consultées (le chiffre est exprimé en %).

Stratégie de choix des variables		Total	Analyse qualitative	Analyse semi-quantitative	Analyse quantitative	
Analyse de sensibilité	Non	Choix expert	51	9	7	35
		Analyse de fréquences	17	2	7	8
	Oui	Analyse multivariée	8	-	-	8
		Analyse hiérarchique	21	-	-	21

L'objectif du choix par **analyses de sensibilité (multivariée ou hiérarchique)** est sensiblement différent. Un grand nombre de VP ne donnant pas nécessairement des résultats satisfaisant (Soeters et van Westen, 1996 ; Remondo *et al.*, 2003b ; van Westen *et al.*, 2006), le but est de retenir un jeu de VP considéré comme le plus influent, parmi un jeu initial conséquent et statistiquement indépendant (Bonham-Carter, 1994 ; Atkinson et Massari, 1998). Le choix s'effectue alors par :

- (i) Un calcul de **coefficients de corrélation et d'association** (Pistocchi *et al.*, 2002). Leurs analyses débouchent sur la détermination de VP statistiquement dépendantes. L'expert a alors le choix de les combiner pour obtenir une nouvelle VP ou d'éliminer la VP considérée peu utile (Bonham-Carter, 1994 ; Baeza et Corominas, 2001 ; Pistocchi *et al.*, 2002) ;
- (ii) **Une analyse hiérarchique** dont le but est d'exécuter plusieurs simulations en introduisant successivement chaque VP (van Westen, 1993 ; Chung et Fabbri, 2000 ; Fernandez *et al.*, 2003 ; Remondo *et al.*, 2003a ; van Westen *et al.*, 2003 ; Thiery *et al.*, 2004a, 2004b). La VP est retenue si le pouvoir prédictif de l'analyse de susceptibilité est supérieur à la simulation précédente. Cette technique à l'avantage de distinguer les VP les plus influentes sur les résultats finaux et d'améliorer certaines VP (entre autres la résolution et la nomenclature ; Pistocchi *et al.*, 2002) si

nécessaire. Toutefois, elle oblige à analyser un grand nombre de simulations lorsque les VP sont nombreuses.

Une dernière méthode, évitant un nombre de simulations trop grand, consiste à intégrer dans le processus de calcul une VP représentant les **unités géomorphologiques**. Cette VP introduit la vision experte dans le processus d'analyse statistique. Elle réduit considérablement le nombre de cellules isolées et augmente le pouvoir prédictif des cartes finales (van Westen *et al.*, 2003, Thiery *et al.*, 2007). **Cette VP est essentiellement utilisée par l'approche experte et la théorie de l'évidence** (Tab. 5.1).

On peut retenir que le nombre de VP utilisées pour une analyse de la susceptibilité est souvent restreint et quelques variables suffisent pour obtenir de bons résultats (Soeters et van Westen, 1996 ; Gokceoglu, 2001 ; Remondo *et al.*, 2003b). Plusieurs stratégies de choix de VP sont utilisées, mais **souvent la seule connaissance du terrain guide l'expert pour déterminer un jeu de VP qu'il considère alors comme adapté à son étude. Les comparaisons entre plusieurs VP acquises spécifiquement ou disponibles représentant le même facteur de prédisposition ne sont quasiment jamais effectuées.**

1.2. La VM : quelle zone retenir pour quel effet ?

L'identification d'un jeu de VP de base par les méthodes quantitatives citées précédemment (analyses de fréquences, analyse multivariée, analyse hiérarchique) est **dépendant de la VM retenue**. Cet aspect est peu abordé dans la littérature et pourtant, **deux points essentiels, propres aux 'mouvements de versant', doivent être pris en compte afin d'éviter des résultats biaisés et tenir compte des caractéristiques des phénomènes**. Il s'agit :

- (i) **Du type de phénomène** qui possède ses propres facteurs de prédisposition (pente, morphologie, végétation, etc. ; van Westen *et al.*, 2006).
- (ii) **De la zone d'ablation** ; en tenant compte de la zone d'accumulation dans l'analyse (*Chap. 3*), **certaines conditions environnementales non représentatives du déclenchement** du phénomène **sont retenues** (Clerici *et al.*, 2002 ; Thiery *et al.*, 2004a et 2004b, 2007) ;

Pour éviter ce biais et avoir une VM reflétant les conditions initiales avant le déclenchement des phénomènes, **quatre méthodes d'optimisation de la VM sont utilisées** (Fig. 5.1). Il s'agit :

- (i) **De diviser l'inventaire selon les types de 'mouvements de versant' et leurs activités** (Clerici *et al.*, 2002) ;
- (ii) **De tenir compte des zones d'ablation des 'mouvements de versant'** (Clerici, 2002 ; Chung et Fabbri, 2003) ;
- (iii) **De créer des zones tampons autour de la zone d'ablation** : ces zones sont considérées comme représentatives des conditions environnementales avant que le mouvement ne se déclare (Clerici, 2002 ; Süzen, 2002 ; Süzen et Doyuran, 2004a) ;
- (iv) **De calculer le centre géométrique de la zone d'ablation** : il évite d'accorder trop de poids aux 'mouvements de versant' de grande taille et limite l'influence des erreurs de cartographie dues à une vision subjective des limites des phénomènes (van Westen, 1993, Atkinson et Massari, 1998 ; Sterlacchini *et al.*, 2004 ; Thiery *et al.*, 2004b ; van Den Eeckhaut *et al.* 2006).

Les méthodes (i) et (ii) peuvent être utilisées pour les approches qualitatives, semi-quantitatives et quantitatives. Les méthodes (iii) et (iv) sont adaptées aux approches quantitatives, notamment pour les processus de calcul de probabilités par cellules sous format raster.

1.3. Conclusion

Plusieurs points essentiels sont à souligner pour obtenir une information quantitative sur les facteurs de prédisposition principaux et retenir un jeu de VP adapté à chaque VM :

- (i) **Aucun jeu de VP type n'est défini.** Pour les analyses qualitatives, on remarque que les VP sont moins nombreuses que pour les analyses quantitatives, et suivant le site de recherche, les méthodologies utilisées et les bases de données acquises, le nombre de VP peut doubler voir tripler ;
- (ii) **Aucune règle ne définit la VM à prendre en compte.** Ainsi dans beaucoup de cas, seuls les mouvements actifs sont retenus sans différenciation de types ;
- (iii) **Aucune étude ne compare des VP issues de bases de données disponibles et acquises spécifiquement** pour les sites de recherche : l'influence de la résolution et surtout l'influence de la nomenclature ne sont donc pas connues.

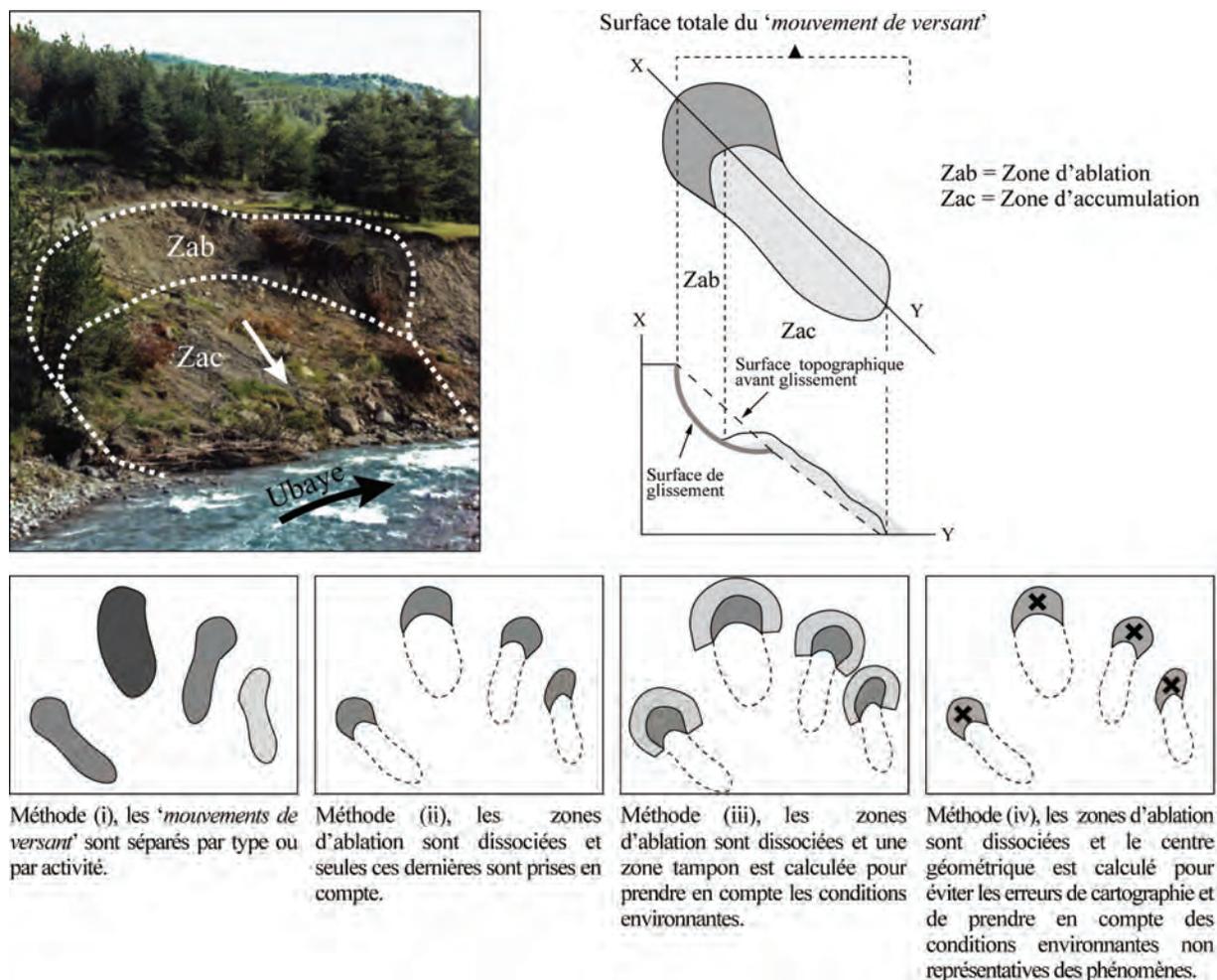


Fig. 5.1. Représentation schématique des zones d'un mouvement de versant et méthodologie d'optimisation de la VM.

De ce fait et face à un manque de méthodologie pour définir une VM représentative et un jeu de VP de base, il convient d'élaborer une stratégie originale et simple. **Cette stratégie se doit de retenir un jeu de VP utilisable pour chaque méthode d'analyse retenue tout en tenant compte du type de phénomène, de son activité et de sa zone représentative.** Ceci est un pré-requis essentiel pour optimiser les analyses et réduire le temps des simulations de calage (Thiery *et al.*, 2007).

2. DETERMINATION D'UN JEU DE VP DE BASE : STRATEGIE ET RESULTATS

L'objectif de cette section est de concevoir une stratégie qui puisse être utilisable pour les quatre méthodes d'analyses choisie au chapitre 1. Pour répondre à cet objectif, les VM utilisées sont les 'mouvements de versant' à ICC1 (mouvements actifs avec indice de confiance cartographique fort) déterminés à la fin du chapitre 3. Les VP utilisées sont celles détaillées au chapitre 4, soit les VP disponibles et celles produites spécifiquement.

2.1. Stratégie d'analyse

La méthode adoptée pour l'analyse de sensibilité est fondée sur une analyse des fréquences entre chaque VM (Fig. 5.2) et chaque VP. Ce type de croisement est préféré aux stratégies plus complexes car :

- (i) Il est applicable pour chaque type de méthode d'analyse de susceptibilité (quantitative, semi-quantitative et qualitative) ;
- (ii) Les résultats descriptifs (fréquence) permettent de comparer rapidement les résultats entre les VP représentant une même information obtenue par différents moyens.

L'analyse descriptive obtenue permet (i) de confirmer les observations effectuées sur le terrain pour chaque type de phénomènes et (ii) de guider le scientifique pour établir certaines règles plus objectives (dans le cadre d'une analyse qualitative) ou d'allouer certaines pondérations à certaines VP (pour une analyse semi-quantitative).

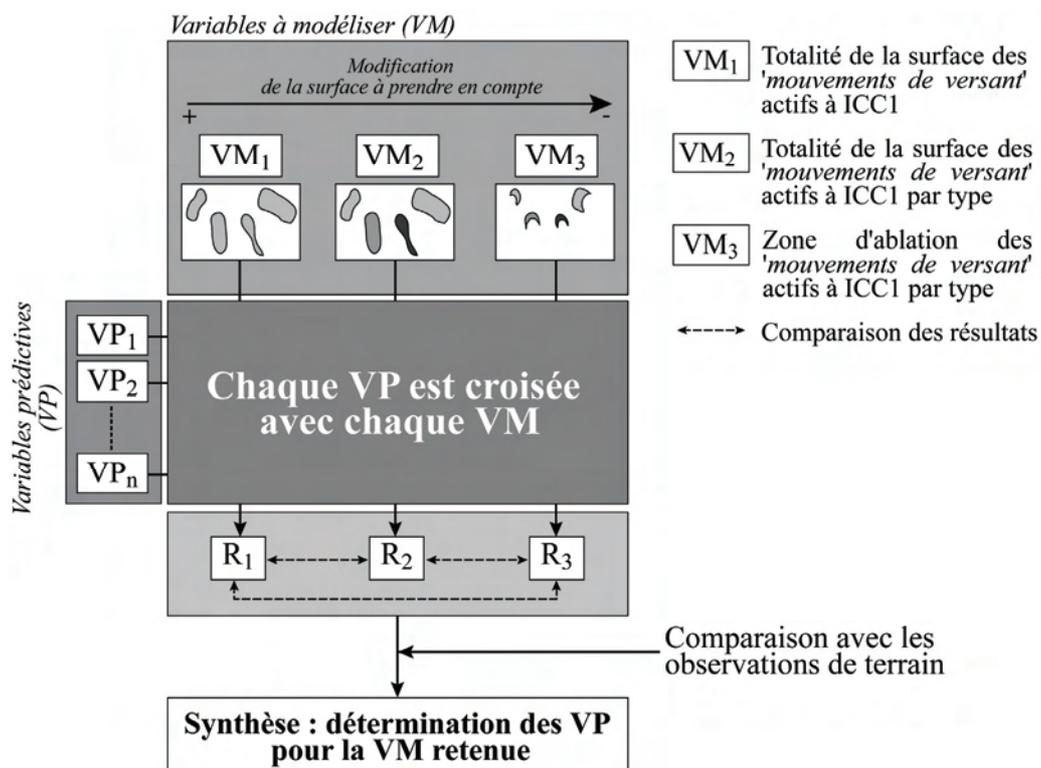
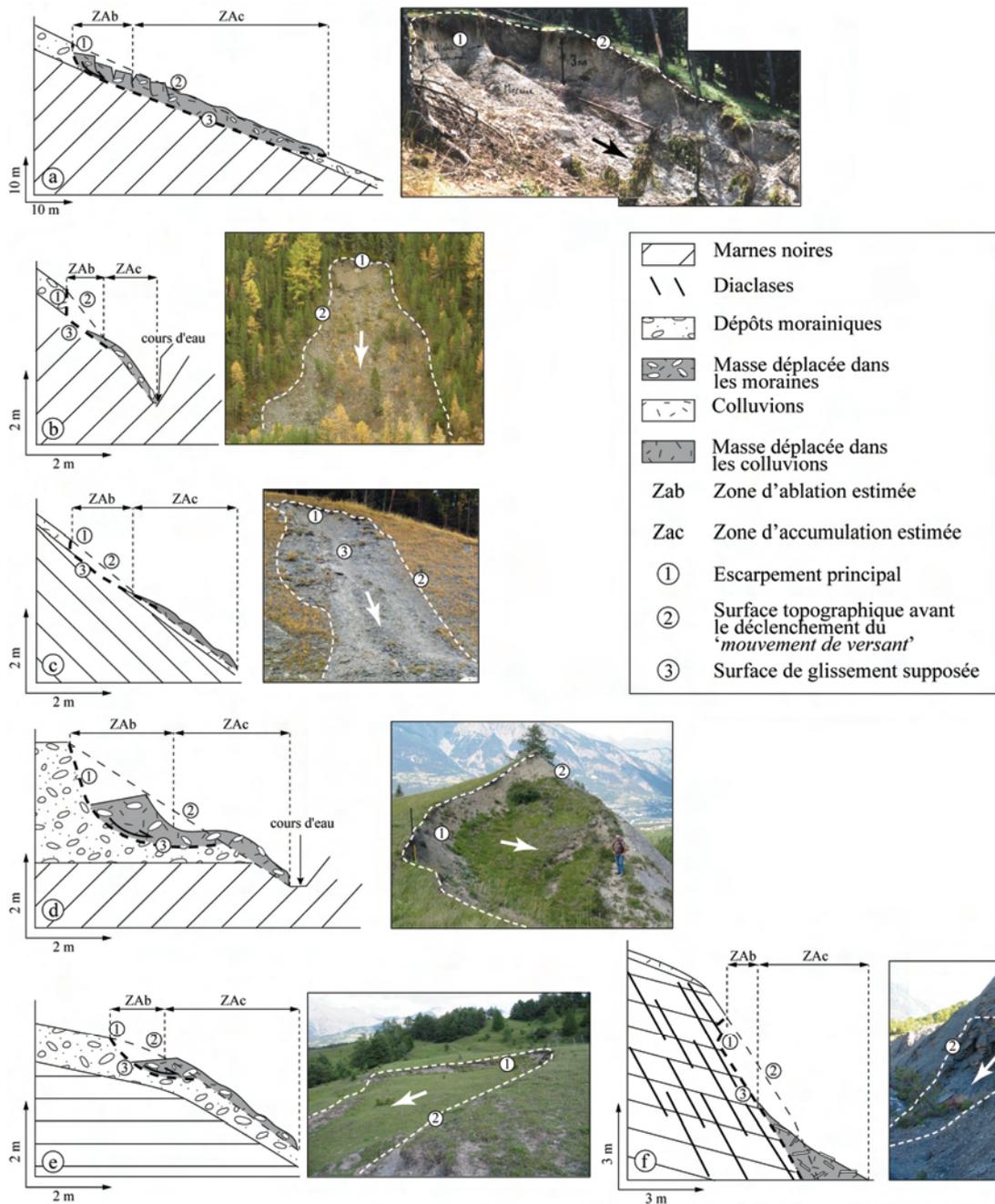


Fig. 5.2. Représentation schématique de l'analyse de sensibilité mise en place pour identifier les variables prédictives pour chaque variable à modéliser retenue.

Comme décrit ci-dessus, la procédure se focalise sur les phénomènes parfaitement localisés ('mouvements de versant' actifs avec indice de confiance cartographique fort -ICC1-). Trois jeux de VM sont distingués :

- (i) Le premier jeu de VM (VM1) est représenté par la totalité de la surface des 'mouvements de versant' actifs, sans distinction entre zone d'ablation et zone d'accumulation ;



Type de 'mouvement de versant' : a. Translationnel complexe (TC). b. Translationnel superficiel de berge (TSB). c. Translationnel superficiel d'interfluves (TSI). d. Rotationnel de berge (RB). e. Rotationnel d'interfluve (RI). f. Glissement banc sur banc (GBB).

Fig. 5.3. Types et zones de 'mouvements de versant' retenus pour la stratégie d'analyse des VP (facteurs de prédisposition principaux).

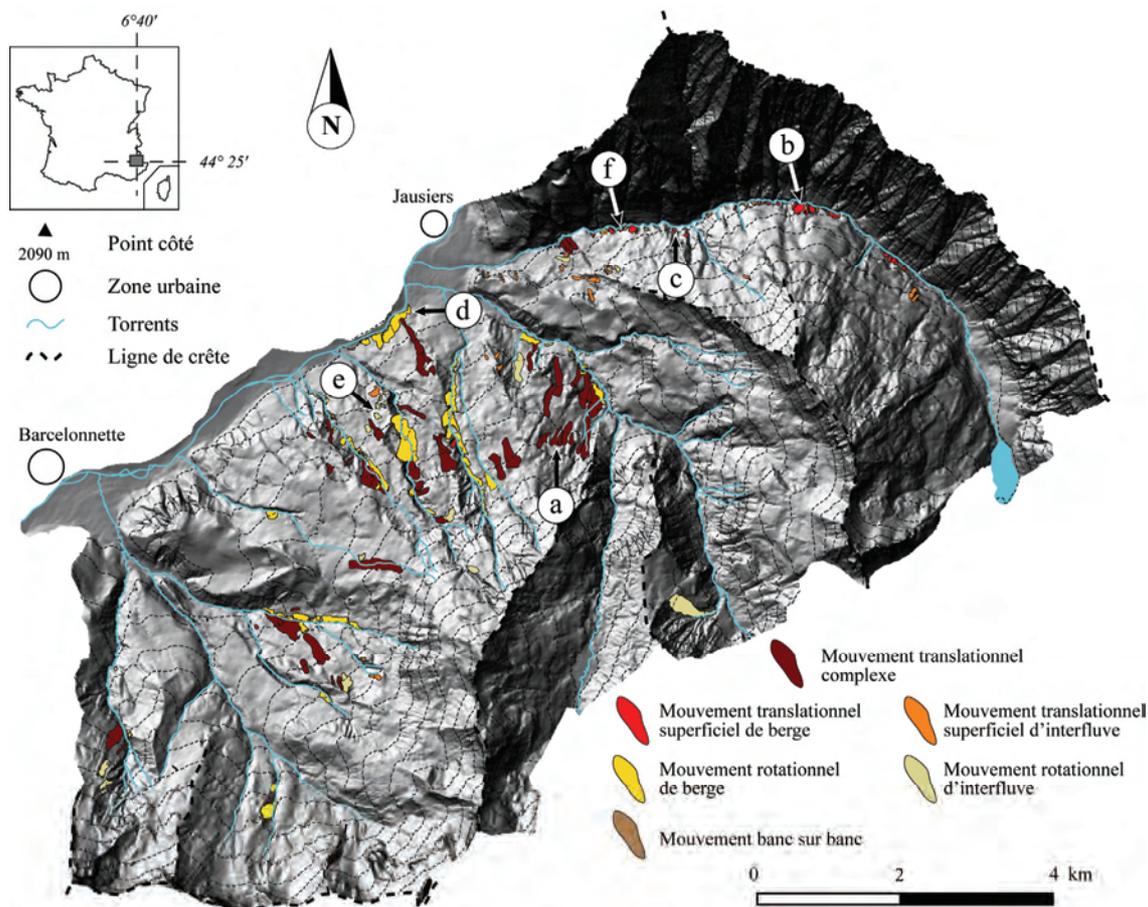
- (ii) Le deuxième jeu de VM (VM2) représente les différents types de mouvements de versant (Fig. 5.3) : translationnels complexes, translationnels de berge, translationnels d'interfluve, rotationnels de berge, rotationnels d'interfluves et banc sur banc ;

(iii) **Le troisième jeu de VM (VM3) tient compte de la zone d'ablation (Fig. 5.3) des différents types de mouvements distingués dans le second jeu VM2.**

Les résultats obtenus sont confrontés aux observations effectuées pour établir la carte morphodynamique et la typologie des 'mouvements de versant'.

Les figures 5.3 et 5.4 présentent respectivement les différents types de 'mouvements de versant' retenus, les zones d'ablation et d'accumulation considérées et leur localisation sur le versant Ubac. Au total, 220 'mouvements de versant' sont retenus qui se répartissent ainsi : 25.5% de translationnels complexes, 22.3% de rotationnels d'interfluve, 21% de translationnels superficiels de berge, 14.1% de translationnels superficiels d'interfluve, 9.1% de banc sur banc et 8.2% de rotationnels de berge. Rappelons également que 16 variables prédictives (VP) sont utilisées (cf. Chap. 4).

Les fréquences³⁷ obtenues entre chaque VP et VM sont détaillées en exposant les résultats pour les VP disponibles et produites spécifiquement dans la représentation d'une même information (Figs. 5.5 à 5.11). Ces résultats permettent entre autre, d'observer la qualité de chaque VP et l'influence de leur nomenclature et de leur résolution respective.



Remarque : Les lettres correspondent aux localisations des différents 'mouvements de versant' détaillés dans la figure 5.3.

Fig. 5.4. Localisation sur le versant Ubac des 'mouvements de versant' retenus pour l'identification des facteurs de prédisposition (adapté de Thiery et al., 2007).

³⁷ Les fréquences sont obtenues par le calcul du nombre de cellules des différentes classes de chaque variable pour chaque type de phénomènes.

2.2. Comparaison entre VM, VP disponibles et VP produites spécifiquement pour une même information

Les variables disponibles et produites spécifiquement concernent la **variable 'topographie'** (*BD Alti*® et *MNT BB*) et la **variable 'occupation du sol'** (*CLC1*, *CLC2*, *CRIGE*, *BD ALARM* et *BD ALARMc*). Les caractéristiques principales de chaque VP sont rappelées dans le tableau 5.3 (les détails étant précisés dans le chapitre 4).

Tableau 5.3. Caractéristiques générales des VP disponibles et produites spécifiquement pour une même information.

IPA = Interprétation de Photographies Aériennes ; PACA = Provence Alpes Côtes d'Azur

VP	Nom de la variable	Caractéristiques principales	Acquisition
Topographie	<i>BD Alti</i> ®	Produite sur la base de la digitalisation des courbes de niveau tous les 50 m. Résolution de 30 m ² ré-échantillonnée à 10 m ² .	Disponible
	<i>MNT BB</i>	Produite sur la base de la digitalisation des courbes de niveau tous les 10 m Résolution de 10 m ²	Produite spécifiquement
Occupation du sol	<i>CLC 1</i>	Produite par l'interprétation d'images satellites + IPA. Elimination des objets < 25 ha. Résolution de 10 m ² . 11 classes retenues.	Disponible
	<i>CLC2</i>	Produite par l'interprétation d'images satellites + IPA Elimination des objets < 25 ha. Résolution de 10 m ² . 19 classes retenues.	Disponible
	<i>CRIGE</i>	Produite par l'interprétation d'images satellites + IPA. Résolution de 10 m ² . 15 classes adaptées à la région PACA retenues.	Disponible
	<i>BD ALARM</i>	Produite par l'interprétation d'images satellites + IPA. + cartes de végétation. Résolution de 30 m ² ré-échantillonnée à 10 m ² . 15 classes adaptées au Bassin de <i>Barcelonnette</i> retenues.	Produite spécifiquement
	<i>BD ALARMc</i>	Dérivée de la <i>BD ALARM</i> . Correction manuelle des limites des objets de la <i>BD ALARM</i> . Objets < à 100 m ² éliminés. Résolution 10 m ² . 15 classes adaptées au Bassin de <i>Barcelonnette</i> retenues.	Produite spécifiquement

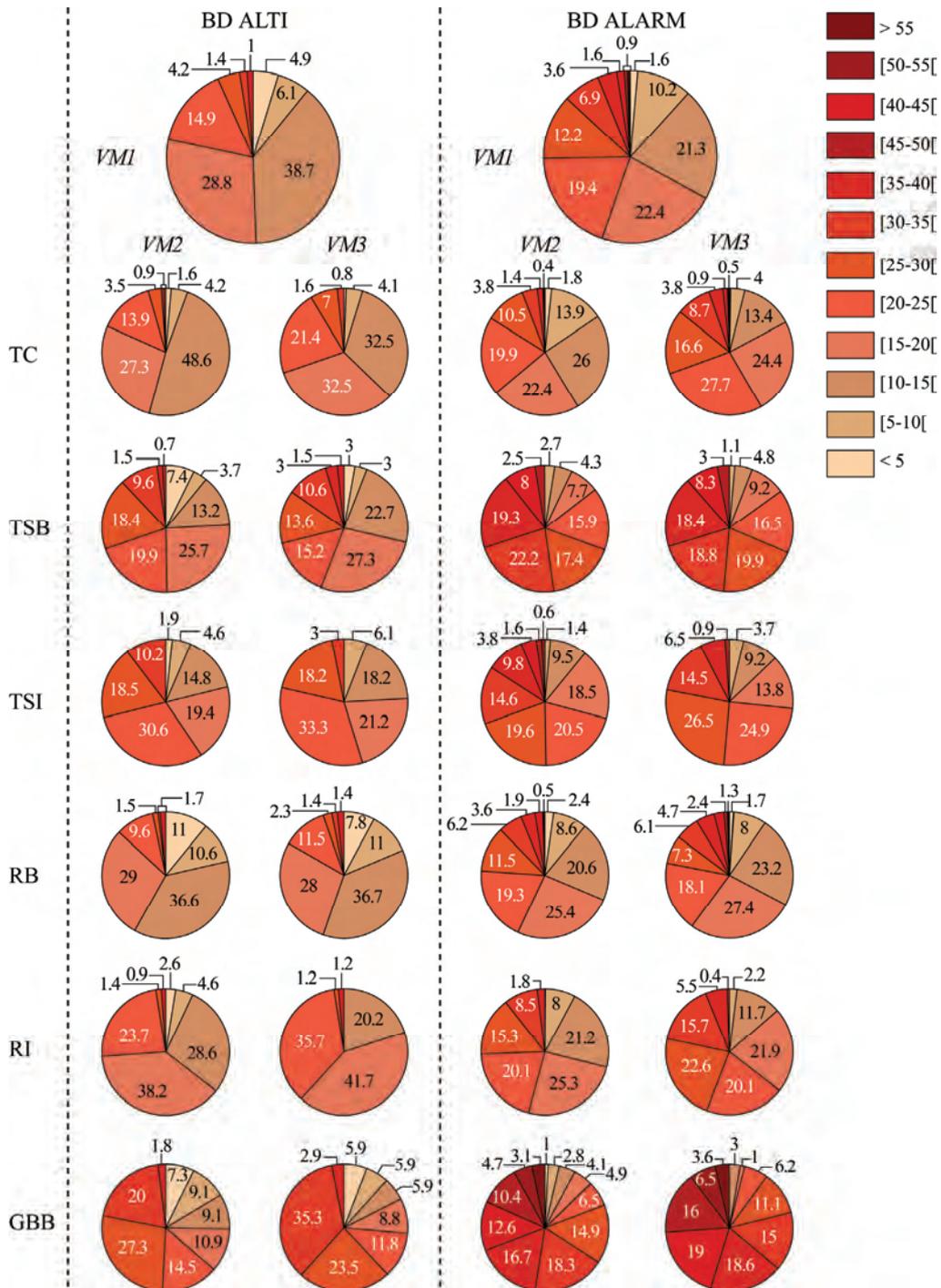
2.2.1. Les VP 'topographie' : confirmation de l'imprécision de la *BD Alti*®

L'influence des différents MNT s'observe dans la qualité des dérivées premières (gradients de pente et exposition) et les dérivées secondes (aspect des versants). La figure 5.5 présente les fréquences pour chaque VM et les gradients de pente obtenus avec la *BD Alti*® et le *MNT BB*.

Les résultats entre VM1 et les gradients de pente de chaque MNT confirment la différence de leur répartition, détaillée au chapitre 4 (§ 1.3.2). Les fréquences obtenues avec la *BD Alti*® et le *MNT BB* sont respectivement centrées sur les pentes faibles à moyennes (de 10 à 25°) et sur les pentes moyennes et fortes (43.6 % des mouvements sont localisés sur des pentes > 30°). Ce constat est renforcé par une comparaison entre la pente moyenne mesurée sur le terrain pour chaque 'mouvement de versant' et les gradients de pentes des deux MNT pour la VM1. Les résultats acquis avec le *MNT BB* sont très proches de ceux obtenus sur le terrain. *A contrario*, avec la *BD Alti*®, les pentes faibles sont surreprésentées.

Cette tendance 'générale' se vérifie aussi entre VM2 et les gradients de pente dérivés des deux MNT. Les fréquences de gradients de pente calculées par type de phénomène avec le *MNT BB* sont sensiblement les mêmes que celles mesurées directement sur le terrain et reportées dans

la base de données alors qu'avec la BD Alti ® les pentes faibles sont encore une fois surreprésentées. Cette analyse confirme *a posteriori*, la qualité du MNT réalisé spécifiquement et conforte l'investissement consenti pour l'acquérir à l'échelle de travail du 1/10 000^{ème}.



Types de 'mouvements de versant' : TC = Translationnel complexe ; TSB = Translationnel superficiel de berge ; TSI = Translationnel superficiel d'interfluve ; RB = Rotationnel de berge ; RI = Rotationnel d'interfluve ; GBB = Glissement banc sur banc.

Fig. 5.5. Fréquence des gradients de pente selon le MNT et les différents types de VM par type de 'mouvements de versant' (les chiffres sont exprimés en %).

Les fréquences obtenues entre VM3 et le MNT BB montrent que les pentes moyennes et fortes sont mieux représentées qu'avec VM2. Ceci confirme une fois de plus les observations effectuées sur le terrain et l'intérêt de séparer le phénomène en deux zones distinctes. Toutefois, pour les 'mouvements de versant' le long des berges (translationnels superficiels et rotationnels) et de petites tailles, cette différence est moins perceptible que pour les 'mouvements de versant' localisés sur les interfluves. Deux raisons majeures peuvent expliquer de tels résultats :

- (i) **Le sapement régulier des phénomènes par les torrents provoque une diminution de la taille de la zone d'accumulation** occupant alors une surface équivalente ou plus petite que la zone d'ablation (indice de déplacement > 0,5, Chap. 3 § 4.2.4.1). Ainsi, les gradients de pente calculés pour VM2 et VM3 sont proches. En revanche, **pour les autres types de mouvements, la surface de la zone d'accumulation est plus grande** que celle de la zone d'ablation. Les pentes étant plus faibles dans la zone d'accumulation, la différence entre les gradients de pente pour VM2 et VM3 est plus nette ;
- (ii) **Les changements de gradients de pente en deçà de 10 m de distance ne peuvent pas être reconnus par le meilleur MNT à notre disposition** (résolution spatiale de 10 m). Se baser essentiellement sur le croisement des gradients de pente et VM3 pour les glissements de petite taille (< 1000 m²) pose alors le problème de lissage des pentes (évoqué dans le chapitre 4, § 1.3.2).

En complément des résultats acquis avec la VP 'gradient de pente', il est apparu judicieux d'observer les résultats des fréquences avec la VP 'exposition' et la VP 'aspect des versants' afin de confirmer ces premières conclusions.

Pour les VP 'exposition' que ce soit avec VM1, VM2 et VM3 **peu de différences s'observent entre les fréquences** (Fig. 5.6). Ceci est en partie dû aux versants du bassin qui possèdent des caractéristiques topographiques particulières (bossèlements fréquents, rupture de pente, etc.) et offrent des expositions homogènes sans changements d'orientation sur de courtes distances. Les expositions de la BD Alti ® offrent alors de fortes similitudes avec les expositions du MNT BB. Les résultats indiquent que la majorité des 'mouvements de versant' sont orientés de l'ouest au nord-est avec une prédominance pour une orientation nord-ouest et nord. Les mouvements translationnels de berge sont orientés du nord vers le nord-est (80%) alors que les mouvements rotationnels de berge et les mouvements banc sur banc sont plutôt orientés vers le nord-ouest (55%). Seuls les mouvements rotationnels d'interfluve sont orientés vers l'est et vers le sud-est (25%).

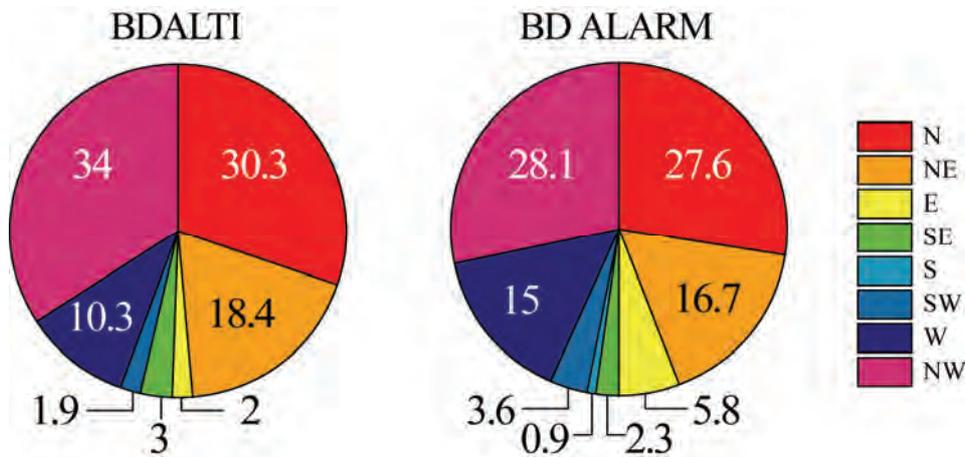


Fig. 5.6. Fréquences obtenues entre la VM1 et la VP 'exposition des versants' issue de la BD Alti ® et BD ALARM (les chiffres sont exprimés en %).

Pour l'aspect des versants, la différence entre la *BD Alti*® et le *MNT BB* est incontestable. Avec la *BD Alti*®, les 'mouvements de versant' localisés sur les versants concaves sont sous-représentés (à la fois pour *VM1*, *VM2* ou *VM3*). Ces versants sont pourtant considérés comme favorables à l'occurrence des phénomènes, car ils favorisent la concentration des eaux de ruissellement (Lee *et al.*, 2003 ; Ohlmacher, 2004 ; Komac, 2006). Pour le *MNT BB* une différence entre les fréquences obtenues avec *VM2* et *VM3* est assez nette, notamment entre les mouvements localisés en interfluve et les mouvements localisés le long des berges. Ainsi, les fréquences des versants concaves obtenues sans les zones d'ablation des mouvements d'interfluve sont supérieures à celles obtenues avec les zones d'ablation des mouvements de berge. Une fois encore, la taille plus importante de la zone d'ablation dans le cas des mouvements de berge explique ce contraste moins net.

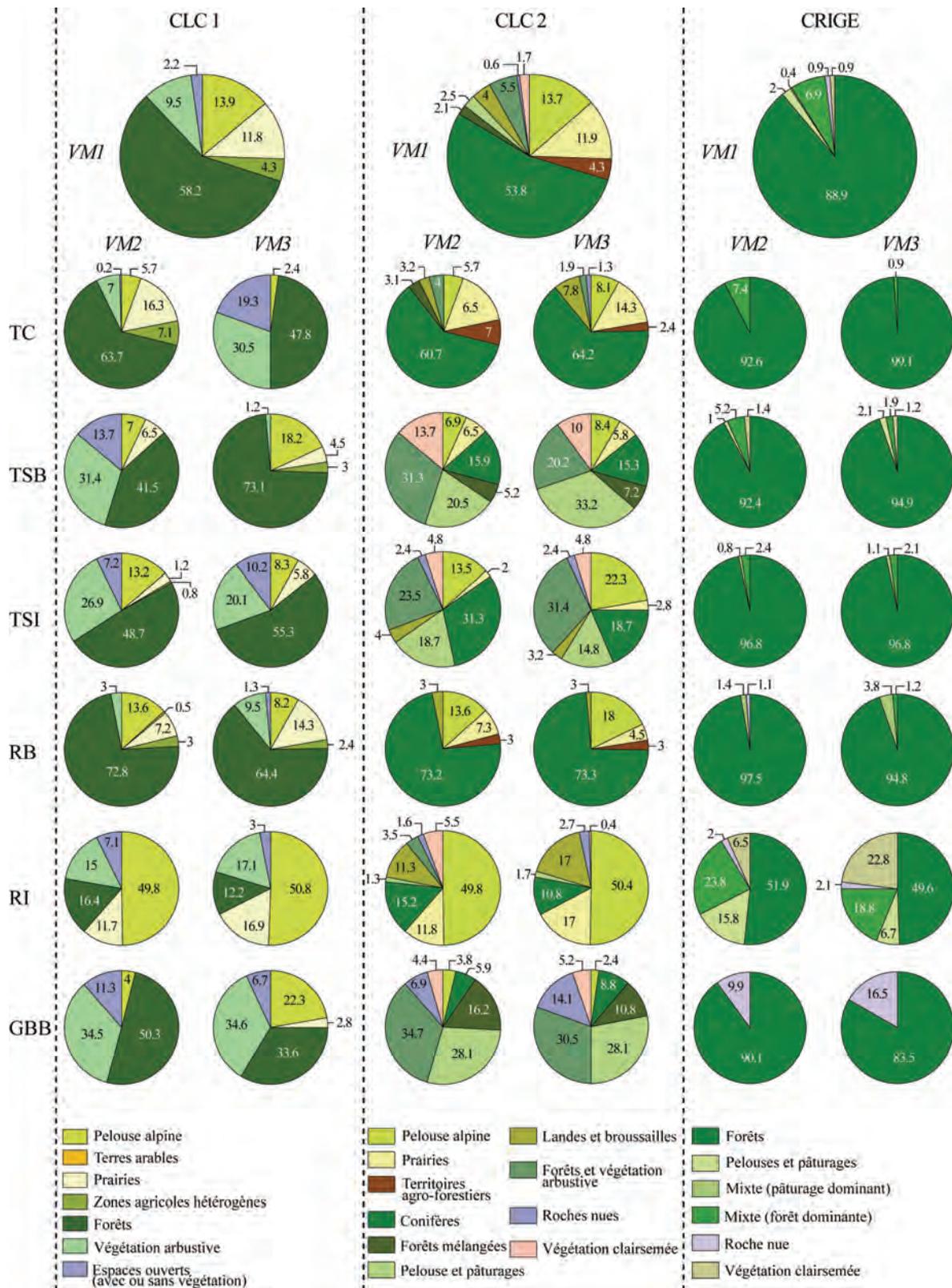
Pour conclure les résultats des fréquences entre les différentes *VP* dérivées montrent que l'investissement accompli **pour obtenir un MNT adapté au site était nécessaire**. Grâce à ce *MNT*, les informations relevées sur le terrain sont confirmées, ce qui n'est pas le cas avec les dérivées de la *BD Alti*®, l'information est trop lissée. Face à cette imprécision de la *BD Alti*®, confirmée *a posteriori*, le ***MNT BB* est conservé pour les analyses de susceptibilité**, par les différents modèles d'analyse spatiale retenus (*Chap. 6, 7 et 8*).

2.2.2. La *VP* 'occupation du sol'

Chaque *VP* 'occupation du sol' est croisée avec chaque *VM* : les résultats, représentés par les figures 5.7 et 5.8, permettent de discuter deux points particuliers : l'influence de la qualité des *VP* sur les résultats et le rôle de la forêt.

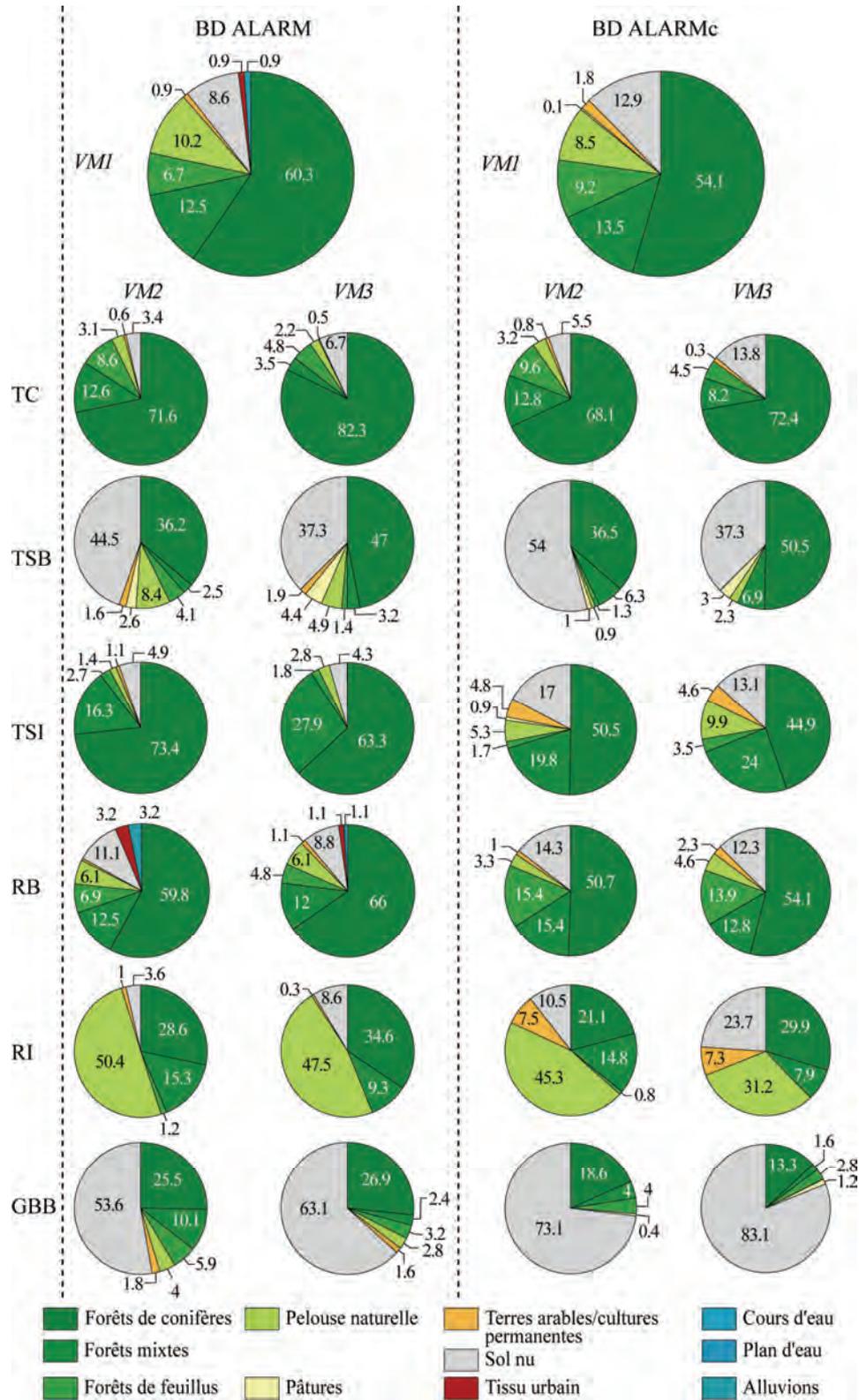
Nous savons déjà que les ***VP* acquises spécifiquement sont plus précises spatialement** (par exemple pour la reconnaissance d'îlots isolés de certaines classes) et **possèdent une nomenclature adaptée au site**. La correction manuelle de la *BD ALARM* 'occupation du sol' acquise permet une meilleure prise en compte des 'mouvements de versant' sur sol nu. Ceci est particulièrement vrai pour les glissements banc sur banc, qui se produisent dans les marnes noires ou les glissements translationnels superficiels de berge où les versants sont régulièrement mis à nu par le sapement. Cette nuance entre types de 'mouvements de versant' est accentuée lorsque les croisements sont effectués avec les *VM3*. Par exemple, pour les glissements rotationnels d'interfluve, la *VM2* est représenté majoritairement par la pelouse naturelle (45.3%) et les classes de forêts (36.7%) ; en ne retenant que la *VM3*, la part représentée par la pelouse naturelle diminue de 14% et la classe sol nu augmente de 13%.

La part de la forêt reste relativement stable pour chaque résultat. De manière générale, les fréquences obtenues pour les *VP* 'occupation du sol' et les *VM* confirment les observations de terrain et que **la majorité des 'mouvements de versant' sont localisés sous forêts** (au minimum 60% entre *CLC1* et *VM1* et au maximum 89% entre *CRIGE* et *VM1*). Les résultats pour les *VP* disponibles confirment aussi que leur résolution et leur nomenclature ne sont pas adaptées pour différencier les *VM2* et *VM3*. **Paradoxalement, les résultats des croisements entre les *VM2* et *VM3* et la *BD ALARMc* ne sont pas en mesure d'apporter une information supplémentaire, malgré une nomenclature adaptée et une résolution plus précise.**



Types de 'mouvements de versant' : TC = Translationnel complexe ; TSB = Translationnel superficiel de berge ; TSI = Translationnel superficiel d'interfluve ; RB = Rotationnel de berge ; RI = Rotationnel d'interfluve ; GBB = Glissement banc sur banc.

Fig. 5.7. Fréquence des différentes VP issues des BD 'occupation du sol' disponibles (CLC1, CLC2, CRIGE) selon la VM (les chiffres sont exprimés en %).



Types de 'mouvements de versant' : TC = Translationnel complexe ; TSB = Translationnel superficiel de berge ; TSI = Translationnel superficiel d'interfluve ; RB = Rotationnel de berge ; RI = Rotationnel d'interfluve ; GBB = Glissement banc sur banc.

Fig. 5.8. Fréquence des différentes VP issues des BD 'occupation du sol' (BD ALARM et BD ALARMc) produites spécifiquement pour selon la VM (les chiffres sont exprimés en %).

Pour conclure, l'analyse des fréquences avec les VP 'occupation du sol' disponibles et les VM indique les grandes tendances d'occupation du sol pour chaque type de '*mouvements de versant*'. Les résultats acquis avec les VP produites spécifiquement permettent d'améliorer cette vision, **particulièrement pour la reconnaissance des mouvements banc sur banc et dans une moindre mesure pour les mouvements translationnels superficiels d'interfluve**. Cependant, il est difficile de tirer bénéfice de ces statistiques descriptives. **La connaissance du terrain reste un des atouts essentiels pour choisir la VP 'occupation du sol' et les classes associées qui seront utilisées ultérieurement dans notre recherche.**

2.3. Comparaison entre VM et VP produites spécifiquement pour une information

Les analyses avec des VP produites spécifiquement pour une information concernent les variables '**géologie**' et '**hydrologie**'. Parmi les VP 'géologie' ont été distingués : **la lithologie, le type de formations superficielles, l'épaisseur des formations superficielles et le pendage relatif des strates apparentes**. Pour les VP 'hydrologie' seuls **les cours d'eau** sont retenus ; les zones humides étant produites à titre indicatif (cf. *Chap. 4 § 4*). Les différents croisements confirment les observations de terrain : les résultats précisent les relations entre certaines classes de VP et certains '*mouvements de versant*'.

2.3.1. Les VP 'géologie'

2.3.1.1. La lithologie

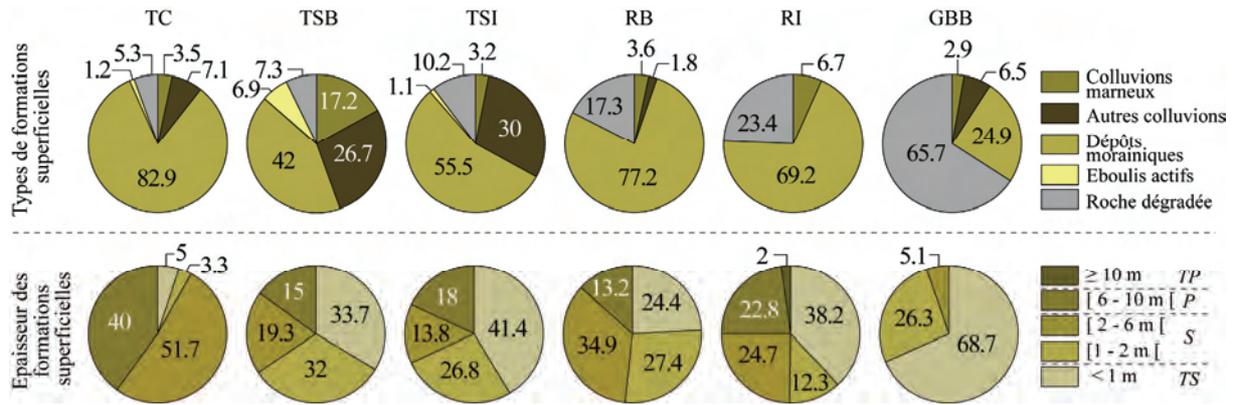
Les fréquences entre les différents types de lithologie et la VM1 indiquent que la majorité des '*mouvements de versant*' sont situés sur une lithologie de type marneuse (77.5% sur des marnes noires et 17.4% sur les autres marnes). Avec les VM2 et VM3, deux groupes de '*mouvements de versant*' se distinguent :

- (i) Ceux qui se **déclarent sur les flyschs et les marnes** avec les mouvements translationnels superficiels de berge et les mouvements banc sur banc et, dans une moindre mesure, les mouvements translationnels superficiels d'interfluve ;
- (ii) Ceux qui **se localisent essentiellement sur les marnes**, avec les mouvements translationnels complexes et les mouvements rotationnels (de berge et d'interfluve).

2.3.1.2. Les formations superficielles

Pour les formations superficielles, **quelques regroupements de classes sont effectués afin de simplifier l'analyse**. Tel est le cas pour les classes de **colluvions sur marnes et sur flyschs** (la distinction pouvant s'effectuer par superposition avec la VP lithologie). Sont regroupés aussi les **deux types de moraines et les colluvions morainiques** aux caractéristiques géotechniques similaires. Les fréquences obtenues avec la VM1 montrent une prédominance des '*mouvements de versant*' sur des dépôts morainiques (81.7%). **L'introduction de la VM2 permet de scinder en trois groupes les '*mouvements de versant*' :**

- (i) Les '*mouvements de versant*' localisés **essentiellement sur les dépôts morainiques** dont les mouvements translationnels complexes (82.9%), les mouvements rotationnels de berge (77.2%) et les mouvements rotationnels d'interfluve (69.2%) ;
- (ii) Les '*mouvements de versant*' localisés **à la fois sur les dépôts morainiques, sur des dépôts de pente** (colluvions de toute nature) et **parfois sur la roche dégradée**. Ce groupe est constitué par les mouvements translationnels superficiels ;
- (iii) Les '*mouvements de versant*' localisés **essentiellement sur la roche dégradée et parfois dans les dépôts morainiques** comme les mouvements banc sur banc.



Types de 'mouvement de versant' : TC = Translationnel complexe ; TSB = Translationnel superficiel de berge ; TSI = Translationnel superficiel d'interfluves ; RB = Rotationnel de berge ; RI = Rotationnel d'interfluves ; GBB = Glissement banc sur banc ; TS = Très superficiel ; S = Superficiel ; P = Profond ; TP = Très profond.

Fig. 5.9. Distribution des différentes formations superficielles et de leurs épaisseurs pour la VM3 selon les différents types de 'mouvements de versant' (les chiffres sont exprimés en %).

Le croisement avec la VM3 accentue ces fréquences et confirme cette distribution, avec l'élimination de certaines classes de VP où peuvent s'accumuler la masse en déplacement (par exemple les dépôts torrentiels, Fig. 5.9).

2.3.1.3. Les épaisseurs de formations superficielles

Les classes d'épaisseur des formations superficielles sont distribuées équitablement pour les classes supérieures à 1 m et inférieures à 10 m. Les trois classes [1-2 m] ; [2-6 m] ; [6-10 m[sont représentées respectivement par 20.9%, 32.6% et 25% des phénomènes (Fig. 5.9). L'introduction de VM2 permet de différencier deux groupes de 'mouvements de versant' avec (i) les **mouvements très superficiels** (mouvements translationnels superficiels et les mouvements banc sur banc) et, (ii) les **autres types de 'mouvements de versant'**. Lorsque le croisement est effectué avec VM3, il est alors possible de distinguer trois groupes avec :

- (i) Les '**mouvements de versant** très superficiels avec les mouvements banc sur banc (80.3% sont inférieurs à 1 m d'épaisseur) ;
- (ii) Les '**mouvements de versant** très superficiels et/ou superficiels avec les mouvements translationnels superficiels (pour les translationnels superficiels de berge et d'interfluve, 80 et 83% sont respectivement inférieurs à 6 m d'épaisseur) et rotationnels (pour les rotationnels de berge et d'interfluve, 86% et 74% sont respectivement inférieurs à 6 m d'épaisseur) ;
- (iii) Les '**mouvements de versant** superficiels et/ou profonds avec les mouvements translationnels complexes (42.7% et 32.6%, respectivement dans les classes d'épaisseur [2-6 m[et [6-10 m[).

2.3.1.4. Le pendage des strates

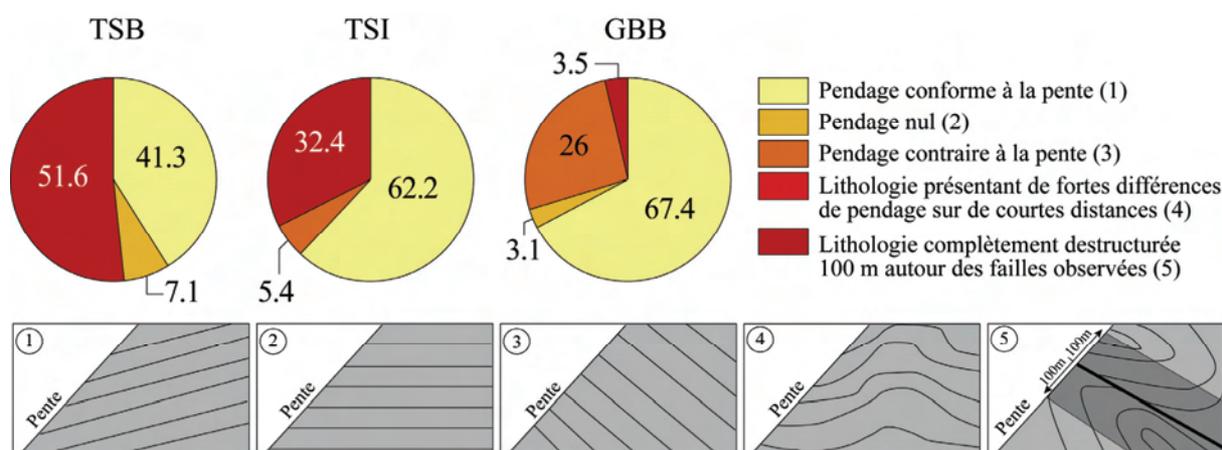
La VP 'pendage des strates' ne prend en compte que les secteurs où les surfaces de sol sont nues et où le pendage est visible. Les différentes classes choisies au chapitre 4 sont rappelées dans la figure 5.10. Pour les VM2 et VM3, les mouvements translationnels complexes ou les mouvements rotationnels sont exclus de l'analyse, car les différentes classes de pendage ne couvrent pas plus de 5 % de leur surface (trop faible d'un point de vue statistique). Pour les

autres types de 'mouvements de versant', les classes 1 (pendage conforme à la pente), 3 (pendage nul) et 5 (lithologie complètement déstructurée) sont le plus souvent représentées (Fig.5.10).

On distingue deux groupes avec :

- (i) Les 'mouvements de versant' majoritairement localisés sur les secteurs dont les **pendages sont conformes à la pente** avec les glissements banc sur banc (67.4%) et les mouvements translationnels superficiels d'interfluve (62.2%) ;
- (ii) Les mouvements translationnels superficiels de berge localisés **indifféremment** sur les secteurs dont les **pendages sont conformes à la pente** (41.3%) et les secteurs dont la lithologie est '**complètement déstructurée**' (51.6%) ;

Les différents croisements présentent des résultats semblables entre la VM2 et la VM3.



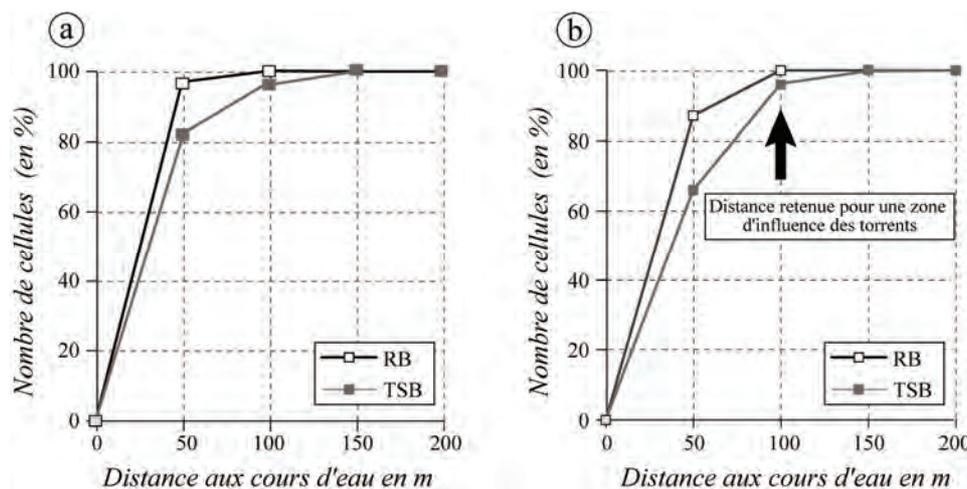
Types de 'mouvements de versant' : TSB = Translationnel superficiel de berge ; TSI = Translationnel superficiel d'interfluve ; GBB = Glissement banc sur banc.

Fig. 5.10. Distribution des classes de pendage pour VM3 pour trois types de 'mouvements de versant' (les chiffres sont exprimés en %).

2.3.2. La VP' hydrologie'

Dans le cadre d'analyse de la susceptibilité, la variable 'hydrologie' est utilisée de manière à connaître la distance maximum d'influence du sapement basal des cours d'eau. Dans cet objectif, une série de zones 'tampons' (buffer) est créée. Pour cette recherche, une zone tampon est produite tous les 50 m. Chaque VM est ensuite croisée avec chaque zone tampon pour obtenir une courbe de fréquence cumulée mettant en rapport la surface des phénomènes prise en compte et les distances par rapport à chaque zone tampon. Les 'mouvements de versant' retenus sont les mouvements de berge (translationnels de berge et rotationnels de berge).

La figure 5.11 présente les résultats obtenus pour les VM2 et VM3. Un palier s'observe sur chaque courbe à partir de 100 m de distance. Cette tendance étant plus accentuée avec VM3, une distance aux cours d'eau de 100 m sera retenue pour les futures analyses.



a. Fréquences cumulées avec VM2. b. Fréquences cumulées avec VM3. TSB = Mouvement translationnel superficiel de berge ; RB = Mouvement rotationnel de berge.

Fig. 5.11. Fréquences cumulées des distances aux cours d'eau en mètres.

2.4. Synthèse et conclusion

Les analyses des VP pour les 'mouvements de versant' (totalité des phénomènes, VM1 ; par type de phénomènes, VM2 ; pour la zone d'ablation par type de phénomène ; VM3) confirment les observations effectuées sur le terrain tout en apportant une information quantitative plus précise sur certaines relations entre les VP et les 'mouvements de versant'. Les résultats indiquent que :

- (i) **Pour les VM, la zone d'ablation (VM3) permet de mieux différencier les classes de VP des qui apparaissent les plus influentes** (et de ce fait d'identifier certains facteurs de prédispositions), pour analyser la susceptibilité des terrains aux instabilités de versant. Cette variable (VM 3, e.g. zone d'ablation) tient compte du type de 'mouvements de versant' et de la zone d'initiation supposée ;
- (ii) **Des tendances statistiques** se dégagent avec les VP disponibles pour certaines classes. Mais, dans la majorité des cas, **leur résolution initiale lisse l'information et leur nomenclature trop complexe et non adaptée nuit à une bonne analyse**. Il est alors difficile de discerner des classes qui peuvent être considérées comme influentes ;
- (iii) Enfin, **une vision experte des 'mouvements de versant' est indispensable** pour choisir certaine VP surtout lorsque le site d'étude possède des types de **mouvements particuliers**. Cet aspect justifie une approche géomorphologique et une bonne connaissance du terrain d'autant plus vraie à cette échelle de travail (1/10 000^{ème}).

3. CONCLUSION DU CHAPITRE 5

Au terme de ce chapitre, nous pouvons établir que la stratégie fondée sur des analyses des fréquences confirme les observations de terrain et les critères retenus pour établir la typologie de 'mouvements de versant' définie au chapitre 3. De plus, cette stratégie a permis de choisir parmi les différentes VM et les différentes VP (disponibles et produites spécifiquement, Tab. 5.4), celles qui sont les plus adaptées à notre recherche. **Pour la suite de nos travaux ne seront retenus que les zones d'ablation des 'mouvements de versant' et les variables produites spécifiquement** ; les autres variables apparaissent peu ou pas adaptées à notre échelle de travail.

Dans ce cadre, pour les approches retenues, chaque type de 'mouvements de versant' sera associé à un jeu de VP de base. Ces résultats ne constituent qu'une approche préliminaire de la définition des VP les plus influentes pour chaque type de phénomène. Il faut analyser plus finement les relations entre les classes de VP et la VM. En d'autres termes, **les différentes approches retenues dans cette recherche offrent la possibilité de retenir des règles expertes et mathématiques pouvant être transposées à des sites montagneux complexes aux caractères morphologiques similaires.** Cet aspect sera traité dans la troisième partie de ce travail.

Tab. 5.4. Variables de base retenues pour chaque type de 'mouvement de versant'.

*** = 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	VP de base
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'.	<ul style="list-style-type: none"> • Gradient de pente (MNT BB) • Aspect des versants (MNT BB) • Occupation du sol (BD ALARMc) • Lithologie • Formations superficielles • Pendage apparent
Glissement translationnel (translational slide)	Superficiel de berge (debris-slide)***^d	Déclenchement dans les moraines parfois à l'interface avec la roche sous-jacente, escarpement semi-circulaire ou rectangulaire. Localisé le long des berges de torrent.	<ul style="list-style-type: none"> • Gradient de pente (MNT BB) • Aspect des versants (MNT BB) • Occupation du sol (BD ALARMc) • Lithologie • Formations superficielles • Epaisseur des formations superficielles • Pendage apparent • Distance au cours d'eau
	Superficiel d'interfluve (debris-slide)**	Déclenchement dans les moraines parfois à l'interface avec la roche sous-jacente : escarpement semi-circulaire ou rectangulaire, localisé sur les interfluves.	<ul style="list-style-type: none"> • Gradient de pente (MNT BB) • Aspect des versants (MNT BB) • Occupation du sol (BD ALARMc) • Lithologie • Formations superficielles • Epaisseur des formations superficielles • Pendage apparent
	Complexe (complex translational slide)***	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.	<ul style="list-style-type: none"> • Gradient de pente (MNT BB) • Occupation du sol (BD ALARMc) • Lithologie • Formations superficielles • Epaisseur des formations superficielles
Glissement rotationnel (rotational slide)	De berge (rotational slide)**	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. Localisé le long des berges de torrent.	<ul style="list-style-type: none"> • Gradient de pente (MNT BB) • Aspect des versants (MNT BB) • Occupation du sol (BD ALARMc) • Formations superficielles • Epaisseur des formations superficielles • Distance au cours d'eau
	D'interfluve (rotational slide)***	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.	<ul style="list-style-type: none"> • Gradient de pente (MNT BB) • Aspect des versants (MNT BB) • Occupation du sol (BD ALARMc) • Formations superficielles • Epaisseur des formations superficielles

PARTIE III : ANALYSE DE LA SUSCEPTIBILITE ET DE L'ALEA PAR APPROCHES PROBABILISTES

Le **troisième partie** présente les différentes approches et analyses de la susceptibilité et de l'aléa.

Le **sixième chapitre** se concentre sur les approches qualitative et semi-quantitative de la susceptibilité. Pour ces deux approches sont retenues une **méthode d'analyse dite 'experte'** fondée sur les règles préconisée par le PPR et une **méthode d'analyse spatiale semi-quantitative fondée sur des règles par Logiques floues** assez peu utilisées actuellement. Les caractéristiques de chaque méthode et la stratégie de calage (sur un site représentatif) et de validation (sur le versant *Ubac*) pour l'approche par *Logiques floues* sont successivement présentées. Les résultats des analyses de sensibilité et des meilleures simulations sont ensuite discutés, évalués et validés par rapport à la carte de susceptibilité 'experte' considérée comme document de référence.

Le **septième chapitre** est consacré à l'approche quantitative de la susceptibilité. Deux modèles d'analyse spatiale fondée sur des méthodes probabilistes sont **testés : un modèle bivarié fondé sur le théorème de Bayes (Théorie de l'Evidence ou Weight of Evidence)** et un **modèle multivarié fondé sur les régressions logistiques (Weighted Logistic Regression)**. Une stratégie de calage et de validation spécifique est présentée. Fondée sur une succession d'analyses statistiques multidimensionnelles, cette analyse exploratoire permet d'identifier les variables les plus influentes pour chaque type de phénomène. Les résultats de chaque méthode sont ensuite comparés entre eux puis à ceux obtenus par l'approche semi-quantitative et évalués et validés par rapport à la carte 'experte'. Au final, le meilleur modèle d'analyse spatiale est utilisé pour être validé localement sur le versant '*Adret*' puis transposé sur le bassin versant du *Moulin*. Les avantages et les limites de cette stratégie sont ensuite discutés.

Dans le **huitième chapitre**, une cartographie de l'aléa au 1/10 000^{ème} reposant sur un rapprochement entre modèle probabiliste et modèle physique est proposée. Un modèle à base physique (*STARWARS*, modèle hydrologique couplé à un modèle de stabilité de pente) a été sélectionné pour déterminer les seuils de déclenchement de certains types de '*mouvements de versant*' caractéristiques du bassin de *Barcelonnette*. Une stratégie spécifique utilisant un site de calage dont les phénomènes recensés sont bien connus (dates de déclenchement, occurrence temporelle...) est décrite. Les paramètres les plus influents sont discutés. Cette approche étant limitée spatialement, une tentative de transposition est effectuée en intégrant les zones de forte susceptibilité aux '*mouvements de versant*' simulées par le modèle probabiliste bivarié. Les avantages et les limites des deux approches de cartographie de l'aléa expérimentées dans ce travail sont ensuite discutés.

Les jeux de variables prédictives de base (*i.e.* les facteurs de prédisposition, *VP*) pour chaque variable à modéliser (*i.e.* les '*mouvements de versant*', *VM*) ont été définis dans le chapitre 5. A partir de ces derniers, il s'agit désormais d'établir des règles de cartographie de la susceptibilité qui soient simples et aisément transposables sur des sites aux conditions environnementales proches. Plusieurs approches ont été définies dans le chapitre 1 et trois ont été choisies : une approche qualitative dite '*expert*' ; une approche semi-quantitative sur la base de règles d'analyse par *Logiques floues* ; une approche statistique comparant une méthode bivariée et une méthode multivariée. L'objectif de ce chapitre est :

- (i) **D'élaborer une carte '*expert*' de susceptibilité** pour le bassin de *Barcelonnette*. Cette carte doit utiliser des règles simples valables aussi bien pour le versant *Ubac* que le versant *Adret*. En outre, cette carte doit pouvoir servir de document de référence pour valider les différents modèles spatiaux utilisés, en l'absence de tout autre document (*i.e.* cartographie *PPR* sur l'ensemble du site d'étude) ;
- (ii) **De tester une stratégie de cartographie par approche semi-quantitative fondée sur les *Logiques floues***. Cette stratégie doit être utilisable pour les six types de '*mouvements de versant*', et doit permettre de réduire la subjectivité liée aux approches qualitatives.

Ce chapitre est scindé en deux sections. La première section décrit la démarche experte de cartographie de la susceptibilité en s'appuyant sur des exemples issus de notre expérience. La seconde section expose les différentes règles de combinaison de *VP* par *Logiques floues*. Les résultats obtenus sont confrontés à la carte '*expert*'. Les avantages et les limites de la stratégie sont ensuite exposés en conclusion.

1. CARTOGRAPHIE 'EXPERT' : UNE DEMARCHE ADAPTEE AU BASSIN DE BARCELONNETTE

La cartographie '*expert*' est réalisée en appliquant la procédure réglementaire utilisée pour la réalisation des *Plans de Prévention des Risques* (MATE/METL, 1999). Cette carte '*expert*', relevant du jugement de la personne qui cartographie, est une synthèse interprétative des facteurs de prédisposition des phénomènes, intégrant également les informations disponibles sur les facteurs déclenchants. Sa construction nécessite une vision large de la zone à cartographier en identifiant des secteurs aux caractéristiques environnementales homogènes. Ainsi, la cartographie morphodynamique présentée au chapitre 2 prend toute son importance, constituant l'un des documents de base de l'analyse.

Cette section présente, d'abord les variables (*VM* et *VP*) retenues pour élaborer la carte '*expert*' et les différentes règles associées. Puis pour illustrer notre démarche, des exemples de la carte '*expert*' obtenue sont présentés, en insistant particulièrement sur certains secteurs sujets à discussion, et où des difficultés d'interprétation ont été rencontrées.

1.1. Démarche adoptée

Pour obtenir des règles aisément utilisables sur le versant *Ubac* et sur le versant *Adret*, les caractéristiques à retenir ont été simplifiées. Pour les VM, l'information retenue est dérivée de la cartographie morphodynamique. Pour les VP, trois types de niveaux d'information sont utilisées parmi celles énumérées au chapitre 5 : (i) le gradient de pente, (ii) l'occupation du sol, (iii) les formations superficielles. Les caractéristiques retenues sont d'abord exposées ci-après puis les différentes règles retenues sont détaillées.

1.1.1. Les caractéristiques retenues

1.1.1.1. Pour les VM 'mouvements de versant'

Pour une cartographie 'expert' de la susceptibilité aux 'mouvements de versant', les phénomènes peuvent être déterminés par plusieurs caractéristiques : type, extension, épaisseur, volume, vitesse, intensité, activité et occurrence temporelle (Flageollet, 1989 ; MATE/METL, 1999).

Toutes ces caractéristiques ont été introduites dans la base de données 'mouvements de versant', chacune avec sa marge d'incertitude compte tenu des informations disponibles et des moyens mis en œuvre. Compte tenu de la diversité des 'mouvements de versant' inventoriés, et du manque de précision sur certaines caractéristiques, celles retenues en priorité sont (Tab. 6.1) : les types de phénomènes, leurs extensions et leurs activités. Ces caractéristiques ont fait l'objet d'une analyse de qualité (Chap. 3). La profondeur des 'mouvements de versant' découle de la typologie élaborée dans ce même chapitre 3.

Tab. 6.1. Caractéristiques retenues pour les 'mouvements de versant'.

Type de 'mouvement de versant'	Extension	Activité	Épaisseur
<ul style="list-style-type: none"> • Translationnel complexe • Translationnel superficiel de berge • Translationnel superficiel d'interfluve • Rotationnel de berge • Rotationnel d'interfluve • Banc sur banc 	<ul style="list-style-type: none"> • Petit (< 0.004 km²) • Moyen ([0.004 km²-0.02 km²]) • Grand (> 0.02 km²) 	<ul style="list-style-type: none"> • Actif • Latent • Dormant 	<ul style="list-style-type: none"> • Très superficiel (< 1m) • Superficiel ([1-2 m]) • Profond ([2-6 m]) • Très profond (> 6 m)

Les autres caractéristiques (vitesse, volume, intensité et occurrence temporelle - périodes de retour), n'ayant fait l'objet d'aucune analyse de leur qualité ou de mesures particulières *in situ*, sont données seulement à titre informatif. Elles permettent d'avoir une certaine vision de la gravité des dégâts potentiels sur les infrastructures.

1.1.1.2. Les facteurs explicatifs pris en compte

Le gradient de pente est la première VP retenue. Pour une carte 'expert', le scientifique considère souvent que la valeur de la pente conditionne le type de 'mouvements de versant'. Par exemple, pour le bassin de *Barcelonnette*, les glissements translationnels complexes (superficiels et profonds) et les glissements translationnels superficiels d'interfluve ne se déclenchent que pour les pentes moyennes à fortes alors que les glissements translationnels superficiels de berge et les glissements banc sur banc se déclenchent majoritairement sur les pentes fortes (Tab. 6.2). La multiplicité des 'mouvements de versant' inventoriés, de leur classes de gradient de pente associées et des changements de gradient de pente sur de courtes distances rendent difficiles une cartographie homogène et claire. Dans le cas de ces mouvements gravitaires, nous avons considéré que plus la pente était forte, plus la susceptibilité pouvait être forte. Le tableau 6.3 présente le niveau de susceptibilité pouvant être associé à trois classes de gradient de pente retenues.

Tab. 6.2. Analyse qualitative du gradient de pente associé à chaque type de 'mouvement de versant'.

- = association nulle ; + = association moyenne ; ++ = association forte ; +++ = association très forte.

Gradient de pente	Types de 'mouvements de versant'					
	Translational complexe	Translational superficiel de berge	Translational superficiel d'interfluve	Rotationnel de berge	Rotationnel d'interfluve	Banc sur banc
< 5°	-	-	-	-	-	-
[5°-10°[+	+	+	++	++	+
[10°-15°[+	+	+	+++	+++	+
[15°-20°[+++	++	++	+++	++	+
[20-25°[+++	+++	+++	+++	++	++
[25-30°[+++	+++	+++	++	++	+++
[30-35°[+++	+++	+++	+	+	+++
[35-40°[++	+++	+++	+	+	+++
[40-45°[+	++	++	+	+	+++
≥ 45°	+	++	+	+	+	+++

Tab. 6.3. Classes de gradient de pente retenues pour la cartographie 'expert'.

Gradient de pente (en degré)	Susceptibilité pouvant être considérée comme :
< 5°	Nulle.
[5°-10°[	Faible.
≥ 10°	Moyenne à forte suivant les cas, la classe retenue est sujette à discussion.

L'occupation du sol est la deuxième VP retenue. Cette VP correspond à la BD ALARMc présentée dans les chapitres 4 et 5. Les classes sans relation directe avec les 'mouvements de versant' ne sont pas directement intégrées à l'analyse experte (surface en eau comme les plans d'eau, les cours d'eau, les alluvions ou les classes concernant les territoires artificialisés comme le bâti, les zones industrielles, les secteurs d'extraction de minéraux, etc.). Les autres classes sont regroupées en cinq grandes familles suivant les règles simplificatrices utilisées par Malet *et al.* (2006). Le tableau 6.4 présente les différentes classes d'occupation du sol associées pour l'analyse experte. Ces classes sont fondées sur la nomenclature définie lors du projet Alarm.

Tab. 6.4. Classes d'occupation du sol retenues pour la cartographie 'expert'.

Catégorie	BD ALARMc	Classes retenues pour la cartographie 'expert'	Susceptibilité pouvant être considérée comme :
<i>Forêts et milieux naturels</i>	Forêts de conifères denses	Forêts	Faible à moyenne suivant la pente, car secteurs considérés comme participant à la stabilité du versant. Forte en cas de fortes humidités (arrivées d'eau liées à l'abandon et à la détérioration des systèmes de drainage et/ou d'irrigation) car l'effet positif de la forêt sur la stabilité du versant est réduit ou annulé.
	Forêts de conifères de densité moyenne à faible		
	Forêts de feuillus		
	Pelouses alpines et pâturages naturels	Pelouses alpines	Faible à forte suivant la pente, car secteurs considérés comme peu ou pas drainés.
<i>Territoires agricoles</i>	Pâtures	Pâtures	Faible à forte suivant la pente car secteurs considérés comme moins entretenus que les zones cultivées. Secteurs parfois associés à une déprise et à un abandon des systèmes de drainage et/ou d'irrigation pouvant favoriser l'instabilité du versant.
	Cultures permanentes	Cultures permanentes	Nulle à faible car secteurs considérés comme étant drainés et entretenus.
<i>Affleurements rocheux</i>	Roches nues ou sols nus Marnes noires	Affleurements rocheux	Forte car secteurs sans protection du sol.

Enfin, pour chaque classe retenue, nous avons interprété un degré de dégradation du sol en la considérant comme un facteur aggravant pour les secteurs actuellement stables (sans '*mouvements de versant*'). Par exemple, nous avons considéré qu'un sol nu (i) s'érodait plus facilement qu'un sol végétalisé et (ii) augmentait l'infiltration des eaux dans les dépôts morainiques. Par conséquent, sur un sol en pâture, aux endroits très dégradés, la probabilité d'observer un phénomène est augmentée : la susceptibilité sera ainsi considérée comme plus élevée (Tab. 6.5).

Tab. 6.5. Dégradation de l'occupation du sol retenue pour les secteurs sans 'mouvements de versant'.

Catégorie	Description	Extrait de 400 m de côté environ
Dégradation très forte	Le sol est complètement à nu : aucune protection végétale n'est visible. Généralement, il s'agit de secteurs ravinés dans les marnes noires ou de secteurs proches des crêtes armées dans une autre lithologie.	
Dégradation forte	Les sols comportent des traces continues de ravinement, la roche en place est largement visible. Des secteurs de végétation (souvent de la forêt) protègent des espaces interstitiels.	
Dégradation moyenne	Les traces de dégradation ne sont pas encore éparses mais forment des ensembles continus plus réguliers. Elles s'observent sur les pelouses et les pâtures.	
Dégradation faible	Les traces de dégradation sont éparses et discontinues. Elles s'observent sur les pelouses et les pâtures.	
Sans dégradation	Correspond le plus souvent aux aires cultivées et entretenues régulièrement.	

Les types de **formations superficielles** et les épaisseurs associées sont la troisième VP choisie. Nous considérons qu'elles conditionnent, en partie, les types de '*mouvements de versant*' qui peuvent se déclarer dans les secteurs actuellement stables. Par exemple, les glissements rotationnels d'interfluves ne se localiseront que sur des dépôts morainiques de plus de 2 m d'épaisseur, alors que les glissements banc sur banc se déclareront majoritairement sur une lithologie dégradée, parfois sur des dépôts de pente de faible épaisseur.

Pour obtenir des secteurs plus homogènes facilitant l'analyse, des classes de formations aux caractéristiques géotechniques proches ont été regroupées, ou bien, certaines classes sans relation directe avec des '*mouvements de versant*' n'ont pas été prises en compte. Le tableau 6.6 présente les différents types de formations superficielles et les types de '*mouvements de versant*' associés.

Tab. 6.6. Classes de formations superficielles retenues pour la cartographie 'expert'.

Degré d'association : - = faible ; + = moyen ; ++ = fort ; +++ = très fort. Nd = Non déterminée ; Npc = Non pris en compte.

Formations superficielles			Type de ' <i>mouvements de versant</i> ' et degré d'association					
Classes	Classes retenues pour la cartographie 'expert'	Epaisseur	TC	TSB	TSI	RB	RI	GBB
<i>Moraine stable</i>	Dépôts morainiques	≤ 1 m	-	++	+	-	-	-
<i>Moraine remaniée</i>		] 1 – 2 m]	-	+++	+++	-	-	-
		] 2 – 6 m]	++	++	++	++	-	-
<i>Colluvions morainiques</i>		] 6 – 10 m]	+++	-	-	++	+++	-
		> 10 m	+	-	-	+	++	-
<i>Colluvions issues de flyschs ou calcaires</i>	Colluvions autres	≤ 1 m	-	++	+	-	-	++
		] 1 – 2 m]	-	++	+	-	-	+
<i>Colluvions marneuses ou marnes dégradées</i>	Colluvions marneuses ou marnes dégradées	≤ 1 m	-	++	+	-	-	++
		] 1 – 2 m]	-	++	+	-	-	+
<i>Eboulis vifs</i>	Eboulis vifs	Nd	-	-	-	-	-	+
<i>Eboulis fixes</i>	Npc	Npc	Npc	Npc	Npc	Npc	Npc	Npc
<i>Formations alluviales et torrentielles</i>	Npc	Npc	Npc	Npc	Npc	Npc	Npc	Npc
<i>Formations lacustres</i>	Npc	Npc	Npc	Npc	Npc	Npc	Npc	Npc
<i>Autres</i>	Roche dégradée	≤ 1 m	-	+	+	-	-	+++

1.1.2. Règles expertes et caractéristiques des classes de susceptibilité

La démarche adoptée consiste à déterminer quatre niveaux de susceptibilité (susceptibilité nulle, faible, modérée, forte) puis à les digitaliser sous SIG. Les polygones représentent des '*facettes*' aux caractéristiques environnementales proches. A chaque '*facette*' est associée plusieurs informations (classes de VP utilisées) regroupées dans une base de données. Ainsi, pour chaque polygone présentant un niveau de susceptibilité, le type de '*mouvements de versant*', son activité et son occurrence temporelle, lorsque l'information est disponible, sont mentionnés. Plusieurs types de '*mouvements de versant*' peuvent être associés dans un polygone. Pour les zones actuellement stables (sans '*mouvements de versant*' déclarés), la classe de susceptibilité est évaluée par analogie avec d'autres zones aux caractéristiques similaires exigeant alors une vision large de la zone cartographiée. Le tableau 6.7 présente les différentes règles adoptées pour chaque classe de susceptibilité.

Cette carte est produite à échelle humaine, c'est à dire pour une période de 100 ans (MATE/MATL, 1999). De ce fait, les polygones ont été réalisés en tenant compte de la possibilité d'extension amont-aval et latérale des zones initiales. Les limites ont été fixées suivant (i) les observations diachroniques des '*mouvements de versant*' par photographies aériennes (période de

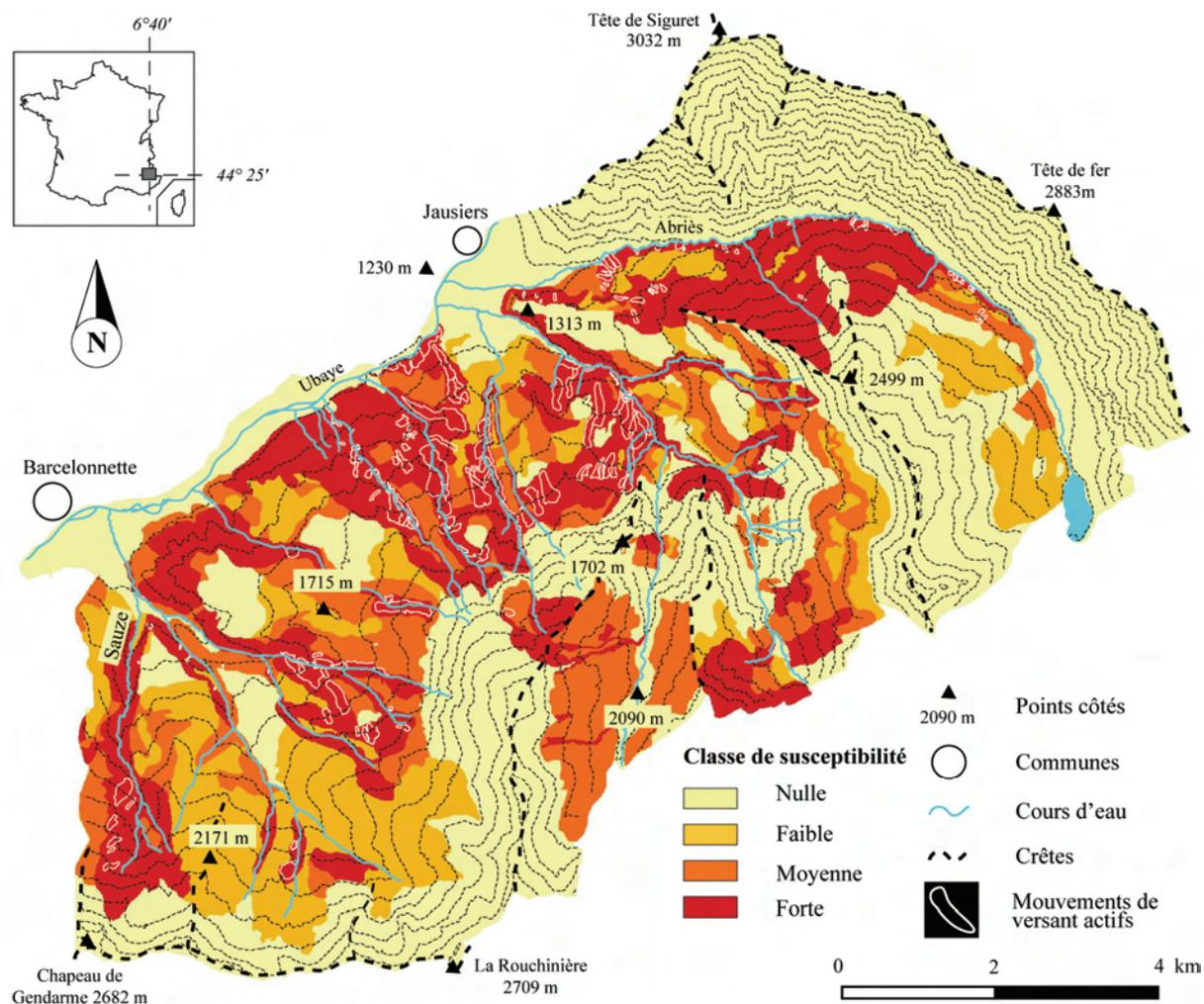
1956 à 2000) et des informations issues de la base de données '*mouvements de versant*' et suivant (ii) les ruptures de pentes et/ou les changements d'occupation du sol.

Tab. 6.7. Classes de susceptibilité expertes et règles associées (Malet et al., 2006).

<i>Susceptibilité</i>	<i>Définition</i>
S1 : <i>susceptibilité nulle</i>	Aucune possibilité de déclenchement d'un '<i>mouvement de versant</i>'. Les conditions environnementales locales contribuent à renforcer la stabilité des terrains (association d'un gradient de pente nul à faible [0-10°], de terrains agricoles en cultures permanentes, entretenus et drainés).
S2 : <i>susceptibilité faible</i>	Possibilité faible de déclenchement d'un '<i>mouvement de versant</i>'. Les conditions environnementales locales (association d'un gradient de pente faible à modéré [10-20°], de pelouses ou d'espaces forestiers entretenus) sont faiblement favorables au déclenchement de glissements de terrain. Néanmoins, l'abandon de l'entretien des terrains ou la présence locale de rupture de pente pourraient conduire à la déstabilisation. Le principe est donc à la prudence notamment concernant la mise en place d'aménagements futurs.
S3 : <i>susceptibilité modérée</i>	Possibilité modérée de déclenchement d'un '<i>mouvement de versant</i>'. Les conditions environnementales locales sont favorables au déclenchement de glissements de terrain (association d'un gradient de pente modéré à fort [20°-25°], de présence de ruptures de pentes et de bossellements, de pelouses ou d'espaces forestiers non entretenus, d'une absence ou d'un mauvais état des dispositifs de drainage, de sols faiblement dégradés). Les projets de construction sont possibles mais devront être précédés d'études géotechniques détaillées pour définir les travaux de confortement obligatoires (fondations, renforcement des structures, drainage, reboisement).
S4 : <i>susceptibilité forte</i>	Possibilité forte de déclenchement d'un '<i>mouvement de versant</i>'. Les conditions environnementales locales sont très favorables au déclenchement de ' <i>mouvements de versant</i> ' (association d'un gradient de pente fort >25°, de sols fortement dégradés ou ravinés, de l'absence de végétation ou de forêts très mal entretenues). Des glissements très actifs sont présents. Aucun aménagement n'est possible.

1.2. Résultats

Après une présentation générale de la carte '*expert*' du versant *Ubac*, un exemple de secteur comportant plusieurs classes de susceptibilité, accompagné de la base de données associée est donné. Les différents critères sont détaillés ce qui permet de bien interpréter la méthode utilisée pour la démarche experte. Enfin, plusieurs secteurs particuliers présentant des difficultés d'interprétation et donc sujets à discussion sont décrits. La carte '*expert*' présentée en figure 6.1 est centrée sur le versant *Ubac*. Les surfaces en susceptibilité forte, modérée, et faible représentent respectivement 17.7 km², 5.8 km² et 6.9 km².

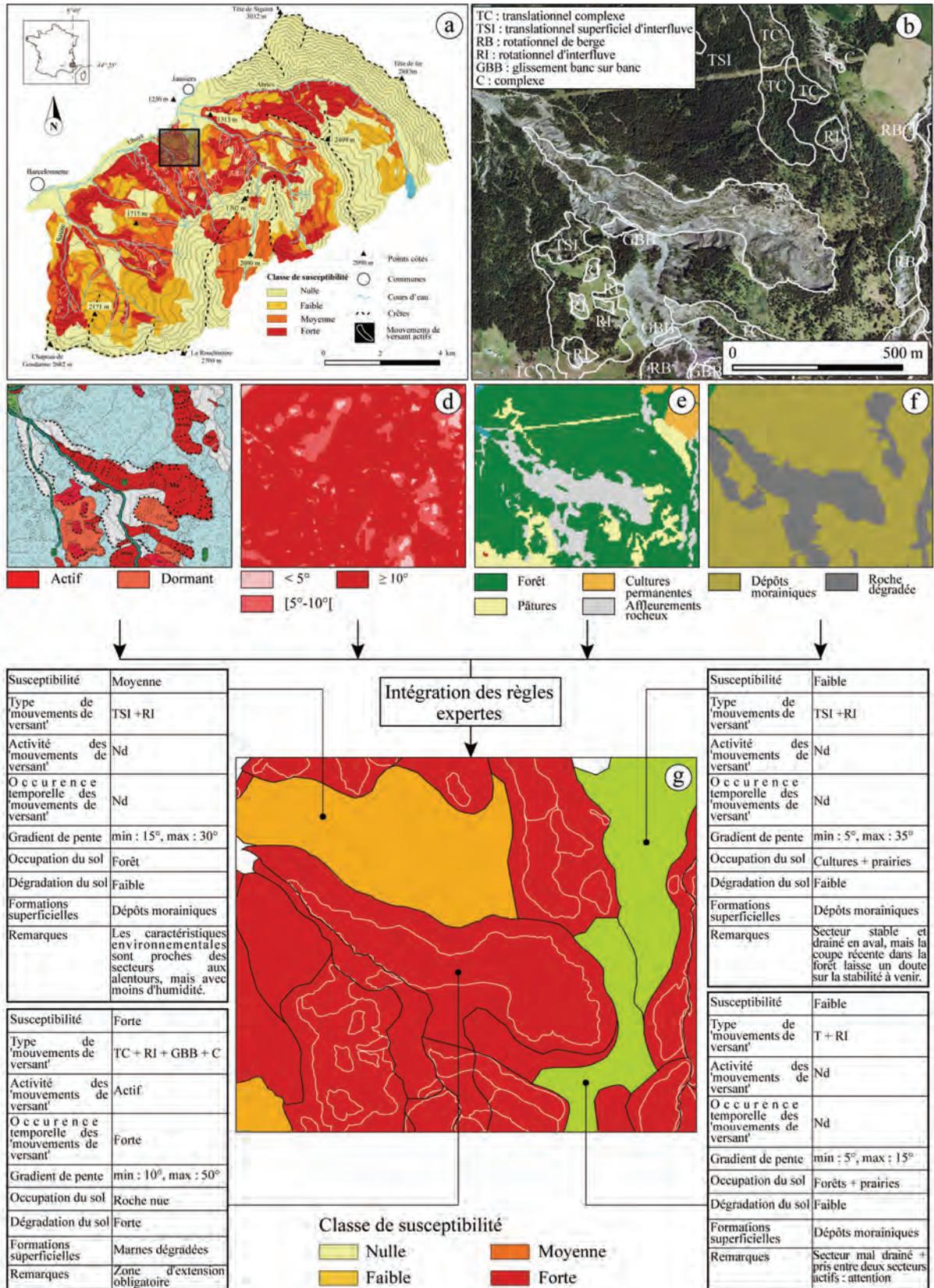


Le versant au Nord de l'Abriès n'est pas représenté car les 'mouvements de versant' s'y déclenchant (écroulements, rock falls) ne sont pas intégrés à notre recherche.

Fig. 6.1. Carte 'expert' (qualitative) des 'mouvements de versant' du versant Ubac.

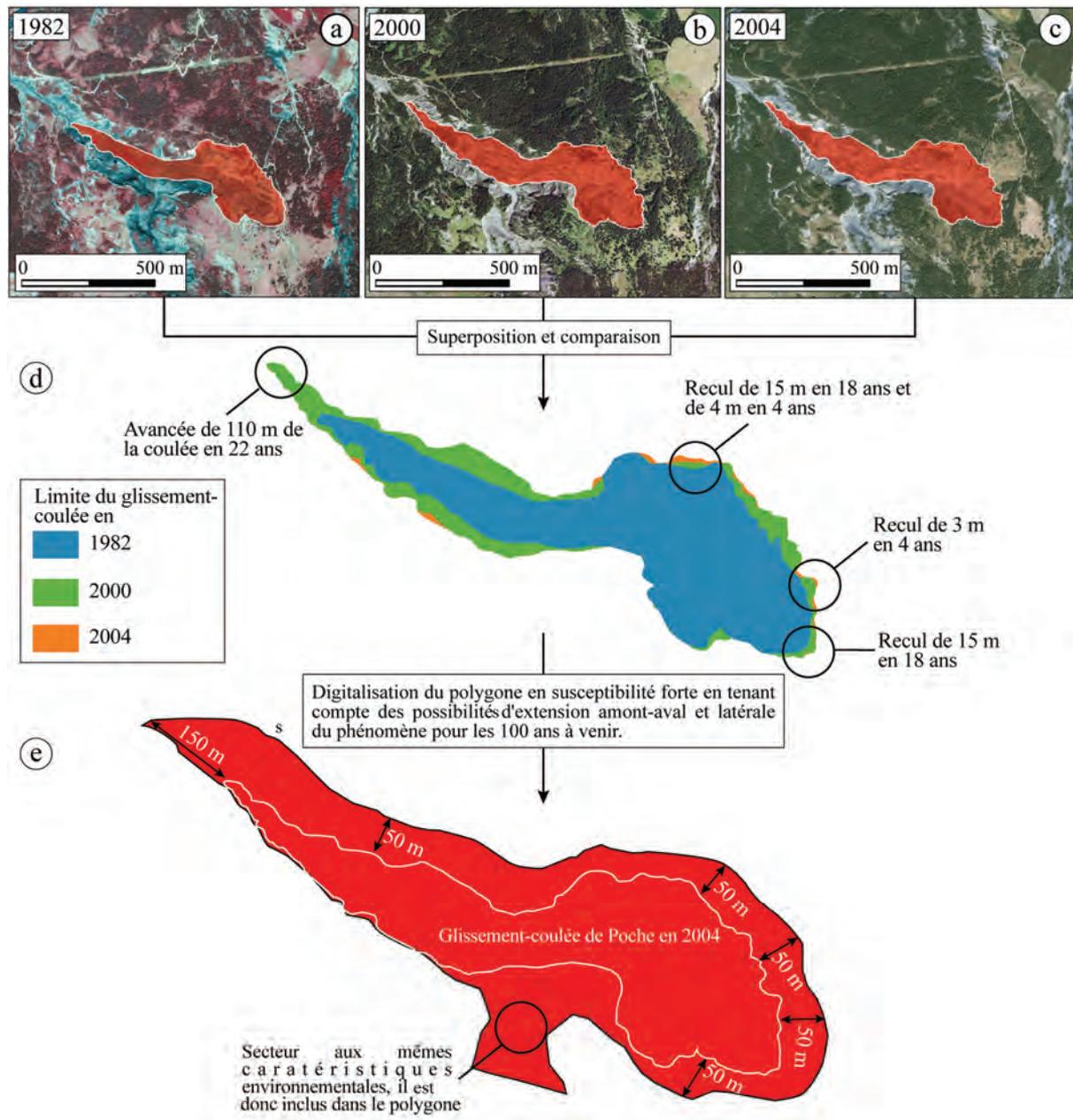
1.2.1. Exemples d'interprétation et base de données associée

La figure 6.2 illustre notre démarche et présente de manière synthétique la base de données associée à chaque polygone. Les extraits des bases de données associés aux polygones renseignent sur la manière dont nous avons considéré chaque paramètre relatif aux VM et aux VP. Pour chaque polygone, les différents types de phénomènes que nous avons estimés comme susceptibles de s'y déclencher sont mentionnés. Enfin, la possibilité d'extension amont-aval et latérale des 'mouvements de versant' actuel et actif du secteur se fonde sur l'analyse diachronique des photographies aériennes présentée dans la figure 6.3.



a. Localisation de l'extrait. b. Orthophoto (IGN, 2000) et type de 'mouvements de versant'. c. Activité des phénomènes. d. Gradient de pente. e. Occupation du sol. f. Formations superficielles. g. Exemples de polygones finaux et base de données associée. Nd = Non déterminée.

Fig. 6.2. Exemples illustrant la démarche adoptée pour la cartographie 'expert' du bassin de Barcelonnette.



a. Orthophoto de 1982 (IGN, 1982). b. Orthophoto de 2000 (IGN, 2000). c. Orthophoto de 2004 (IGN, 2004). d. Comparaison des différentes limites du glissement-coulée entre 1982 et 2004. e. Secteur en susceptibilité forte, intégrant les possibilités d'extension du glissement-coulée pour les 100 ans à venir.

La localisation du glissement-coulée se trouve sur la figure 6.2.

Fig. 6.3. Intégration de l'extension amont-aval et latérale des 'mouvements de versant' pour la cartographie 'expert' : exemple du glissement-coulée de Poche (glissement complexe et composite).

1.2.2. Les secteurs à fortes incertitudes : exemples d'interprétation(s) délicate(s)

Les exemples de zonage de la susceptibilité présentés précédemment résultent d'une interprétation avec peu de doute : les caractéristiques des différentes classes de susceptibilité affectées à chaque polygone laissent peu de place à une longue interrogation et discussion. Il s'agit des secteurs connaissant de multiples 'mouvements de versant' dont l'activité et l'occurrence temporelle sont bien connus dans le bassin de Barcelonnette. Cependant, la majorité des secteurs

cartographiés a nécessité une phase interprétative plus complexe et délicate conduisant à des hésitations sur le niveau de susceptibilité à leur accorder. **Dans ce cas, nous avons toujours retenu le principe de précaution (allant dans le sens de la sécurité) avec une justification reposant sur les observations de terrain.** Quelques exemples sont présentés dans le tableau 6.8 ci-dessous.

Tab. 6.8. Exemples de secteurs de la carte 'expert' sujets à discussion.

Niveau de susceptibilité	Description	Extrait de 1000 m de côté environ
Fort	<p>Secteur 1 : Secteur comportant des 'mouvements de versant' translationnels complexes et rotationnels actifs. Les pentes sont moyennes à fortes (entre 15° et 40°), l'occupation du sol est fortement dégradée. Les phénomènes étant très actifs la forêt participe assez peu à la stabilisation du sol. Mal drainé, le secteur est humide en permanence et des fissures sont observées en amont des mouvements actifs. Ainsi, une bande de sécurité assez large de 400 m a été fixée pour tenir compte de l'extension des évolutions futures.</p>	
Fort	<p>Secteur 2 : Secteur comportant des glissements translationnels superficiels actifs aux fréquences moyennement élevées. Les pentes sont fortes (> 40°) et avec un tel gradient de pente, la forêt participe peu à la stabilisation du sol. Des traces de dégradation du sol sont fréquentes. Les mesures de mitigation établies le long de la route allant vers Enchastrayes renforcent l'idée d'une susceptibilité forte sur ce versant. Une bande de sécurité d'une vingtaine de mètres est définie pour tenir compte d'une éventuelle extension d'une instabilité en l'absence de travaux de mitigation efficaces.</p>	
Moyen	<p>Secteur 3 : Secteur actuellement stable. Les pentes sont faibles à moyennes (10° à 25°). Plusieurs types de versant ont été retenus : Les versants sous forêts, le long des torrents, sont essentiellement composés de dépôts morainiques peu épais et sont soumis à un sapement constant : c'est pourquoi ils ont été considérés d'un niveau de <i>susceptibilité moyenne</i>. Les versants en pâture, le long du torrent, où la dégradation du sol est fréquente. Par exemple, à l'est, des petits glissements translationnels se sont déjà produits. Le sapement basal associé à une certaine probabilité de petits glissements superficiels nous a conduit à mettre ce secteur en <i>susceptibilité moyenne</i> et <i>non pas en susceptibilité forte</i> car les glissements sont de faible ampleur. Le versant le long de la route est cartographié en <i>susceptibilité moyenne</i>. Malgré l'absence de traces d'activité actuelle ou passée, mais pour attirer l'attention sur la stabilité à long terme du déblai de la route (avec murs de soutènement). Stabilité qui pourrait évoluer en fonction des conditions d'entretien des terrains à l'amont.</p>	
Moyen	<p>Secteur 4 : Au nord, malgré des pentes assez faibles, le secteur est cartographié en <i>susceptibilité moyenne</i> car les conditions topographiques et d'occupation du sol sont similaires à celles où se localise un glissement translationnel complexe (glissement entretenu par la fuite d'un drain abandonné). Le principe a donc été double : appliquer un niveau par analogie avec des zones jugées de susceptibilité moyenne situées en aval aux conditions environnementales identiques et adopter une bande de sécurité. Au sud, les glissements rotationnels sont dormants ou fossiles. Comme leur activité est nulle, le secteur est déclaré en <i>susceptibilité moyenne</i>. Ceci est justifié par des pentes moyennes, des traces de dégradation du sol multiples, une pâture non entretenue avec des drains abandonnés. Une réactivation est fortement possible si les conditions topographiques ou de drainage venaient à changer.</p>	

Niveau de susceptibilité	Description	Extrait de 1000m de côté environ
Faible	<p>Secteur 5 : le secteur ne comporte pas de 'mouvements de versant', il est considéré en <i>susceptibilité faible mais non nulle</i> car les pentes sont majoritairement moyennes (10-20°) et de nombreuses ruptures de pente sont visibles. Des travaux d'aménagement, engagés sans précaution particulière, pourraient entraîner une probable déstabilisation des terrains. L'abandon des cultures et du drainage pourrait contribuer à la déstabilisation des terrains. Le principe est donc à la prudence et il convient d'apporter une attention aux aménagements futurs.</p>	
Faible	<p>Secteur 6 : le secteur ne comporte pas de 'mouvements de versant', les pentes sont moyennes à fortes (> 15°), la forêt et la pelouse (avec aménagement de pistes de ski) recouvrent ce secteur. Des traces de dégradation sont observées, probablement provoquées par la pratique du ski. Ce secteur est entretenu et surveillé pour le ski, et assez bien drainé contrairement aux versants adjacents. Il est considéré en <i>susceptibilité faible</i> mais il faut mentionner que des changements d'utilisation du sol et des travaux sans précaution préalable (étude de faisabilité) pourraient être préjudiciables à la stabilité.</p>	
Nul	<p>Secteur 7 : ce secteur ressemble fortement au secteur n°5 (susceptibilité faible) mais est signalée en <i>susceptibilité nulle</i> car les pentes sont beaucoup plus faibles (80% de la zone < à 5°).</p>	
Nul	<p>Secteur 8 : secteur aux pentes inférieures à 5° : la susceptibilité est donc considérée comme nulle.</p>	

1.3. Conclusion

La démarche utilisée pour la cartographie 'expert' de la susceptibilité a repris les grands principes édictés pour la réalisation des cartes d'aléa des *Plans de Prévention des Risques* en France (MATE/MATL, 1999). L'utilisation de multiples 'facettes' homogènes (sous la forme de polygone) complique quelquefois la lecture de la carte pour les non-initiés. Toutefois, associées à la base de données, ces 'facettes' permettent de bien différencier les différents secteurs et leur niveau de susceptibilité selon les types de 'mouvements de versant' prévisibles. Ce choix est clairement

orienté dans le but de comparer cette carte 'expert' avec celles obtenues avec les modèles d'analyses spatiales, calées et validées pour chaque type de phénomène.

Notons enfin, que si nous avons choisi de garder l'appellation 'carte expert de susceptibilité' pour permettre la comparaison avec les autres documents que nous produirons pour la suite avec les autres méthodes, il s'agit d'une véritable 'carte d'aléa' au sens étendu et accepté dans la procédure PPR.

2. CARTOGRAPHIE PAR APPROCHE SEMI-QUANTITATIVE

Parmi les méthodologies semi-quantitatives de cartographie de la susceptibilité des versants aux 'mouvements de versant', celles utilisant la théorie des *Logiques floues* sont de plus en plus utilisées (van Westen *et al.*, 2003, 2006). Si elles sont considérées comme **flexibles et fiables** (Chap. 1, § 1.3) elles n'en possèdent pas moins des **inconvénients majeurs, ce qui nécessite la définition d'une stratégie adaptée pour :**

- (i) **Quantifier les valeurs d'appartenance** (*VA*, *i.e.* les pondérations) des classes de *VP* particulièrement lorsqu'une forte incertitude entoure la relation d'une classe de *VP* avec les phénomènes ;
- (ii) **Combiner ou intégrer les différentes valeurs d'appartenance** des classes de *VP* ;
- (iii) **Comparer les résultats de différents modèles spatiaux** obtenus par différents moteurs d'inférence (règles combinatoires).

Le but de cette section est de **définir une stratégie de cartographie semi-quantitative** de la susceptibilité aux 'mouvements de versant'. Cette dernière doit être **fondée à la fois sur :**

- (i) **La connaissance experte du site et des phénomènes** afin d'en prendre en compte toutes les particularités ;
- (ii) **Les relations des phénomènes et des *VP***, pour faciliter la transposition de la méthode dans un environnement similaire.

Pour répondre à ces objectifs, la stratégie élaborée pour définir les valeurs d'appartenance, le moteur d'inférence et l'évaluation des modèles spatiaux par *Logiques floues* est d'abord décrite. Sur la base de travaux précédents (Thiery *et al.*, 2006), cette stratégie est adaptée aux six types de 'mouvements de versant'. Puis, les résultats acquis sur un site de calage représentatif du versant *Ubac* du bassin de *Barcelonnette*, seront présentés pour définir les meilleures valeurs d'appartenance pour chaque classe de *VP* retenues.

2.1. Stratégie de cartographie

Les méthodologies d'analyses spatiales utilisant les *Logiques floues* nécessitent de répondre à une hypothèse générale *H* (Zadeh, 1965, Bonham-Carter, 1994, Carranza et Hale, 2001).

Pour l'analyse et la cartographie de la susceptibilité aux 'mouvements de versant', la proposition résumant cette hypothèse *H* est définie par *H* : « les zones sont favorables à des mouvements de versant ». Pour répondre à *H* la stratégie d'analyse est divisée en trois étapes avec : (i) une première étape définissant des valeurs d'appartenance (*VA*) pour chaque classe de *VP*, (ii) une seconde étape centrée sur le moteur d'inférence (détermination des règles de combinaison optimum entre *VP*) et (iii) une troisième étape relative à l'évaluation des meilleurs résultats. Ces étapes sont résumées dans la figure 6.4.

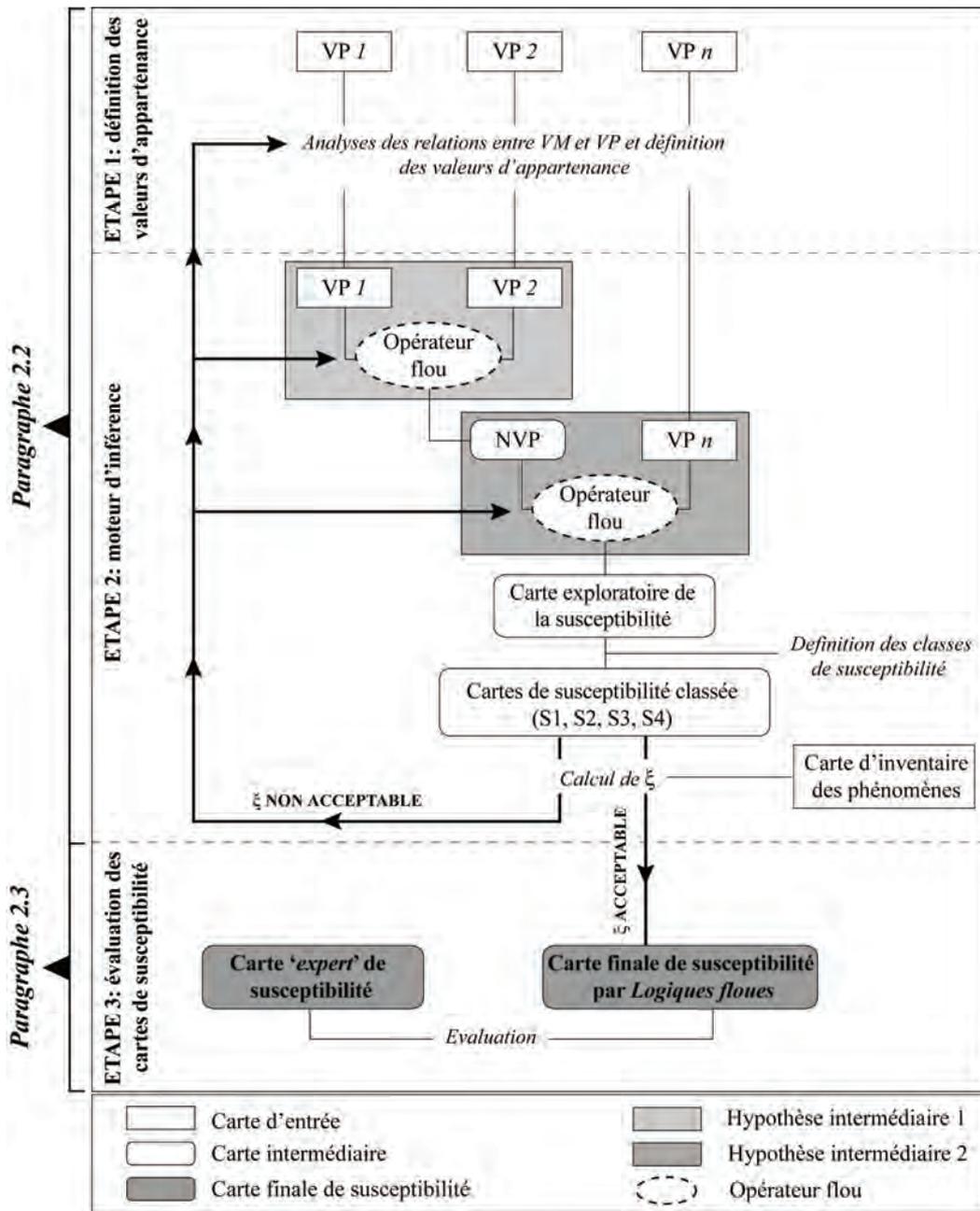


Fig. 6.4. Méthodologie utilisée pour l'évaluation de la susceptibilité aux 'mouvements de versant' par méthode semi-quantitative fondée sur la théorie des Logiques floues (adapté de Thiery et al., 2006).

2.1.1. Analyse de sensibilité pour les valeurs d'appartenance

La première étape est centrée sur la détermination des valeurs d'appartenance (VA) à assigner à chaque classe de VP. Les VA reposent sur le concept de fonction d'appartenance exprimé sur une échelle continue de 0 (non inclus dans la fonction d'appartenance) à 1 (entièrement inclus dans la fonction d'appartenance). Ainsi, la fonction d'appartenance s'exprime par :

$$\mu_A(x) : X \rightarrow [0, 1] \quad [\text{Eq. 6.1}]$$

où x est la variable, μ_A est la fonction d'appartenance et X est l'univers donné dans un intervalle $[0, 1]$ (Zadeh, 1965).

La VA attribuée exprime l'ordre de la classe de la VP dans la fonction d'appartenance. Une valeur faible attribuée exprimera une faible appartenance à la fonction. Inversement, une valeur forte attribuée exprimera une forte appartenance à la fonction. Pour les variables nominales, les VA ne sont pas linéaires mais relatent une vision subjective pour répondre à H. Ainsi, pour la VP 'lithologie', la VA d'une classe s'exprime par l'équation 6.2 :

$$I = \{(x, \mu_i(x)) \mid x \in X\} \quad [\text{Eq. 6.2}]$$

où $\mu_i(x)$ définit la VA de la classe x pour répondre à l'hypothèse H.

Les valeurs d'appartenance (VA) sont généralement assignées de manière subjective en fonction de la connaissance du site et des phénomènes observés (Chi *et al.*, 2002) ou plus objectivement en fonction des relations entre VM et VP (Chung et Fabbri, 2001 ; Ercanoglu *et al.*, 2002).

Des méthodologies qui mêlent algorithmes statistiques fondées sur des théories de Bayes et théories des ensembles flous sont proposées (Cheng et Agterberg, 1999 ; Porwal *et al.*, 2003). Elles sont appliquées avec succès pour la recherche de sites minéralogiques, mais elles sont encore trop exploratoires pour pouvoir être reproductible avec fiabilité pour les phénomènes géomorphologiques complexes, comme les 'mouvements de versant'.

De ce fait, **dans le cadre de cette recherche, la connaissance experte du site et les relations statistiques entre VM et VP** (déterminées dans le chapitre 5) **servent de base pour obtenir les VA de chaque classe de VP**. Plusieurs règles sont déterminées pour définir un jeu optimum de VA adaptée à chaque type de 'mouvements de versant' :

- (i) Les classes de VP disposant d'une très faible relation avec les 'mouvements de versant' ne sont pas intégrées dans les analyses ;
- (ii) Considérant qu'on ne peut être certain qu'une classe de VP soit complètement favorable ou défavorable à l'occurrence d'un 'mouvement de versant', **chaque VA est comprise entre 0.1 et 0.9. Seule la classe de gradient de pente compris entre 0° et 5° est affectée par une VA de 0** car aucune zone d'ablation n'y est observée et d'un point de vue géomécanique, les différents types de 'mouvements de versant' retenus ne peuvent s'y déclencher ;
- (iii) **Si un doute subsiste sur les résultats des relations statistiques et notre vision experte**, notamment lorsqu'une VM est caractérisée par une seule classe de VP (Thiery *et al.*, 2006), une analyse de sensibilité sur la VA est effectuée.

Par exemple, les 'mouvements de versant' observés dans leur grande majorité ont leur zone d'ablation sous forêts. Pourtant, d'un point de vue 'expert', il est admis que les forêts jouent un rôle stabilisateur notamment sur les mouvements superficiels (Greenway, 1987). Ainsi, en se fondant essentiellement sur les fréquences calculées dans le chapitre 5, les autres classes d'occupation du sol devraient avoir une influence négligeable sur la localisation des 'mouvements de versant'. Or d'un point de vue 'expert', nous considérons que certaines classes comme les pâtures (zones en déprise agricole et parfois mal drainées) peuvent être influentes ;

- (iv) L'analyse de sensibilité est alors effectuée en assignant itérativement des VA de 0.1 à 0.9 pour les classes douteuse, mais tout en gardant des valeurs constantes pour les quatre VP considérées comme indispensables³⁸ à une analyse de susceptibilité aux 'mouvements de versant'. Le tableau 6.9 présente les VP posant problème pour chaque type de 'mouvements de versant'. **L'opérateur utilisé est l'opérateur algébrique PRODUIT** supposant que les valeurs d'appartenance choisies soient présentes

³⁸ Les VP considérées comme indispensables sont : le gradient de pente, la lithologie, les formations superficielles et l'occupation du sol ; Catani *et al.*, 2005).

ensemble pour répondre favorablement à l'hypothèse H^{39} (Bonham-Carter, 1994 ; Carranza et Hale, 2001 ; Thiery *et al.*, 2006 ; Annexe 6.1).

Tab. 6.9. VP utilisées pour l'analyse de sensibilité sur les valeurs d'appartenance.

Type de 'mouvements de versant'	VP posant problème	Classes utilisées pour l'analyse de sensibilité
Translationnels complexes	Occupation du sol	Forêt, pâtures, pelouses naturelles, sol nu
Translationnels superficiels de berge	Lithologie Formations superficielles Occupation du sol	Marnes (tous types) Roche dégradée Forêt, pâtures, pelouses naturelles, sol nu
Translationnels d'interfluve	Occupation du sol	Forêt, pâtures, pelouses naturelles, sol nu
Rotationnels de berge	Lithologie Formations superficielles Occupation du sol	Marnes (tous types) Dépôts morainiques Forêts, pelouses naturelles, sol nu
Rotationnels d'interfluve	Occupation du sol	Forêts
Banc sur banc	Formations superficielles	Colluvions, dépôts morainiques, marnes dégradées

2.1.2. Définition du moteur d'inférence

La **seconde étape** de la stratégie est fondée sur l'intégration des meilleures valeurs d'appartenance dans le modèle toujours dans l'objectif de répondre à l'hypothèse H^{39} . Cette étape s'effectue en deux temps :

- (i) Dans un premier temps, **par l'évaluation d'une hypothèse intermédiaire H1** combinant **deux VP** ou plus afin d'obtenir **une néo-variable prédictive (NVP)** représentative des VP (facteurs de prédisposition) les plus favorables à la localisation de chaque type de 'mouvements de versant' ;

Par principe, **la NVP augmente le pouvoir prédictif** des cartes obtenues si elle a une signification liée à l'hypothèse H^{39} (*i.e.* signification géologique ou géomorphologique dans notre cas ; Carranza et Hale, 2001 ; Porwal *et al.*, 2003 ; van Westen *et al.*, 2003 ; Thiery *et al.*, 2007) ;

- (ii) Dans un deuxième temps, **par l'évaluation de l'hypothèse intermédiaire H2 qui représente la combinaison de la NVP et d'autres VP non utilisées.** Cette hypothèse renforce les résultats obtenus avec H1.

Pour les hypothèses H1 et H2, chaque opérateur flou est utilisé successivement pour définir le meilleur moteur d'inférence (règle combinatoire, Annexe 6.1). Ainsi, sont testés itérativement les opérateurs OU, ET, SOMME, PRODUIT puis γ (GAMMA). Pour γ représentant une combinaison des opérateurs SOMME et PRODUIT (Zimmerman et Zysno, 1980 ; An *et al.*, 1991 ; Bonham-Carter, 1994), douze valeurs comprises entre 0.1 et 1 sont testées (Annexe 6.1).

Pour chaque itération (combinant H1 et H2), les VA finales sont analysées suivant une courbe cumulative représentant en abscisse, les valeurs d'appartenance combinées et en ordonnée, la surface cumulée du site de recherche. Quatre classes de susceptibilité, correspondant aux quatre classes définies pour la cartographie 'expert', sont définies selon les seuils observés sur la courbe (S1, susceptibilité nulle ; S2, susceptibilité faible ; S3, susceptibilité moyenne ; S4, susceptibilité forte). Les cartes sont ensuite comparées entre elles en :

- (i) **Calculant l'erreur relative (ξ) de la classe de susceptibilité forte** qui exprime le ratio du nombre de cellules représentant VM3 moins le nombre de cellules S4 dans VM3 sur le nombre de cellules représentant VM3, soit :

$$\xi = \frac{o_v - p_v}{o_v} \quad [\text{Eq. 6.3}]$$

³⁹ H = « les zones sont favorables aux mouvements de versant »

où ξ est l'erreur relative, o_v les valeurs observées (*i.e.* le nombre de cellules de VM3) et p_v les valeurs modélisées (*i.e.* le nombre de cellules représentant S4 dans VM3). Les cartes avec une erreur relative (ξ) forte sont éliminées ; celles avec une erreur relative (ξ) faible sont retenues ;

- (ii) **Examinant attentivement la surface occupée par la classe de susceptibilité forte (S4).** Si la surface S4 est considérée comme surreprésentée, la carte est éliminée.

2.1.3. Evaluation des cartes de susceptibilité

La troisième étape de la stratégie consiste à évaluer les meilleures cartes obtenues par cette approche semi-quantitative avec la carte 'expert' (§.1) ; cette dernière pouvant être considérée comme la carte de susceptibilité de référence, en l'absence de tout autre document disponible. Cette évaluation s'effectue grâce à un tableau de contingence, entre les quatre classes de susceptibilité des deux cartes élaborées selon les deux méthodes. Sont calculées successivement : le taux de classement correct (TCC), le taux de classement non correct (TCI), l'indice de sensibilité (SENS), l'indice de spécificité (SPE) et le Kappa K de Cohen (K ; Cohen, 1960 ; Tab. 6.10). Le coefficient de sensibilité et l'indice de Kappa K servent de référence pour notre évaluation :

- (i) **L'indice de sensibilité (SENS)** représente la proportion de cellules correctement classées dans les classes expertes respectives. En ce sens il exprime le **taux de prédiction** de chaque classe de la carte simulée (Begueria, 2006). Plus la valeur est proche de 1, plus le taux de prédiction est bon ;
- (ii) **Le coefficient de Kappa K permet de calculer le degré de concordance (accord)** entre deux cartes de susceptibilité obtenues de manière différentes ; la carte 'expert' étant la carte de base dans notre cas. Comme les calculs de proportions simples (TCC et TCI) ce coefficient tient compte de la prévalence⁴⁰, mais introduit une correction permettant de tenir compte du hasard (au sens probabiliste du terme), autrement dit de la subjectivité (Fielding et Bell, 1997 ; Bergeri *et al.*, 2002). Une valeur de K proche ou égale à 1 signifie un degré de concordance très fort entre le modèle spatial et la carte expert ; dans ce cas, le modèle spatial est considéré comme très bon. Des valeurs de K supérieures à 0.4 signifient un degré de concordance fort ; le modèle spatial est considéré comme bon. Des valeurs inférieures à 0.4 signifient un degré de concordance moyen ou faible ; le modèle spatial est alors rejeté (Fielding et Bell, 1997 ; Thiery *et al.*, 2007).

Tab. 6.10. Statistiques dérivées du tableau de contingence (Cohen, 1960 ; Fielding et Bell, 1997).

N = Nombre de cellules du site d'étude ; a = nombre de cellules correctement classées dans la classe ; b = nombre de cellules non correctement classées dans la classe ; c = nombre de cellules non correctement classées hors classe ; d = nombre de cellules correctement classées hors classe.

Indice	Equation	Signification
Taux de classement correct	$(a + d) / N$	Proportion d'observations correctement classées
Taux de classement non correct	$(b + c) / N$	Proportion d'observations non correctement classées
Sensibilité	$a / (a + c)$	Proportion de cas positifs correctement modélisés
Spécificité	$d / (b + d)$	Proportion de cas négatifs correctement modélisés
Coefficient Kappa (K)	$[(a + d) - (((a + c) (a + b) + (b + d) (c + d))) / N] / [N - (((a + c) (a + b) + (b + d) (c + d)) / N)]$	Proportion de concordance spécifique

⁴⁰ La prévalence est utilisée en général en médecine pour mesurer l'état de santé d'une population à un instant T, pour la classification des modèles spatiaux il exprime la proportion des cellules d'une classe de susceptibilité par rapport au nombre total de cellule de la classe ou de toute classe confondue (Fielding et Bell, 1997).

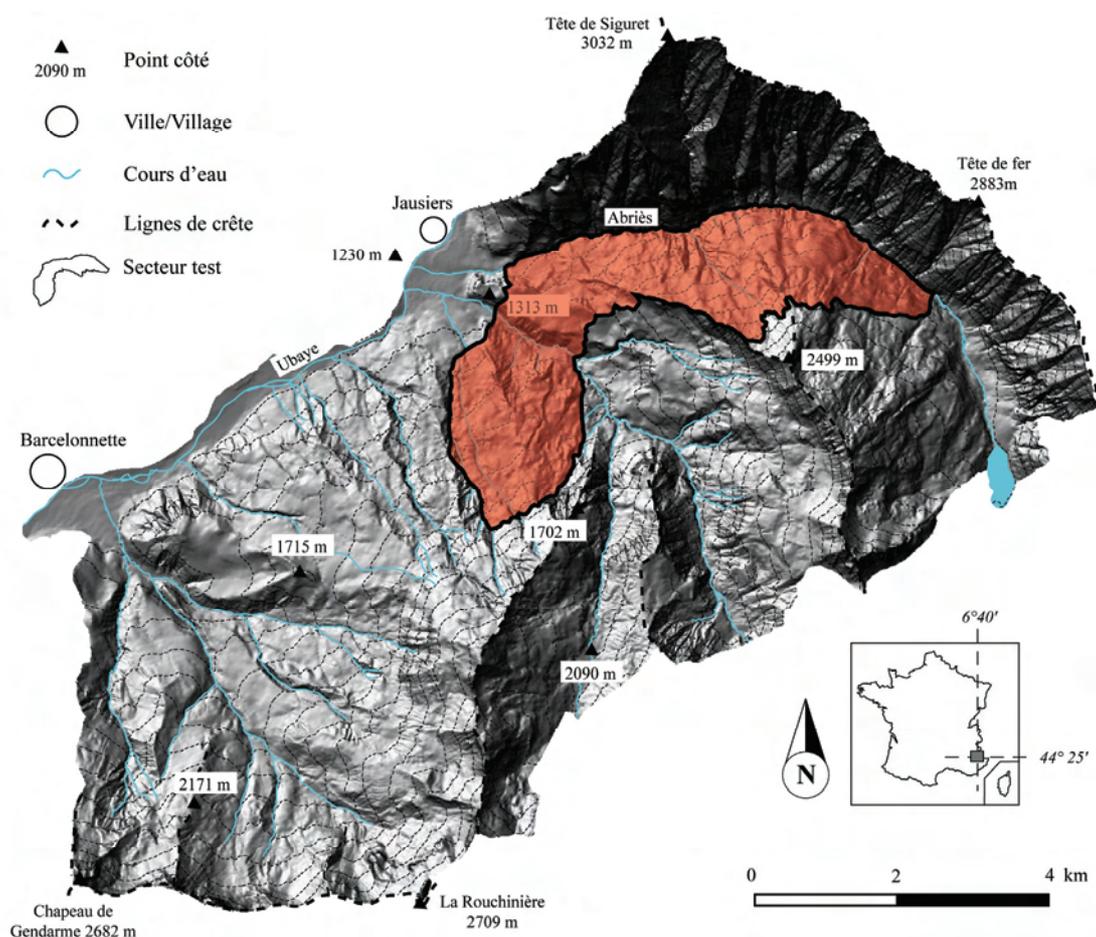


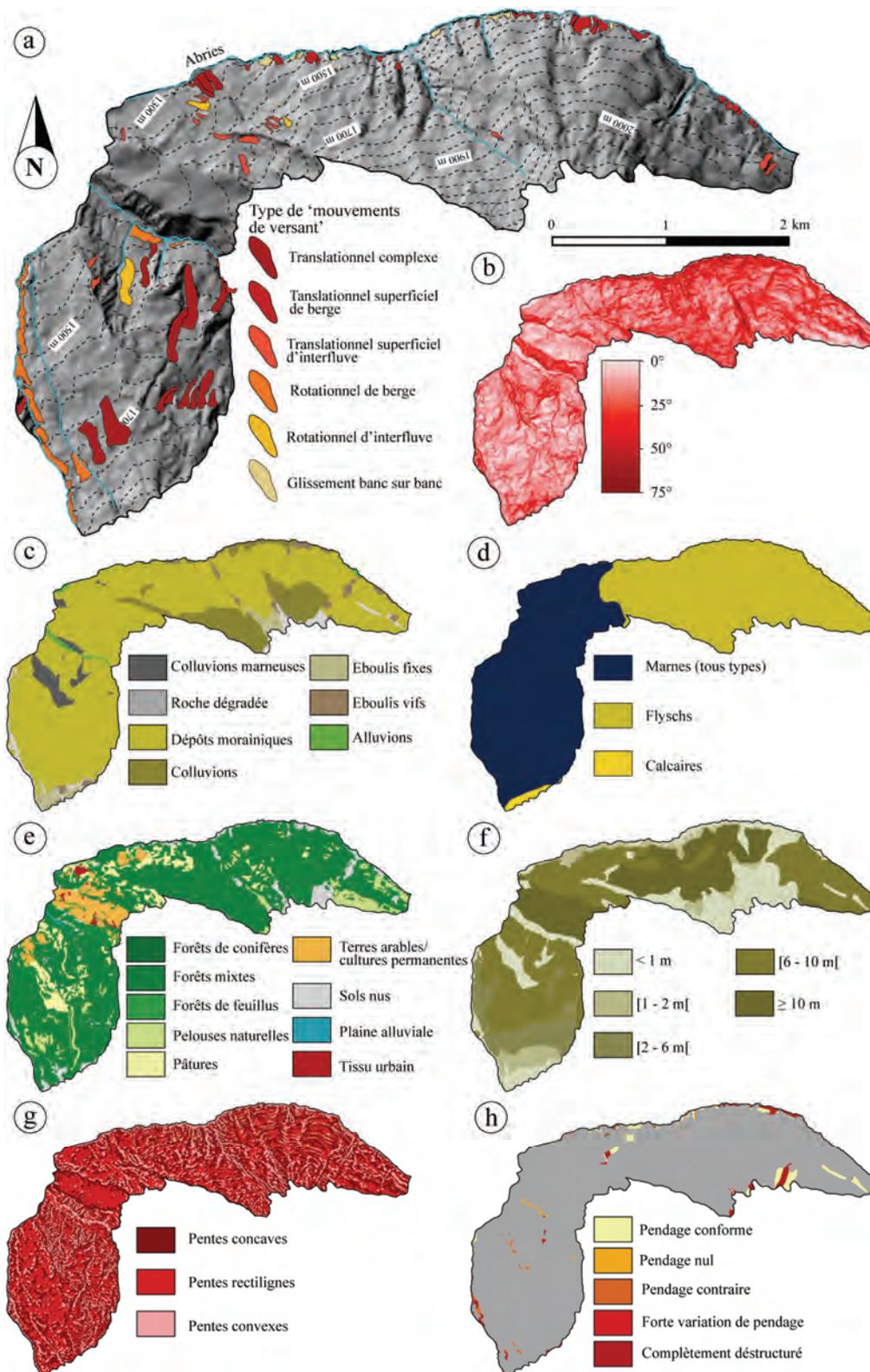
Fig. 6.5. Localisation du secteur test d'application d'une méthode semi-quantitative basée sur la théorie des Logiques floues (versant Ubac, bassin de Barcelonnette).

2.2. Détermination des règles d'analyse : valeurs d'appartenance et moteur d'inférence optimum

Pour obtenir les différentes règles d'analyse par *Logiques floues* pour chaque type de 'mouvements de versant', la recherche est réalisée sur **une zone test représentative du versant Ubac** (Catani *et al.*, 2005 ; Greco *et al.*, 2007 ; Thiery *et al.*, 2006, 2007). Le secteur test, d'une surface de 11 km², est localisé à cheval sur le secteur d'Abriès et le *Secteur intermédiaire* (Fig. 6.5). Il est limité par le torrent de l'Abriès au Nord et par des crêtes armées dans les calcaires résistants et les flyschs à *Helminthoïdes* dans sa partie est. La partie ouest est constituée du secteur de *Bois Noir*. La limite ouest du secteur est constituée par le torrent de la *Frache*. Les hauts de versant présentent des pentes très fortes (> 40°) contrairement aux versants intermédiaires ayant des pentes douces à fortes (entre 5 et 40°). Ces versants sont :

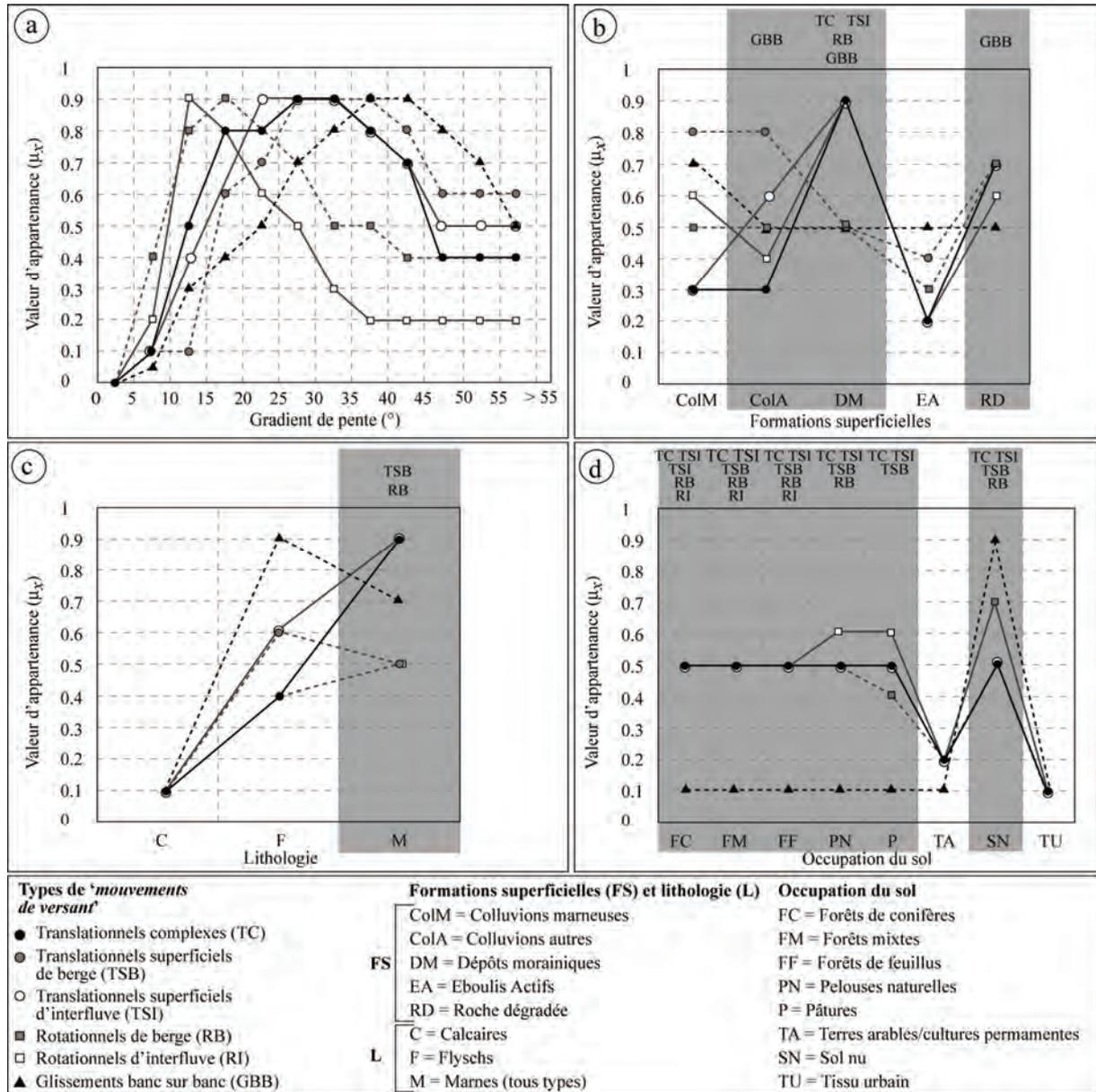
- (i) Entaillés dans les marnes noires *callovo-oxfordiennes* à l'ouest et armés par les flyschs à *Helminthoïdes* dans la partie est ;
- (ii) Recouverts par des dépôts morainiques (77%) et par de la forêt (71%).

Les hauts de versant ne sont pas pris en compte pour les simulations car ils sont jugés non représentatifs des conditions morphologiques pour lesquelles se déclarent les 'mouvements de versant', (Thiery *et al.*, 2007). La figure 6.6 présente les VP sélectionnées pour le secteur test.



a. Vue en relief du secteur test. b. Carte des gradients de pente (°). c. Carte de la nature des formations superficielles. d. Carte de la lithologie. e. Carte de l'occupation du sol. f. Carte des épaisseurs de formations superficielles. g. Carte de l'aspect des pentes. h. Carte du pendage apparent.

Fig. 6.6. Cartes représentant les VP utilisées pour l'analyse semi-quantitative du secteur test (adapté de Thiery et al., 2006).

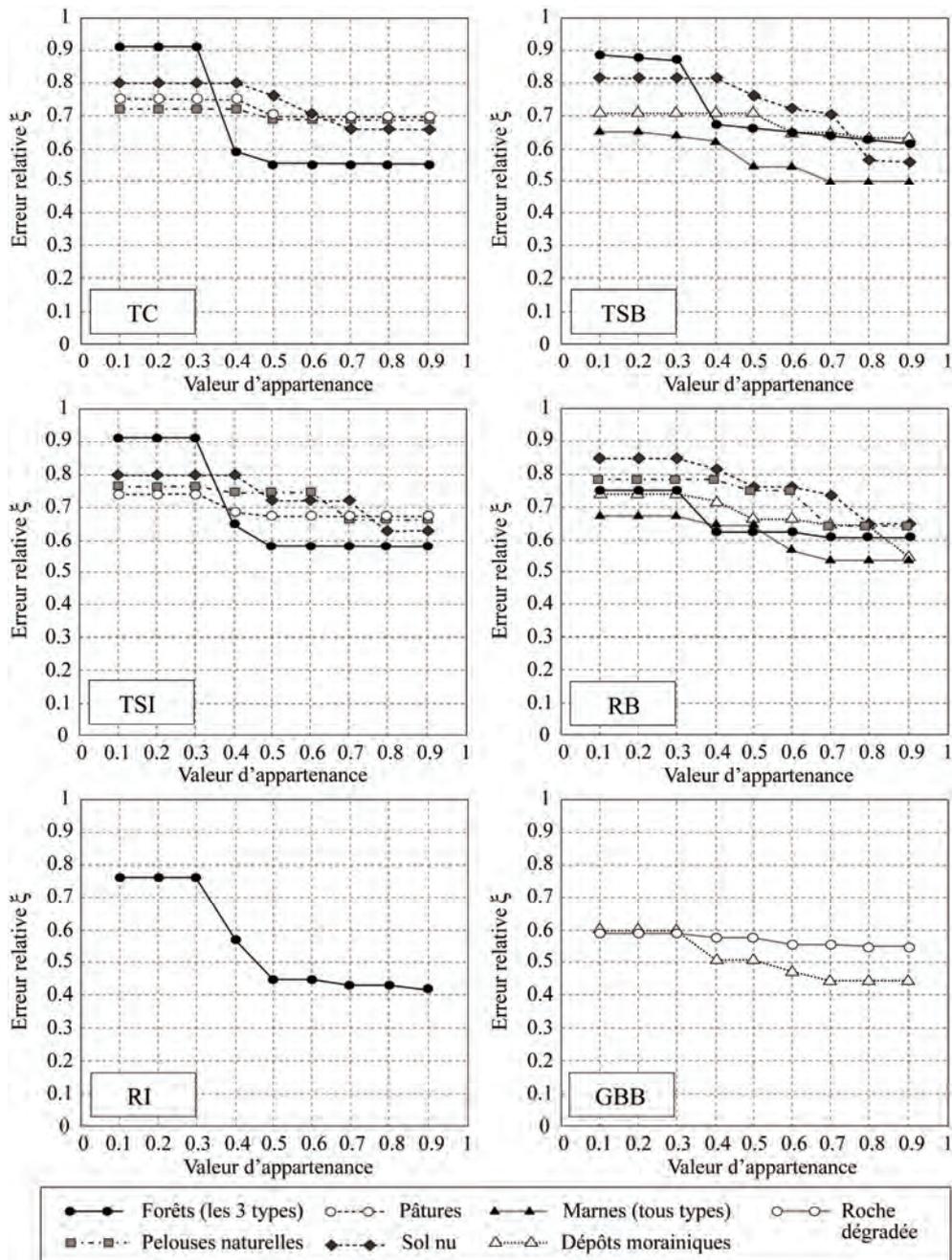


a. Valeurs d'appartenance pour la VP gradient de pentes. b. Valeurs d'appartenance pour la VP formations superficielles. c. Valeurs d'appartenance pour la VP lithologie. d. Valeurs d'appartenance pour la VP occupation du sol. Les cadres grisés représentent les classes de VP nécessitant une analyse de sensibilité pour définir des valeurs d'appartenances appropriées à certains types de 'mouvements de versant'.

Fig. 6.7. Valeurs d'appartenance pour les VP 'constantes' pour chaque type de 'mouvements de versant'.

2.2.1. Analyse de sensibilité sur les valeurs d'appartenance

Les figures 6.7 et 6.8 présentent les différentes valeurs d'appartenance pour les quatre VP 'constantes' pour chaque type de 'mouvements de versant.' L'analyse de sensibilité s'effectue itérativement sur chaque classe de VP posant problème. Lorsque ces dernières ne sont pas concernées par l'analyse de sensibilité, une VA constante de 0.5 est appliquée (Fig. 6.7.) On considère que cette valeur 'intermédiaire' ne sous-estime ou ne surestime pas l'influence de la classe de VP en tant que 'constante' sur les résultats finaux.



TC = Glissement translationnel complexe ; TSB = Glissement translationnel superficiel de berge ; TSI = Glissement translationnel superficiel d'interfluve ; RB = Glissement rotationnel de berge ; RI = Glissement rotationnel d'interfluves ; GBB = Glissement banc sur banc.

Fig. 6.8. Erreurs relatives (ξ) des classes de VP posant des problèmes de détermination des valeurs d'appartenance.

L'analyse des résultats consiste en une comparaison des variations d'erreur relative [Eq. 6.3] pour chaque simulation. La figure 6.8 présente les analyses de sensibilité effectuées pour chaque classe de VP et pour chaque type de 'mouvements de versant'. Lorsqu'un seuil est observé sur une courbe, la VA correspondante est retenue. Si deux seuils sont observés, la valeur d'appartenance diminuant le plus l'erreur relative est conservée (Fig. 6.8). Une synthèse des VA conservée pour chaque classe de VP selon le type de 'mouvements de versant' est présentée dans le tableau 6.11.

Tab. 6.11. Valeurs d'appartenance pour chaque classe de VP retenues pour l'analyse semi-quantitative.

* = VP utilisée comme 'constante' pour l'analyse de sensibilité. En grisé les classes ayant fait l'objet d'une analyse de sensibilité sur les valeurs d'appartenance. Npc = Non pris en compte. TC = Glissement translationnel complexe ; TSB = Glissement translationnel superficiel de berge ; TSI = Glissement translationnel superficiel d'interfluves ; RB = Glissement rotationnel de berge ; RI = Glissement rotationnel d'interfluves ; GBB = Glissement banc sur banc.

VP	Classes de VP	Valeur d'appartenance attribuée					
		TC	TSB	TSI	RB	RI	GBB
Gradient de pente*	< 5°	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	[5 – 10°[	0.1	0.1	0.1	0.4	0.2	0.05
	[10 – 15°[	0.5	0.1	0.4	0.8	0.9	0.3
	[15 – 20°[	0.8	0.6	0.8	0.9	0.8	0.4
	[20 – 25°[	0.8	0.7	0.9	0.8	0.6	0.5
	[25 – 30°[	0.9	0.9	0.9	0.7	0.5	0.7
	[30 – 35°[	0.9	0.9	0.9	0.5	0.3	0.8
	[35 – 40°[	0.8	0.9	0.8	0.5	0.2	0.9
	[40 – 45°[	0.7	0.8	0.7	0.4	0.2	0.9
	[45 – 50°[	0.4	0.6	0.5	0.4	0.2	0.8
	[50 – 55°[	0.4	0.6	0.5	0.4	0.2	0.7
≥ 55°	0.4	0.6	0.4	0.4	0.2	0.5	
Aspect des versants	Pentes concaves	0.4	0.3	0.4	0.3	0.3	Npc
	Pentes rectilignes	0.5	0.6	0.5	0.5	0.5	Npc
	Pentes convexes	0.3	0.7	0.3	0.7	0.7	Npc
Lithologie*	Calcaires	0.1	0.1	0.1	0.1	Npc	0.1
	Flyschs	0.4	0.6	0.6	0.4	Npc	0.9
	Marnes (tous types)	0.9	0.5	0.9	0.6	Npc	0.7
Type de formations superficielles*	Colluvions marneuses	0.3	0.8	0.3	0.5	0.6	0.7
	Colluvions autres	0.3	0.8	0.6	0.5	0.4	0.6
	Dépôts morainiques	0.9	0.7	0.9	0.9	0.9	0.4
	Eboulis actifs	0.2	0.4	0.2	0.3	0.2	0.5
	Roche dégradée	0.7	0.7	0.7	0.7	0.6	0.6
Epaisseur des formations superficielles	< 1 m	0.1	0.8	0.8	0.1	0.1	0.8
	[1 – 2 m[	0.2	0.8	0.8	0.3	0.3	0.6
	[2 – 6 m[	0.8	0.5	0.5	0.8	0.7	0.4
	[6 – 10 m[	0.7	0.2	0.2	0.6	0.9	0.2
	≥ 10m	0.4	0.1	0.1	0.3	0.7	0.1
Occupation du sol*	Forêt	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.1
	Forêt mixte	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.1
	Forêt de feuillus	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.1
	Pelouse naturelle	0.6	0.6	0.7	0.6	0.6	0.1
	Pâtures	0.4	0.5	0.4	0.4	0.6	0.1
	Terres arables/cultures permanentes	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1
	Sol nu	0.8	0.8	0.8	0.7	0.7	0.9
	Tissu urbain	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Hydrologie	Zone tampon [0 – 100 m[	Npc	0.9	Npc	0.9	Npc	Npc
Pendage apparent des strates	Pendage conforme	Npc	0.9	Npc	0.9	Npc	0.8
	Pendage nul	Npc	0.8	Npc	0.8	Npc	0.6
	Pendage contraire	Npc	0.6	Npc	0.6	Npc	0.5
	Forte variation de pendage	Npc	0.8	Npc	0.8	Npc	Npc
	Complètement déstructuré	Npc	Npc	Npc	Npc	Npc	0.9

2.2.2. Moteur d'inférence (combinaison des variables prédictives) et analyse de l'erreur relative

Les erreurs relatives les plus basses sont acquises avec :

- (i) Une NVP calculée avec l'opérateur algébrique SOMME pour répondre à l'hypothèse H1 ;
- (ii) Avec l'opérateur algébrique SOMME ou γ ($\gamma=0.975$) pour répondre à l'hypothèse H2.

Tab. 6.12. Valeurs d'appartenance des NVP obtenues par l'opérateur algébrique SOMME pour chaque type de 'mouvements de versant'.

NVP = Néo-variable prédictive ; GP = Gradient de pente ; FS = Formations superficielles ; EFS = Epaisseur des formations superficielles ; LITHO = lithologie ; HYDR = Hydrologie ; VA = Valeurs d'appartenance ; Dép. mor. = Dépôts morainiques ; Col. = Colluvions marneuses+ Colluvions autres ; Col. mar. = Colluvion marneuses ; Eb. Vifs = Eboulis vifs ; Roc. dég. = Roche dégradée ; Flys. = Flyschs ; Mar. = Marnes (tous types) ; Npc = Non pris en compte.

Types de 'mouvements de versant'	Variables prédictives et classes sélectionnées pour la NVP					VA finales
	GP	FS	EFS	LITHO	HYDR	
Translationnel complexe	[25 – 35°[	Dép. mor.	Npc	Npc	Npc	0.99
	[35 – 45°[	Dép. mor.				0.98
	[15 – 25°[	Dép. mor.				0.96
	[5 – 15°[	Dép. mor.				0.95
	[25 – 35°[	Col. ou Roc. dég.				0.92
	[35 – 45°[	Col. ou Roc. dég.				0.90
Translationnel superficiel de berge	[25 – 35°[	Col..	Npc	Npc	[0-100 m[	0.98
	[25 – 35°[	Dép. mor.				0.97
	[35 – 45°[	Col..				0.96
	[35 – 45°[	Dép. mor.				0.95
	[15 – 25°[	Col..				0.94
	[15 – 25°[	Dép. mor.				0.93
	[5 – 15°[	Col..				0.92
	[5 – 15°[	Dép. mor.				0.91
Translationnel superficiel d'interfluve	[25 – 35°[	Dép. mor.	Npc	Npc	Npc	0.99
	[15 – 25°[	Dép. mor.				0.98
	[35 – 45°[	Dép. mor.				0.96
	[5 – 15°[	Dép. mor.				0.95
	[25 – 35°[	Col. ou Roc. dég.				0.92
	[35 – 45°[	Col. ou Roc. dég.				0.90
Rotationnel de berge	[10 – 15°[	Dép. mor.	Npc	Npc	[0-100 m[	0.99
	[15 – 20°[	Dép. mor.				0.98
	[20 – 25°[	Dép. mor.				0.98
Rotationnel d'interfluve	[15 – 20°[	Dép. mor.	Npc	Npc	Npc	0.99
	[20 – 25°[	Dép. mor.				0.98
	[15 – 20°[	Dép. mor.				0.97
	[25 – 30°[	Dép. mor.				0.96
	[25 – 35°[	Dép. mor.				0.95
	[25 – 30°[	Dép. mor.				0.94
Banc sur banc	Npc	Eb. vifs	Npc	Flys.	Npc	0.97
		Roc. dég.		Flys.		0.96
		Col. mar.		Mar.		0.94

Pour l'hypothèse H1, l'opérateur algébrique SOMME permet d'obtenir pour une cellule donnée, une valeur d'appartenance combinée supérieure à celles introduites pour le calcul. Les classes de VP aux VA élevées deviennent alors complémentaires. Le tableau 6.12 présente ces valeurs d'appartenance combinées pour les VP retenues, permettant de produire la NVP pour chaque type de 'mouvements de versant'.

Concrètement, pour les mouvements translationnels complexes, les versants recouverts par des dépôts morainiques aux pentes comprises entre 15° et 45° sont représentatifs des conditions géomorphologiques favorables à la localisation des zones d'ablation, c'est-à-dire des zones de déclenchement de ce type de mouvement (VA comprises entre 0.9 et 0.7 ; Tab. 6.11). En combinant ces différentes classes de VP avec l'opérateur algébrique SOMME, quatre classes aux valeurs d'appartenance élevées sont retenues (Fig. 6.9), soit pour :

- (i) La classe 1 : les gradients de pente [25° et 35°[et dépôts morainiques (VA = 0.99) ;
- (ii) La classe 2 : les gradients de pente [35° et 45°[et dépôts morainiques (VA = 0.98) ;
- (iii) La classe 3 : les gradients de pente [15° et 25°[et dépôts morainiques (VA = 0.96) ;
- (iv) La classe 4 : les gradients de pente [5° et 15°[et dépôts morainiques (VA = 0.95) ;
- (v) La classe 5 : les gradients de pente [25 - 35°[et colluvions ou roches dégradée (VA = 0.92) ;
- (vi) La classe 6 : les gradients de pente [35 - 45°[et colluvions ou roches dégradée (VA = 0.90).

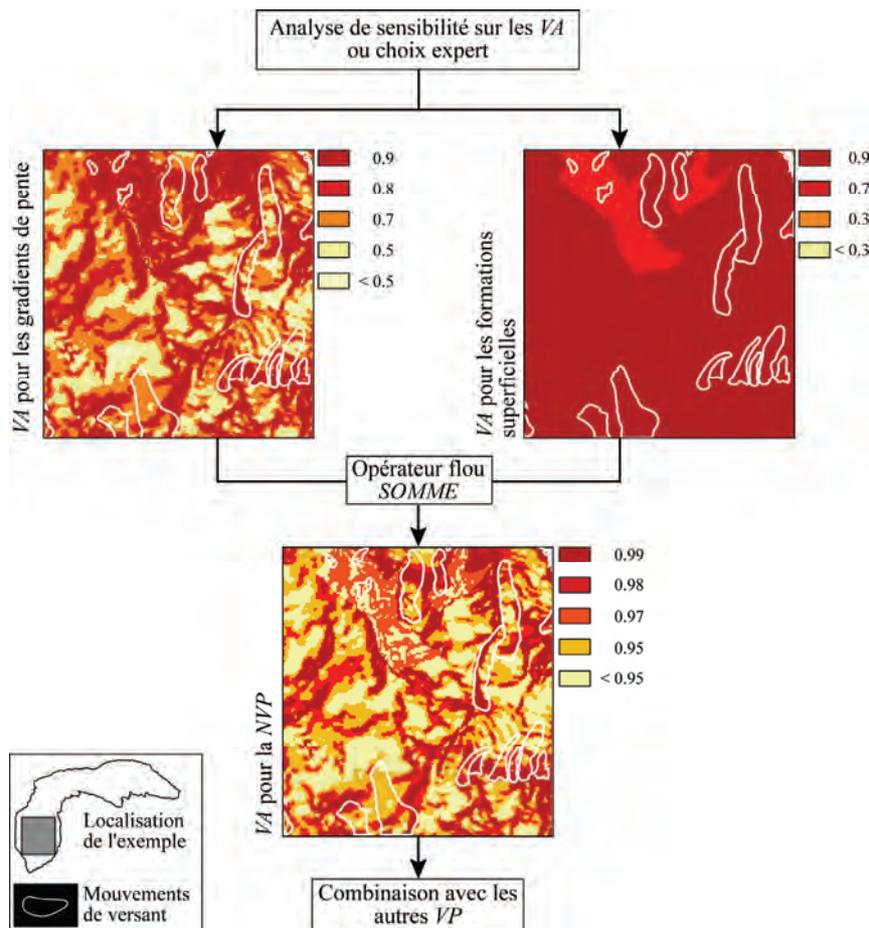


Fig. 6.9. Exemple de combinaison de VP avec l'opérateur flou SOMME pour obtenir une NVP ; application aux mouvements translationnels complexes.

Pour l'hypothèse H2, l'introduction itérative des différentes VP permet de montrer :

- (i) L'influence de chaque VP sur les simulations ;
- (ii) Des VP en nombre limité permettent d'obtenir une erreur relative (ξ) acceptable.

Quelques exemples d'erreur relative sont présentés dans le tableau 6.13. Ainsi :

- (i) **Pour les mouvements translationnels complexes et superficiels d'interfluve**, le nombre optimum de VP pour obtenir une erreur relative acceptable est de 3 (erreur relative ξ minimale obtenue de 0.11). En comparaison avec des simulations réalisées avec les VP 'constantes' (dont deux constituent la NVP), on remarque une nette amélioration de l'erreur relative (ξ , passant de 0.45 à 0.11), confirmant ainsi, **l'influence d'une néo-variable (NVP) sur les modèles spatiaux lorsque celle-ci à une signification géomorphologique** (van Westen *et al.*, 2003 ; Thiery *et al.*, 2006) ;
- (ii) **Pour les mouvements translationnels superficiels de berge**, le nombre minimum de VP nécessaire est de 4. La NVP est dérivée de 3 VP dont la VP 'hydrologie' qui confine les simulations le long des torrents. Avec cette NVP l'erreur relative (ξ) minimale est de 0.16 ;
- (iii) **Pour les mouvements rotationnels de berge**, 3 VP sont nécessaires pour obtenir des erreurs relatives (ξ) acceptables. Comme pour les mouvements translationnels superficiels de berge, la NVP prend en compte la VP 'hydrologie' afin de confiner les calculs dans une bande plus restreinte représentative de l'influence des torrents. L'erreur relative (ξ) minimale est de 0.18 ;
- (iv) **Pour les mouvements rotationnels d'interfluve**, la NVP est obtenue avec 3 VP. Le nombre minimum pour obtenir des erreurs relatives (ξ) acceptables est de 4. Comme pour les mouvements rotationnels de berge, l'erreur relative (ξ) minimale est de 0.11 ;
- (v) **Pour les mouvements banc sur banc**, 4 VP au minimum sont requises pour une erreur relative (ξ) acceptable. La NVP utilisée n'est pas obtenue avec les gradients de pente comme pour les autres 'mouvements de versant' mais avec les formations superficielles et la lithologie. L'erreur relative (ξ) minimale obtenue est de 0.11.

Les erreurs relatives (ξ) indiquent que les meilleures simulations sont obtenues avec les opérateurs SOMME et γ ($\gamma = 0.975$). L'opérateur γ permet d'établir, suivant le coefficient choisi, une certaine variation entre les opérateurs PRODUIT et SOMME (Bonham-Carter, 1994). Si les erreurs relatives (ξ) peuvent être très proches entre les simulations obtenues avec une NVP et quelques VP et, avec les opérateurs SOMME et γ , les surfaces dérivées en susceptibilité forte s'avèrent quant à elles, très différentes en terme de surface obtenue (Tab. 6.13).

2.2.3. Analyse visuelle des meilleures cartes

L'analyse visuelle des cartes de susceptibilité dérivées des meilleures simulations obtenues avec l'opérateur algébrique SOMME souligne une exagération des surfaces en susceptibilité forte (S4) et ce quel que soit le 'mouvement de versant'. A l'inverse, les cartes obtenues avec les mêmes combinaisons de NVP et VP mais cette fois-ci avec l'opérateur γ ($\gamma = 0.975$) semblent être plus proches de notre vision experte. La figure 6.10 est représentative des résultats obtenus avec ces deux opérateurs pour les glissements translationnels complexes et les glissements rotationnels de berge.

Avec l'opérateur algébrique SOMME, les versants, qui d'un point de vue expert ne nous semblent pas susceptibles, apparaissent en S4. Deux raisons majeures sont la cause de cette exagération :

- (i) L'opérateur algébrique SOMME à tendance à accroître les VA dérivées. Ainsi pour le modèle spatial, la combinaison entre la NVP et la lithologie donne des VA très hautes ;

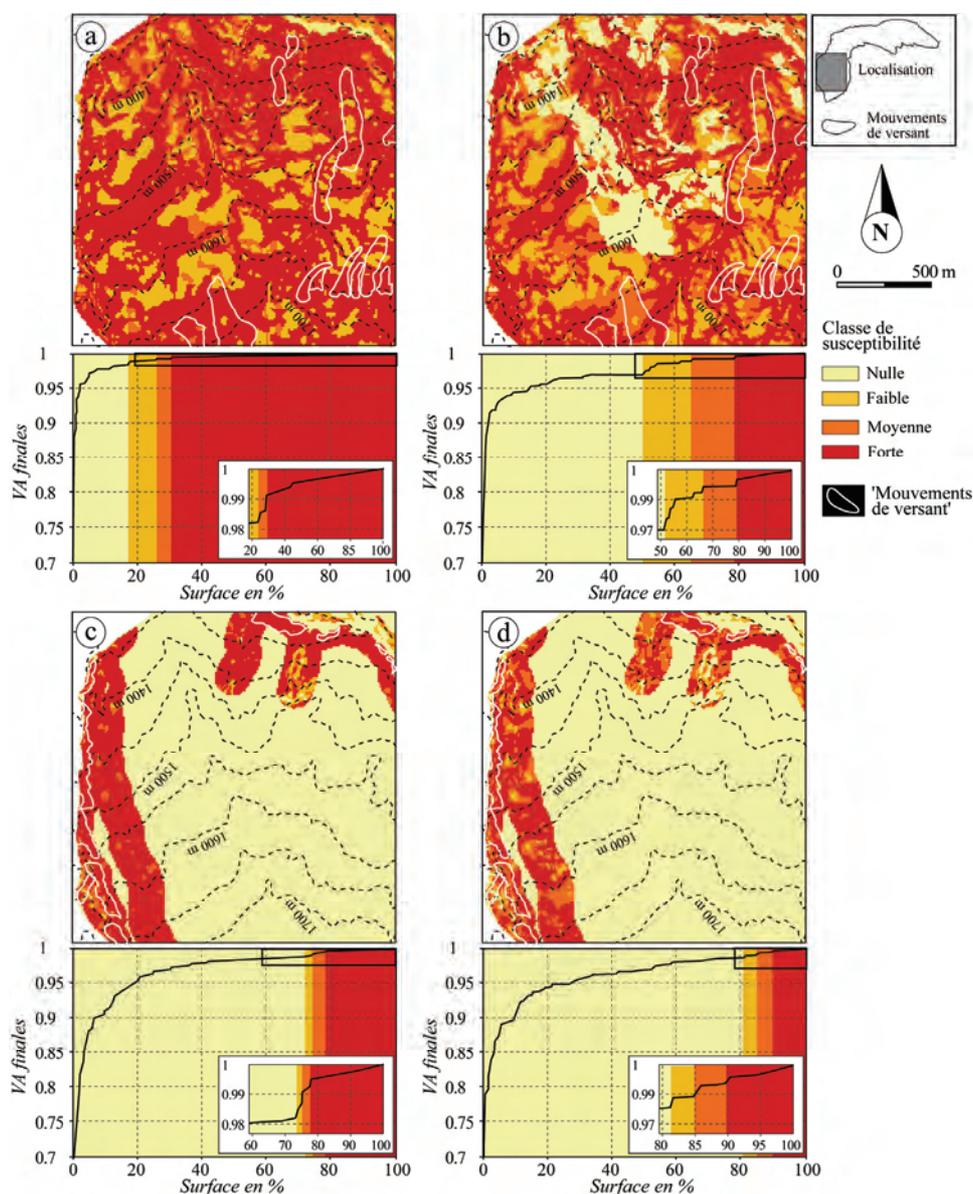
- (ii) **Les courbes cumulatives**, obtenues avec l'opérateur algébrique SOMME servant à définir les classes de susceptibilité, **sont difficiles à lire**. Différencier des seuils sur ces courbes est quasi impossible (Fig. 6.10), sauf en tenant compte d'un nombre conséquent de cellules soit entre 55% et 70% de la surface totale suivant le modèle spatial (Tab. 6.5).

Tab. 6.13. Exemple de résultats de simulations avec des NVP et des opérateurs différents pour chaque type de 'mouvements de versant'.

En grisé les meilleures simulations. La NVP 3 est obtenue avec l'opérateur SOMME ; la NVP4 est obtenue avec l'opérateur PRODUIT. Les classes prises en compte sont celles du Tab. 6.6. LITH = Lithologie ; OS = Occupation du sol ; HYD = Hydrologie ; ASP = Aspect des pentes ; PEND = Pendage apparent ; GP = Gradient de pente ; EFS = Epaisseurs des formations superficielles ; ξ = erreur relative.

N° de la simulation	VP utilisées	Opérateur flou	ξ	Surface en S4 (% de la surface totale)
Mouvements translationnels complexes				
1	NVP 4 + LITH + OS	SOMME	0.55	20%
2	NVP 4 + LITH + OS	PRODUIT	0.57	10 %
3	NVP 4 + LITH + OS	γ (0.975)	0.55	20%
4	NVP 3 + LITH + OS	SOMME	0.11	70%
5	NVP 3 + LITH + OS	PRODUIT	0.34	20%
6	NVP 3 + LITH + OS	γ (0.975)	0.26	25%
Mouvements translationnels superficiels de berge				
7	NVP4 + OS + ASP + PEND	SOMME	0.54	8%
8	NVP4 + OS + ASP + PEND	PRODUIT	0.61	5%
9	NVP4 + OS + ASP + PEND	γ (0.975)	0.55	8%
10	NVP3 + OS + ASP + PEND	SOMME	0.16	11%
11	NVP3 + OS + ASP + PEND	PRODUIT	0.55	5.1%
12	NVP3 + OS + ASP + PEND	γ (0.975)	0.26	6.5%
Mouvements translationnels d'interfluve				
13	NVP 4 + LITH + OS	SOMME	0.58	21%
14	NVP 4 + LITH + OS	PRODUIT	0.59	11%
15	NVP 4 + LITH + OS	γ (0.975)	0.58	20%
16	NVP 3 + LITH + OS	SOMME	0.12	69%
17	NVP 3 + LITH + OS	PRODUIT	0.41	20%
18	NVP 3 + LITH + OS	γ (0.975)	0.36	25%
Mouvements rotationnels de berge				
19	NVP4 + OS + ASP	SOMME	0.65	6.5%
20	NVP4 + OS + ASP	PRODUIT	0.66	6.5%
21	NVP4 + OS + ASP	γ (0.975)	0.65	6.5%
22	NVP3 + OS + ASP	SOMME	0.18	21%
23	NVP3 + OS + ASP	PRODUIT	0.57	5%
24	NVP3 + OS + ASP	γ (0.975)	0.25	40%
Mouvements rotationnels d'interfluve				
25	NVP4 + OS + ASP	SOMME	0.5	8%
26	NVP4 + OS + ASP	PRODUIT	0.6	9%
27	NVP4 + OS + ASP	γ (0.975)	0.55	9%
28	NVP3 + OS + ASP	SOMME	0.11	57%
29	NVP3 + OS + ASP	PRODUIT	0.4	12%
30	NVP3 + OS + ASP	γ (0.975)	0.29	32%
Mouvements banc sur banc				
31	NVP4 + GP + PEND + EFS	SOMME	0.25	1.8%
32	NVP4 + GP + PEND + EFS	PRODUIT	0.37	1%
33	NVP4 + GP + PEND + EFS	γ (0.975)	0.29	1.5%
34	NVP3 + GP + PEND + EFS	SOMME	0.11	28.5%
35	NVP3 + GP + PEND + EFS	PRODUIT	0.25	1.8%
36	NVP3 + GP + PEND + EFS	γ (0.975)	0.21	3.5%

Avec l'opérateur γ ($\gamma = 0.975$), une combinaison des opérateurs algébriques SOMME et PRODUIT (Zimmerman et Zysno, 1980 ; Annexe 6.1), la classe S_4 est plus en adéquation avec notre vision experte. Cette valeur tend à accroître les VA dérivées mais dans une moindre mesure que l'opérateur algébrique SOMME. De plus, les seuils observés sur les courbes sont plus nets et donc plus aisés à déterminer (Fig. 6.7). Les surfaces en S_4 sont véritablement localisées aux endroits où les VA de la NVP sont élevées. L'introduction des autres VP participe alors à des améliorations des résultats à certains endroits spécifiques.



a. Carte de susceptibilité obtenue pour les glissements translationnels complexes après classification de la simulation n° 4 (opérateur algébrique SOMME, Tab. 6.5). b. Carte de susceptibilité obtenue pour les glissements translationnels complexes après classification de la simulation n° 6 (opérateur $\gamma = 0.975$, Tab. 6.5). c. Carte de susceptibilité obtenue pour les glissements rotationnels de berge après classification de la simulation n° 22 (opérateur algébrique SOMME, Tab. 6.5). d. Carte de susceptibilité obtenue pour les glissements rotationnels de berge après classification de la simulation n° 24 (opérateur $\gamma = 0.975$, Tab. 6.5).

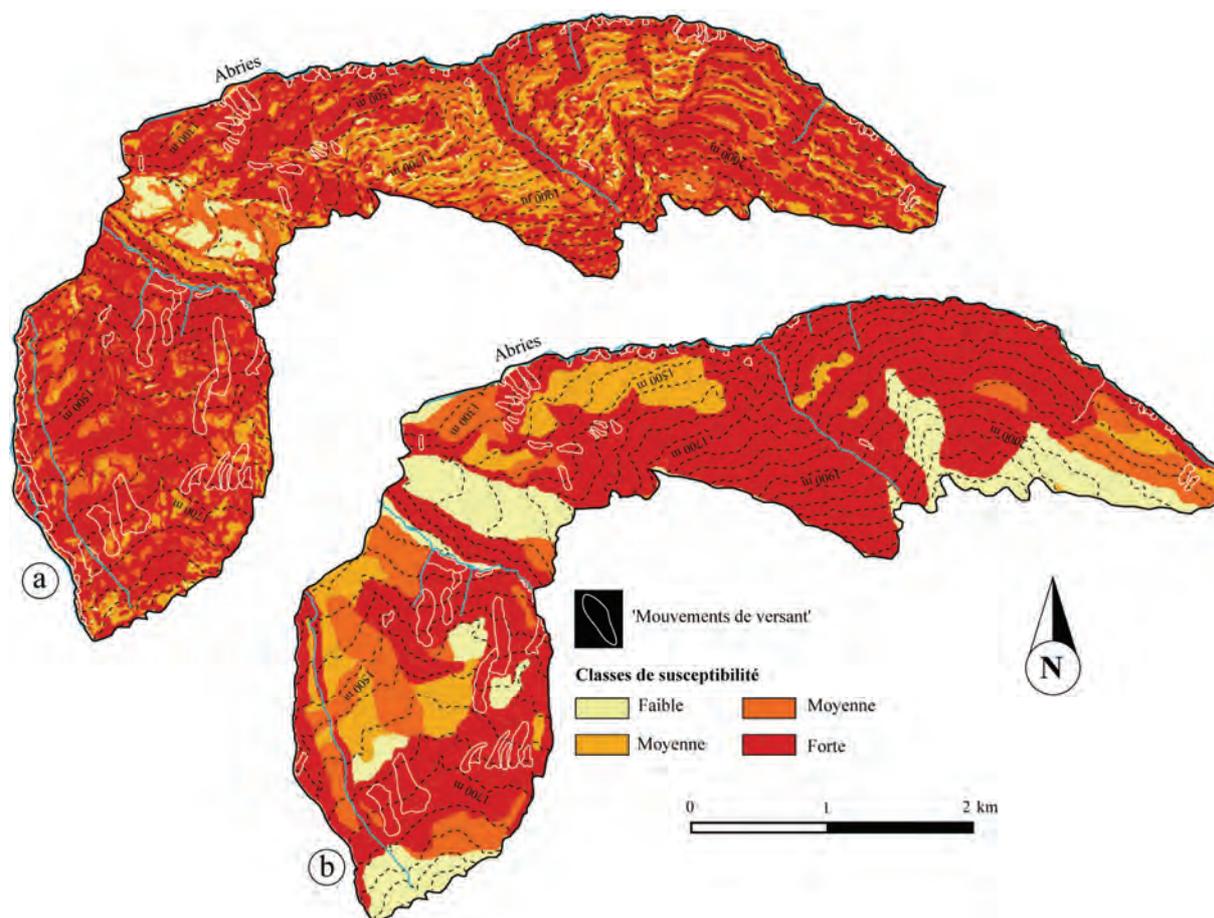
Fig. 6.10. Exemples de cartes de susceptibilité obtenues par Logiques floues pour les glissements translationnels complexes et rotationnels de berge avec le meilleur jeu de VP et les opérateurs SOMME ou γ ($\gamma = 0.975$).

2.3. Evaluation des règles de cartographie obtenues par Logiques floues sur le site de calage

2.3.1. Evaluation statistique

La dernière étape du calage pour obtenir des règles d'analyse semi-quantitative nous donnant satisfaction, consiste à évaluer, sur le site de calage, les cartes obtenues pour chaque type de 'mouvements de versant'. Cette évaluation s'effectue en calculant cinq indices de qualité (Tab. 6.10 ; Fielding et Bell, 1997) issus d'un tableau de contingence entre les différentes classes de susceptibilité simulées et celles interprétées sur la carte 'expert' pour chaque type de 'mouvements de versant'. Les secteurs cartographiés de manière experte retenus pour chaque type de phénomène sont uniquement ceux pour lesquels le niveau de susceptibilité est mentionné, les autres étant exclus de l'évaluation.

Au final, des indices de qualité généraux sont calculés entre une carte de susceptibilité semi-quantitative regroupant les six autres cartes simulées et la carte 'expert'. **Le regroupement des différentes classes simulées repose sur le principe de précaution : les classes de susceptibilité forte sont privilégiées aux classes de susceptibilité faible.** La figure 6.11 présente cette carte finale pour le secteur de calage.



a. Carte de susceptibilité unifiée obtenue par approche semi-quantitative. b. Carte de susceptibilité obtenue par approche qualitative (carte 'expert').

Fig. 6.11. Cartes de susceptibilité produites par approches semi-quantitative et qualitative ('expert') pour le secteur de calage.

Les résultats (Tab. 6.14) montrent que les taux de classement correct sont bons (sans être optimum) pour chaque type de phénomène et pour les quatre classes de susceptibilité (entre 0.67 et 0.89). L'indice de sensibilité (*SENS*) ou taux de prédiction, est plus informatif. Cet indice est moyen à bon pour la classe *S1* et *S4* (entre 0.31 et 0.89), et il est mauvais pour *S2* et *S3* (entre 0.08 et 0.24). Les classifications moyennes à bonnes sont confirmées par le coefficient de *Kappa* (*K*), pratiquement toujours supérieur à 0.4 pour *S1* et *S4*. La concordance entre les deux classes de susceptibilité faible (*S1*) et forte (*S4*) est considérée comme 'correcte', tandis qu'elle est considérée comme 'faible' pour les classes faible (*S2*) et moyenne (*S3* ; entre 0.03 et 0.1).

Tab. 6.14. Indices de qualité dérivés du tableau de contingence.

TCC = taux de classement correct ; TCN = taux de classement non correct ; SENS = indice de sensibilité ; SPE = indice de spécificité ; K = indice de kappa. En gris les *K* > 0.4.

	Classe de susceptibilité				Indices généraux
	Nulle (S1)	Faible (S2)	Moyenne (S3)	Forte (S4)	
Carte des glissements translationnels complexes					
TCC	0.80	0.85	0.82	0.80	0.82
TCN	0.20	0.15	0.18	0.20	0.18
SENS	0.81	0.19	0.13	0.62	0.64
SPE	0.22	0.91	0.91	0.86	0.88
K	0.58	0.08	0.05	0.42	0.52
Carte des glissements translationnels superficiels de berge					
TCC	0.79	0.84	0.85	0.70	0.80
TCN	0.21	0.16	0.15	0.30	0.20
SENS	0.33	0.13	0.11	0.88	0.59
SPE	0.09	0.94	0.94	0.48	0.86
K	0.29	0.08	0.05	0.40	0.45
Carte des glissements translationnels d'interfluve					
TCC	0.75	0.80	0.80	0.82	0.79
TCN	0.25	0.20	0.20	0.18	0.21
SENS	0.81	0.19	0.12	0.62	0.64
SPE	0.22	0.86	0.91	0.86	0.88
K	0.58	0.05	0.06	0.47	0.49
Carte des glissements rotationnels de berge					
TCC	0.82	0.84	0.77	0.68	0.74
TCN	0.18	0.16	0.23	0.32	0.26
SENS	0.50	0.26	0.24	0.60	0.49
SPE	0.06	0.89	0.83	0.39	0.82
K	0.49	0.09	0.10	0.40	0.41
Carte des glissements rotationnels d'interfluve					
TCC	0.82	0.86	0.70	0.54	0.75
TCN	0.18	0.14	0.30	0.46	0.25
SENS	0.50	0.26	0.24	0.60	0.49
SPE	0.06	0.89	0.83	0.59	0.82
K	0.45	0.08	0.05	0.21	0.32
Carte des glissements banc sur banc					
TCC	0.80	0.75	0.89	0.72	0.79
TCN	0.20	0.25	0.11	0.28	0.21
SENS	0.31	0.11	0.09	0.86	0.56
SPE	0.07	0.92	0.92	0.46	0.84
K	0.37	0.06	0.03	0.41	0.43
Carte unifiée					
TCC	0.88	0.79	0.67	0.67	0.71
TCN	0.12	0.21	0.33	0.33	0.29
SENS	0.55	0.08	0.10	0.62	0.42
SPE	0.89	0.88	0.85	0.35	0.81
K	0.18	0.01	0.01	0.20	0.23

Enfin, les indices, issus de la carte semi-quantitative unifiée, sont moyens à bons pour le taux de classification correct (TCC, 0.67 à 0.88) et faible à moyen pour l'indice de sensibilité (SENS, entre 0.08 et 0.62). Le coefficient de *Kappa* *K* est quant à lui mauvais (entre 0.01 et 0.2). Cette mauvaise concordance générale est due à une sous-estimation des secteurs en classe *S1*, *S2* et *S3*,

lorsque les cartes sont regroupées suivant le *principe de précaution*. Ce principe favorise la spatialisation des classes de susceptibilité élevée, ce qui est aisément vérifiable sur la figure 6.11a, où la couleur rouge (S4) représente sur la carte 9.8 km² (soit 89% de la surface du secteur test). La figure 6.12 permet de bien visualiser ces différences pour la classe de susceptibilité forte (S4).

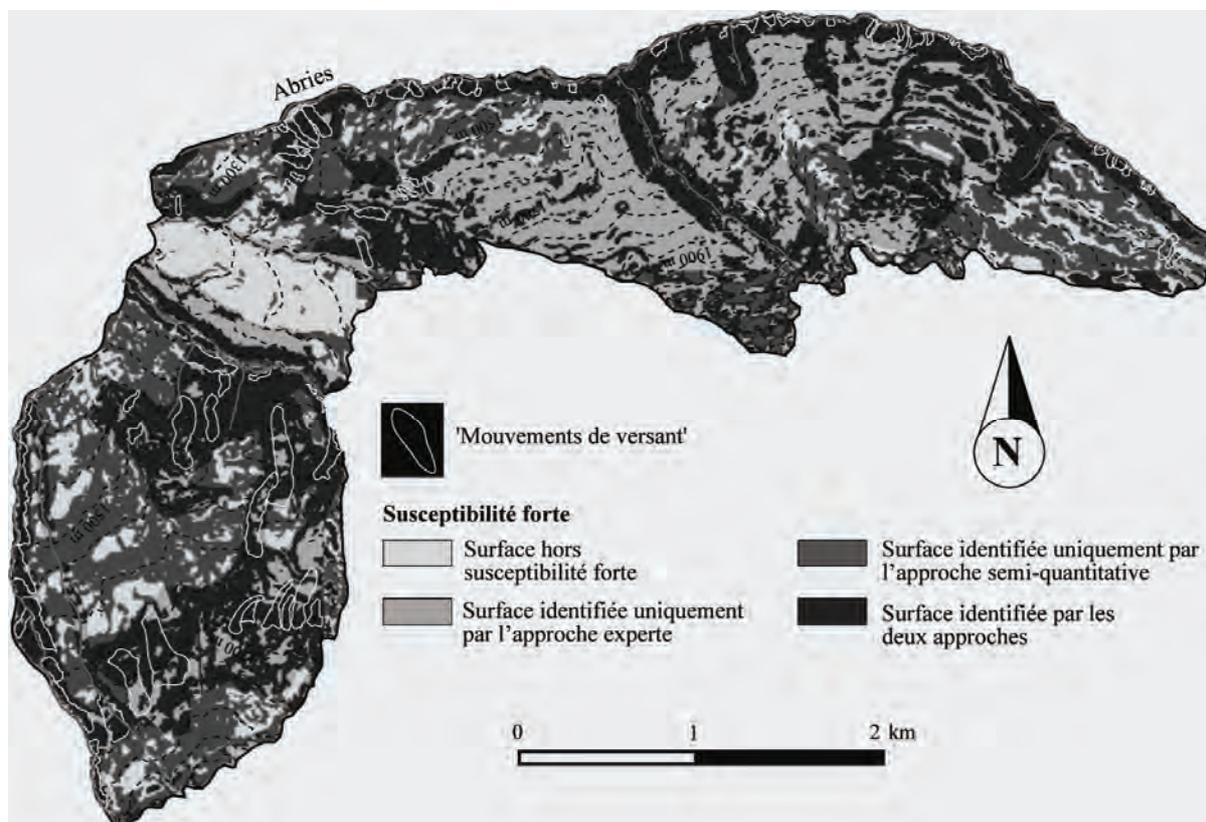
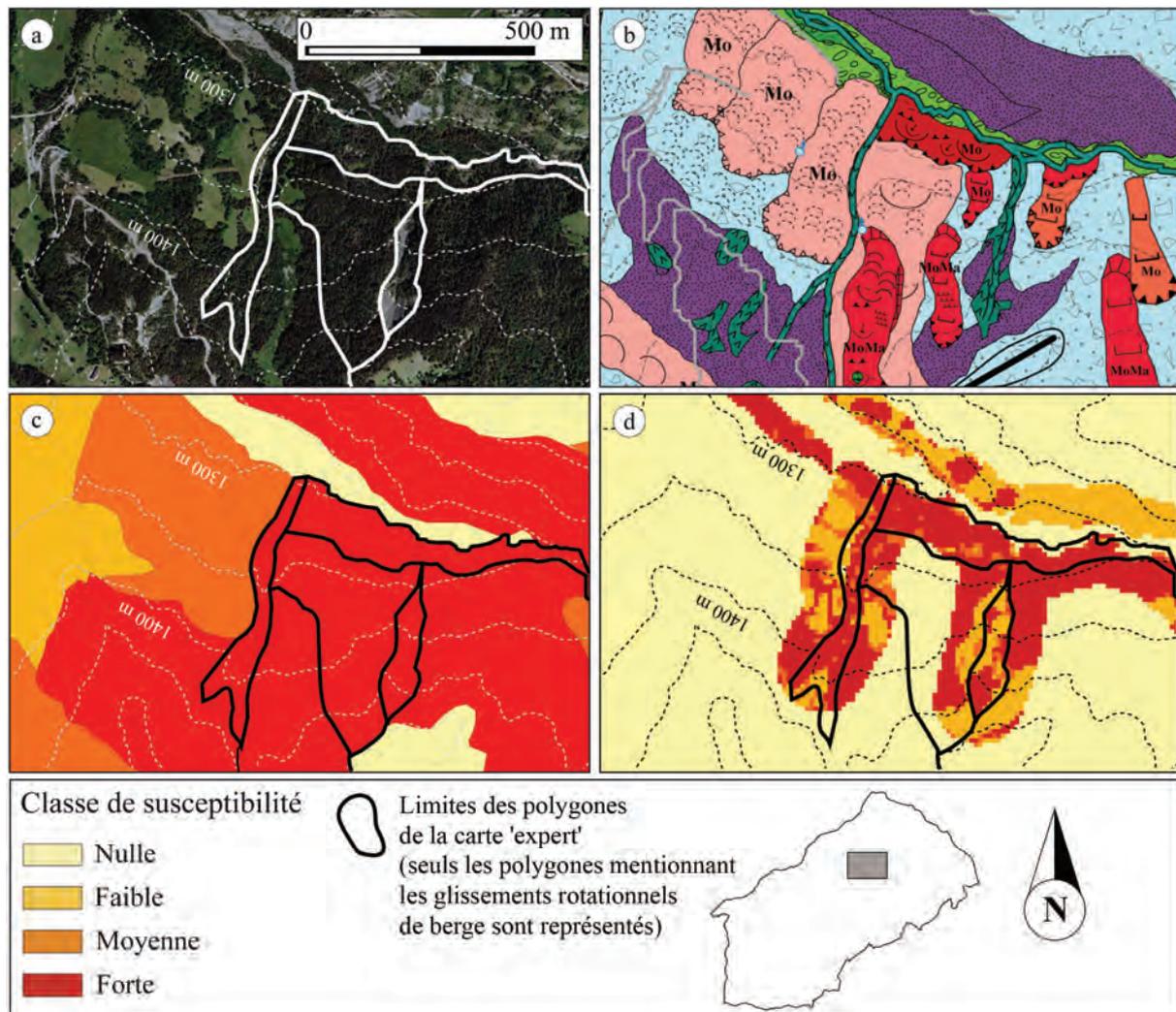


Fig. 6.12. Carte des différences entre les surfaces reconnues en susceptibilité forte pour la carte 'expert' et la carte semi-quantitative unifiée.

2.3.2. Evaluation experte ou critique des résultats

Que ce soit par l'intermédiaire des indices de qualité (Tab. 6.14) ou de cartes présentant une comparaison des classes de susceptibilité expertes ou simulées (Fig. 6.12), il est indéniable que **certains secteurs des cartes semi-quantitatives posent des problèmes de classification par rapport à une vision experte.**

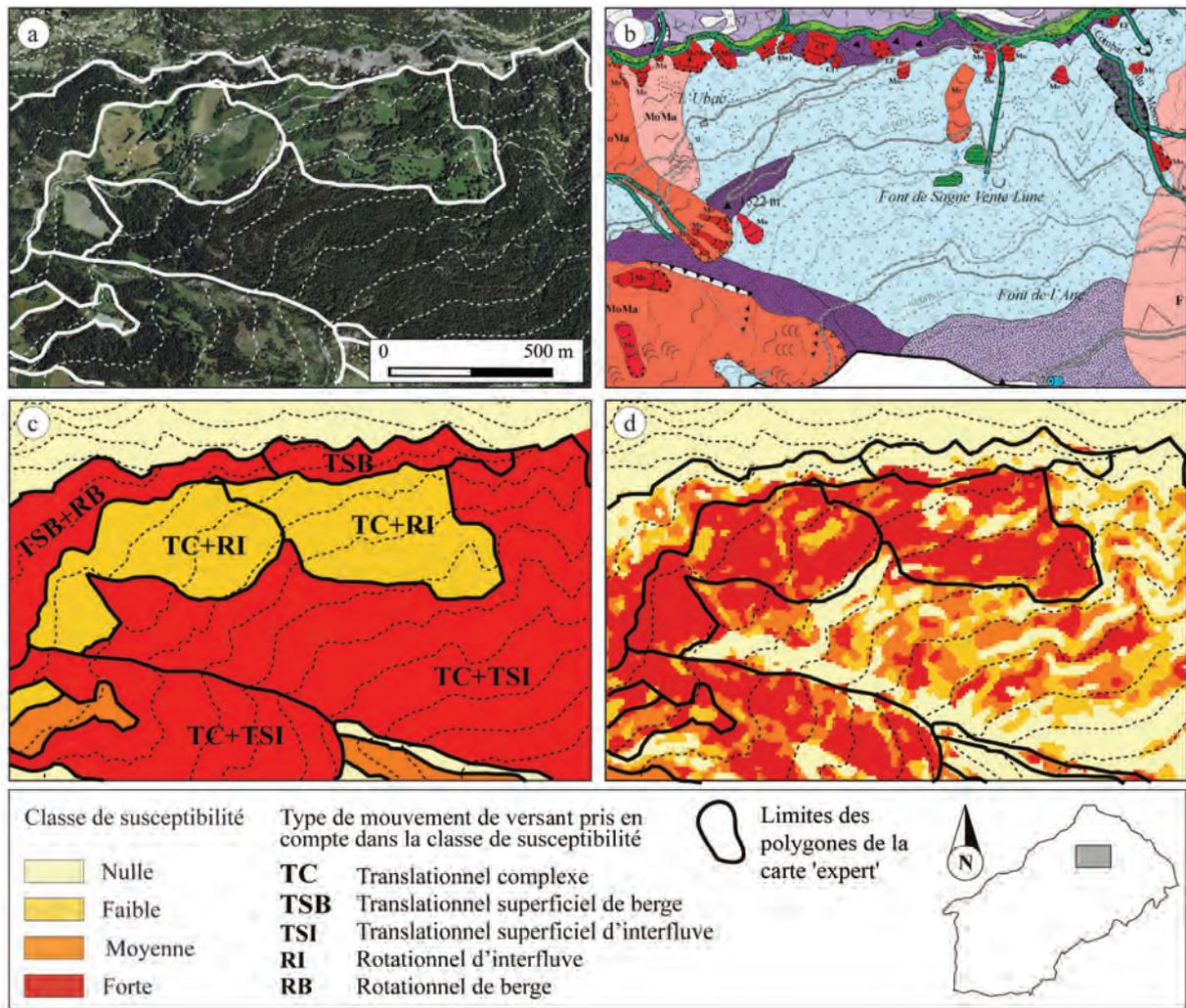
Deux secteurs 'témoins' nous ont servi pour illustrer les raisons des certaines mauvaises classifications. Ce retour 'terrain' s'appuyant sur la cartographie morphodynamique et nos connaissances des secteurs cartographiés permet une critique objective des résultats. L'identification des secteurs à problèmes et les explications sont effectuées sous forme de fiche présentant la carte morphodynamique, la carte 'expert' et les simulations réalisées. Sur chaque vignette, les polygones digitalisés pour la carte 'expert' sont superposés facilitant l'identification des secteurs à problèmes.



a. Orthophoto (IGN, 2000). b. Carte morphodynamique. c. Carte 'expert'. d. Carte de susceptibilité simulée par Logiques floues.

Fig. 6.13. Analyse comparative des résultats, fiche n°1 : problème de la zone tampon 'hydrologie' pour les glissements de berge dans le secteur de Bois Noir.

La figure 7.12 montre que l'introduction de la zone tampon accorde une importance trop grande à l'influence du sapement basal de certains torrents. Cette zone de 100 m, bien adaptée pour les torrents principaux, surestime les valeurs d'appartenance finales proches des torrents secondaires. Inclure une zone tampon, moins large en fonction de l'activité du torrent et de son rang peut être envisagée afin de limiter cet effet.



a. Orthophoto (IGN, 2000). b. Carte morphodynamique. c. Carte 'expert'. d. Carte de susceptibilité des glissements rotationnels d'interfluve simulée par Logiques floues.

Fig. 6.14. Analyse comparative des résultats, fiche n° 2 : problème de caractérisation globale dans le secteur de l'Abriès.

La figure 6.14 montre que la rive gauche de l'Abriès est très mal reconnue par les simulations par *Logiques floues*. Nous retenons l'exemple des glissements rotationnels d'interfluve, soit le secteur cartographié en susceptibilité faible au centre de l'extrait de la figure 6.14.c. Sur la figure 6.14.d le même secteur est simulé en susceptibilité forte (Fig. 6.14.d). Cette surestimation du modèle final (Fig. 6.14.d), par rapport à notre vision, vient du fait que ces 'mouvements de versant' se déclenchent sur des pentes faibles à moyennes et souvent sur des sols non boisés. Le secteur présente bien ces caractéristiques, mais son entretien régulier (agriculture, drainage entretien par les services du RTM) est intégré dans notre vision 'expert', il est donc cartographié en susceptibilité faible. Ces points ne sont pas intégrés dans le modèle qui surestime alors le secteur en classe de susceptibilité forte.

2.4. Conclusion

Cette section a permis d'établir des règles sur la base des *Logiques floues* pour analyser la susceptibilité aux 'mouvements de versant'. Ces règles, moins subjectives que pour l'analyse qualitative, reposent sur une stratégie par étape testée sur un site représentatif du versant Ubac.

La première étape est centrée sur les pondérations ou *fuzzyfication* des classes de *VP* ; la deuxième étape met l'accent sur le moteur d'inférence autrement dit les règles combinatoires des *VP* ; la troisième étape est une évaluation des résultats avec la carte 'expert' obtenue par une approche qualitative ('expert') considérée comme un document de référence.

Pour les pondérations (valeurs d'appartenance), certaines classes de *VP* sont sujettes à discussion, notamment lorsque la relation statistique entre ces dernières et les *VM* est forte, mais pas ou peu justifiée de manière experte. Pour obtenir une pondération adéquate et réduire l'incertitude mathématique une analyse de sensibilité est effectuée en introduisant itérativement plusieurs valeurs d'appartenance.

Pour les combinaisons de *VP*, l'introduction d'une néo-variable prédictive (*NVP*) est indispensable pour obtenir des erreurs relatives (ξ) acceptables. Cette *NVP* est obtenue par combinaison de deux *VP* au minimum et doit avoir une signification géomorphologique. Une fois la *NVP* acquise, **les combinaisons entre *VP* et *NVP* effectuées avec les opérateurs SOMME et γ ($\gamma=0.975$) sont celles qui obtiennent des erreurs relatives (ξ) les plus basses.**

L'analyse visuelle des cartes de susceptibilité simulée pour chaque type de '*mouvements de versant*' et de leurs **surfaces en forte susceptibilité permet de distinguer les meilleures simulations**, qui s'avèrent être celles calculées avec l'opérateur γ ($\gamma=0.975$).

Enfin, **l'évaluation 'expert' a permis de présenter quelques lacunes de la méthodologie** notamment dans la retranscription des classes *S2* et *S3* qui ne sont pas en concordance avec notre vision de la susceptibilité du secteur. **Ceci est essentiellement le fait de l'hypothèse *H* définie par *H* « les zones sont favorables aux mouvements de versant ».** Ainsi, les valeurs d'appartenance et le moteur d'inférence sont spécialement calés pour retrouver les secteurs de susceptibilité forte pour chaque type de phénomène. A partir de **ces règles, obtenues par les Logiques floues, les différentes simulations tendent à produire des cartes binaires avec une prédominance des classes *S4* et *S1*** pour chaque type de '*mouvement de versant*'. Pour la cartographie 'expert' les classes *S2* et *S3* ressortent mieux, car elles sont issues d'interprétations subjectives à travers des associations de *VP* (facteurs de prédisposition) tenant compte des principes de précautions ne pouvant être retranscrits de manière mathématique. Pour éviter cela, quelques tentatives de cartographie de susceptibilité aux '*mouvements de versant*' par approches multicritères sont proposées (*Chap.1, § 1.5.1*), notamment par processus analytique hiérarchique (*AHP* ; Komac, 2006 ; Yoshimatsu et Abe, 2006 ; *Chap. 1, § 1.6*). Leur flexibilité et leur implémentation rapide dans un environnement *SIG* (*ILWIS®* ou *ArcGIS®*) pourrait permettre d'obtenir des cartographies de meilleure qualité, tenant compte du raisonnement humain et de l'incertitude associée.

3. CONCLUSION DU CHAPITRE 6

Ce chapitre avait pour objectif d'analyser la susceptibilité des terrains aux '*mouvements de versant*' par deux approches, au degré de subjectivité différent : **l'approche qualitative dite 'expert' et une approche semi-quantitative reposant sur les Logiques floues et la connaissance du terrain.**

La première approche repose sur une procédure subjective, utilisée pour l'élaboration des Plans de Prévention des Risques en France. L'analyse montre que plusieurs versants sont susceptibles à différents types des '*mouvements de versant*' et que, pour certains secteurs, il est parfois difficile de choisir une classe de susceptibilité plutôt qu'une autre. Face à ces difficultés, deux grands principes ont été suivis :

- (i) Le premier principe a été de digitaliser les versants sous forme de facettes homogènes regroupant des caractéristiques environnementales communes (pentes, occupation du sol et formations superficielles) ;

- (ii) Le second principe a été d'appliquer le principe de précaution pour les secteurs cartographiés en tenant compte d'une zone de sécurité pour les '*mouvements de versant*' actifs et en privilégiant les classes de susceptibilité les plus fortes en cas de doute.

La **seconde approche, semi-quantitative**, repose sur l'élaboration de règles de cartographie moins subjectives notamment par l'introduction de différentes pondérations (valeur d'appartenance) et d'une stratégie de combinaison des VP par **Logiques floues**. Ces différentes règles doivent permettre une véritable transposition des résultats pour d'autres secteurs. Une stratégie par étapes successives a alors été suivie. Elle permet de réduire les incertitudes des valeurs d'appartenance à approprier pour chaque classe de VP et de les combiner. Les différentes cartes sont ensuite évaluées par rapport à la carte '*expert*'.

Cette stratégie, censée limiter l'incertitude, s'avère quelque peu décevante. Malgré une certaine connaissance des phénomènes et de leurs caractéristiques, la stratégie adoptée ne permet pas de retranscrire correctement certaines règles expertes pour certains secteurs, en particulier ceux dont les classes de susceptibilité sont sujettes à discussion comme les classes de susceptibilité faible et moyenne. Ces limites transparaissent, également, lors de la réunification des six cartes semi-quantitatives en une carte de susceptibilité unique : une surestimation de la classe de susceptibilité forte (S4) et des indices de qualité médiocres sont alors relevés.

Malgré ces défauts, l'analyse semi-quantitative a permis de dégager certains points essentiels pour une analyse spatiale de la susceptibilité plus objective :

- (i) **L'analyse de la susceptibilité par type de '*mouvements de versant*'** est confirmée par les différentes cartes obtenues. Les indices de qualité associés s'avèrent bons à très bons pour certains types de phénomènes (glissement translationnels complexes, translationnels d'interfluve, rotationnels de berge) et les classes S1 et S4 ;
- (ii) La combinaison de deux VP (au minimum) est nécessaire pour augmenter le pouvoir prédictif des analyses. **Cette néo-variable prédictive (NVP) se doit d'avoir une signification géomorphologique**, dans ce sens cela confirme les études récentes de van Westen *et al.* (2003) et Thiery *et al.* (2006).

Ainsi, en partant de ces deux derniers points, deux méthodes probabilistes sont testées sur le même site de calage avec les mêmes VP. L'objectif est d'obtenir des cartes de susceptibilité plus objectives, comportant moins d'incertitudes et qui puissent être transposables avec moins de difficultés d'interprétation. Cet aspect est détaillé dans le chapitre 7.

CHAPITRE 7 : CARTOGRAPHIE PROBABILISTE DE LA SUSCEPTIBILITE ET REGLES DE TRANSPOSITION

Les règles de cartographie '*expert*' et semi-quantitative par *Logiques floues* ont été définies. Elles obéissent à des règles et à une stratégie propre à notre échelle de travail. L'état de l'art présenté au premier chapitre a montré que les approches quantitatives ou probabilistes étaient très peu utilisées pour une cartographie de la susceptibilité des '*mouvements de versant*' à l'échelle du 1/10 000^{ème}, notamment en raison d'une utilisation de variables généralement créées pour des échelles plus petites (1/50 000^{ème} – 1/25 000^{ème}). **Aucune stratégie de calage n'est donc disponible pour cette recherche, ce qui nous a contraints à en concevoir une spécifique, tenant compte de l'échelle de travail adoptée et des variables disponibles.** Ce chapitre a pour double objectif de :

- (i) **Concevoir, tester et valider une stratégie de cartographie probabiliste** de la susceptibilité aux '*mouvements de versant*' à l'échelle du 1/10 000^{ème} à partir des deux méthodes choisies : une méthode bivariée basée sur les théorèmes de Bayes (*Théorie de l'évidence, Weight of evidence*) et une méthode multivariée (*Régressions logistiques ; Weighting logistic regression*) ;
- (ii) **Comparer les résultats acquis par cette approche probabiliste avec ceux obtenus par les approches qualitative et semi-quantitative.**

Au final, le meilleur modèle d'analyse spatiale retenu doit servir pour un essai de transposition sur un site externe au bassin de *Barcelonnette*, le site du *Moulin*.

Quatre sections composent ce chapitre. **La première section** propose un court rappel du fonctionnement de chaque méthode probabiliste choisie. Il ne s'agit pas de détailler tous les processus de calcul mais de montrer les avantages et les limites de chacune des méthodes afin de définir une stratégie de calage commune. Dans **la deuxième section**, la stratégie de calage élaborée est détaillée. Les différents choix opérés à chaque étape sont discutés et justifiés par l'extrême sensibilité des méthodes probabilistes aux variables à modéliser (*VM*) introduites dans les modèles et aux différents types de variables prédictives (*VP*) utilisées. **La troisième section** se concentre sur les résultats et sur la sensibilité des deux approches aux différentes variables (*VM* et *VP*) sur un site de calage représentatif. Différentes combinaisons de variables sont testées et chaque résultat subit une série des tests sur le pouvoir prédictif et la certitude statistique. Les deux approches probabilistes sont ensuite comparées afin de retenir celle qui correspond le plus à nos objectifs. **La quatrième section** est basée sur la comparaison des cartes semi-quantitatives et probabilistes élaborées, testées et évaluées, à la carte '*expert*'. Différents tests de qualité sont appliqués et une validation experte sur certains secteurs clés est réalisée, dans le but de garder la meilleure approche de cartographie par modèles d'analyse spatiale. La dernière étape de cette quatrième section se focalise sur la validation locale sur le versant *Adret* puis sur la transposition des meilleurs résultats sur le site du *Moulin*. Les résultats sont ensuite discutés afin de définir les avantages et les limites de notre stratégie de cartographie.

1. APPROCHE QUANTITATIVE : RAPPELS ET PRINCIPES DES METHODES CHOISIES

Cette section fondée sur l'état de l'art du chapitre 1, détaille d'avantage la description des deux méthodes d'analyse spatiale probabilistes choisies. Les différents problèmes inhérents à chaque méthode et relatifs aux *VM* et aux *VP* à introduire pour la modélisation, sont discutés afin de comprendre les différentes étapes de la stratégie de calage.

1.1. L'approche bivariée par la Théorie de l'évidence

1.1.1. Principes de la Théorie de l'évidence (Weight of evidence)

L'approche bivariée par la *Théorie de l'évidence (Weight of evidence)*, déjà appliquée en médecine (Spiegelhalter et Kill-Jones, 1984) et en géologie (Agterberg *et al.*, 1990 ; Bonham-Carter *et al.*, 1989, 1990 ; Bonham-Carter, 1994), est une version log-linéaire du théorème général de *Bayes* utilisant les principes de calcul de probabilité fondés sur les notions de probabilité *a priori* et de probabilité *a posteriori* (cf. Chap. 1 et Annexe 7.1). Dans la cadre d'une analyse spatiale de la susceptibilité aux '*mouvements de versant*', on exprime :

- (i) **La probabilité *a priori* (*pprior*)**, comme la probabilité qu'une unité de terrain (une cellule) contienne une variable à modéliser (*VM*, *i.e.* les '*mouvements de versant*'). Elle est calculée suivant la densité de cellules sur la totalité du site d'étude ;
- (ii) **La probabilité *a posteriori* (*ppost*)** comme l'actualisation de la *pprior*. Elle est estimée après le calcul de la probabilité *a priori* selon la densité de *VM* pour chaque variable (ou classe de variable) considérée comme prédictive (*VP*, *i.e.* chaque facteur de prédisposition).

La méthode est fondée sur le calcul d'un poids positif (W^+ , Eq. 7.1) et d'un poids négatif (W^- , Eq. 7.2), dont les valeurs dépendent de l'association entre la *VM* et la *VP*. Ces poids positifs et négatifs sont calculés selon les ratios des logarithmes naturels des *côtes (odds)*, appelé aussi *logit* (une *côte* représentant la probabilité de présence sur la probabilité d'absence d'un phénomène), soit :

$$W^+ = \ln \frac{P(B|VM)}{P(\bar{B}|\bar{VM})} \quad [\text{Eq. 7.1}]$$

$$W^- = \ln \frac{P(\bar{B}|VM)}{P(B|\bar{VM})} \quad [\text{Eq. 7.2}]$$

où *B* est la classe de *VP* et le symbole ' $\bar{\cdot}$ ' représente l'absence de *VP* et/ou de *VM*. Le détail des calculs est donné en annexe 7.1. Les calculs des valeurs de W^+ et de W^- , pour toutes les *VP*, permettent de calculer la probabilité *a posteriori*, qui additionnée à la probabilité *a priori* l'actualise. **Lorsque plusieurs *VP* sont combinées, les secteurs ayant une pondération finale élevée ou faible correspondent respectivement à une plus grande ou une plus petite probabilité de présence de *VM*.**

Les résultats (*i.e.* estimation des probabilités) sont largement dépendants du nombre et de la qualité des *VM* et de *VP* introduits initialement (Bonham-Carter, 1994) :

- (i) **Pour les *VM***, les probabilités seront basses si le site est caractérisé par un petit nombre de phénomènes. Dans ce cas, la faible certitude statistique des résultats oblige à les interpréter avec une extrême prudence (Bonham-Carter, 1994 ; van den

Eeckhaut *et al.*, 2006). A l'inverse, si le site est couvert par un nombre 'raisonnable' de phénomènes (VM), alors les résultats seront statistiquement stables et réalistes ;

- (ii) **Pour les VP**, outre un contrôle de leur qualité en amont du processus de calcul, il est possible d'en réduire leur nombre (ou le nombre de classes) lorsque celui-ci est trop grand en utilisant leurs pondérations, leur contraste, leur variance ou le contraste de leur variance (Annexe 7.1). Cette réduction permet de réduire la variance des pondérations finales et d'obtenir des résultats plus fiables d'un point de vue statistique (Bonham-Carter, 1994 ; Thiart *et al.*, 2003).

1.1.2. La dépendance conditionnelle : un élément indispensable à évaluer

Si la *Théorie de l'évidence* est largement utilisée pour la cartographie de la susceptibilité aux 'mouvements de versant' (van Westen, 1993 ; Lee *et al.*, 2002 ; van Westen *et al.*, 2003 ; Wu *et al.*, 2004 ; Süzen et Doyuran, 2004a et 2004b ; Neuhäuser et Terhorst, 2007), la **dépendance conditionnelle des variables** peut biaiser le processus de calcul et les résultats finaux (avec surestimation ou sous-estimation des *ppost*). Plusieurs tests sont proposés pour l'évaluer : le **test d'indépendance du χ^2** ⁴¹ (test du chi-carré), le **test omnibus**⁴² (OT, *Omnibus Test*) et le **nouveau test omnibus**⁴³ (NOT, *New Omnibus Test*, Bonham-Carter *et al.*, 1989, 1990 ; Bonham-Carter, 1994 ; Agterberg et Cheng, 2002 ; Thiart *et al.*, 2003).

Le test le plus couramment utilisé est le test de corrélation du χ^2 . Si ce test n'est pas le plus significatif, il possède l'avantage d'être plus aisément obtenu que les deux autres réclamant un traitement de chaque *ppost* (Thiart *et al.*, 2003). Pour améliorer sa signification, il peut être accompagné d'un test d'association comme le coefficient *V de Cramer* (Pistocchi *et al.*, 2002).

Dans le cas où la dépendance conditionnelle est avérée, les VP dépendantes peuvent être combinées dans une nouvelle variable prédictive alors introduite dans l'analyse spatiale comme une simple variable (van Westen, 1993 ; Bonham-Carter, 1994 ; Thiart *et al.*, 2003 ; van Westen *et al.*, 2003). Une autre solution préconisée par Agterberg *et al.* (1993) consiste à utiliser une méthode multivariée comme les *Régressions logistiques*.

1.2. L'approche multivariée par Régressions logistiques

1.2.1. Les principes de calcul

La *Régression linéaire* est une méthode statistique permettant d'étudier des associations et de faire des prédictions entre des VM et des VP. Lorsque la VM n'est pas quantitative mais qualitative ou catégorielle (*i.e.* absence/présence) la régression linéaire n'est plus appropriée. Une

⁴¹ Le test du χ^2 repose sur un tableau de contingence produit entre deux VP et la VM. Il consiste à comparer l'écart entre le χ^2 réel, qui est fonction du nombre d'unité de terrain occupé par les VM, à un χ^2 théorique. Le test d'indépendance repose alors sur l'acceptation ou le rejet de l'hypothèse nulle H_0 , selon un degré de liberté (qui est fonction du nombre de classes croisées) et un seuil de signification généralement donné à $\alpha = 0.05$; Bonham-Carter, 1994 ; Davis, 2002). Si l'écart entre les deux χ^2 est grand, alors H_0 est rejetée et il y a dépendance conditionnelle entre les deux VP. Le problème majeur de ce test est sa sensibilité au nombre de VM pris en compte, les résultats pouvant varier de $\pm 30\%$ (Pistocchi *et al.*, 2002, Dumolard *et al.*, 2003).

⁴² L'OT (*Omnibus test*) est le ratio du nombre de VM observé sur le nombre de VM calculé. Plusieurs seuils reflétant la dépendance conditionnelle ont été suggérés : si $OT > 0.85$ il n'y a pas de dépendance conditionnelle, si $OT < 0.85$ alors il y a dépendance conditionnelle entre deux ou plusieurs VP. L'avantage de ce test est qu'il n'est pas sensible au nombre de VM introduit. L'inconvénient est que le seuil de signification retenu est empirique et arbitraire (Thiart *et al.*, 2003).

⁴³ Le NOT (*New Omnibus Test*, Agterberg et Cheng, 2002) est utilisé lorsque les tests (i) et (ii) ne donnent pas satisfaction. Le test repose sur la variance des VM simulées et la variance des probabilités *a posteriori* (Agterberg *et al.*, 1990). Le but est d'obtenir un nombre de VM simulées proche du nombre de VM introduit. Dans ce cas l'hypothèse nulle H_0 est acceptée. L'avantage de ce test est qu'il ne requiert pas de degré de liberté pour tester l'hypothèse H_0 ; de ce fait, il est plus simple d'utilisation que le χ^2 (Agterberg et Cheng, 2002 ; Thiart *et al.*, 2003).

probabilité est comprise entre 0 et 1, un modèle linéaire ne permet pas de contraindre la fonction dans cet intervalle. Pour cette raison, les *Régressions logistiques* (Hosmer et Lomeshow, 1989 ; Agterberg *et al.*, 1993) sont utilisées : comme pour la *Théorie de l'évidence*, une transformation des calculs en *logit* est nécessaire. Une fonction sigmoïdale contrainte entre 0 et 1 est alors obtenue. La transformation en *logit* permet d'évaluer rapidement la probabilité associée à une combinaison de *VP*, ainsi que l'importance de celle-ci. Mathématiquement, le modèle s'exprime comme suit :

$$Pr(VM = 1 / B) = \pi(B) = \frac{e^z}{1 + e^z} \quad [\text{Eq. 7.3}]$$

où *VM* est la variable à modéliser, *B* est la variable prédictive, $Pr(VM = 1/B)$ est la probabilité que *VM* soit présente et *Z* représente les coefficients de régression ($\beta_0 + \beta_{1B}$). *Z* variant de $-\infty$ à $+\infty$, le codage de la probabilité varie de 1 à 0, et la probabilité de présence de *VM* correspond à son espérance conditionnelle. Le détail des calculs est donné en annexe 7.2.

Lorsque plusieurs *VP* sont combinées, les secteurs aux pondérations respectivement élevées ou faibles correspondent soit à une plus grande, soit à une plus petite probabilité de présence de *VM*.

1.2.2. Une approche souple mais conditionnée par le nombre de *VM* introduit

Les *Régressions logistiques* présentent plusieurs avantages déjà énumérés au chapitre 1, à savoir :

- (i) **Elles fonctionnent avec des variables quantitatives et/ou catégorielles** : un recodage n'est donc pas nécessaire (contrairement aux régressions multiples) ;
- (ii) Aucune analyse sur l'indépendance des facteurs n'est nécessaire pour obtenir des résultats cohérents ;
- (iii) **La méthode de calcul ne nécessite pas obligatoirement une partition de la zone d'étude par unités homogènes** (contrairement aux techniques multivariées). Le calcul par cellules, même de petite taille est possible (technique généralement utilisée), permettant une implémentation plus rapide dans un environnement *SIG* ;

Toutefois, deux inconvénients majeurs sont liés à cette méthode :

- (iv) **Un nombre réduit de *VM* sous-estime largement les probabilités finales**. Il faut donc des stratégies adaptées, comme le calage sur un test représentatif (limitant ainsi la surface initiale à prendre en compte pour augmenter la densité de *VM*) ou bien, l'utilisation de méthodes basées sur le même principe de calcul, par exemple les *Régressions logistiques pour données rares (Rare events logistic regression)* ;
- (v) **Les coefficients de régression pour chaque *VP* sont dépendants les uns des autres**, nécessitant alors une attention particulière sur les *VP* à introduire et une stratégie de calage adaptée.

1.3. Conclusion

Les deux méthodes quantitatives choisies pour évaluer la susceptibilité aux '*mouvements de versant*' ont déjà été appliquées sur d'autres sites pour un ou plusieurs types de phénomènes. Le but des ces études étaient obtenir une carte de susceptibilité pour un site donné. Notre problématique est légèrement différente dans la mesure où les objectifs sont (i) de **comparer ces approches pour obtenir une méthodologie finale généralisable pour plusieurs types de phénomènes** et (ii) de **transposer cette méthodologie soit sur des sites aux caractéristiques géomorphologiques semblables**.

Il s'agit alors **d'obtenir un (des) jeu(x) de variables commun(s) aux deux approches** pour pouvoir comparer leurs probabilités finales respectives. Parmi les deux approches retenues, la *Théorie de l'évidence* est celle dont les résultats sont les plus dépendants des variables introduites, particulièrement en raison de sa dépendance vis-à-vis de la dépendance conditionnelle. La stratégie de calage des deux approches probabilistes est, de ce fait, fondée sur une optimisation des variables par la *Théorie de l'évidence*. Les jeux de variables optimum seront appliqués ensuite aux analyses spatiales par *Régressions logistiques*.

2. STRATEGIE DE MODELISATION PROBABILISTE

Cette section décrit la stratégie élaborée pour répondre à l'étude spécifique de la susceptibilité aux '*mouvements de versant*' du bassin de *Barcelonnette*. Après avoir fait un rappel des limites de l'évaluation et de la validation des modèles d'analyse spatiale par approche probabiliste, la stratégie de calage, de comparaison et de validation adaptée à la problématique est présentée.

2.1. Stratégie d'analyse

2.1.1. *Evaluation et validation des approches quantitatives/probabilistes : constat, besoins.*

En dehors des problèmes inhérents à chaque méthode probabiliste (qualité des *VP*, problèmes de dépendance conditionnelle, etc.), **plusieurs points doivent être soulignés pour comprendre pourquoi et comment élaborer une stratégie de calage multi-sites cohérente et fiable pour tous types de phénomènes. Ces points s'axent autour de l'évaluation et de la validation des modèles d'analyse spatiale utilisés.** Ainsi, pour la cartographie de la susceptibilité par approche probabiliste :

- (i) **L'évaluation** se présente comme une série de tests effectués avec les *VP* introduites pour caler le modèle (capacité du modèle à reconnaître les *VM* introduites) ;
- (ii) **La validation**, quant à elle, est centrée sur une série de tests réalisés avec des *VM* indépendantes, non utilisées pour caler le modèle.

Certaines limites sont à souligner que ce soit pour l'évaluation ou pour la validation.

2.1.1.1. *L'évaluation : une faible certitude statistique*

Schématiquement, la majorité des recherches utilisant ces approches de cartographie de la susceptibilité ne s'intéressent qu'à la capacité du modèle à reconnaître la *VM* introduite (calcul du taux de reconnaissance des *VM*, calcul de l'erreur relative sur les *VM* introduites – *Chap. 6 -*, détermination d'une courbe de réussite⁴⁴). Cette technique d'évaluation ne permet pas d'obtenir une **confiance statistique** à accorder aux résultats. **Or, cette certitude statistique⁴⁵ est rarement évaluée** et seules quelques publications scientifiques y portent une attention particulière avec l'utilisation de tests appliqués la classe de susceptibilité forte retenue (tests basés sur la variance et l'écart-type des probabilités ; comme les tests de *Goodman-Kruskall*, de *Kolmogorov-Smirnov*, *T de Student* ; *Goodman et Kruskall, 1954* ; *Goodman, 1954* ; *Davis, 2002 - Irigaray et al., 1999* ;

⁴⁴ La courbe de réussite ou de succès est calculée en classant la distribution des *ppost* des valeurs faibles vers les valeurs élevées en classes fixes (50, 100, 200). Ces différentes classes sont retranscrites sur la carte et superposées aux *VM* introduites dans le modèle. Une fréquence commune est calculée, mettant en valeur la surface minimum de susceptibilité forte du site nécessaire pour reconnaître les *VM*. On considère que plus la surface est faible, meilleur est le modèle. Si la surface est proche de celle des *VM* introduites, le modèle souffre d'un problème de *VP* ou de *VM*, le modèle est rejeté. Le détail du calcul de cette courbe peut-être trouvé dans *Chung et Fabbri (2001)* et *Fabbri et al. (2002 et 2003)*.

⁴⁵ Certitude statistique : appelée confiance statistique ou qualité intrinsèque des modèles (*Guzzetti et al., 2006*).

Guzzetti *et al.*, 2006 ; van den Eeckhaut *et al.*, 2006 ; Thiery *et al.*, 2007). Suivant le nombre et la qualité des variables d'entrée (VP et VM), la confiance à accorder aux résultats peut varier du simple au double (Guzzetti *et al.*, 2006). Il est donc indispensable d'évaluer la certitude statistique des approches probabilistes.

2.1.1.2. La validation : des stratégies diverses parfois limitées

Les stratégies de validation des modèles d'analyse spatiale par approches probabilistes sont plus nombreuses. Les principales sont :

- (i) **L'utilisation d'une partie de la VM** (souvent 50%) non retenue pour le calage ;
- (ii) **L'utilisation d'un jeu de VM d'une période plus récente** pour tester la capacité prédictive du modèle ;
- (iii) **Le partage du site de recherche en deux parties égales** (souvent de manière arbitraire) en appliquant les pondérations obtenues sur la partie de calage sur l'autre partie. La validation se réalise avec les VM de la seconde partie du site (Chung et Fabbri, 2001 ; Fabbri *et al.*, 2002, 2003 ; Chung, 2006).

Pour chacune de ces stratégies, les mêmes tests sont utilisés pour la validation, comme : le calcul du taux de reconnaissance des VM, le calcul de l'erreur relative, la détermination d'une courbe de prédiction⁴⁶. Ces différents tests connaissent des limites notamment lorsque :

- (i) **Le nombre de VM est faible** (utiliser une partie de la VM pour valider le modèle revient à avoir peu de certitude d'obtenir des résultats corrects ; forte incertitude statistique) ;
- (ii) **Peu de données historiques sont disponibles pour la VM** (le modèle a alors une faible capacité à reconnaître les localisations 'probables' des phénomènes, et il est nécessaire de trouver un autre moyen de validation) ;
- (iii) **Le site de recherche est partagé en deux parties géométriquement similaires** (cela suppose que les classes de VP soient identiques de part et d'autre du site, ce qui est très rarement le cas et pose le problème éventuel d'un manque de VM pour la validation sur la seconde partie - Guzzetti *et al.*, 2006-. Dans ce cas, une question sur les probabilités résultantes se pose : reflèteront-elles bien les conditions réelles de susceptibilité sur la partie de validation ? Le partage d'un site en bassin de risque ou en bassin versant de calage paraît plus judicieux, uniquement si ces derniers reflètent bien les conditions géomorphologiques de l'ensemble du site - Catani *et al.*, 2005 ; Greco *et al.*, 2007 ; Thiery *et al.*, 2007).

2.1.1.3. Synthèse

L'évaluation et la validation des approches probabilistes nécessitent certains critères pour obtenir des résultats cohérents. Van Westen *et al.* (2003) et Guzzetti *et al.* (2006) proposent quelques critères pour évaluer, valider et comparer les cartes de susceptibilité obtenues par ce type d'approche (Tab 7.1).

⁴⁶ La courbe de prédiction suit le même principe de calcul que la courbe de succès. Toutefois, le calcul est réalisé avec des VM indépendantes non introduites pour caler le modèle (Remondo *et al.*, 2003b). Dans cette recherche, nous appliquons uniquement ce principe d'évaluation des cartes, même lors du calage, ce qui permet d'observer, de facto, si le modèle est correct ou non.

Tab. 7.1. Critères d'évaluation et de validation pour obtenir une carte de susceptibilité aux 'mouvements de versant' et tests et niveaux de qualité associés (adapté de van Westen et al., 2003 et Guzzetti et al., 2006).

Niveau de qualité : 0 = basse ; 1 = moyenne ; 2 = bonne ; 3 = très bonne.

Evaluation/Validation	Description	Tests généralement associés	Niveau de qualité associé
Evaluation	Aucun test n'est effectué pour déterminer la qualité et le pouvoir prédictif des cartes de susceptibilité	Aucun	0
	L'évaluation du degré de performance du modèle est possible. Les tests sont effectués avec le même jeu de VM utilisé pour le calage du modèle	Reconnaissance des VM introduites (%); Calcul de l'erreur relative ; Courbe de réussite.	1
	L'évaluation de l'erreur statistique associée au ppost est possible. Les tests sont effectués avec le même jeu de VM utilisé pour le calage du modèle	Tests de corrélation (χ^2 , test de Fisher, test de Kolmogorov-Smirnov, test de Goodman-Kruskall, r^2 , coefficient de Spearman); Tests d'association (V de Cramer, T de Tschuprow); Tests d'incertitude (T de Student's, Variance).	2
Validation	L'évaluation du pouvoir prédictif du modèle est possible. Les tests sont effectués avec un jeu de VM indépendant de celui utilisé pour le calage du modèle	Reconnaissance des VM indépendantes (%); Calcul de l'erreur relative ; Courbe de prédiction.	3

La stratégie adoptée doit être établie pour arriver à un niveau de qualité 3 (Tab. 7.1), puis les résultats seront comparés à ceux obtenus avec les cartographies 'expert' et semi-quantitative. Les meilleurs résultats seront alors validés localement puis transposés à un site secondaire afin d'obtenir une méthodologie de cartographie par SIG de la susceptibilité adaptée à des sites montagneux à la géomorphologie complexe. Les choix de la stratégie de calage, d'évaluation et de validation vont donc être effectués selon ces paramètres.

2.1.2. Stratégie adoptée : proposition pour un calage et une évaluation cohérente fondés sur la Théorie de l'évidence

L'objectif de la stratégie de calage est de ne retenir que les VM et les classes de VP les plus influentes pour la cartographie de la susceptibilité de chaque type de 'mouvements de versant'. Dans le chapitre 5, un jeu de VM et de VP de base a été déterminé. Pourtant, la cartographie par approche semi-quantitative fondée sur les Logiques floues et son évaluation (Chap. 6) ont montré que certaines VP (comme les classes d'occupation du sol pour certains types de phénomènes) pouvaient poser des problèmes de relations statistiques. **Pour cette stratégie de calage (Fig. 7.1), il convient donc de suivre des étapes d'évaluation reconnues, soit celles préconisées par van Westen et al. (2003) et Guzzetti et al. (2006) :**

- (i) Aptitude des variables pour construire le modèle ;
- (ii) Evaluation du degré de performance du modèle ;
- (iii) Evaluation du pouvoir prédictif et du niveau d'incertitude du modèle.

Les trois étapes sont testées sur le site de calage représentatif du versant Ubac décrit dans le chapitre 6. Les probabilités de localisation de futurs 'mouvements de versant' (ppost = probabilités a posteriori) sont calculées en tenant compte des seules zones d'ablation (VM3). Une carte de susceptibilité est créée, après une classification des ppost. Les classes de susceptibilité obtenues sont ensuite évaluées (i) par comparaison aux VM3 de calage, (ii) par comparaison aux VM3 non retenues au départ puis (iii) par un test de confiance statistique.

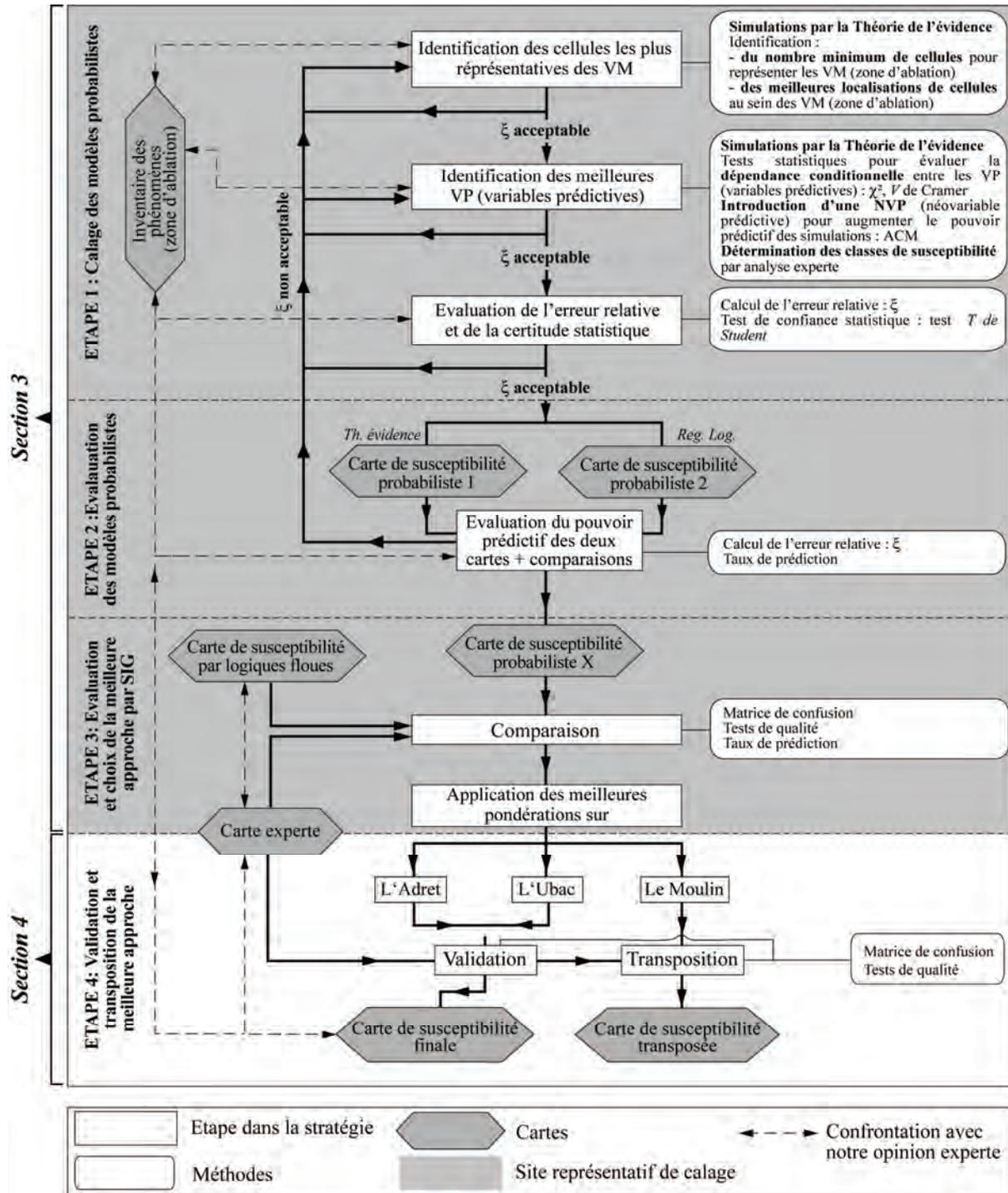


Fig. 7.1. Représentation schématique de la stratégie de cartographie de susceptibilité par étapes successives pour les approches probabilistes et choix de la meilleure approche d'analyse spatiale par SIG.

Cette stratégie de calage a déjà été éprouvée sur trois types de 'mouvements de versant' (translationnels complexes, translationnels superficiels de berge et rotationnels de berge) de l'Ubac par Thierry *et al.* (2007). Certains résultats sont repris ci-après *in extenso*. Les différentes étapes de calcul probabiliste (Théorie de l'évidence et Régressions logistiques) sont réalisées à partir de l'extension Arc SDM ® sous ArcVIEW 3.2 ® (Kemp *et al.*, 2001). Les tests statistiques sont effectués sous SPSS ® et StatBox ® (Grimmersoft ®).

2.1.2.1. Optimisation des VM

Des simulations probabilistes ont déjà été effectuées sur l'ensemble du bassin de *Barcelonnette* (Thiery *et al.*, 2003, 2004, 2005). Les premiers résultats indiquent une forte variation des *ppost* selon la localisation et le nombre de VM introduit. De ce fait, les **deux premières étapes de la stratégie de calage sont centrées sur la représentativité des cellules de la VM3** (nombre minimum et localisation préférentielle).

Le nombre initial de cellules retenu pour chaque type de '*mouvements de versant*' est indiqué dans le tableau 7.2. **Le nombre minimum de cellules** à retenir est estimé en comparant les résultats des simulations effectuées avec des cellules tirées au sort aléatoirement à partir de *VMa* (de 10% à 100%). **La localisation des cellules** à conserver est obtenue en comparant plusieurs simulations effectuées avec différentes localisations de cellules au sein de la zone d'ablation. Le tableau 7.2 indique les caractéristiques de ces localisations et la figure 7.2 illustre chaque VM.

Tab. 7.2. Caractéristiques des VM introduites dans le modèle d'analyse spatiale par Théorie de l'évidence pour identifier le nombre et la localisation des cellules les plus représentatives.

Seuls sont retenus les glissements translationnels complexes (TC), les translationnels superficiels de berge (TSB) et les rotationnels de berge (RB).

Variable à modéliser (VM)	Caractéristiques des VM
<i>VMa</i>	Utilisation de toutes les cellules des zones d'ablation (VM3, 460 cellules)
<i>VMb</i>	Utilisation du centre géométrique de chaque zone d'ablation (une cellule par VM3)
<i>VMc</i>	Utilisation du nombre total de cellule pour une zone tampon d'un rayon de 10 m autour de <i>VMb</i> (230 cellules)
<i>VMd</i>	Utilisation du nombre total de cellules des VM3 de petite taille (moyenne des tailles : TC = 215 m ² , TSB = 60 m ² , RB = 260m ² , Annexe 7.3)
<i>VMe</i>	Utilisation du nombre total de cellules des VM3 de taille moyenne (moyenne des tailles : TC = 400 m ² , TSB = 65 m ² , RB = 450m ² , Annexe 7.3)
<i>VMf</i>	Utilisation du nombre total de cellules des VM3 de plus grande taille (moyenne des tailles : TC = 650 m ² , TSB = 190 m ² , RB = 640 m ² , Annexe 7.3)
<i>VMg</i>	Utilisation des cellules représentant les classes de <i>VP</i> les plus fréquentes au sein de VM3 (230 cellules)

Comme pour l'approche semi-quantitative, **chaque simulation est réalisée en tenant compte de quatre VP considérées comme constantes** (Catani *et al.*, 2005) soit : le gradient de pente, les formations superficielles, la lithologie et l'occupation du sol. Pour chaque simulation, la distribution cumulée des *ppost* est analysée de manière experte (définition de seuils afin de définir quatre classes de susceptibilité⁴⁷ (S1 : nulle, S2 : faible, S3 : moyenne, S4 : forte). **Ces cartes reclassées sont évaluées par le calcul de l'erreur relative** (ξ , Eq. 6.3). Si cette dernière diminue avec l'introduction d'un nouveau jeu de cellules, représentant les VM3, ce jeu est retenu pour être comparé au suivant.

Les trois types de '*mouvements de versant*' doivent permettre d'identifier les cellules les plus représentatives pour leurs VM respectives. La méthodologie est alors appliquée directement pour les trois autres types de '*mouvements de versant*' (les glissements translationnels d'interfluve, les glissements rotationnels d'interfluve et les glissements banc sur banc).

⁴⁷ Cette définition de quatre seuils tient compte des classes retenues pour la carte experte et pour les cartes obtenues par approche semi-quantitative. Dans d'autres études, il est courant de trouver deux classes de susceptibilité (stable, instable ; Begueria et Lorente, 1999) ou jusqu'à six classes de susceptibilité (nulle, très faible, faible, moyenne, forte, très forte ; Chácon *et al.*, 2006).

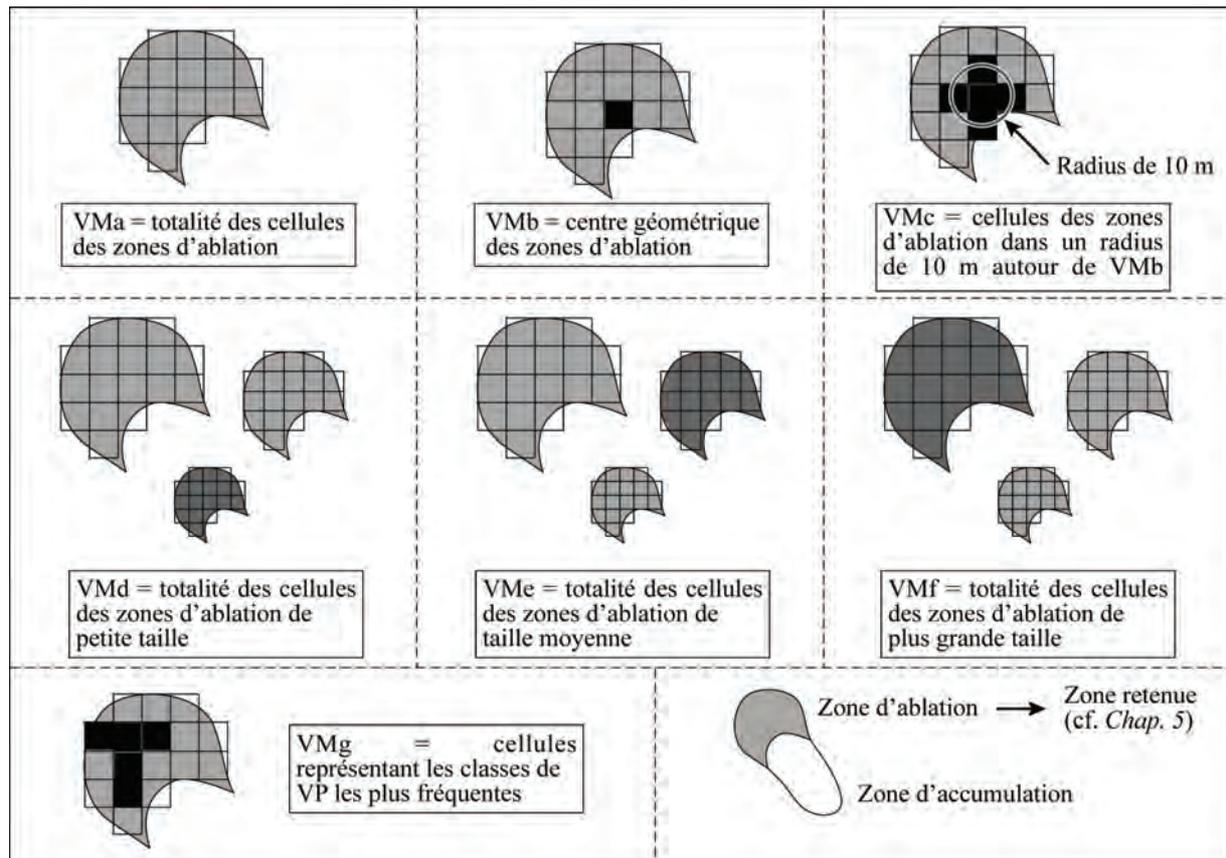


Fig. 7.2. Représentation schématique des cellules prises en compte pour retenir le jeu de cellules représentatif pour les VM de chaque type de 'mouvements de versant'.

2.1.2.2. Identification des VP les plus influentes

L'identification d'un jeu de VP pour chaque type de 'mouvements de versant' est basée sur des tests de dépendance conditionnelle et sur la distribution cumulée des *ppost*. Les calculs sont effectués en tenant compte des meilleurs jeux de cellules représentant *VM3*, identifiés lors de l'étape précédente. Cinq étapes sont suivies :

- (i) **Sélection des VP pour chaque type de phénomène**, sur la base des VP déterminées dans le chapitre 5 ;
- (ii) **Analyse de la violation de la dépendance conditionnelle entre chaque VP et les cellules représentatives de *VM3*** sur la base d'un test de corrélation de χ^2 . Ce test, très sensible au nombre de cellules et de VP introduits dans le modèle (Thiart *et al.*, 2003), est complété par le calcul d'un coefficient d'association *V* de Cramer (*Cramer's V coefficient* ; Kendall et Stuart, 1979). Comme le χ^2 , le *V* de Cramer est basé sur des tableaux de contingences entre les VP, mais sa capacité à tenir compte d'un grand nombre de variables permet d'obtenir un résultat plus pertinent (*i.e.* nombre de cellules et de classes de VP, dans notre cas). Le *V* de Cramer fournit une mesure standardisée entre [0-1] ; plus $V \rightarrow 1$, plus l'association entre deux VP est forte ;
- (iii) Exploitation de la **structure de l'association** afin de relever **les classes de chaque VP les plus influentes pour chaque type de phénomène**. Cette exploration est réalisée sur la base d'une technique statistique exploratoire multidimensionnelle : l'**Analyse de Correspondance Multiple** (*ACM* ; Benzécri, 1973 ; Annexe 7.4) ;

- (iv) **Introduction dans le modèle d'une néo-variable prédictive (NVP)** ayant une signification géomorphologique (van Westen *et al.*, 2003). Cette NVP est issue de la combinaison des VP provoquant une violation de l'indépendance conditionnelle ;
- (v) **Evaluation du degré de performance de chaque VP et NVP en les introduisant itérativement dans le modèle probabiliste.** Si l'erreur relative (ξ) ne diminue pas, en dépit de l'addition de la VP ou de la NVP, la simulation est rejetée. A l'inverse, si l'erreur relative (ξ) diminue, la VP ou la NVP est retenue pour les simulations suivantes.

2.1.2.3. Evaluation du pouvoir prédictif et de la certitude statistique

Les meilleures simulations sont évaluées en deux temps :

- (i) Dans un premier temps, **toutes les zones d'ablation 'mouvements de versant'** situées sur le site représentatif et non retenues pour le calage des modèles sont utilisées pour un calcul d'erreur relative. **Si l'erreur relative (ξ) < 0.35, la simulation est considérée comme correcte** (Thiery *et al.*, 2003) ;
- (ii) Dans un second temps, **la confiance statistique de la classe de susceptibilité forte des simulations est évaluée suivant un test T de Student** (*Student T test*, Bonham-Carter, 1994 ; Kemp *et al.*, 2001 ; Davis, 2002 ; Thiery *et al.*, 2004a). Ce test de confiance statistique est fondé sur l'écart-type des *ppost* et permet de créer des valeurs normalisées pour estimer l'hypothèse $H_0 : ppost = 0$. Les valeurs normalisées *vn* sont retenues pour des seuils de certitude α correspondants à la probabilité que **les secteurs de forte susceptibilité soient contenus dans un intervalle de confiance** (représentés sur la carte par une zone de forte certitude statistique). Le seuil retenu pour cette étude est $\alpha = 0.05$ (soit une confiance de 95%) pour une $vn = 1.64$.

2.1.2.4. Application aux Régressions logistiques

Les variables (VM3 et VP) optimum étant identifiées pour chaque type de 'mouvements de versant', elles sont ensuite utilisées pour les simulations par *Régressions logistiques*. Les classes de susceptibilité sont déterminées de la même manière que les simulations par approche bivariable ; c'est-à-dire par une analyse de la distribution cumulée des *ppost*. La comparaison des classes de susceptibilité forte s'effectue alors en trois étapes :

- (i) Par une analyse visuelle des classes de susceptibilité forte sur les cartes dérivées ;
- (ii) Par le calcul et l'analyse de courbes de prédiction pour les simulations réalisées par les deux approches (*prediction rate*, Chung et Fabbri, 2001, Fabbri *et al.*, 2002, 2003) ;
- (iii) Par le calcul de l'erreur relative (ξ) pour l'ensemble des cellules représentant les zones d'ablation et une comparaison avec celles obtenues par la *Théorie de l'évidence*.

Seuls les modèles donnant satisfaction sur ces trois points sont gardés.

2.1.2.5. Une validation originale : évaluation experte, validation 'locale' et transposition

Les meilleures cartes probabilistes sont comparées aux cartes obtenues par Logiques floues et à la carte 'expert'. La discrimination des résultats s'effectue grâce aux tests de qualité issus du tableau de contingence (le taux de classement correct, le taux de classement non correct, l'indice de sensibilité, l'indice de spécificité et le *Kappa K* de Cohen, Chap. 6 § 2.1.3).

Les résultats des meilleurs modèles d'analyse spatiale sont ensuite appliqués sur l'ensemble du versant Ubac, puis sur le versant Adret pour une validation 'locale' et, enfin, sur le site du Moulin pour la transposition. Cette transposition sur un site annexe est effectuée pour les glissements banc sur banc, seuls phénomènes communs aux deux sites. Cette

transposition s'effectue sur la base de cellules de 1 X 1 m correspondant au *MNT* interpolé à partir du levé *LIDAR* aéroporté. Les cartes sont évaluées grâce au calcul de l'erreur relative (ξ) puis discutées.

3. SENSIBILITE DES APPROCHES PROBABILISTES

La cartographie de la susceptibilité aux '*mouvements de versant*' par approche probabiliste est un travail de recherche exploratoire. Il convient de rester prudent quant à l'analyse des résultats. La stratégie exposée auparavant est proposée dans le but de réduire au maximum cette incertitude. Cette section présente les résultats de chaque étape de calage des approches probabilistes. Une synthèse des avantages et des limites de notre stratégie sont discutés en fin de section.

3.1. Sensibilité de l'approche bivariée (*Théorie de l'évidence*) aux variables

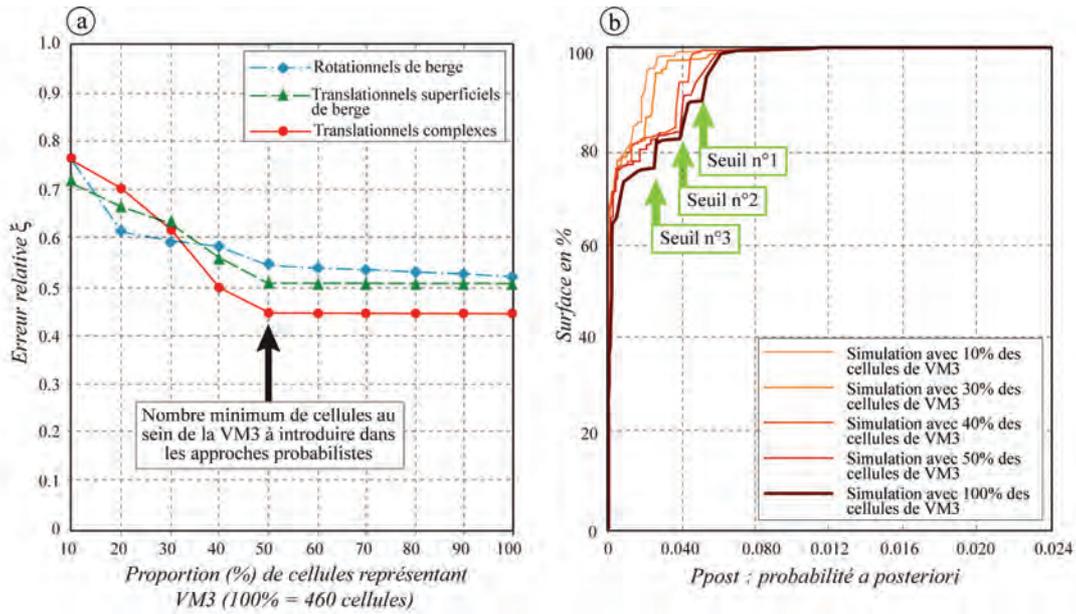
3.1.1. Optimisation des cellules des VM3

Le nombre minimum de cellules représentatives des VM3 est déterminé sur la base de 460 cellules⁴⁸. La figure 7.3 présente la synthèse des résultats des différentes simulations et de l'erreur relative (ξ) pour les trois types de '*mouvements de versant*' retenus. Un seuil de 50% est identifié pour une erreur relative (ξ) stabilisée⁴⁹.

Pour identifier les meilleures localisations de cellules (de VMc à VMg), les simulations suivantes sont donc réalisées avec 230 cellules. Le tableau 7.3 indique que les simulations avec VMb et VMc ne sont pas acceptables, confirmant ainsi le fait qu'utiliser le centre géométrique des zones d'ablation ou quelques cellules basées sur ce centre géométrique sous estime les *ppost*. La taille des zones d'ablation (VM3) a une faible influence sur la diminution significative de l'erreur relative (ξ). On remarque, toutefois, une certaine tendance à une erreur relative (ξ) plus faible pour les VM3 de plus grande taille (expliqué par une variabilité sans doute moins forte). Enfin, les meilleurs résultats sont obtenus avec VMg représentant la combinaison la plus fréquente au sein de chaque VM3 pour chaque phénomène, l'erreur relative (ξ) étant respectivement de 0.40, 0.45 et 0.43 pour les glissements translationnels complexes, les glissements translationnels superficiels de berge et les glissements rotationnels de berge.

⁴⁸ Ce nombre est basé sur le nombre de cellules des VM des glissements translationnels superficiels de berge. Pour pouvoir obtenir un nombre de cellules représentatif, nous avons décidé que les trois types de '*mouvements de versant*' retenus devaient avoir le même nombre de cellules initial.

⁴⁹ Le même constat est réalisé par Thiery et al. (2004a, 2004b) pour des simulations probabilistes réalisées par la Théorie de l'évidence pour l'ensemble du versant Ubac du bassin de Barcelonnette. Les '*mouvements de versants*' retenus pour cette analyse sont les glissements translationnels et rotationnels. Les cellules prises en compte sont les centres géométriques des zones d'initiation des phénomènes. Les résultats acquis montrent une stabilisation de l'erreur relative avec 50% des cellules retenues, la confiance statistique accordée aux surfaces en susceptibilité forte dérivées des *ppost* est jugée correcte. Toutefois, si les tests statistiques sont satisfaisants, les surfaces de susceptibilité forte obtenues ne sont pas en adéquation avec la vision experte du site. De plus, le fait d'utiliser des types '*mouvements de versant*' aux conditions d'initiation légèrement différentes biaisent les résultats finaux.



a. Erreur relative selon le nombre de cellules introduites dans l'approche probabiliste bivariée.
 b. Identification des seuils sur les courbes de probabilités pour définir les classes de susceptibilité (les simulations sont réalisées pour les glissements translationnels complexes ; les seuils sur les courbes plus claires sont plus difficiles à identifier et dépendent du nombre de cellules introduites).

Fig. 7.3. Erreur relative (ξ) et identifications de seuils pour identifier les classes de susceptibilité des simulations selon différentes quantités de cellules introduites dans l'approche probabiliste bivariée (adapté de Thiery et al., 2007).

Tab. 7.3. Erreur relative (ξ) associée aux simulations réalisées avec différentes localisations de cellules représentant la VM3.

Type de 'mouvements de versant' : TC = Translationnels complexes ; TSB = Translationnel superficiel de berge, RB = Rotationnel de berge. La signification des VM est donnée dans le tableau 7.2. Les simulations sont réalisées avec quatre VP considérées comme des constantes soit : les gradients de pente, la lithologie, les formations superficielles et l'occupation du sol. Les meilleurs résultats sont surlignés en gris.

VM introduite dans l'approche	Erreur relative (ξ)		
	TC	TSB	RB
VMa	0.45	0.50	0.54
VMb	0.74	0.76	0.73
VMc	0.49	0.57	0.60
VMd	0.69	0.64	0.69
VMe	0.52	0.58	0.62
VMf	0.46	0.53	0.54
VMg	0.40	0.45	0.43

3.1.2. Indépendance conditionnelle et Analyse Multiple des Correspondances (AMC) : détermination des classes les plus influentes

3.1.2.1. Analyse de la dépendance conditionnelle

Les différents tests statistiques d'évaluation de la **dépendance conditionnelle** indiquent une violation entre certaines VP pour les six types de 'mouvements de versant'. Les valeurs de χ^2 et de

V de Cramer obtenus dans le tableau 7.4, pour les glissements translationnels complexes, montrent un exemple concret de la violation de l'indépendance conditionnelle (Thiery *et al.*, 2007). Le coefficient V de Cramer indique une association faible entre les variables, sauf entre les VP 'gradient de pente' et 'aspect des versants' et les VP 'gradient de pente' et 'formations superficielles'. La corrélation entre les VP 'gradients de pente' et 'aspect des versants' est principalement liée à la localisation de VMg sur les pentes faibles et celles comprises entre 15° et 35°. Ces pentes représentent plus de 50% de la surface du site de calage et sont principalement rectilignes. De ce fait, parce que la surface commune entre les classes de gradient de pente comprises entre 15° et 35° et les pentes rectilignes est élevée, il y a redondance entre les deux VP.

Combiner ces deux VP n'aurait aucune signification géomorphologique : la VP 'aspect des versants' est donc supprimée du processus de calcul. A *contrario*, les VP 'gradients de pente' et 'formations superficielles' prises ensemble ont une signification géomorphologique et sont donc gardées pour analyser et explorer la structure des associations à travers une *Analyse Multiple des Correspondances* (AMC).

Tab. 7.4. Exemples de résultats des tests de corrélation et d'association entre VMg et différentes VP pour les glissements translationnels complexes (Thiery *et al.*, 2007).

Les VP 'hydrologie' et 'pendage apparent' ne sont pas introduites dans le modèle, aucune relation n'ayant été déterminée avec les VM3 dans le chapitre 5. GP = Gradient de pente ; LIT = Lithologie ; FS = Formations superficielles, EFS = Epaisseur des formations superficielles ; OS = Occupation du sol ; AV = Aspect des versants.

Les caractères en gras indiquent les VP utilisées pour construire une NVP (la structure est explorée plus loin dans le texte). Test de χ^2 , de gauche à droite : χ^2 calculé, χ^2 théorique et (degré de liberté). Coefficient V de Cramer : les caractères en gras indiquent une association modérée à forte entre les VP ; les cases en gris représentent l'hypothèse H_0 rejetée pour un degré de liberté $\alpha = 0.05$.

VP		LIT	FS	EFS	OS	ASP
GP	χ^2	2.6 12.5 (6)	33.1 21 (12)	104.3 28.8 (18)	75.5 36.4 (24)	81.6 21 (12)
	V	0.11	0.42	0.26	0.29	0.41
LIT	χ^2	-	0.2 5.9 (2)	5.7 7.8 (3)	0.2 9.5 (4)	1.2 5.9 (2)
	V	-	0	0.15	0.03	0.07
FS	χ^2	-	-	9.6 12.5 (6)	35.3 15.5 (8)	7.2 9.4 (6)
	V	-	-	0.14	0.27	0.12
EFS	χ^2	-	-	-	31.8 21 (12)	55.7 12.6 (6)
	V	-	-	-	0.2	0.38
OS	χ^2	-	-	-	-	24.5 9.5 (4)
	V	-	-	-	-	0.23

3.1.2.2. Analyse de la structure des différentes associations à travers une Analyse Multiple des Correspondances (AMC)

L'AMC s'effectue, dans un premier temps, par l'observation de la contribution de chaque facteur pour les six types de 'mouvements de versant'. Chacun de ces facteurs représente une faible contribution de la variance (contribution < 20% pour chaque axe ; Tab. 7.5). Comme le souligne, Benzécri (1973), il est alors préférable dans un second temps, d'axer l'analyse sur la contribution des modalités (pour notre recherche les classes de VP) et leurs coordonnées dérivées de leurs *valeurs-tests*, afin de faire ressortir des classes de VP proches et former des groupes.

Une analyse fine de la contribution des classes de VP et de leurs coordonnées respectives sur des plans factoriels, indique que quatre facteurs suffisent pour obtenir des classes aux significations géomorphologiques concrètes. En principe, deux ou trois VP suffisent pour faire ressortir ces groupes.

Tab. 7.5. Contribution des VP à la variance des axes 1 à 4 pour les six types de 'mouvements de versant'.

Les VP les plus contributives pour chaque axe sont indiquées en gris et utilisées pour définir la NVP. Les classes choisies sont détaillées dans la dernière colonne.

GP = Gradient de pente ; LIT = Lithologie ; FS = Formations superficielles ; EFS = Epaisseur des formations superficielles ; OS = Occupation du sol ; ASP = Aspect des versants ; HYD = Hydrologie ; PEN = Pendage apparent ; Var. cum. = Variance cumulée.

	GP	LIT	FS	EFS	OS	ASP	HYD	PEN	Var cum.	Structure de la NVP
<i>Translotionnels complexes</i>										
F1	37.1	0.4	25.6	21.1	15.7	-	-	-	12.9	NVP1 : GP (5-15°, 15-25°, 25-35°, 35-45°) + FS (dépôts morainiques)/ GP (25-35°, 35-45°) + FS (colluvions ou roche dégradée)
F2	36.8	3.1	6.3	29.9	20.6	-	-	-	25.3	
F3	39.9	0.1	12.2	33.8	13.7	-	-	-	36.1	
F4	24.3	2.4	25.7	16.7	30.8	-	-	-	46.0	
<i>Translotionnels superficiels de berge</i>										
F1	25.6	18.6	19.1	3.2	15.3	0.1	0.1	18.2	13.1	NVP2 : GP (15-25°, 25-35°, 35-45°, 45-55°) + FS (colluvions, dépôts morainiques) + HYD
F2	10.3	6.9	5.9	21.5	25.9	3.6	0.2	25.6	22.7	
F3	18.4	16.5	6.9	25.0	16.4	2.0	10.4	4.5	32.0	
F4	21.6	3.3	10.0	28.1	28.5	7.4	0.7	0.3	40.5	
<i>Translotionnels superficiels d'interfluve</i>										
F1	20.9	14.1	20.3	16.2	7.6	0.8	-	20.2	21.3	NVP3 : GP (5-15°, 15-25°, 25-35°, 35-45°) + FS (dépôts morainiques)/ GP (25-35°, 35-45°) + FS (colluvions ou roche dégradée)
F2	22.7	2.0	14.8	14.6	30.0	5.2	-	10.6	33.9	
F3	36.9	0.0	30.3	5.7	18.5	5.1	-	3.4	44.8	
F4	34.4	0.1	28.2	0.5	21.2	4.7	-	10.9	54.2	
<i>Rotationnels de berge</i>										
F1	33.1	17.2	24.9	3.0	21.0	0.6	0.05	-	16.4	NVP4 : GP (10-20°, 20-30°, 30-40°) + FS (dépôts morainiques) + HYD
F2	24.9	3.8	0.8	34.2	7.8	19.8	2.4	-	28.4	
F3	19.8	17.0	6.7	29.7	9.2	11.2	6.4	-	39.8	
F4	40.9	0.9	4.5	22.5	20.6	0.7	10.0	-	49.3	
<i>Rotationnels d'interfluve</i>										
F1	40.3	-	20.0	20.2	18.2	1.3	-	-	38.7	NVP5 : GP (15-20°, 20-25°, 25-30°) + FS (dépôts morainiques) + EFS (2-6 m, 6-10 m)
F2	35.5	-	30.2	10.6	0.6	26.1	-	-	59.7	
F3	10.0	-	10.4	2.0	1.2	76.3	-	-	76.4	
F4	35.1	-	27.7	16.1	0.9	20.3	-	-	91.2	
<i>Banc sur banc</i>										
F1	3.9	31.9	36.2	0.5	7.9	0.19	-	19.4	19.6	NVP6 : LIT (marnes noires, flyschs) + FS (roche dégradée, colluvions, dépôts morainiques)
F2	14.2	3.9	40.2	4.0	30.3	0.4	-	7	36.0	
F3	0.1	35.9	34.9	12.4	2.2	14.1	-	0.6	50.2	
F4	52.1	0.1	3.1	1.3	0.2	24.6	-	17.7	60.1	

Le tableau 7.6 et la figure 7.4 présentent un exemple concret pour les glissements translationnels complexes. Ainsi, pour les quatre premiers facteurs nous pouvons distinguer :

- (i) **Le facteur 1** oppose les gradients de pentes moyens (entre 15 et 25°), moyennement fortes (entre 25 et 35°) et fortes (>35°) et oppose les formations superficielles de type morainiques avec les colluvions. Dans une moindre mesure, une opposition s'observe entre les formations très épaisses et les autres ainsi qu'entre les forêts et les

sols nus. Cette composante peut-être interprétée comme un facteur du type de formations par rapport aux gradients de pentes ;

- (ii) **Le facteur 2** oppose les pentes moyennes (entre 15 et 30°) et les pentes fortes (> 35°), et tient compte des sols nus et des formations superficielles peu épaisses. Cette composante peut être interprétée comme un facteur d'épaisseur par rapport aux gradients de pente ;
- (iii) **Le facteur 3** met en avant les pentes faibles (entre 10 et 15°), les dépôts morainiques de moyennes à fortes épaisseurs (> 6 m). Cette composante peut-être interprétée comme un facteur d'épaisseur de dépôts morainiques ;
- (iv) **Le facteur 4** oppose les pentes fortes (> 40°) avec les pentes moyennes (entre 15 et 25°) et tient compte des dépôts morainiques, des colluvions, de la forêt et des épaisseurs superficielles (entre 2 et 6 m). Cet axe est plus difficile à interpréter mais nous avons considéré que la composante pouvait représenter un facteur de différents types d'occupation du sol selon les gradients de pentes.

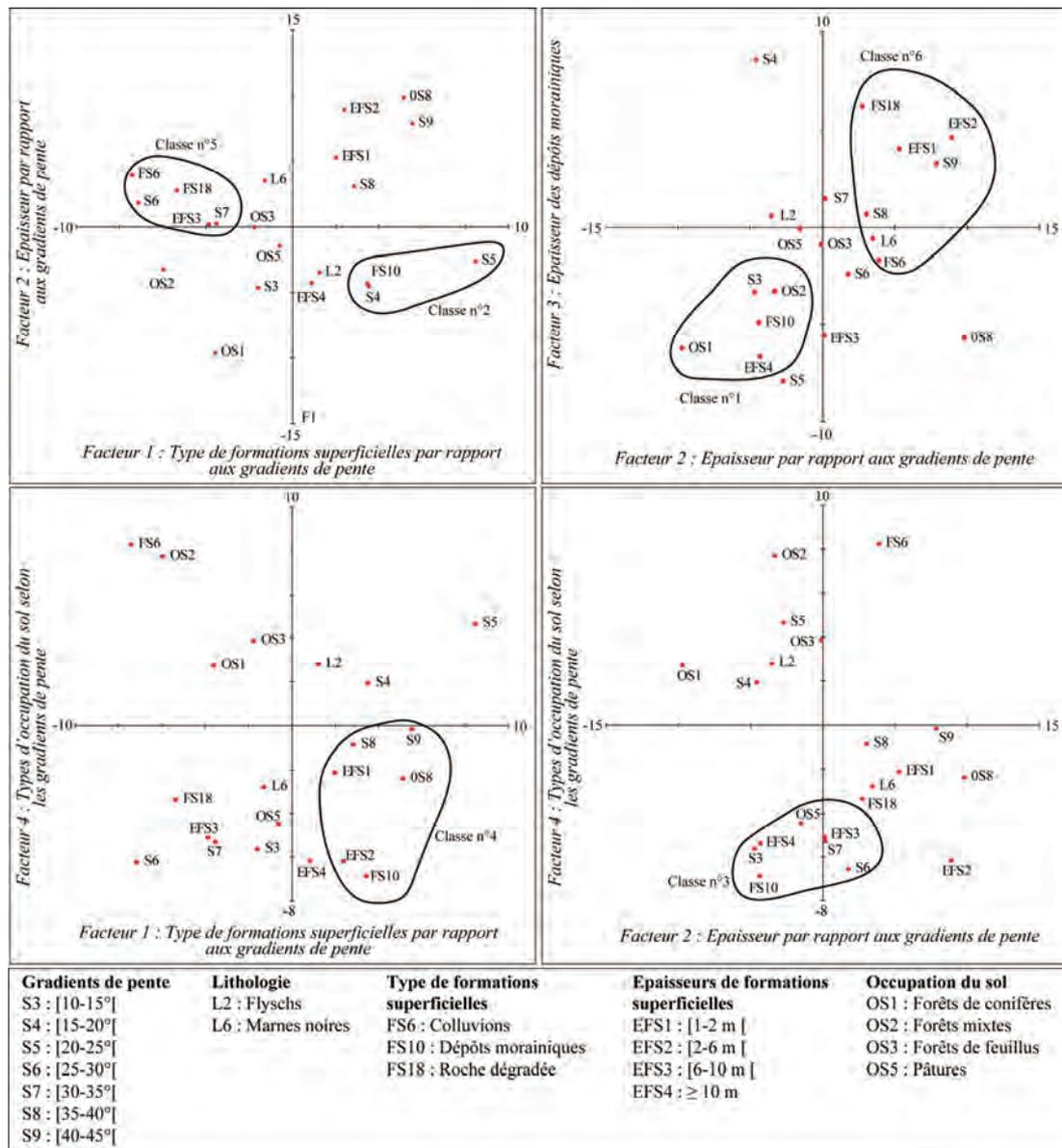
Tab. 7.6. Contributions et valeurs-tests calculées pour chaque classe de VP lors de l'AMC réalisée pour des glissements translationnels complexes.

GP = Gradient de pentes ; LIT = Lithologie ; FS = Formations superficielles ; EFS = Epaisseur des formations superficielles ; OS = Occupation du sol. Les chiffres entre parenthèses représentent les valeurs-tests des classes de VP (modalités), les autres chiffres représentent les contributions de chaque classe de VP (modalités) au facteur. Les cases en gris foncé représentent les classes les plus influentes pour la définition des facteurs ; en gris clair, les classes utilisées, mais moins influentes.

VP	Classes	Facteur			
		F1	F2	F3	F4
GP	10-15°	0,6 (-1.6)	0,0 (-4.7)	16,0 (-3.4)	0,0 (-5.6)
	15-20°	9,5 (3.5)	3,9 (-4.6)	15,7 (8.6)	2,6 (1.9)
	20-25°	14,9 (8.5)	1,5 (-2.7)	0,1 (-7.9)	5,6 (4.6)
	25-30°	0,1 (-7.1)	2,4 (1.8)	1,3 (-2.4)	0,8 (-6.5)
	30-35°	2,6 (-3.5)	6,4 (0.2)	0,5 (1.4)	0,0 (-5.3)
	35-40°	2,0 (2.9)	7,1 (3.1)	3,1 (0.6)	7,4 (-0.9)
	40-45°	7,5 (5.6)	15,4 (7.9)	3,1 (3.3)	8,8 (-0.2)
	Part de la variance totale	37,1	36,8	39,9	24,3
LIT	Marnes noires	0,4 (1.3)	4,2 (-3.5)	0,1 (0.6)	2,4 (2.8)
	Flyschs	0,0 (-1.3)	0,0 (3.5)	0,0 (-0.6)	0,0 (-2.8)
	Part de la variance totale	0,4	3,1	0,1	2,4
FS	Dépôts morainiques	12,0 (3.5)	0,8 (-4.4)	10,1 (-4.9)	20,3 (6.9)
	Roche dégradée	0,2 (-5.3)	1,7 (2.8)	1,2 (6.2)	3,0 (-3.4)
	Colluvions	13,3 (-7.4)	3,9 (3.9)	0,9 (-1.7)	2,4 (-8.2)
	Part de la variance totale	25,6	6,3	12,2	25,7
EFS	1-2 m	6,8 (2.1)	8,0 (5.3)	4,7 (4.1)	1,4 (-2.1)
	2-6 m	6,7 (2.4)	18,5 (8.9)	5,5 (4.6)	10,0 (-6.1)
	6-10 m	6,6 (-3.8)	0,0 (0.2)	5,9 (-5.6)	5,0 (-5.1)
	≥ 10 m	0,1 (0.88)	2,7 (-4.3)	17,8 (-6.3)	0,3 (-6.3)
	Part de la variance totale	21,1	29,9	33,8	16,7
OS	Forêts de conifères	0,6 (-3.6)	4,7 (-9.7)	2,3 (-6.3)	0,4 (2.7)
	Forêts mixtes	8,8 (-5.9)	2,7 (-3.2)	3,3 (-3.3)	18,2 (7.8)
	Forêts de feuillus	0,8 (-1.7)	0,0 (-0.1)	0,3 (-0.9)	4,6 (3.8)
	Pâtures	0,1 (-0.5)	0,6 (-1.5)	0,0 (-0.1)	6,2 (-4.5)
	Sol nu	5,5 (5.2)	12,6 (9.8)	8,1 (-5.7)	1,4 (-2.4)
	Part de la variance totale	15,7	20,6	13,7	30,8

A partir de ces interprétations et de la construction de quatre plans factoriels (Fig. 7.4), six classes ont été définies pour la NVP (NVP1) des glissements translationnels. Ces classes ont été créées à partir des VP 'gradient de pentes' et 'formations superficielles'. À titre indicatif, nous avons ajouté les classes des autres variables (en gris clair dans le tableau 7.6) qui nous ont servi dans le processus de combinaison. Les six classes retenues représentent :

- (i) **La classe 1**, les pentes très faibles recouvertes par les formations morainiques (plutôt épaisses > 6 m) ;



Entourées d'un trait gras les classes de variables, à la signification géomorphologique avérées une fois regroupées et utilisées pour créer les classes de la NVP.

Fig. 7.4. Interprétation et regroupements des classes de la NVP pour les glissements translationnels complexes à partir de quatre plans factoriels construits avec les quatre premières composantes de l'ACM.

- (ii) **La classe 2**, les pentes moyennes (15°-25°) recouvertes par les formations morainiques ;

- (iii) **La classe 3**, les pentes moyennes à fortes (25°-35°) recouvertes par les formations morainiques (d'épaisseur superficielle à moyenne - 2-6 m) ;
- (iv) **La classe 4**, les pentes fortes (35°-45°) recouvertes par les formations morainiques (de faible épaisseur) ;
- (v) **La classe 5**, les dépôts de pente (colluvions ou marnes dégradées) sur des pentes moyennes à fortes (25°-35°) ;
- (vi) **La classe 6**, les dépôts de pente (colluvions ou marnes dégradées, de faibles épaisseurs) sur des pentes fortes (35°-45°).

Le détail de la structure des autres *NVP* est indiqué dans le tableau 7.5. Soulignons que les contributions de chaque modalité et les *valeurs-tests* sont une aide pour obtenir une *NVP* ayant à la fois un sens géomorphologique et une faible redondance statistique. Il appartient, ensuite, à l'expert de regrouper ou non certaines classes. C'est pour cela que pour ce type les glissements translationnels complexes, nous nous sommes focalisés sur les *VP* 'gradients de pente' et 'formations superficielles'. Une fois associées, les classes obtenues ont un véritable sens géomorphologique (par exemple : les moraines sont localisés sur des pentes faibles à moyennes, les colluvions sur des pentes plus fortes). Ce regroupement permet d'éliminer la dépendance conditionnelle entre ces *VP*.

3.1.3. Sensibilité des modèles aux différentes *VP*

Chaque *VP* et *NVP* sont introduites itérativement dans le modèle. Le tableau 7.7 présente les résultats de l'erreur relative (ξ) pour chaque simulation. L'information géomorphologique représentée par la *NVP* augmente la performance des cartes de susceptibilité obtenues. Par exemple, pour les glissements translationnels superficiels de berge, l'erreur relative (ξ) obtenue avec les *VP* non combinées ('gradients de pente', 'formations superficielles', 'lithologie', 'occupation du sol') est de 0.45 (Tab. 7.3) alors qu'avec la *NVP* et les mêmes *VP* ('lithologie' et 'occupation du sol') l'erreur relative (ξ) passe à 0.14 (Tab. 7.7).

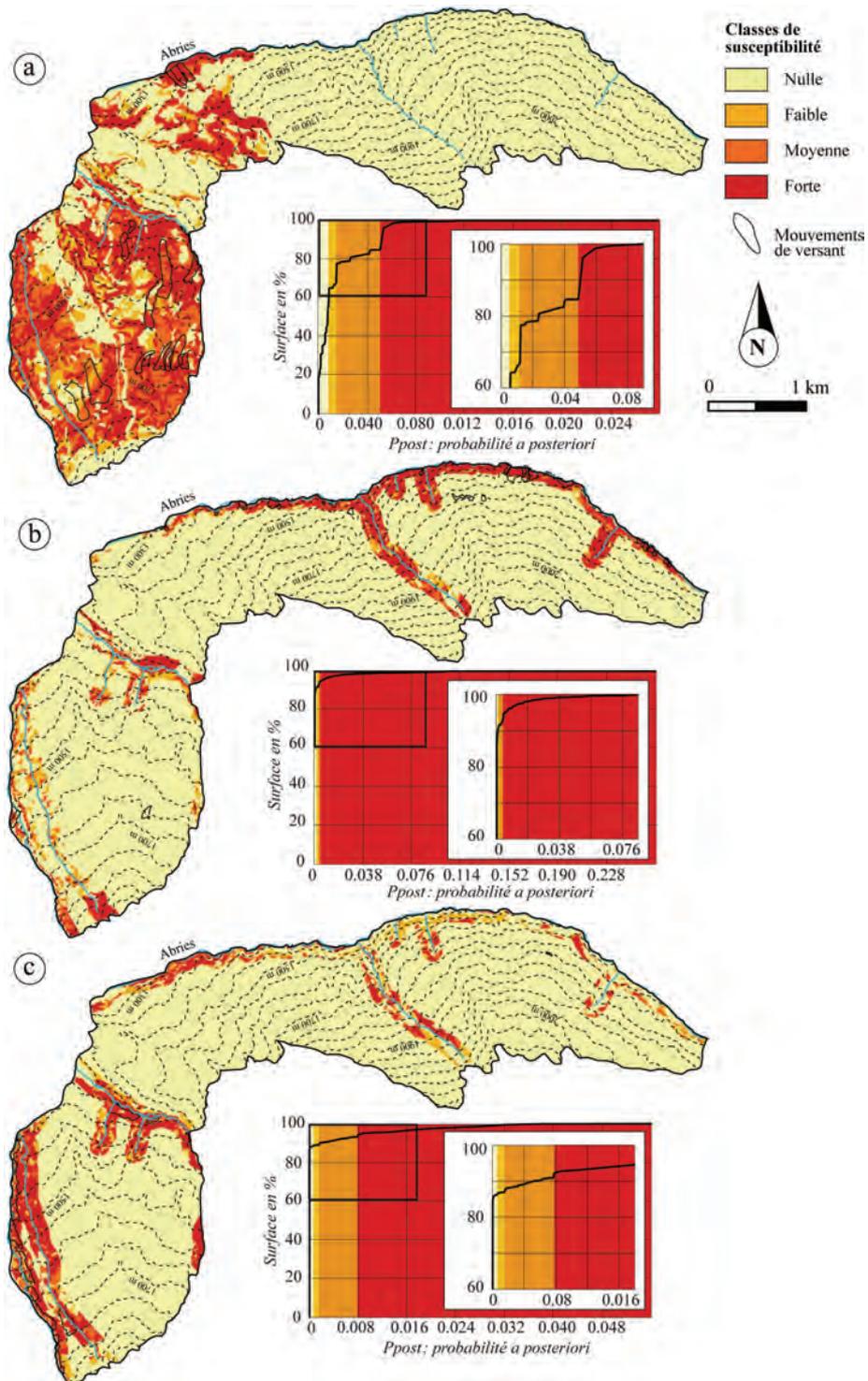
Tab. 7.7. Sensibilité des simulations pour chaque type de 'mouvements de versant' : erreur relative et résultats de la dépendance conditionnelle pour les meilleures combinaisons de *VP* et *NVP*.

TC = Glissements translationnels complexes ; *TSB* = Glissements translationnels superficiels de berge ; *TSI* = Glissements translationnels superficiels d'interfluve ; *RB* = Glissements rotationnels de berge. ; *RBI* = Glissements rotationnels d'interfluve ; *BB* = Glissement banc sur banc.

'Mouvements de versant'	Combinaison	Erreur relative (ξ)	Dépendance conditionnelle	
			Corrélation (χ^2)	Association (V de Cramer)
TC	NVP1 + LIT	0.35	Faible	Faible
	NVP1 + LIT + OS	0.18	Faible	Faible
TSB	NVP2 + OS	0.35	Faible	Faible
	NVP2 + OS + ASP	0.21	Faible	Faible
	NVP2 + OS + ASP + BED	0.14	Faible	Faible
TSI	NVP3 + LIT	0.39	Faible	Faible
	NVP3 + LIT + OS	0.31	Faible	Faible
RB	NVP4 + OS	0.21	Faible	Faible
	NVP4 + OS + ASP	0.16	Faible	Faible
RI	NVP5 + OS	0.39	Faible	Faible
	NVP5 + OS + ASP	0.19	Faible	Faible
BB	NVP6 + GP	0.30	Faible	Faible
	NVP6 + GP + EFS	0.18	Faible	Faible
	NVP6 + GP + EFS + PEN	0.17	Faible	Faible

Trois exemples de simulations avec les meilleurs jeux de *VP* et de *NVP* sont présentés en figure 7.5. Les courbes cumulées des *ppost* y sont indiquées. Etant donné le faible nombre de

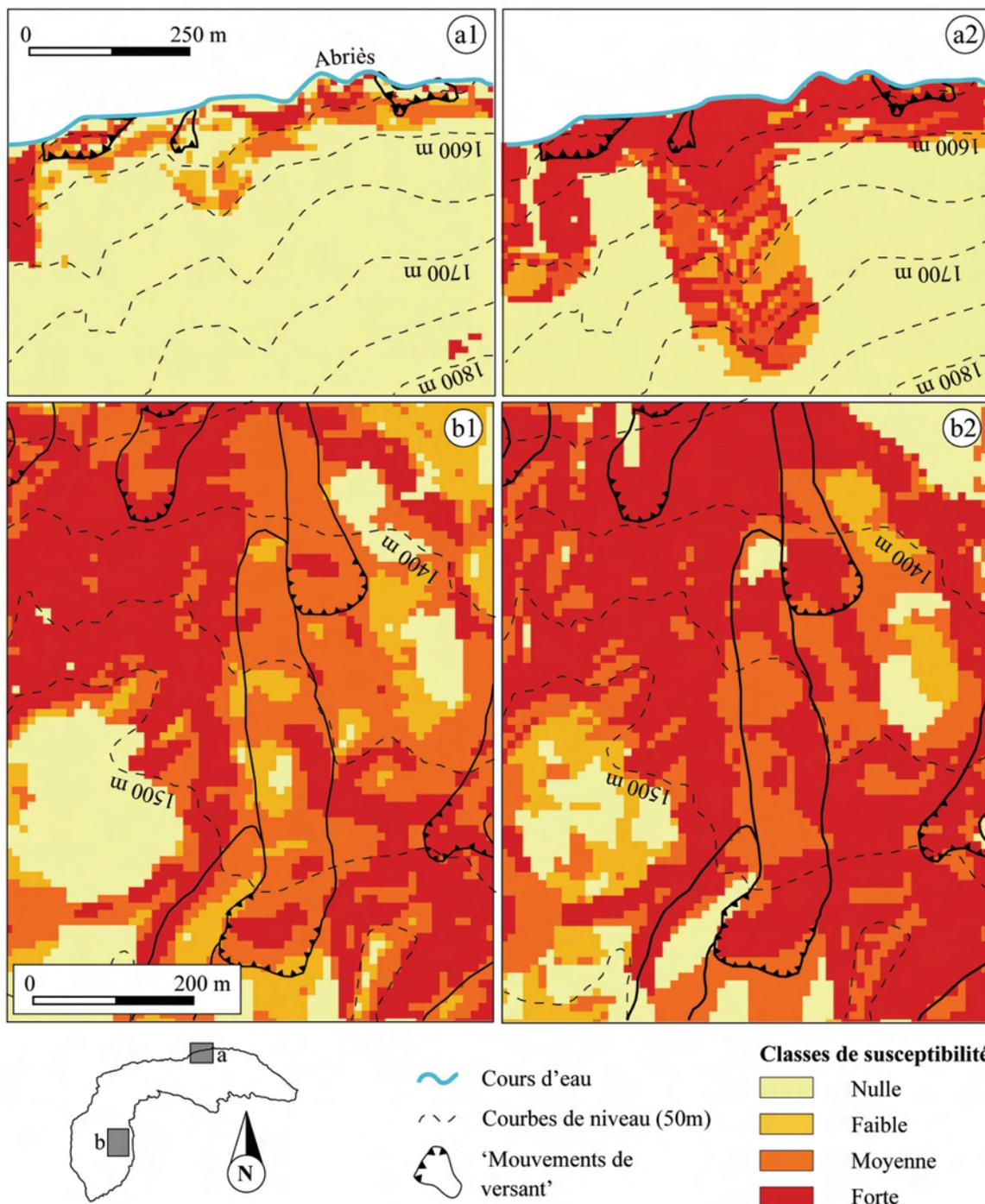
cellules par rapport à la surface totale du site les p_{post} ont une valeur très faible. Elles ne sont donc pas considérées comme des probabilités *stricto-sensu* mais comme des 'indices' de susceptibilité (Zêzere *et al.*, 2003).



a. Carte simulée pour les glissements translationnels complexes (NVP1 + LIT + OS). b. Carte simulée pour les glissements translationnels superficiels de berge (NVP2 + OS + HYD + ASP + BED). c. Carte simulée pour les glissements rotationnels de berge (NVP4 + OS + HYD + ASP).

Fig. 7.5. Exemples de cartes de susceptibilité et de courbes de p_{post} cumulées obtenues avec la Théorie de l'évidence après calage (utilisant la stratégie développée pour cette recherche).

La figure 7.6 présente deux exemples de simulations reclassées, sans et avec *NVP*, pour les glissements translationnels complexes et translationnels superficiels de berge. Les 'mouvements de versant' sont nettement mieux reconnus après l'introduction de la *NVP* : le nombre de cellules en classe de susceptibilité forte augmente de 80% entre la figure 7.6.a1 et la figure 7.6.a2.



a1. Carte simulée pour les glissements translationnels superficiels de berge avec les quatre constantes et sans *NVP* (SLO + LIT + FS + OS). a2. Carte simulée pour les glissements translationnels superficiels de berge avec *NVP* (NPV4 + OS + HYD + ASP + PEN). b1. Carte simulée pour les glissements translationnels complexes avec les quatre constantes et sans *NVP* (SLO + LIT + FS + OS). b2. Carte simulée pour les glissements translationnels complexes avec *NVP* (NVP1 + LIT + OS).

Fig. 7.6. Exemples de simulations sans *NVP* et avec *NVP*.

3.1.4. Evaluation de la confiance statistique

La confiance statistique est évaluée avec le test *T* de *Student* (Davis, 2002). Les résultats sont présentés dans le tableau 7.8. Avec plus de 73% de surfaces de susceptibilité forte pour un seuil $\alpha = 0.05$ (95% de confiance), on estime que les meilleures simulations pour chaque type de 'mouvements de versant' sont statistiquement fiables.

Tab. 7.8 Confiance statistique des meilleures simulations par type de 'mouvements de versant' par Théorie de l'évidence.

TC = Glissements translationnels complexes ; TSB = Glissements translationnels superficiels de berge ; TSI = Glissements translationnels superficiels d'interfluve ; RB = Glissements rotationnels de berge ; RBI = Glissements rotationnels d'interfluve ; BB = Glissement banc sur banc.

'Mouvements de versant'	Simulations	Nombre de combinaisons	Nombre de cellules introduites	Surface incluse dans l'intervalle de confiance
TC	NVP1 + LIT + OS	215	230	93%
TSB	NVP2 + OS + ASP + BED	743	230	85%
TSI	NVP3 + LIT + OS	215	74	79%
RB	NVP4 + OS + ASP	288	230	99%
RI	NVP5 + OS + ASP	206	53	71%
BB	NVP6 + GP + EFS + PEN	597	89	73%

Pour les glissements translationnels superficiels d'interfluve, les glissements rotationnels d'interfluve et les glissements banc sur banc, les simulations présentent une surface de susceptibilité forte incluse dans l'intervalle de confiance plus faible (entre 73% et 79% de la surface en *S4*). Ces plus faibles valeurs, par rapport aux résultats des simulations pour les autres 'mouvements de versant', sont dues à un jeu de cellules représentatives plus réduit utilisé lors du calage des modèles. Comme le souligne Bonham-Carter (1994), dans ce cas, les valeurs de *ppost* sont moins stables et génèrent une variance et un écart-type larges. Toutefois, la prise en compte de cellules représentatives (localisation et combinaison les plus fréquentes) des zones d'ablation et l'introduction d'une *NVP* permettent (i) d'obtenir une surface de susceptibilité forte à la confiance statistique considérée comme acceptable et (ii) de réduire l'incertitude statistique des résultats.

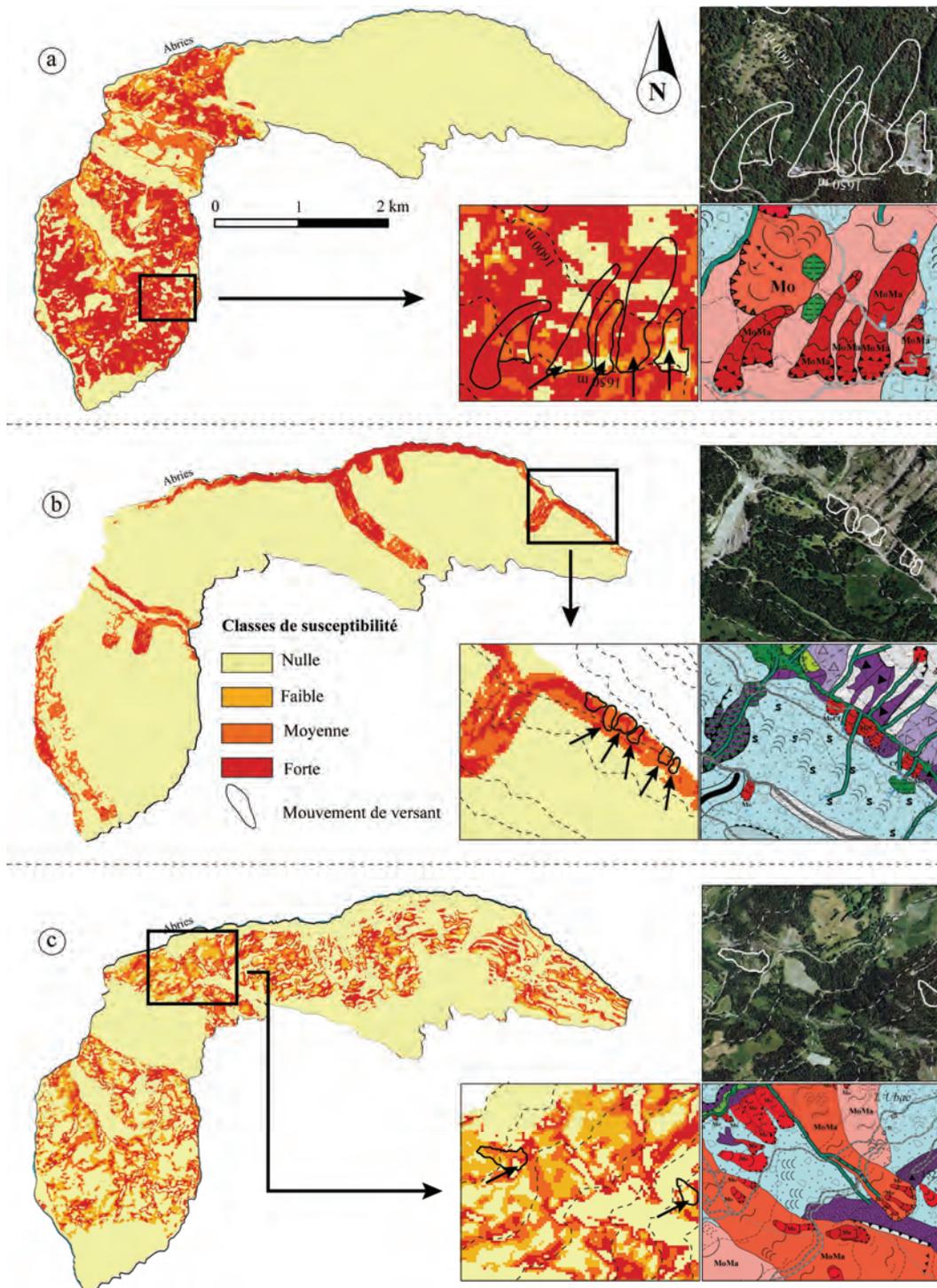
D'un point de vue statistique, les cartes finales obtenues sur le site représentatif sont donc considérées comme performantes en termes de reconnaissance des phénomènes. La stratégie de calage, tenant compte des *VM* et des *VP*, apparaît bien adaptée pour une approche bivariée fondée sur les théories de Bayes. L'introduction de la *NVP*, ayant une signification géomorphologique, contribue par ailleurs à ces bons résultats. Les cellules les plus représentatives des *VM3*, les *VP* et les *NVP* sont maintenant utilisées pour les modélisations par Régressions logistiques.

3.2. Modélisation par Régressions logistiques

3.2.1. Analyse visuelle des simulations et comparaison par courbes de prédiction

La figure 7.7 présente trois extraits de cartes réalisées à partir des meilleurs jeux de variables pour trois types de 'mouvements de versant' différents. De manière générale, les cartes obtenues par Régressions logistiques présentent deux aspects opposés :

- (i) D'une part, **elles présentent des aires de susceptibilité forte largement supérieures aux cartes obtenues par la Théorie de l'évidence**, comme c'est le cas pour les glissements translationnels complexes, les glissements translationnels superficiels de berge et les glissement rotationnels de berge. Cela n'est pas réellement satisfaisant d'un point de vue expert (Fig. 7.7.a) ;



a. Carte simulée pour les glissements translationnels complexes. b. Carte simulée pour les glissements translationnels superficiels de berge. c. Carte simulée pour les glissements rotationnels d'interfluve. Chaque exemple présente un extrait de l'Orthophoto (IGN, 2000) et un extrait de la carte géomorphologique. Pour chaque carte simulée, ne sont présentés que les 'mouvements de versant' associés aux simulations.

Fig. 7.7. Exemples de cartes de susceptibilité simulées par Régressions logistiques.

- (ii) D'autre part, les surfaces en susceptibilité forte sont très inférieures à celles simulées par la Théorie de l'évidence pour les glissements translationnels

d'interfluve, les glissements rotationnels d'interfluve et les glissements banc sur banc. Dans ce cas, les zones de susceptibilité forte ne sont pas homogènes (Fig. 7.7.c).

Certaines localisations de susceptibilité forte simulées par *Régressions logistiques* apparaissent donc peu représentatives par rapport aux conditions environnementales réelles (comme par exemple dans le secteur de *Bois Noir* ou le long de *l'Abriès* ; Figs. 7.7b et 7.7.b). Les surfaces présentées dans le tableau 7.9 confirment cette impression de surestimation ou de sous-estimation des surfaces de susceptibilité forte par rapport aux surfaces simulées et selon le type de 'mouvements de versant' par la *Théorie de l'évidence*.

Tab. 7.9. Erreur relative pour les meilleures simulations obtenues par *Théorie de l'évidence* et *Régressions logistiques* pour chaque type de 'mouvements de versant'.

TC = Glissements translationnels complexes ; TSB = Glissements translationnels superficiels de berge ; TSI = Glissements translationnels superficiels d'interfluve ; RB = Glissements rotationnels de berge. ; RBI = Glissements rotationnels d'interfluve ; BB = Glissement banc sur banc ; S4 = Susceptibilité forte.

'Mouvements de versant'	Combinaison	Erreur relative (ξ)		Surface en S4 (km ²)	
		Théorie de l'évidence	Régressions logistiques	Théorie de l'évidence	Régressions logistiques
TC	NVP1 + LIT + OS	0.18	0.30	2.11	2.45
TSB	NVP2 + OS + ASP + BED	0.14	0.30	0.91	0.99
TSI	NVP3 + LIT + OS	0.31	0.52	4.8	3.0
RB	NVP4 + OS + ASP	0.16	0.32	0.9	10.3
RI	NVP5 + OS + ASP	0.19	0.87	1.7	1.2
BB	NVP6 + GP + EFS + PEN	0.17	0.39	0.80	0.45

Les courbes de prédiction recommandées pour comparer des cartes simulées par approche probabiliste de manière efficace et visuelle, sont calculées pour les simulations de chaque type de 'mouvements de versant' (Chung et Fabbri, 1999, 2001). La figure 7.8 présente les différentes courbes obtenues. Pour chaque type de 'mouvements de versant', la *Théorie de l'évidence* a un pouvoir prédictif supérieur : la proportion de surface simulée ayant les *ppost* les plus élevées (donc fortement susceptible) est toujours inférieure à celle simulée par les *Régressions logistiques*. Par exemple, pour les glissements translationnels complexes (Fig. 7.8.a), 20% de la surface la plus susceptible modélisée par la *Théorie de l'évidence* suffit à prédire 89% des VM. Pour une même prédiction, il faudra 50% de la surface la plus susceptible modélisée par les *Régressions logistiques*.

3.2.2. Comparaisons des erreurs relatives et synthèse

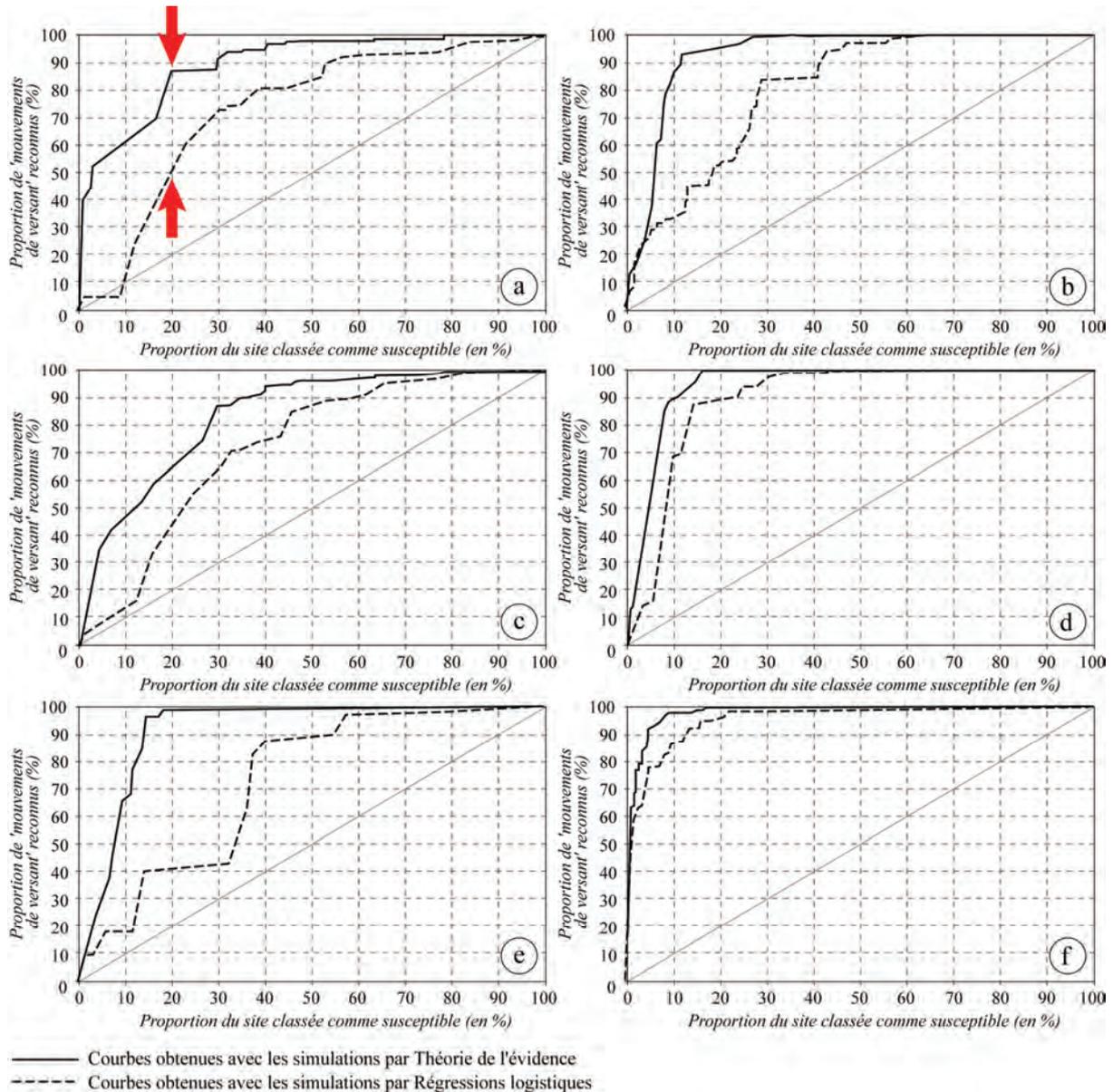
Ces différences de prédiction sont confirmées par le calcul et la comparaison des erreurs relatives (ξ) des deux approches. Le tableau 7.9 met en valeurs ces différences parfois considérables pour certains types de 'mouvements de versant', comme c'est le cas pour les glissements rotationnels d'interfluve (différence de 0.68).

Ces différences d'erreur relative (ξ) sont à mettre en rapport avec le nombre de cellules retenues pour les analyses et la détermination des surfaces de susceptibilité issues des *ppost*. Ainsi, se distinguent deux cas :

- (i) **Lorsque la surface de susceptibilité forte simulée par les *Régressions logistiques* est plus grande que celle simulée par la *Théorie de l'évidence*, les erreurs relatives sont alors relativement proches (pas de différence au-delà de 0.16).** C'est le cas pour les simulations des glissements translationnels complexes, des glissements translationnels superficiels d'interfluve et des glissements rotationnels de berge. Dans ce cas le nombre de cellules représentatives est relativement grand (> 200) ;
- (ii) **Lorsque la surface de susceptibilité forte simulée par les *Régressions logistiques* est plus réduite que celle simulée par la *Théorie de l'évidence*, les erreurs relatives**

sont **dissemblables**, comme les simulations réalisées pour les glissements translationnels superficiels d'interfluve, les glissements rotationnels d'interfluve et les glissements banc sur banc. Dans ce cas le nombre de cellules représentatives est faible (< 100).

Les simulations par **Régressions logistiques** sont donc très sensibles au nombre de cellules introduites, en particulier lorsque ce nombre est inférieur à un certain seuil. Pour cette recherche, ce seuil se situe à environ 200 cellules représentatives retenues. La définition précise de ce seuil devra faire l'objet de recherches plus spécifiques.



a. Glissements translationnels complexes. b. Glissements translationnels superficiels de berge. c. Glissements translationnels superficiels d'interfluve. d. Glissements rotationnels de berge. e. Glissements rotationnels d'interfluve. f. Glissement banc sur banc.

Fig. 7.8. Courbes de prédiction des simulations par Théorie de l'évidence et par Régressions logistiques pour chaque type de 'mouvements de versant'.

Pour conclure, d'un point de vue visuel et statistique, les résultats des simulations réalisées par la Théorie de l'évidence et par les Régressions logistiques sont assez divergents. Visuellement, les cartes obtenues présentent de nettes différences d'une méthode à l'autre, avec des surfaces de susceptibilité forte simulées variant jusqu'à 40% (pour les simulations des glissements banc sur banc par exemple). Ces différences se remarquent d'autant plus lorsque les tests de prédiction et d'erreur relative (ξ) sont appliqués. Ces deux tests révèlent un pouvoir prédictif des cartes très limité, notamment lorsque le nombre de cellules représentatives est restreint. **Ce facteur limitatif confirme les travaux de Thiart *et al.* (2003) et de van den Eeckhaut *et al.* (2006) qui soulignent l'intérêt d'une méthodologie adaptée, pour les Régressions logistiques, dans le cas d'un nombre réduit de VM ou de cellules représentatives.**

Ainsi, malgré l'introduction de la NVP dont le but est de réduire le nombre de combinaison possible entre VP, et par conséquent l'incertitude statistique des calculs de *ppost*, **les Régressions logistiques apparaissent moins bien adaptées pour une cartographie de la susceptibilité à l'échelle du 1/10 000^{ème} que la Théorie de l'évidence.**

3.3. Synthèse : limites des approches probabilistes pour une échelle du 1/10 000^{ème}

Avant de comparer les cartes obtenues par les différentes approches (qualitative, semi-quantitative et bivariée), il est utile de rappeler les avantages et les limites de la stratégie appliquée et les possibilités offertes par les approches probabilistes. Elles définissent le potentiel du modèle pour une éventuelle transposition :

- (i) **Un nombre restreint de cellules représentatives peut suffire pour obtenir des *ppost* cohérentes et stables** à condition qu'elles soient bien choisies en fonction des caractéristiques des phénomènes à prendre en compte. Selon la méthode d'analyse spatiale, un nombre trop réduit de cellules représentatives provoque une diminution de la confiance statistique à accorder aux *ppost* et biaise l'interprétation des classes de susceptibilité dérivées. De ce fait, l'approche par *Régressions logistiques* nécessite soit un nombre plus élevé de cellules représentatives des zones d'ablation, soit une autre stratégie de modélisation spatiale pour ce type d'environnement et pour cette échelle de travail ;
- (ii) **Pour la Théorie de l'évidence, ce nombre limité de cellules représentatives (< 200), pour certains types de 'mouvements de versant', a eu de faibles conséquences sur l'erreur relative (ξ) et sur la confiance statistique des modèles finaux.** Toutefois, une probabilité *a priori* (*pprior* = nombre de cellules représentatives / surface totale du site d'étude) de 0.0018 est un minimum à vérifier avant toute simulation pour cette échelle de travail. En deçà, les résultats des probabilités *a posteriori* (*ppost*) semblent plus instables entraînant alors des difficultés d'interprétation. Si pour les simulations par *Théorie de l'évidence*, ce seuil n'a pas été contraignant, cela est dû à la néo-variable prédictive (NVP), produite spécifiquement et introduite dans le modèle ;
- (iii) **L'introduction d'une néo-variable (NVP) augmente le pouvoir prédictif des cartes simulées** (par exemple l'erreur relative ξ passant de 0.45 à 0.14 pour les glissements translationnels superficiels de berge) tout en réduisant l'incertitude statistique des calculs. Cette NVP doit avoir une signification géomorphologique et une indépendance conditionnelle vis-à-vis des autres VP. Ceci induit un processus d'identification long nécessitant plusieurs tests statistiques (tests de corrélation, d'association, analyse statistique multidimensionnelle) et une validation par l'expert qui accepte ou non de regrouper certaines variables. ;
- (iv) **A noter que le même processus de regroupement a été réalisé avec l'approche semi-quantitative par *Logiques floues*** (Chap. 6 ; § 2.2.2). Les classes de variables retenues pour cette approche sont les mêmes que celles retenues après une analyse statistique complexe. La comparaison des deux approches avec le même jeu de VP

sera effectuée dans la section 4. **Enfin, cette néo-variable apparaît indispensable pour une évaluation de la susceptibilité aux 'mouvements de versant' à l'échelle du 1/10 000^{ème}.** Elle permet d'obtenir des zones cohérentes de susceptibilité évitant des cellules isolées, obligeant de passer des filtres successifs pour rendre la carte bien plus lisible (Malet *et al.*, 2006) ;

- (v) **La stratégie d'évaluation**, basée sur des critères de reconnaissance de VM indépendantes (cellules non introduites dans le modèle), des tests de prédiction et des tests de confiance statistique, s'avère être efficace, laissant assez peu d'incertitude au niveau mathématique ;
- (vi) **Il faut maintenant valider les meilleures cartes simulées.** Comme pour l'approche semi-quantitative cela passe par **une comparaison avec la carte 'expert'** et une analyse fine de certains secteurs posant des problèmes de simulation ou d'interprétation. Si les tests statistiques sont indispensables, **l'expert se doit de vérifier et de comprendre pourquoi certains secteurs sont ou ne sont pas reconnus dans telle ou telle classe de susceptibilité.** Ceci est particulièrement vrai lorsque les phénomènes à modéliser et le site de recherche présentent des morphologies complexes.

4. COMPARAISON, VALIDATION ET TRANSPOSITION : COMMENT RETENIR LA MEILLEURE APPROCHE CARTOGRAPHIQUE ?

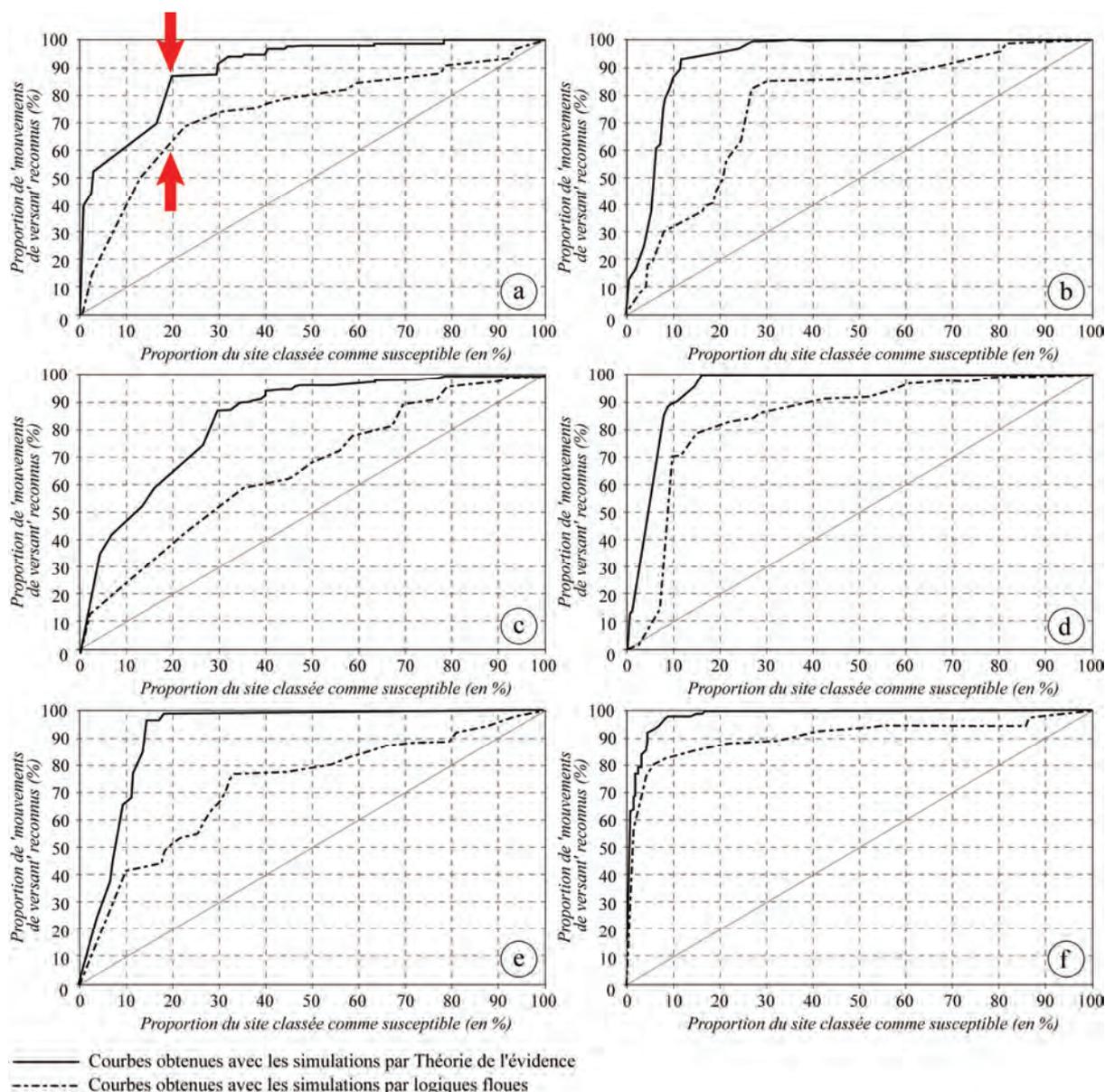
Les différentes approches sont maintenant calées et évaluées. L'objectif final de la cartographie de la susceptibilité étant de retenir la meilleure approche par modèle d'analyse spatiale, il convient **dans un premier temps de comparer les résultats acquis par l'approche semi-quantitative fondée sur les Logiques floues et par l'approche probabiliste (Théorie de l'évidence).** Cette comparaison repose sur l'analyse des courbes de prédiction, sur des tests statistiques et sur une comparaison à la carte 'expert' (tests de qualité, discussion de secteurs à problèmes). **Les meilleurs résultats sont ensuite utilisés sur l'ensemble du bassin de Barcelonnette pour une validation locale, avant d'être transposés sur le site du Moulin.**

4.1. Approche semi-quantitative et approche probabiliste : quelle approche retenir ?

4.1.1. Comparaisons statistiques

Les premières comparaisons s'effectuent par les calculs des courbes de prédiction et le calcul de l'erreur relative (ξ) pour les zones d'ablation.

La figure 7.9 présente les différentes courbes de prédiction obtenues pour les deux approches. Pour chaque type de 'mouvements de versant', la *Théorie de l'évidence* a un pouvoir prédictif supérieur aux simulations : la proportion de surface simulée ayant les *ppost* les plus élevées (donc fortement susceptibles) est toujours inférieure à celle simulée par *Logiques floues*. En reprenant, l'exemple des glissements translationnels complexes servant à illustrer la différence entre les simulations par *Théorie de l'évidence* et *Régressions logistiques*, pour 20% de la surface la plus susceptible modélisée, la simulation par *Logiques floues* prédit 63% des VM alors que pour la *Théorie de l'évidence* 89% des VM sont reconnues (Fig. 7.9.a).



a. Glissements translationnels complexes. b. Glissements translationnels superficiels de berge. c. Glissements translationnels superficiels d'interfluve. d. Glissements rotationnels de berge. e. Glissements rotationnels d'interfluve. f. Glissement banc sur banc.

Fig. 7.9. Courbes de prédiction des simulations par Théorie de l'évidence et par Logiques floues pour chaque type de 'mouvements de versant'.

Le tableau 7.10 indique l'erreur relative (ξ) et les surfaces retenues en susceptibilité forte (S4) de chaque simulation avec les meilleures variables. Malgré, la forte incertitude des pondérations de certaines classes de VP pour l'approche semi-quantitative (Chap. 6), les différences sont moins élevées qu'avec les Régressions logistiques et n'excèdent pas 0.12 pour l'erreur relative (ξ) et 0.65 km² pour les surfaces retenues en S4, sauf pour les glissements rotationnels d'interfluve avec une différence de 1.82 km². Les raisons de cette différence seront détaillées par la suite (§ 4.1.2.2).

Les simulations réalisées par approche probabiliste bivariée sont supérieures en qualité de prédiction, à celles réalisées par approche semi-quantitative par Logiques floues. Mais cette analyse statistique générale ne suffit pas. Il faut procéder à une analyse plus détaillée secteurs par secteurs en comparant ces résultats obtenus avec ceux de la carte 'expert'.

Tab. 7.10. Erreur relative pour les meilleures simulations obtenues par Théorie de l'évidence et Régressions logistiques pour chaque type de 'mouvements de versant'.

TC = Glissements translationnels complexes ; TSB = Glissements translationnels superficiels de berge ; TSI = Glissements translationnels superficiels d'interfluve ; RB = Glissements rotationnels de berge ; RBI = Glissements rotationnels d'interfluve ; BB = Glissement banc sur banc ; S4 = Susceptibilité forte.

Les NVP utilisées pour chaque approche ne sont pas obtenues de la même manière que précédemment. Néanmoins, elles ont le même nom dans le tableau car elles combinent les mêmes classes de VP.

'Mouvements de versant'	Combinaison	Erreur relative (ξ)		Surface en S4 (km ²)	
		Théorie de l'évidence	Logiques floues	Théorie de l'évidence	Logiques floues
TC	NVP1 + LIT + OS	0.18	0.26	2.11	2.75
TSB	NVP2 + OS + ASP + PEN	0.14	0.26	0.91	0.71
TSI	NVP3 + LIT + OS	0.31	0.40	4.80	4.85
RB	NVP4 + OS + ASP	0.16	0.25	0.90	1.12
RI	NVP5 + OS + ASP	0.19	0.29	1.70	3.52
BB	NVP6 + GP + EFS + PEN	0.17	0.19	0.80	0.38

4.1.2. Evaluation experte

La phase de comparaison experte, comme nous l'avons vu dans le chapitre 6 (§ 2.3.2), est essentielle dans notre processus d'évaluation, en privilégiant plutôt les modèles qui fournissent des résultats réalistes plutôt que ceux qui sont 'optimaux' d'un point de vue numérique. C'est en ce sens que ces comparaisons sont jugées indispensables à cette échelle de travail, pour essayer de valider la (les) meilleure(s) approche(s) à inclure dans une méthodologie de cartographie de la susceptibilité. La comparaison experte s'effectue en deux temps :

- (i) **Dans un premier temps, les cartes probabilistes sont croisées une à une avec la carte 'expert'** et cinq indices de qualité⁵⁰ sont calculés. Un indice de qualité générale est calculé entre la carte 'expert' et une carte de susceptibilité probabiliste 'unifiée' (regroupant les six cartes simulées selon le principe de précaution⁵¹ évoqué dans le chapitre 6). Les indices calculés pour chaque carte simulée par chaque approche et les indices globaux sont ensuite comparés à ceux calculés pour les simulations par Logiques floues ;
- (ii) **Dans un second temps, les secteurs à problème de reconnaissance** de classes de susceptibilité, retenus dans le chapitre 6, sont repris afin d'observer si la stratégie de calage établie pour l'approche probabiliste est plus à même de résoudre ces difficultés de reconnaissance que la stratégie élaborée pour l'approche semi-quantitative.

4.1.2.1. Tests de qualité

Le tableau 7.11 présente chaque indice calculé pour les deux approches. Les indices par classes et par type de 'mouvements de versant' sont très proches entre les simulations obtenues par les deux approches. Les cartes probabilistes présentent un taux de classification correct (TCC) similaire entre les deux approches. Il est élevé (sans être optimum) pour chaque classe de susceptibilité pour chaque type de 'mouvements de versant' (TCC entre 0.67 et 0.91).

⁵⁰ Les tests de qualité sont issus du tableau de contingence. Sont calculés : le taux de classement correct, le taux de classement non correct, l'indice de sensibilité, l'indice de spécificité et le Kappa K de Cohen (Chap. 6 § 2.1.3).

⁵¹ En cas de doute sur une classe, la classe de susceptibilité du niveau supérieur est toujours privilégiée (cas entre classe forte et moyenne, et entre classe moyenne et faible).

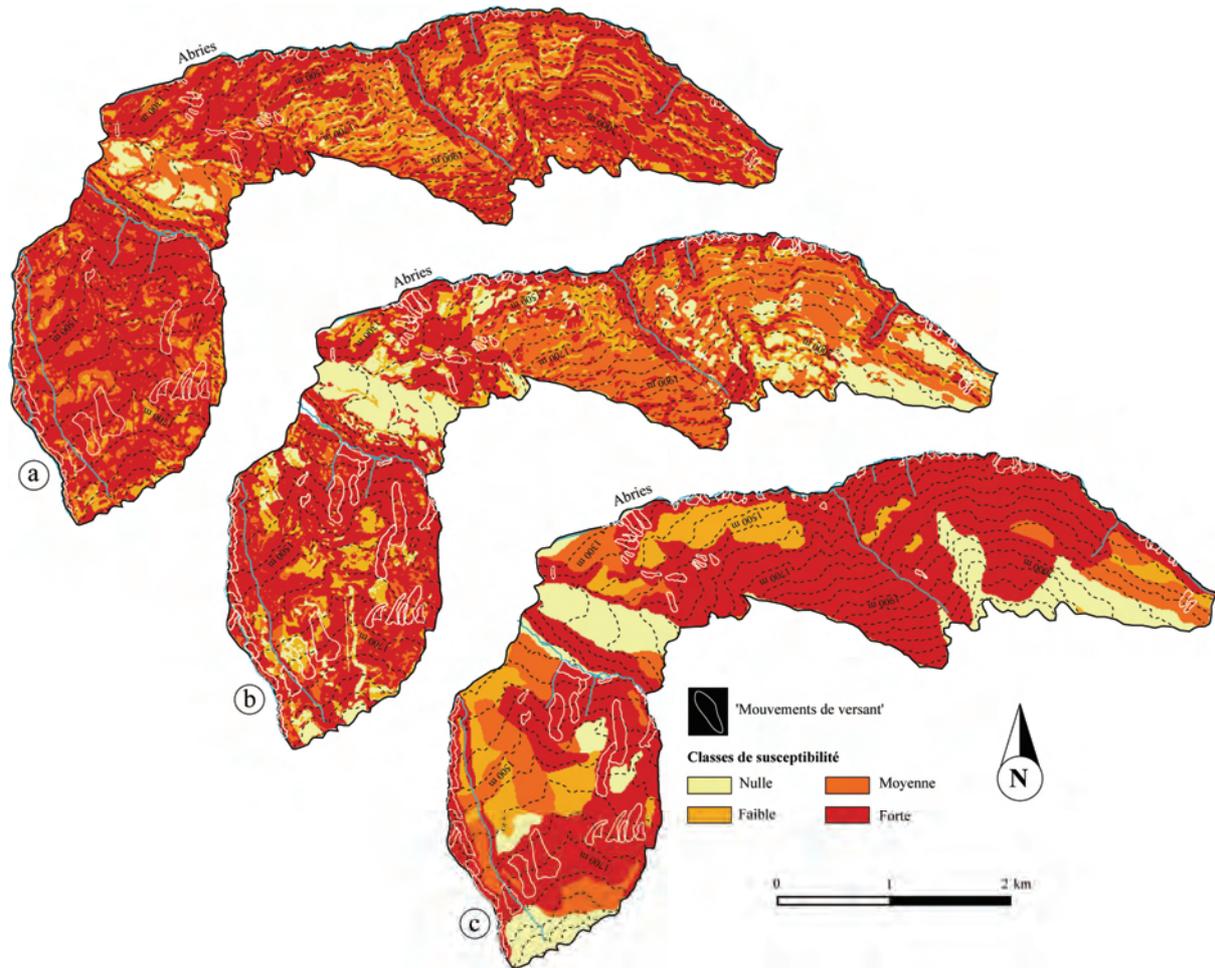
Tab. 7.11. Indices de qualité dérivés du tableau de contingence.

TCC = taux de classement correct ; TCN = taux de classement non correct ; SENS = indice de sensibilité ; SPE = indice de spécificité ; K = indice de Kappa. En gris les meilleures valeurs de K pour la susceptibilité forte et pour l'ensemble des classes de susceptibilité. LF = Logiques floues ; TE = Théorie de l'évidence.

	Classe de susceptibilité								Indices généraux	
	Nulle (S1)		Faible (S2)		Moyenne (S3)		Forte (S4)			
	LF	TE	LF	TE	LF	TE	LF	TE	LF	TE
Carte des glissements translationnels complexes										
TCC	0.80	0.78	0.85	0.87	0.82	0.84	0.80	0.80	0.82	0.82
TCN	0.20	0.22	0.15	0.13	0.18	0.16	0.20	0.20	0.18	0.18
SENS	0.81	0.77	0.19	0.13	0.13	0.13	0.62	0.74	0.64	0.74
SPE	0.22	0.80	0.91	0.91	0.91	0.92	0.86	0.84	0.88	0.88
K	0.58	0.54	0.08	0.03	0.05	0.05	0.42	0.43	0.52	0.52
Carte des glissements translationnels superficiels de berge										
TCC	0.79	0.78	0.84	0.78	0.85	0.79	0.70	0.73	0.80	0.77
TCN	0.21	0.22	0.16	0.22	0.15	0.21	0.30	0.27	0.20	0.23
SENS	0.33	0.50	0.13	0.10	0.11	0.15	0.88	0.89	0.59	0.65
SPE	0.09	0.93	0.94	0.88	0.94	0.90	0.48	0.64	0.86	0.82
K	0.29	0.47	0.08	0.01	0.05	0.06	0.40	0.48	0.45	0.42
Carte des glissements translationnels d'interfluve										
TCC	0.75	0.79	0.80	0.82	0.80	0.77	0.82	0.79	0.79	0.77
TCN	0.25	0.21	0.20	0.18	0.20	0.23	0.18	0.21	0.22	0.23
SENS	0.81	0.82	0.19	0.18	0.12	0.11	0.62	0.75	0.64	0.68
SPE	0.22	0.26	0.86	0.82	0.91	0.88	0.86	0.84	0.88	0.85
K	0.58	0.54	0.05	0.02	0.06	0.03	0.47	0.48	0.49	0.50
Carte des glissements rotationnels de berge										
TCC	0.82	0.79	0.84	0.88	0.77	0.81	0.68	0.70	0.74	0.78
TCN	0.18	0.21	0.16	0.12	0.23	0.19	0.32	0.30	0.26	0.22
SENS	0.50	0.74	0.26	0.06	0.24	0.10	0.60	0.69	0.49	0.76
SPE	0.06	0.81	0.89	0.95	0.83	0.86	0.39	0.71	0.82	0.85
K	0.49	0.42	0.09	0.01	0.10	0.01	0.40	0.41	0.41	0.42
Carte des glissements rotationnels d'interfluve										
TCC	0.82	0.78	0.86	0.72	0.70	0.78	0.54	0.67	0.75	0.77
TCN	0.18	0.22	0.14	0.28	0.30	0.22	0.46	0.33	0.25	0.23
SENS	0.50	0.55	0.26	0.23	0.24	0.23	0.60	0.65	0.49	0.55
SPE	0.06	0.15	0.89	0.34	0.83	0.78	0.59	0.57	0.82	0.81
K	0.45	0.39	0.08	0.04	0.05	0.13	0.21	0.35	0.32	0.39
Carte des glissements banc sur banc										
TCC	0.80	0.80	0.75	0.73	0.89	0.85	0.72	0.82	0.79	0.82
TCN	0.20	0.20	0.25	0.27	0.11	0.15	0.28	0.18	0.21	0.18
SENS	0.31	0.68	0.11	0.18	0.09	0.17	0.86	0.85	0.56	0.62
SPE	0.07	0.05	0.92	0.88	0.92	0.91	0.46	0.57	0.84	0.84
K	0.37	0.39	0.06	0.09	0.03	0.05	0.41	0.45	0.43	0.45
Carte unifiée										
TCC	0.88	0.80	0.79	0.81	0.67	0.85	0.67	0.91	0.71	0.75
TCN	0.12	0.20	0.21	0.19	0.33	0.15	0.33	0.09	0.29	0.25
SENS	0.55	0.86	0.08	0.18	0.10	0.08	0.62	0.80	0.42	0.61
SPE	0.89	0.39	0.88	0.89	0.85	0.95	0.35	0.93	0.81	0.89
K	0.18	0.36	0.01	0.08	0.01	0.03	0.20	0.43	0.23	0.41

Les indices de sensibilité⁵² (SENS, cf. Chap.6, § 2.3), sont moyens à bons pour les classes S1 et S4, et mauvais pour les classes S2 et S3. Les taux de classifications correctes sont confirmés par un indice K pratiquement toujours supérieur à 0.4 pour S1 et S4. Comme pour les classes simulées par approche semi-quantitative, la concordance des classes simulées par approche probabiliste est donc considérée comme correcte pour S1 et S4 alors qu'elle est considérée comme faible à très faible pour S2 et S3.

⁵² Indice de sensibilité : probabilité qu'une classe de susceptibilité S de la carte simulée soit classée correctement par rapport à la même classe issue de la carte 'expert'.



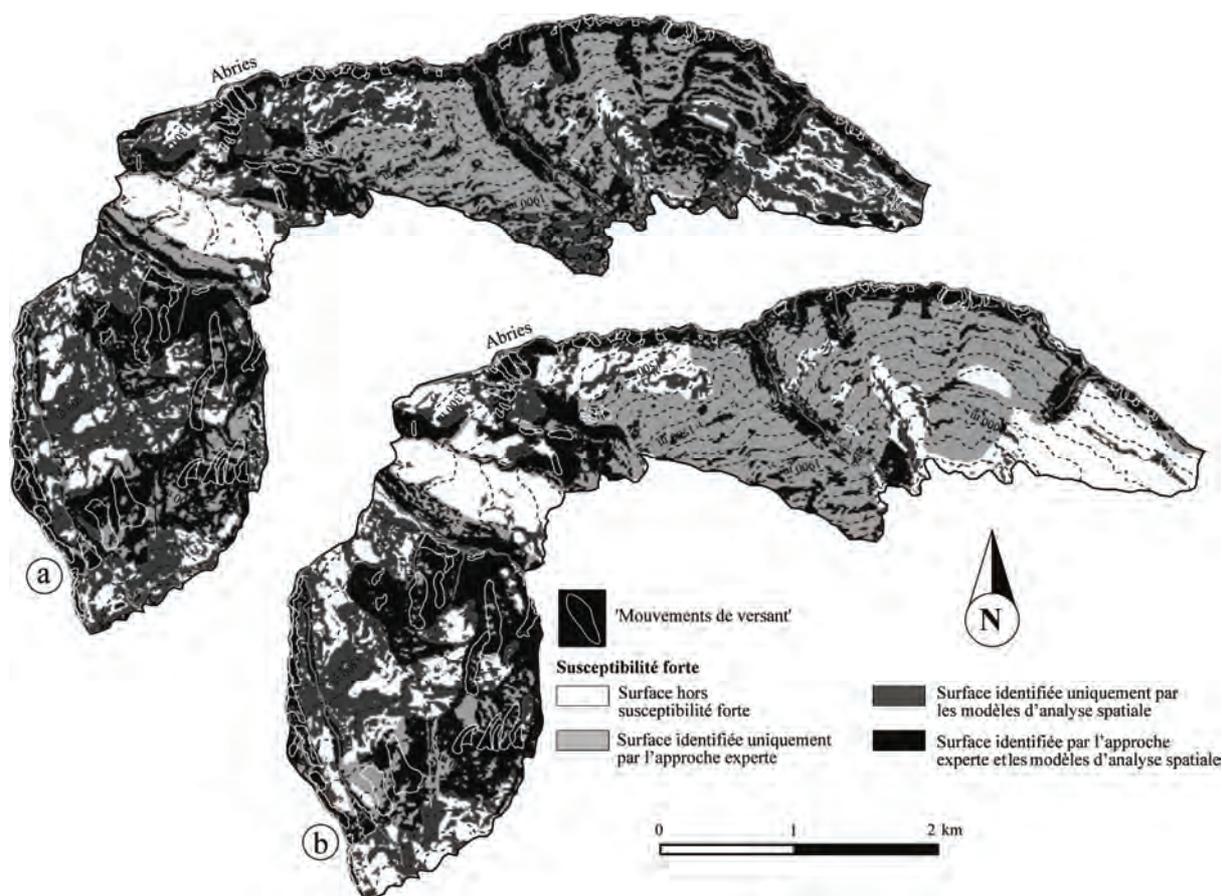
a. Carte unifiée simulée par Logiques floues. b. Carte unifiée simulée par la Théorie de l'évidence. c. Carte 'expert'.

Fig. 7.10. Cartes de susceptibilité unifiées simulées par la Théorie de l'évidence et l'approche semi-quantitative par logiques floues pour le site de calage.

De manière générale, les différents indices de qualité (TCC, SENS, K) entre les cartes probabilistes unifiées et la carte 'expert' s'avèrent légèrement meilleurs que ceux calculés avec la carte de susceptibilité semi-quantitative unifiée. Ceci est particulièrement vrai pour les classes S1 et S4, alors que pour S2 et S3, les différents coefficients restent faibles. La sous estimation des secteurs S1, S2 et S3 pour la carte unifiée est due, cette fois encore, au regroupement des différentes cartes suivant le principe de précaution. Ce principe favorise les classes de susceptibilité élevées. Toutefois, contrairement à la carte unifiée semi-quantitative, la carte unifiée probabiliste est plus à même de différencier la classe nulle (Tab. 7.11 et Fig. 7.10). Les différences de localisation des classes et la comparaison experte sont détaillées dans le point suivant.

4.1.2.2. Analyse experte

La figure 7. 11a, 7.11.b présentent les différences entre les surfaces de susceptibilité forte pour les cartes unifiées simulées (par Logiques floues et par Théorie de l'évidence) et la carte 'expert' sur le site de calage. Les secteurs présentant des différences sont globalement les mêmes sauf la partie est du secteur où les simulations par Théorie de l'évidence apparaissant peu performantes pour obtenir des classes fortes en adéquation avec la carte 'expert'.



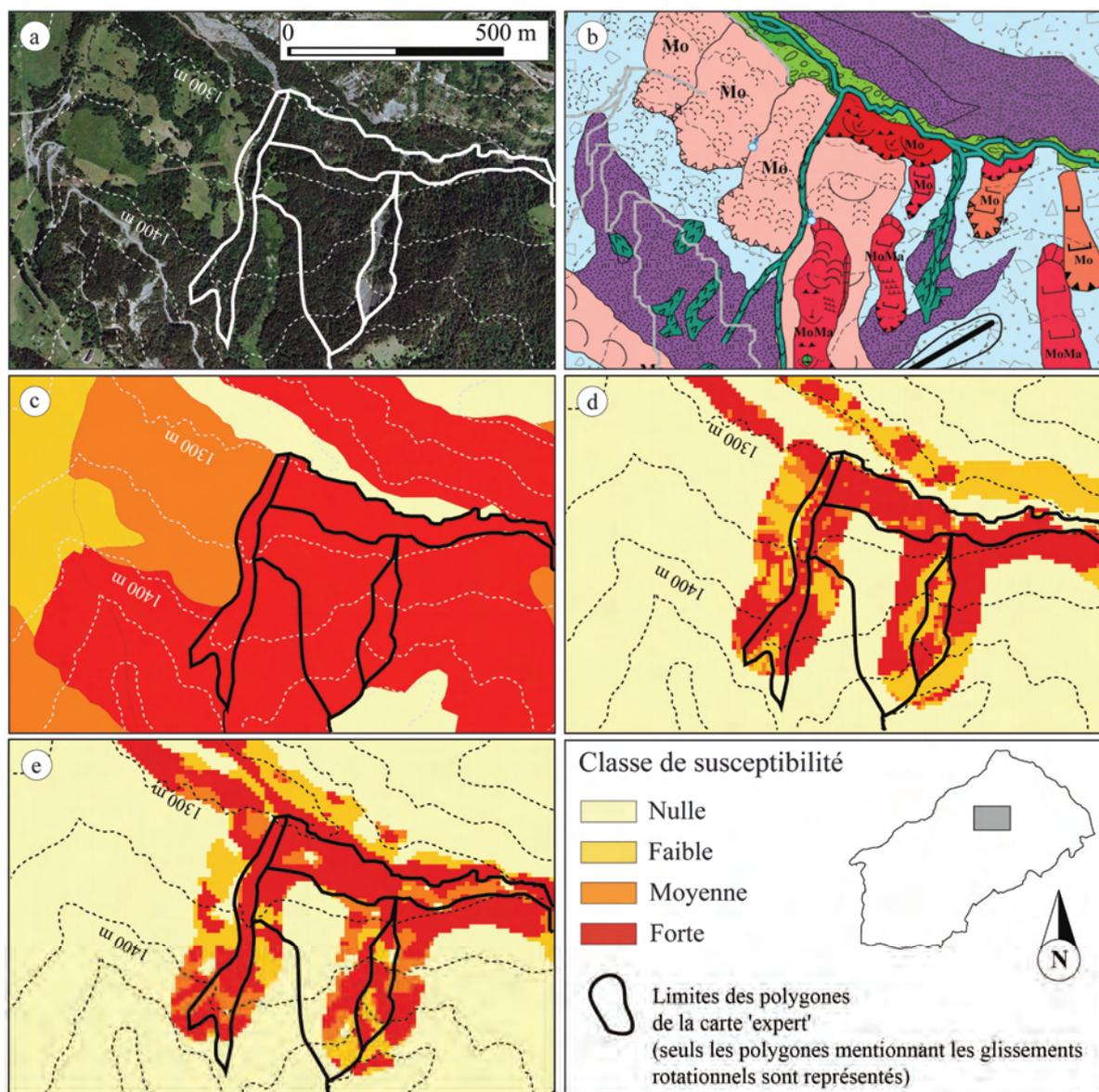
a. Différences entre la carte 'expert' et la carte simulée par Logiques floues. b. Différences entre la carte 'expert' et la carte simulée par Théorie de l'évidence.

Fig. 7.11. Carte des différences entre les surfaces reconnues en susceptibilité forte pour la carte 'expert' et les surfaces simulées en susceptibilité forte par les approches semi-quantitative et probabiliste pour le site de calage.

L'analyse experte, déjà réalisée pour les cartes semi-quantitatives (Chap. 6, § 2.4) se propose d'avancer des hypothèses sur les raisons de ces différences en se basant sur certains secteurs 'témoins'. Ces différences se résument en deux points avec :

- (i) Une sous-estimation ou une surestimation de certaines classes de susceptibilité ;
- (ii) Un biais introduit par l'unification des cartes de susceptibilité simulée et donc une prédiction 'individuelle' faible pour certains types de 'mouvements de versant'.

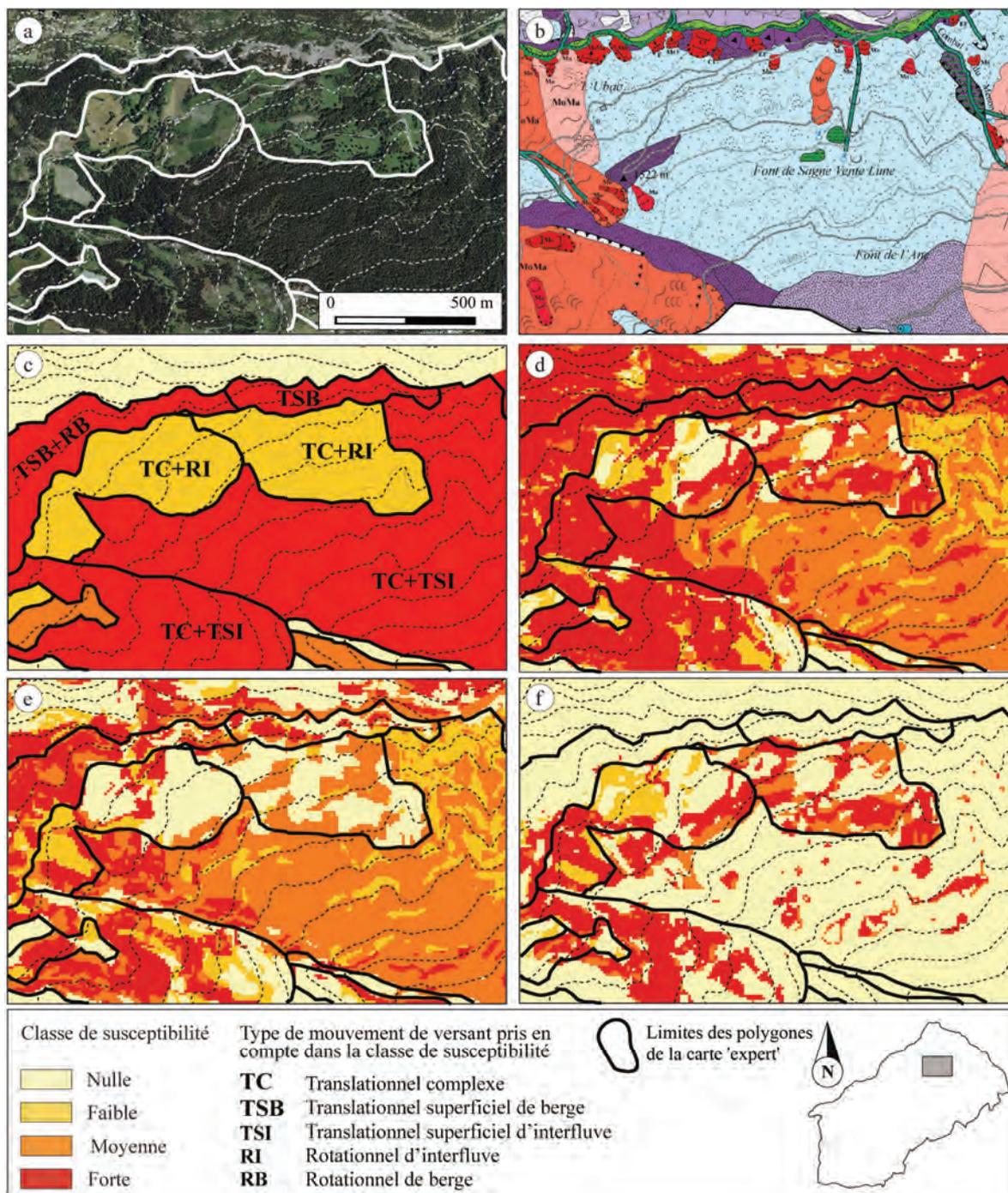
En d'autres termes, on propose une critique des résultats sur la base de nos connaissances du terrain, de la carte morphodynamique et de la carte 'expert'. Les simulations apparaissant très proches, les secteurs à problèmes identifiés pour les résultats de *Logiques floues* sont utilisés afin de comparer les résultats. Un autre secteur a été ajouté pour montrer qu'une identification globale élevée n'était pas toujours synonyme d'une bonne identification par type de phénomène. Les secteurs 'à problème' sont identifiés et des explications sont données sous forme de fiche comportant la carte morphodynamique, la carte 'expert' et les simulations réalisées. Sur chaque vignette, les polygones digitalisés pour la carte 'expert' sont superposés facilitant l'identification des secteurs problématiques.



a. Orthophoto (IGN, 2000). b. Carte morphodynamique. c. Carte 'expert'. d. Carte de susceptibilité simulée par Logiques floues. e. Carte de susceptibilité simulée par Théorie de l'évidence.

Fig. 7.12. Analyse comparative des résultats, fiche n°1 : problème de la zone tampon 'hydrologie' pour les glissements de berge dans le secteur de Bois Noir.

La figure 7.12 expose une simulation par Logiques floues et une simulation par Théorie de l'évidence. Comme la figure 6.13, elle montre que l'introduction de la zone tampon de 100 m accorde une importance trop grande à l'influence du sapement basal de certains torrents, notamment les torrents secondaires. Les valeurs d'appartenance finales ou les *ppost* obtenues surestiment donc cette influence. Inclure une zone tampon, moins large en fonction de l'activité du torrent et de son rang peut être envisagée afin de limiter cet effet. Enfin, la différence assez faible entre les deux cartes indique, que malgré un processus de calcul distinct, les stratégies élaborées pour ces deux approches sont comparables.



a. Orthophoto (IGN, 2000). b. Carte morphodynamique. c. Carte 'expert'. d. Carte de susceptibilité unifiée simulée par Théorie de l'évidence. e. Carte de susceptibilité simulée par Théorie de l'évidence pour les glissements translationnels superficiels d'interfluve. f. Carte de susceptibilité simulée par Théorie de l'évidence pour les glissements rotationnels d'interfluve.

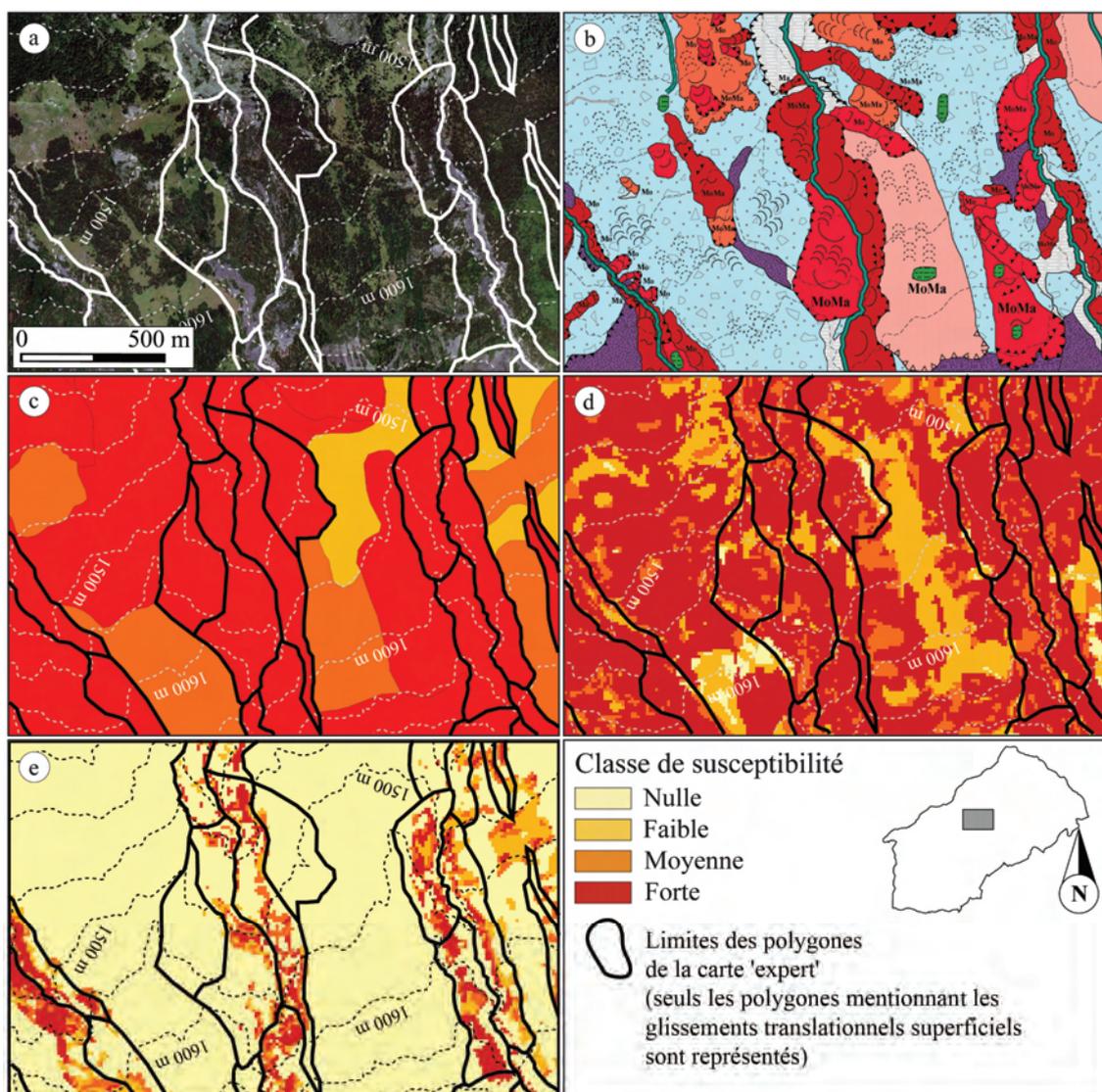
Fig. 7.13. Analyse comparative des résultats, fiche n° 2 : problème de caractérisation globale et particulière pour les glissements d'interfluves dans le secteur de l'Abriès.

La figure 7.13 permet de discuter le problème de la caractérisation :

- (i) Globale de la susceptibilité simulée par Théorie de l'évidence ;

- (ii) De la susceptibilité simulée par *Théorie de l'évidence* pour un type de 'mouvement de versant' (dans ce cas précis les glissements superficiels d'interfluves rotationnels et translationnels).

Sur les figures 7.13.d, e et f, la partie amont du versant au sud de ce secteur cartographié en classe forte sur la carte 'expert' est reconnue en classes de niveaux inférieurs sur les cartes simulées par *Théorie de l'évidence*. Ce problème d'identification de ce secteur de l'Abriès est dû au fait que la majorité des glissements translationnels superficiels d'interfluves se déclenchent à l'interface moraine/marnes, parfois dans les marnes. Par conséquent la VP lithologie est retenue pour les simulations. Le secteur de l'Abriès étant en partie situé dans des flyschs à *Helminthoïdes*, les *ppost* calculées dans ce secteur sont de *facto* faibles puisque très peu de 'mouvements de versant' de ce type y sont localisés. Les classes dérivées sont alors sous-évaluées par rapport à notre vision 'expert' du secteur.



a. Orthophoto (IGN, 2000). b. Carte morphodynamique. c. Carte 'expert'. d. Carte de susceptibilité unifiée simulée par *Théorie de l'évidence*. e. Carte de susceptibilité simulée par *Théorie de l'évidence* pour les glissements translationnels superficiels de berge.

Fig. 7.14. Analyse comparative des résultats, fiche n° 3 : problème d'identification pour les glissements translationnels superficiels de berge dans le secteur du torrent de Poche.

Pour le secteur en classe faible, au centre de l'extrait de la figure 7.13.c, la surestimation du modèle final (Fig. 7.13.d) provient de l'introduction de la carte probabiliste des glissements rotationnels d'interfluves (Fig. 7.13.f). Ces glissements se déclenchent sur des pentes faibles à moyennes et souvent sur des sols non boisés. Le secteur présente bien ces caractéristiques, mais, son entretien régulier (agriculture, drainage entretien par les services du RTM) est intégré dans notre vision 'expert' du secteur qui est alors estimé en classe faible. Ces points ne sont pas introduits dans le modèle qui surestime alors le secteur en classe de susceptibilité forte.

La figure 7.14 pose le problème de la carte simulée unifiée qui est en très bonne adéquation avec la carte expert alors que les cartes simulées par type de phénomènes ne le sont pas. Sur cet exemple, la carte de susceptibilité unifiée simulée par *Théorie de l'évidence* (Fig. 7.14.d) présente des classes de susceptibilité très proches de celles de la carte 'expert' (Fig. 7.14.c). Les polygones digitalisés pour ce secteur sont associés aux glissements translationnels de berge. En comparant la simulation pour les glissements translationnels de berge (Fig. 14.e) et la carte 'expert' (Fig. 7.14.c), les cartes ne sont plus concordantes. Ainsi, **cet exemple montre bien d'une part, toute l'attention et la prudence que l'on doit accorder aux indices statistiques** et, d'autre part, que ces cartes simulées, en dépit de divers tests appliqués, doivent être évaluées attentivement visuellement. Sans aller jusqu'à observer cellule par cellule l'ensemble des cartes simulées, il est impératif de choisir quelques secteurs 'témoins' pour vérifier les résultats des classes dérivées des différentes *ppost*.

4.1.3. Synthèse des résultats obtenus par les approches semi-quantitatives et probabilistes

Deux stratégies de cartographie de la susceptibilité ont été comparées : une stratégie de cartographie par approche semi-quantitative (*Logiques floues*) et une stratégie de cartographie par approche probabiliste (*Théorie de l'évidence*). Les deux ont été testées sur un site représentatif du versant *Ubac* du bassin de Barcelonnette. Les différents tests proposés au cours de cette recherche sont bons à très bons. Ils ont montré que **les cartes simulées par approche probabiliste bivariée sont meilleures que les cartes simulées par approche semi-quantitative**, en terme de reconnaissance des phénomènes et des classes de susceptibilité identifiées de manière experte (avec respectivement des erreurs relative entre 0.14 et 0.31, et un coefficient de kappa K global considéré comme bon > 0.4).

Pour obtenir de tels résultats, les deux stratégies développées se proposent de réduire l'incertitude statistique (pondérations des classes de variables, dépendance conditionnelle, confiance statistique) au maximum tout en gardant à l'esprit la réalité terrain et la prise en compte des critères géomorphologiques. Ces aspects sont respectés par l'introduction d'une NVP combinant deux ou plusieurs VP (grâce à un processus d'analyse de sensibilité des pondérations pour l'approche semi-quantitative ou d'analyses multidimensionnelles et exploratoires pour l'approche probabiliste) dont les résultats peuvent transcrire cette 'réalité géomorphologique'. Cette variable permet d'augmenter significativement le pouvoir prédictif des cartes simulées en créant des zones de susceptibilité homogènes. Pour cinq types de 'mouvements de versant', la combinaison s'effectue sur la base des VP 'gradients de pente' et 'formations superficielles'. Ces variables combinées sont indispensables pour l'étude de la susceptibilité aux 'mouvements de versant' étudiés dans le bassin de *Barcelonnette*. Les classes les plus influentes sont celles créées pour la NVP, elles sont données dans le tableau 7.10. Enfin, le processus de combinaison itératif permet d'éliminer les VP de base les moins influentes décrites au chapitre 5.

La comparaison avec la carte 'expert' et l'analyse de certains secteurs posant problème montre que pour les deux modèles spatiaux certains secteurs ne sont pas ou faiblement en adéquation avec l'analyse experte, surtout les secteurs en susceptibilité faible (S2) ou modérée (S3). Deux raisons majeures expliquent ces différences de reconnaissance :

- (i) **D'une part, la carte 'expert' est fondée sur la subjectivité du scientifique.** Les zones de susceptibilité sont alors adaptées en fonction de subtils changements environnementaux dans des secteurs spécifiques comme par exemple le non entretien d'un drain, un changement de conditions topographiques locaux non reconnues par les dérivées du *MNT*, ou la possibilité d'extension des phénomènes ;
- (ii) D'autre part, pour les approches semi-quantitative ou probabiliste, l'objectif est de reconnaître des secteurs favorables à l'occurrence spatiale de futurs '*mouvements de versant*'. Les stratégies sont donc développées en ce sens ;
- (iii) **Pour les approches probabilistes**, le processus de calcul binaire est optimisé pour reconnaître les conditions environnementales similaires de chaque type de phénomènes. C'est pour cela que le jeu de cellules représentant les classes de *VP* plus fréquentes dans les zones d'ablation (*VMg*) est utilisé. Retenir ce jeu de cellules représentatives présente un inconvénient majeur par le fait que certains secteurs ne sont pas pris en compte par le modèle, notamment ceux aux pentes $< 15^\circ$, alors que certains '*mouvements de versant*' s'y déclenchent (Thiery *et al.*, 2005, 2007) ;
- (iv) **Pour l'approche semi-quantitative par Logiques floues**, on répondra à l'objectif en se basant sur l'hypothèse *H* définie par « *les zones sont favorables aux mouvements de versant* » (Chap. 6, § 2.1). Les valeurs d'appartenance et le moteur d'inférence sont donc optimisés pour correspondre à cette hypothèse *H*, le modèle d'analyse spatial tend alors à réagir de manière binaire.

L'intérêt de cette comparaison des approches qualitative (experte), semi-quantitative et quantitative (probabiliste) est d'**obtenir une méthodologie transposable de cartographie par modèles d'analyse spatiaux**. Aux vues des différents tests d'évaluation (statistiques et expert), **le choix se porte sur l'approche probabiliste bivariée basée sur les théorèmes de Bayes (Théorie de l'évidence)**. **Une fois paramétrée**, grâce à la stratégie développée au cours de cette recherche, **les *ppost* et les classes de susceptibilités dérivées sont fiables laissant peu d'incertitude d'un point de vue mathématique**. La comparaison experte nous donne satisfaction, malgré certains secteurs en classes faible et moyenne et non reconnus par les cartes simulées. Il s'agit maintenant de valider localement la méthode en appliquant les *ppost* des différents types de phénomènes.

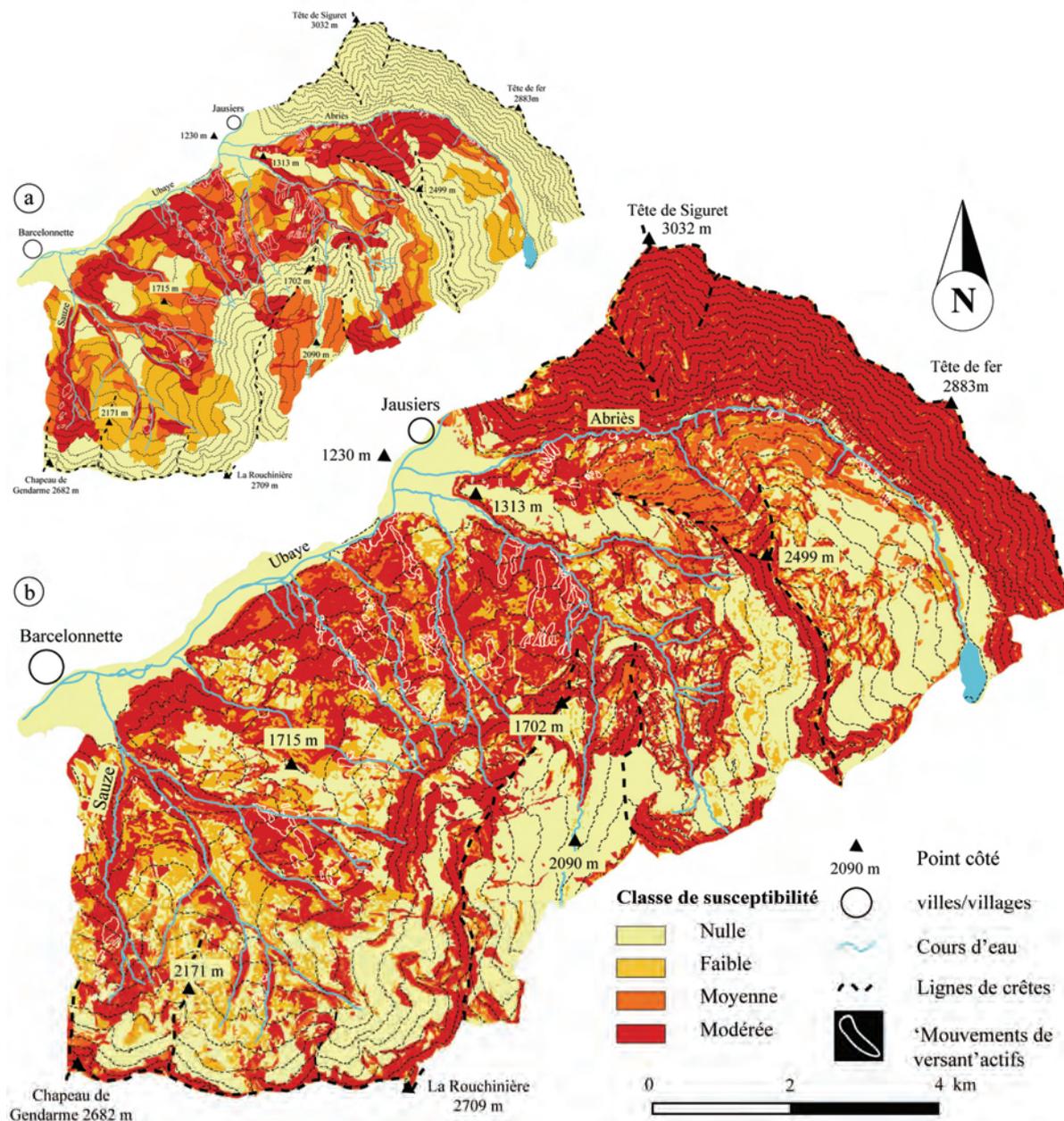
4.2. Validation locale et transposition

La validation et la transposition proposées dans ce travail ont rarement été réalisées. Il s'agit d'appliquer chaque *ppost* de chaque classe de *VP* retenues pour les différents types de phénomènes sur trois sites différents : la totalité du versant *Ubac*, le versant *Adret*, puis le bassin du *Moulin* pour deux types de phénomènes. Les classes de susceptibilité sont ensuite retenues suivant les seuils définis lors de l'étape de calage. Enfin, pour le versant *Ubac* et le versant *Adret* l'erreur relative (ξ) et les indices de qualité sont calculés. Pour le versant du moulin, n'ayant pas de cartes '*expert*' seule l'erreur relative (ξ) est calculée. Les résultats sont présentés successivement, puis ils sont ensuite analysés et discutés.

4.2.1. La validation : vers un premier essai de transposition 'local'

4.2.1.1. Validation sur le versant *Ubac*

Les résultats d'une validation à partir d'une approche probabiliste bivariée par *Théorie de l'évidence* appliquée au versant *Ubac* ont déjà été publiés (Thiery *et al.*, 2007). Ces résultats sont exposés *in extenso* ci-après, avec l'ajout de trois cartes de susceptibilité pour les glissements : translationnels d'interfluve, rotationnels d'interfluve et banc sur banc. La figure 7.15 adaptée de Thiery *et al.* (2007) présente la carte de susceptibilité unifiée du versant *Ubac* issue des *ppost* calées sur le site représentatif. Les tableaux 7.12 et 7.13 donnent respectivement les erreurs relatives (ξ) et les différents indices calculés pour chaque carte.



a. Carte de susceptibilité 'expert'. b. Carte de susceptibilité unifiée obtenue par Théorie de l'évidence.

Fig. 7.15. Carte de susceptibilité 'expert' et unifiée obtenue par Théorie de l'évidence pour le versant Ubac.

Comme pour le site de calage, et essentiellement pour les classes $S1$ et $S4$, les indices calculés sont bons à très bons pour le taux de classement correct, la sensibilité et l'indice de $Kappa$. **Peu de différences sont trouvées par rapport aux tests effectués sur le site de calage, prouvant ainsi la que la stratégie appliquée est appropriée et que les $ppost$ obtenues sont fiables**, même pour la carte simulée pour les glissements rotationnels d'interfluve et ce, en dépit d'un faible nombre de cellules représentatives pour caler le modèle.

La comparaison des classes de susceptibilité forte de la carte 'expert' et de la carte simulée unifiée montre une bonne adéquation, confirmant ainsi les indices de qualité obtenus (Fig. 7.15). Toutefois, la partie est de l'Abriès pose un problème de surreprésentation de la classe de susceptibilité forte simulée, largement visible sur la carte simulée par une zone entièrement rouge de 12.5 km² (Fig. 7.15a et b). La raison essentielle vient du fait que seules les classes des VP

'gradients de pente' > 30° et les classes 'pendage à contre pente' ou 'pendage complètement déstructuré' sont présentes dans cette partie du versant *Ubac*. Les poids (W^*) calculés pour les classes de gradients de pente et la classe 'pendage complètement déstructuré' sont tous assez élevés, entraînant alors des *ppost* plus fortes. Pour la classe 'pendage à contre pente' aucun poids n'est calculé puisqu'elle n'est pas représentée initialement sur la zone de calage. Son influence est nulle sur les *ppost* finales. Ces dernières sont donc élevées pour les versants de l'*Abriés* exposés à l'ouest, la classe de susceptibilité dérivée est donc forte. Pour la carte '*expert*' cette partie est de l'*Abriés* est en susceptibilité nulle car les '*mouvements de versant*' qui s'y déclenchent sont des écroulements (*rock-falls*). S'ils ont bien été cartographiés sur la carte morphodynamique, ils n'ont pas été retenus initialement pour cette recherche (Chap. 3, § 4.1.1). De ce fait, la susceptibilité de ces terrains à ce type d'instabilités n'a pas été cartographiée.

Tab. 7.12. Erreur relative associée à chaque carte simulée par la Théorie de l'évidence sur le versant *Ubac* et *Adret*.

TC = Glissements translationnels complexes ; *TSB* = Glissements translationnels superficiels de berge ; *TSI* = Glissements translationnels superficiels d'interfluve ; *RB* = Glissements rotationnels de berge ; *RBI* = Glissements rotationnels d'interfluve ; *BB* = Glissement banc sur banc ; *S4* = Susceptibilité forte ; *Npc* = Non pris en compte, *ICC1* = Indice de confiance cartographique fort.

'Mouvements de versant'	Nombre de phénomènes actifs (ICC1)		Combinaison	Erreur relative (ξ)		Surface en S4 (km ²)	
	<i>Ubac</i>	<i>Adret</i>		<i>Ubac</i>	<i>Adret</i>	<i>Ubac</i>	<i>Adret</i>
<i>TC</i>	55	5	NVP1 + LIT + OS	0.23	0.90	12.3	2.1
<i>TSB</i>	57	46	NVP2 + OS + ASP + PEN	0.22	0.33	4.9	2.0
<i>TSI</i>	45	30	NVP3 + LIT + OS	0.37	0.39	13.0	4.4
<i>RB</i>	58	2	NVP4 + OS + ASP	0.21	0.45	3.8	0.4
<i>RI</i>	21	8	NVP5 + OS + ASP	0.33	1.00	4.7	0.8
<i>BB</i>	33	<i>Npc</i>	NVP6 + GP + EFS + PEN	0.24	<i>Npc</i>	23.9	<i>Npc</i>

Ainsi, cette partie du bassin de *Barcelonnette* souffre d'un manque de classes de *VP* discriminantes. **Elle montre certaines limites de la stratégie de validation/transposition lorsque le site de calage est seulement représentatif de certaines combinaisons de facteurs environnementaux** (considérées comme majeures) **du site principal**. Dans ce cas, certaines données peuvent manquer pour obtenir une cartographie plus précise. Pour notre site principal les informations manquantes et plus précises concernent les caractéristiques structurales du site (plans de schistosité, de discontinuités, orientation des failles, etc.).

Tab. 7.13. Indices de qualité dérivés du tableau de contingence pour les cartes simulées transposées sur la totalité du versant Ubac et sur le versant Adret.

TCC = taux de classement correct ; TCN = taux de classement non correct ; SENS = indice de sensibilité ; SPE = indice de spécificité ; K = indice de kappa.

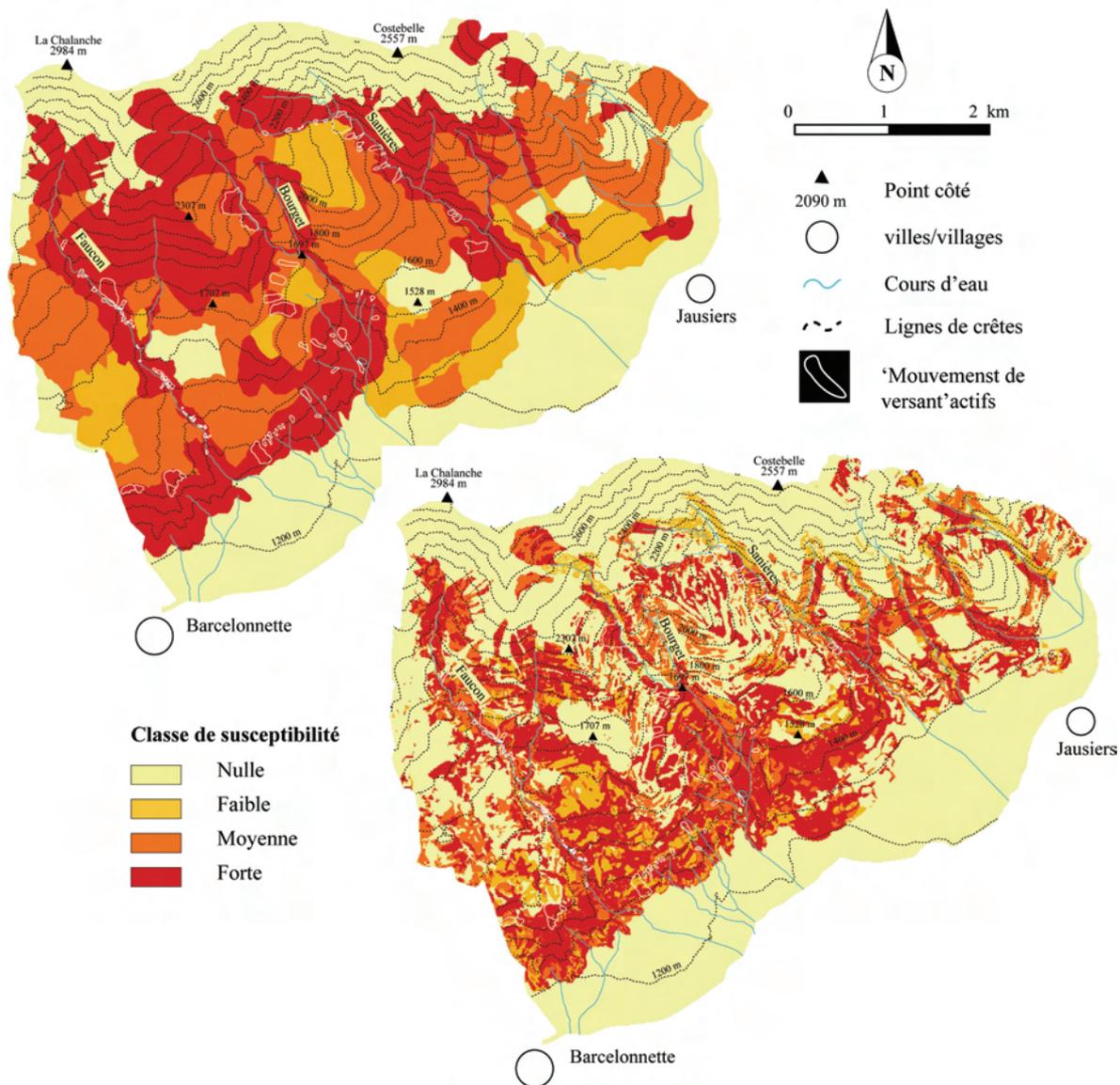
	Classe de susceptibilité								Indices généraux	
	Nulle (S1)		Faible (S2)		Moyenne (S3)		Forte (S4)			
	Ubac	Adret	Ubac	Adret	Ubac	Adret	Ubac	Adret	Ubac	Adret
Carte des glissements translationnels complexes										
TCC	0.78	0.71	0.87	0.81	0.84	0.91	0.80	0.77	0.82	0.80
TCN	0.22	0.29	0.13	0.19	0.16	0.09	0.20	0.23	0.18	0.20
SENS	0.77	0.66	0.13	0.12	0.13	0.51	0.63	0.23	0.64	0.60
SPE	0.80	0.93	0.91	0.84	0.92	0.93	0.84	0.82	0.88	0.87
K	0.54	0.37	0.03	0.01	0.05	0.32	0.43	0.03	0.52	0.47
Carte des glissements translationnels superficiels de berge										
TCC	0.65	0.63	0.81	0.94	0.80	0.82	0.70	0.75	0.74	0.78
TCN	0.35	0.37	0.19	0.06	0.20	0.18	0.30	0.25	0.26	0.22
SENS	0.70	0.58	0.19	0.05	0.14	0.30	0.62	0.69	0.48	0.57
SPE	0.62	0.01	0.91	0.96	0.90	0.83	0.83	0.75	0.83	0.86
K	0.30	0.41	0.11	0.01	0.05	0.03	0.36	0.21	0.41	0.42
Carte des glissements translationnels d'interfluve										
TCC	0.75	0.73	0.85	0.89	0.79	0.83	0.69	0.64	0.71	0.78
TCN	0.25	0.27	0.15	0.11	0.21	0.17	0.31	0.36	0.29	0.22
SENS	0.67	0.64	0.19	0.07	0.45	0.37	0.57	0.43	0.53	0.55
SPE	0.82	0.94	0.89	0.93	0.56	0.88	0.52	0.69	0.76	0.85
K	0.47	0.49	0.02	0.01	0.21	0.22	0.35	0.09	0.43	0.40
Carte des glissements rotationnels de berge										
TCC	0.66	0.61	0.75	0.96	0.81	0.75	0.72	0.87	0.73	0.80
TCN	0.34	0.39	0.25	0.04	0.19	0.25	0.28	0.13	0.28	0.20
SENS	0.60	0.61	0.22	0.06	0.13	0.08	0.62	0.57	0.62	0.49
SPE	0.69	0.69	0.88	0.97	0.92	0.76	0.75	0.87	0.75	0.86
K	0.29	0.06	0.12	0.02	0.05	0.01	0.35	0.09	0.35	0.36
Carte des glissements rotationnels d'interfluve										
TCC	0.73	0.61	0.77	0.87	0.80	0.73	0.75	0.90	0.79	0.78
TCN	0.27	0.39	0.23	0.13	0.20	0.27	0.25	0.10	0.21	0.22
SENS	0.54	0.60	0.45	0.30	0.22	0.23	0.50	0.03	0.62	0.56
SPE	0.65	0.71	0.82	0.88	0.83	0.75	0.80	0.94	0.83	0.85
K	0.21	0.13	0.04	0.07	0.06	0.00	0.30	0.01	0.40	0.41
Carte des glissements banc sur banc										
TCC	0.80	Npc	0.73	Npc	0.75	Npc	0.86	Npc	0.81	Npc
TCN	0.20	Npc	0.27	Npc	0.25	Npc	0.14	Npc	0.19	Npc
SENS	0.69	Npc	0.23	Npc	0.07	Npc	0.82	Npc	0.63	Npc
SPE	0.05	Npc	0.80	Npc	0.91	Npc	0.50	Npc	0.80	Npc
K	0.40	Npc	0.05	Npc	0.01	Npc	0.43	Npc	0.44	Npc
Carte unifiée										
TCC	0.75	0.71	0.85	0.84	0.81	0.73	0.87	0.73	0.83	0.75
TCN	0.25	0.29	0.15	0.16	0.19	0.27	0.13	0.23	0.17	0.25
SENS	0.88	0.56	0.19	0.12	0.12	0.63	0.83	0.46	0.68	0.50
SPE	0.33	0.93	0.84	0.90	0.95	0.74	0.91	0.82	0.89	0.83
K	0.40	0.44	0.07	0.03	0.05	0.15	0.44	0.30	0.45	0.34

4.2.1.2. Transposition locale sur le versant Adret

La transposition locale s'effectue pour les 'mouvements de versant' inventoriés sur le versant Adret soit : les glissements translationnels complexes, les glissements translationnels superficiels de berge, les glissements translationnels superficiels d'interfluves et les glissements rotationnels de berge (Fig. 7.16). **Face à un nombre réduit de données pour certains types de phénomènes (Tab. 7.12), l'erreur relative (ξ) est donnée à titre seulement indicatif.** Elle n'a de valeur statistique réelle que pour les glissements translationnels superficiels de berge (46) et les glissements translationnels superficiels d'interfluve (30) dont l' ξ est respectivement de 0.33 et 0.39. **Pour les indices de qualité généraux de la carte unifiée et des cartes transposées par type de phénomène, le TCC est bon pour alors que l'indice de sensibilité SENS et le coefficient de**

$Kappa K$ sont moyens (respectivement 0.5 et 0.34) donnant une première indication sur une transposition locale moyenne.

Plus en détail, une nette différence s'observe entre les cartes transposées par type de 'mouvements de versant' et les classes de susceptibilité correspondantes déterminées de manière experte. Les taux de prédiction (*SENS*) plus faibles et les coefficients de $Kappa K$ sont très en deçà des normes que nous nous sommes fixés pour accepter les modèles, surtout pour la classe simulée en *S4*. Par exemple, les indices issus du croisement de la carte transposée et de la carte 'expert' pour les glissements translationnels complexes révèlent un taux de prédiction de 0.23 et un coefficient de $Kappa K$ de 0.03. Ces chiffres montrent une faible adéquation entre les deux cartes.



a. Carte 'expert'. b. Carte simulée unifiée obtenue par Théorie de l'évidence.

Fig. 7.16. Cartes de susceptibilité 'expert' et simulée unifiée obtenue par Théorie de l'évidence pour le versant Adret.

Globalement, la qualité de la transposition est donc jugée moyenne; certains secteurs apparaissent bien en classe de susceptibilité *S4* comme les berges des torrents alors que d'autres secteurs, surtout les interfluves, les classes sont largement sous-estimées. Comme pour les résultats obtenus sur le versant *Ubac*, certaines sous-estimations proviennent de conditions

particulières sur ce versant qui ne sont pas introduites dans les processus de calcul (zones autour des drains non entretenus, jugés de manière experte, comme très susceptibles).

4.2.1.3. La transposition à un site externe

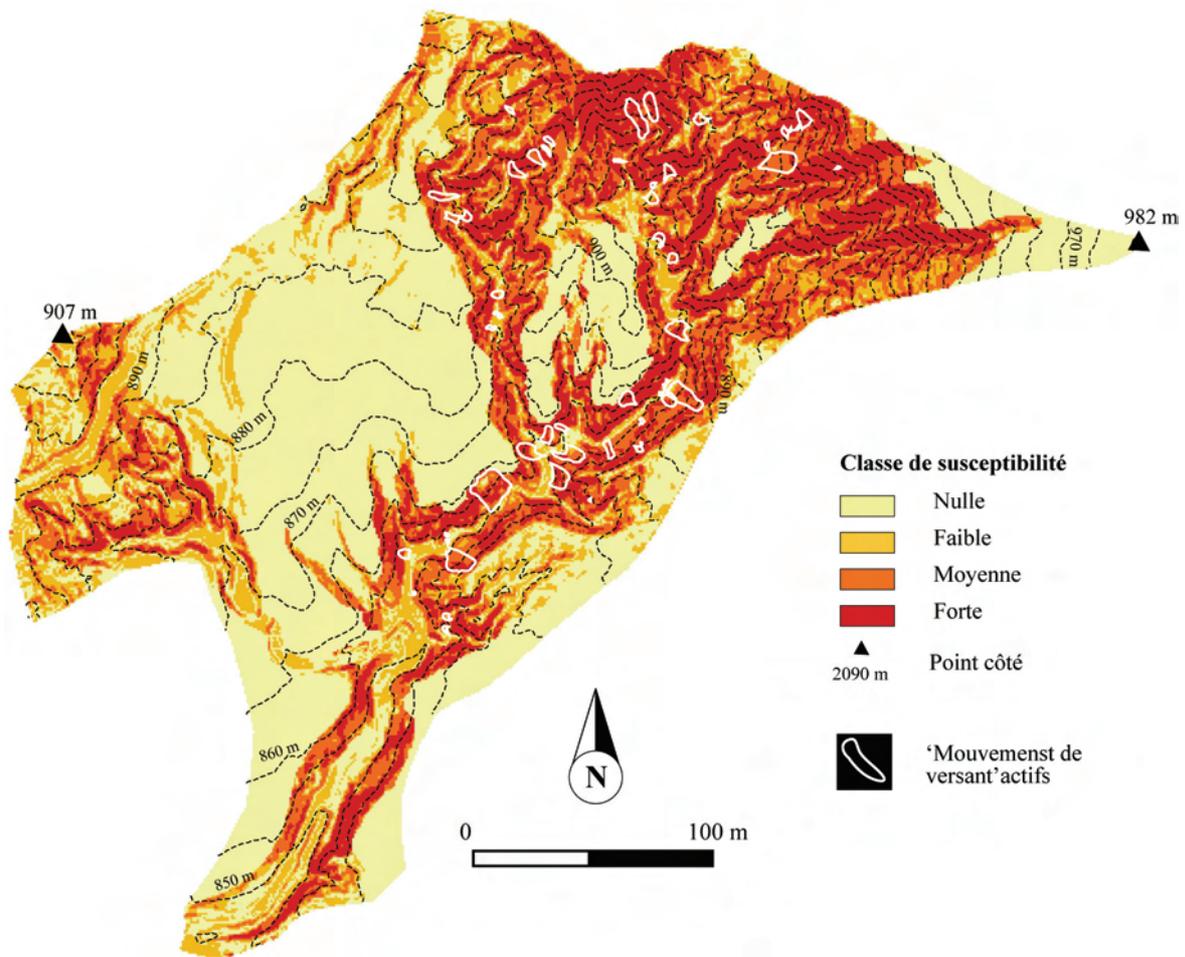
La transposition à un site externe mais aux conditions environnementales proches du bassin de *Barcelonnette* **constitue une étape originale** rarement entreprise (Thurston et Degg, 2000)

Le site de transposition constitué par le bassin versant du *Moulin* présente la particularité d'être fortement raviné et de disposer de '*mouvements de versant*' se déclenchant sur le substrat nu (Chap. 2, § 1.2.3). C'est pour cette raison que seuls les *ppost* issues des simulations pour les glissements banc sur banc sont utilisées⁵³. Les *VP* utilisées sont : la *NVP* (constituée de la combinaison de la lithologie -*LIT*- et des formations superficielles -*FS*), les gradients de pente dérivé du *MNT* par *LIDAR* aéroporté (*GP*), les épaisseurs de formations superficielles (*EFS*) et le pendage apparent (*PEN*). Pour les formations superficielles (*FS*) et leurs épaisseurs (*EFS*), seules sont retenues le manteau de dégradation des marnes toujours considéré comme inférieur à 1 m. Les formations allochtones ayant des caractéristiques géotechniques différentes ne sont pas intégrées au calcul.

La figure 7.17 montre la **carte obtenue de susceptibilité simulée** par *Théorie de l'évidence* après la classification des *ppost* selon les seuils identifiés sur le site de calage du bassin de *Barcelonnette*. L'évaluation de la carte est réalisée par le calcul de l'erreur relative (ξ) qui d'élève à 0.36. Compte tenu de la différence de qualité du *MNT*, et de la taille des cellules retenues pour les simulations nous considérons ce premier résultat comme très encourageant.

Les secteurs les plus favorables sont les secteurs aux facettes de pendage contraire à la pente : les plans de diaclases parallèles et la schistosité perpendiculaire à la pente favorisant l'apparition de blocs marneux et l'occurrence des instabilités (Fig. 7.18). **L'introduction, de l'information structurale sous sa forme la plus simple montre que c'est dans ce sens qu'il faut envisager l'apport de nouvelles variables** pour augmenter le taux de prédiction des cartes simulées pour les glissements structuraux (banc sur banc). Cette analyse rejoint celle déjà réalisée pour le point § 4.2.1.1 qui constate qu'avec plus d'informations sur les caractéristiques structurales (plans de schistosité, de discontinuités, orientation des failles, etc.), les secteurs dénudés seraient mieux discrétisés.

⁵³ Quelques simulations par *Théorie de l'évidence* ont été entreprises par Moreno (2004) sur la base d'un *MNT* acquis par interpolation de courbes digitalisées tous les 2 m. Le nombre de *VP*, leur classes, la résolution des calculs et la stratégie de calage n'étant pas les mêmes que ceux utilisées dans cette recherche nous n'avons pas jugé utile de comparer les résultats.



La carte est obtenue par transposition des ppost calculée sur le bassin de Barcelonnette par Théorie de l'évidence.

Fig. 7.17. Carte de susceptibilité des glissements banc sur banc pour le bassin versant du Moulin.

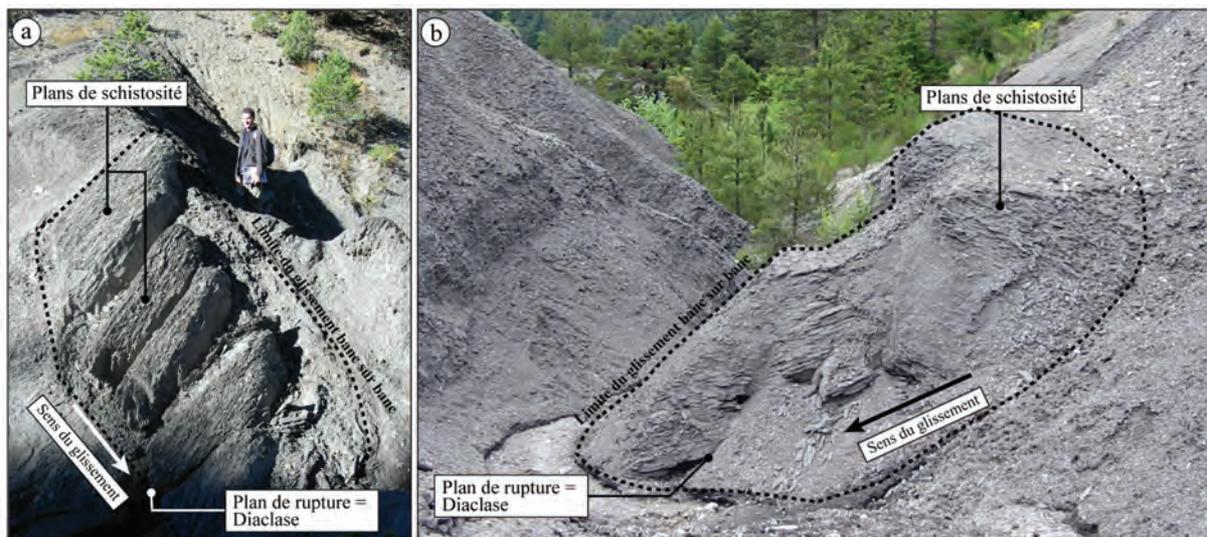


Fig. 7.18. Exemples de glissements banc sur banc le long de diaclases parallèles à la pente dans le bassin versant du Moulin.

4.2.2. Synthèse et discussion

Un des intérêts de notre démarche de cartographie par modèle d'analyse spatiale est de pouvoir transposer les probabilités issues de la meilleure approche (i.e. *Théorie de l'évidence*) localement (versant *Ubac* et versant *Adret*) puis sur un site secondaire aux caractéristiques géomorphologiques proches (bassin du *Moulin*). **Ce type d'essai de transposition a pour but d'éviter un long travail de calage et de validation dans le cadre d'une cartographie de la susceptibilité sur des sites semblables.** Il montre aussi que, dans le cadre de la généralisation des bases de données disponibles, disposer de pondérations, de seuils, de courbes de calage et de taux de prédictions calés, validés peut être un avantage non négligeable si l'on entreprend la généralisation de cartes de susceptibilité pour une région donnée aux caractères environnementaux semblables (i.e. un bassin de risque, Thurston et Degg, 2000 ; Greco *et al.*, 2006).

Dans ce cadre, les résultats de ces transpositions sont encourageants même si les *VP* utilisées sont toutes acquises spécifiquement. Ils permettent de valider la stratégie de cartographie mais aussi de souligner leurs insuffisances et leurs limites.

Ainsi localement, pour le versant *Ubac*, les résultats issus de cette transposition sont très bons, validant ainsi la stratégie élaborée spécifiquement pour l'échelle du 1/10 000^{ème} pour le bassin de *Barcelonnette* et prouvant que le choix du site représentatif était judicieux.

Pour le versant *Adret*, les résultats sont moyens, voir mauvais. Cependant, ce constat doit être nuancé pour deux raisons :

- (i) Pour les glissements translationnels complexes, les rotationnels de berge et d'interfluves, peu de phénomènes ont été observés. Ainsi, se baser exclusivement sur le calcul des erreurs relatives (ξ) a peu d'intérêt ;
- (ii) La carte unifiée simulée montre des secteurs en classe de susceptibilité forte alors que sur la carte '*expert*' les mêmes secteurs sont considérés en classe faible ou moyenne. Ces différences sont en parties dues à l'opposition morphologique des deux versants, évoquée dans le chapitre 2. Sur le versant *Ubac*, les phénomènes se déclenchent majoritairement sur les moraines et sur des pentes moyennes, parfois fortes. Sur le versant *Adret*, ils sont plus localisés sur des versants à pente forte et sur des colluvions de pentes parfois dans les moraines. L'*expert* en charge de la cartographie retient ces différences et opère alors de subtils changements pour cartographier les versants en susceptibilité forte, moyenne ou faible. Les *ppost* introduites dans les *VP* du versant *Adret* quant à elles ne varient pas, et par conséquent, les versants en susceptibilité forte s'apparenteront aux versants dont les *ppost* ont été calées et validées sur le versant *Ubac*.

Pour le bassin versant du *Moulin*, la transposition s'avère prometteuse. Si le site et la stratégie de calage sont bien choisis, il manque toutefois encore quelques variables pour augmenter le taux de prédictions des simulations. Ces variables concernant la structure lithologique et la tectonique plus détaillées sont en cours d'acquisition. De nouvelles simulations sont envisagées pour obtenir des cartes de susceptibilité plus précises.

5. CONCLUSION-SYNTHESE DU CHAPITRE 7

L'objectif de ce chapitre était d'apporter des éléments de réponse aux questions suivantes :

- (i) Quelles stratégie de cartographie adopter pour les approches probabilistes à l'échelle du 1/10 000^{ème} ?

- (ii) Quel modèle d'analyse spatial retenir pour tenter une validation locale et une transposition ?

Répondre à ces questions a nécessité de **préciser les inconvénients et les limites des approches probabilistes** qu'elles soient bivariée ou multivariée. Ces précisions sont apportées dans la *section 1*, elles permettent de concevoir une stratégie de calage spécifique tenant compte des difficultés liées aux approches.

La stratégie élaborée, détaillée en *section 2*, est établie pour retenir un jeu de cellules représentatives des VM (zone d'ablation) et les meilleures VP à prendre en compte pour chaque type de phénomène. Elle montre toute la difficulté pour cartographier la susceptibilité aux '*mouvements de versant*' à l'échelle du 1/10 000^{ème} avec un jeu de variable minimum. Au terme de la phase de calage qui peut paraître complexe, on peut retenir trois principes :

- (i) **≈ 200 cellules** (soit une probabilité *a priori*, *pprior*, de 0.0018) représentatives des VM (variable à modéliser, *i.e.* les '*mouvements de versant*') **sont un minimum pour optimiser les résultats** optimums et obtenir des probabilités statistiquement fiables puis des classes de susceptibilité appropriée ;
- (ii) **Ces bons résultats sont en partie dus à l'introduction d'une néo-variable prédictive (NVP)**. Cette NVP déjà utilisée dans le chapitre 6 avec l'approche semi-quantitative augmente considérablement les résultats tout en diminuant la dépendance conditionnelle entre VP ;
- (iii) Les **meilleures cartes simulées sont obtenues par Théorie de l'évidence**, les Régressions logistiques étant moins performantes surtout lorsque le nombre de cellules représentatives des VM est inférieur à 200.

La validation des résultats est scindée en deux étapes avec une étape de comparaison/évaluation et une étape de validation/transposition. Les résultats de la première étape de comparaison/évaluation montrent que :

- (i) **L'approche probabiliste bivariée est supérieure en termes de prédiction à l'approche semi-quantitative par Logiques floues**. Toutefois, cette supériorité n'est que relative. En effet, si les tests statistiques sont tous favorables aux cartes simulées par la *Théorie de l'évidence*, l'analyse de certains secteurs '*témoins*' indique des similitudes dans la classification de la susceptibilité. Ces similitudes viennent en partie de la NVP introduite qui, pour les deux approches, retient les mêmes classes. Toutefois, devant l'incertitude de valeurs d'appartenance allouées à certaines classes de VP pour l'approche semi-quantitative, les cartes simulées par approche probabiliste sont préférées (l'incertitude statistique étant réduite au maximum par la stratégie de calage spécifique) ;
- (ii) Les classes de susceptibilités faibles et/ou moyennes, acquises par l'approche probabiliste bivariée, sont sous-estimées par les cartes simulées. Ces sous-estimations sont le résultat du processus de calcul binaire optimisé pour reconnaître les conditions environnementales similaires de chaque type de phénomènes. Les classes forte et nulle sont bien reconnues, les classes intermédiaires n'entrant pas dans le processus de calcul ne sont pas ou peu simulées ;
- (iii) Malgré des indices statistiques fiables (erreur relative ξ , prédiction de phénomènes, taux ce classement correct, indice de sensibilité, coefficient *K* de kappa, prédiction des classes de susceptibilité) **une critique des résultats par un 'retour terrain' est nécessaire pour valider les cartes**. Ce '*retour terrain*' s'effectue en comparant la carte morphodynamique, la carte '*expert*' et les cartes simulées. **Il permet de montrer les limites des modèles d'analyse spatiale dans la reconnaissance de certains secteurs et d'envisager certaines améliorations**.

La seconde étape de validation/transposition indique :

- (i) **Une bonne transposition des résultats lorsque les sites ont des caractéristiques géomorphologiques très proches** comme pour l'ensemble du versant *Ubac* pour les six types de phénomènes ou le bassin versant du Moulin, malgré une résolution plus fine des *VP* ;
- (ii) **Une transposition moyenne, lorsque le site connaît des caractéristiques géomorphologiques et des conditions environnementales d'occurrence des phénomènes légèrement différentes** comme pour le versant de *l'Abriès* à l'est du versant *Ubac* ou le versant *Adret*. Deux solutions sont envisageables pour pallier à ce problème : la première solution consiste à produire de nouvelles cartes sur la base de la même stratégie de calage (et donc d'utiliser un nouveau site de calage) ; la seconde solution consiste à intégrer de nouvelles informations comme des données structurales (pendage réel, plan de schistosité, plans de discontinuité, etc.) afin d'actualiser les *ppost* et les classes de susceptibilité dérivées.

Les cartes de susceptibilité par modèle d'analyse spatiale et par type de phénomènes étant calées et validées, **le passage à l'aléa devient nécessaire** pour compléter cette recherche (Chapitre 8).

CHAPITRE 8 : TENTATIVE D'ÉVALUATION DE L'ALÉA : APPORT DES MODELES A BASE PHYSIQUE

La cartographie de la susceptibilité par modèles d'analyse spatiale a permis de détecter les secteurs de rupture potentielle avec une certitude statistique élevée. Par définition, une telle approche ne permet pas d'évaluer l'aléa *stricto sensu*, car la **composante temporelle et l'intensité n'est pas estimée.**

Corréler les cartes de susceptibilité réalisées par approche probabiliste avec des probabilités de retour de précipitations pour produire des scénarii de rupture est possible (Zêzere *et al.*, 2004 ; Remondo *et al.*, 2005). Toutefois, cette méthodologie n'est applicable que lorsque les bases de données concernant les dates de ruptures et les précipitations sont correctement informées (date, type, volume), ce qui n'est pas le cas du bassin de *Barcelonnette*. Pour tenter d'évaluer et de spatialiser l'aléa sur l'ensemble du versant *Ubac*, l'utilisation de modèles à base physique comme *SHALSTAB* ® ou *SINMAP* ® (Montgomery et Dietrich, 1994 ; Dietrich *et al.*, 1995 ; Pack *et al.*, 1998, 2001) a donc été envisagée. Mais ces modèles sont essentiellement validés pour des '*mouvements de versant*' très superficiels, et ne sont donc pas applicables avec les '*mouvements de versant*' profonds observés dans le bassin de *Barcelonnette*. Les mécanismes hydrologiques pris en compte font également l'hypothèse d'une épaisseur de sol totalement saturée.

Ainsi, à cause du manque de données historiques sur le déclenchement des phénomènes et de la diversité des phénomènes, une tentative d'évaluation de l'aléa est proposée pour des '*mouvements de versant*' représentatifs du bassin de *Barcelonnette* en tenant compte :

- (i) Des variables de contrôle déjà acquises ;
- (ii) De notre connaissance de la géomorphologie et des processus de ruptures des phénomènes ;
- (iii) Du facteur de déclenchement (les précipitations, Malet *et al.*, 2007) ;
- (iv) D'une simplification des hypothèses de départ concernant le fonctionnement hydrologique des versants.

Un **modèle numérique à base physique** testé et validé sur plusieurs sites (van Beek, 2002 ; Malet, 2003 ; Malet *et al.*, 2005), a été choisi. L'avantage de ce type de modèle numérique, fondé sur le couplage de modèles hydrologique et de stabilité des pentes, est de pouvoir calculer un facteur de sécurité (Fs) pour plusieurs seuils de déclenchement hydrologiques caractéristiques ; connaissant la date de retour du facteur déclenchant la dimension temporelle peut ainsi être intégrée. Cette stratégie peut être appliquée seulement sur un site peu étendu et pour lequel les événements sont soit recensés précisément, soit l'activité géomorphologique du site est estimée.

Ce chapitre est divisé en trois sections. La **première section** décrit la stratégie d'analyse et d'utilisation du modèle à base physique. La **deuxième section** présente le site représentatif où la première analyse de l'aléa est testée. Après avoir déterminé les paramètres les plus influents à introduire dans le modèle, les résultats et les limites de la méthodologie sont ensuite discutés. La **troisième section** concerne une tentative d'évaluation de l'aléa sur l'ensemble du bassin de *Barcelonnette*. Deux géométries de '*mouvements de versant*' spécifiques du versant *Ubac* sont

choisies pour dériver des seuils de déclenchement, puis des probabilités de rupture. Une méthodologie spécifique est ensuite appliquée sur les secteurs de susceptibilité forte simulée par approche probabiliste afin de simuler une carte d'aléa.

1. OBJECTIFS ET STRATEGIE D'UTILISATION D'UN MODELE A BASE PHYSIQUE POUR L'EVALUATION DE L'ALEA

Outre la localisation spatiale des secteurs susceptibles (quantification de l'occurrence spatiale des phénomènes), l'évaluation de l'aléa nécessite de quantifier la probabilité d'occurrence temporelle et l'intensité (en termes de volume ou de vitesse) des phénomènes (Varnes, 1978 ; Morgenstern, 1991 ; Terlien *et al.*, 1995, Crozier et Glade, 2005). Ceci impose d'identifier les mécanismes de glissement et d'introduire de nouvelles variables de contrôle des phénomènes associées au déclenchement des instabilités de pente. Ces informations peuvent être obtenues par une analyse statistique d'évènements observés ou déduits de simulations numériques à partir de modèles à base physique (*Chap. 1, § 1.7*).

En effet, **plusieurs limitations existent** telles que : le manque de bases de données détaillant les phénomènes (date de déclenchements, caractéristiques, etc.), les manques de représentativité et de mesures des facteurs déclenchants (pluie, séismes) et une connaissance limitée des mécanismes de glissements.

- (i) Pour le bassin de *Barcelonnette*, différentes études ont montré que **le facteur de déclenchement principal des instabilités étaient les précipitations** (Amiot et Nexon, 1995, Flageollet *et al.*, 1999 ; Malet *et al.*, 2007). A partir de ces recherches, **des périodes de déclenchement privilégiées ont été estimées entre mai et août** (*Chap. 1, § 1.1.7*). Cependant, il est **difficile de définir un ou plusieurs seuils spécifiques** : un cumul de précipitations élevé comme un évènement exceptionnel pouvant provoquer l'occurrence de certains phénomènes (Malet *et al.*, 2007). A cela, s'ajoute le fait **qu'il manque une information sur les dates d'occurrence des phénomènes**. La majorité des '*mouvements de versant*' se déclenchant sous forêts et ne faisant pas l'objet de suivi régulier ;
- (ii) Pour les précipitations, **régionaliser les mesures à partir d'observations ponctuelles est difficile en région montagnaise** (Baigorria Paz, 2005). Il faut tenir compte des caractéristiques du relief et de l'ensoleillement. Par exemple, la circulation atmosphérique générale du bassin de *Barcelonnette* s'effectue d'est en ouest ; cette circulation générale est perturbée localement par une disposition des bassins versant perpendiculaire à cet axe modifiant ainsi localement les flux ;
- (iii) **Les mesures hydrologiques** (teneurs en eau, nappe phréatique) *in situ* sur les versants ou sur certains phénomènes sont rares et difficilement applicables sur des sites larges où les versants présentent des caractéristiques souvent hétérogènes. Il faut alors tenter de caler les modèles sur des observations indirectes de l'hydrologie des versants (lieux de concentration des écoulements, talwegs, mares, etc.).

Ainsi, **la stratégie de cartographie de l'aléa pour un bassin versant large comme le bassin de *Barcelonnette* doit être fondée**, d'une part **sur notre connaissance experte du site** et d'autre part **sur des hypothèses de déclenchement hydrologique des '*mouvements de versant*'** :

- (i) **La connaissance experte du site** nous a permis de déterminer plusieurs types de '*mouvements de versant*'. Le site d'étude est caractérisé par une majorité de glissements translationnels et rotationnels. Ainsi, pour caractériser l'aléa, seuls sont retenus ces '*mouvements de versant*' dont la géométrie et les mécanismes de déclenchement sont bien connus (cf. *Chap. 3*).

- (ii) Pour simuler le comportement hydrologique puis évaluer l'état d'équilibre des versants, **les hypothèses** consistent à utiliser un modèle hydrologique de versant et un modèle simple d'équilibre de pente infinie. **Le premier mécanisme de déclenchement**, observé en présence d'une nappe d'eau, consiste en **l'augmentation de la pression interstitielle provoquant une diminution des forces de résistance (et de la cohésion du matériau ; Fig. 8.1.a)**. **Le second mécanisme de déclenchement**, observé sur les **versants aux fortes pentes** et aux **formations superficielles peu épaisses**, consiste en **une diminution rapide de la cohésion apparente des matériaux suite à une diminution de la succion matricielle provoquée par un front d'infiltration ne générant pas de pressions interstitielles positives (Fig. 8.1.b)**. Pour le bassin de *Barcelonnette*, ces deux situations ont été observées (Malet *et al.*, 2007).
- (iii) Les deux mécanismes peuvent être simulés par le code numérique. Des simplifications sont réalisées concernant les effets de la végétation en termes d'effets hydrologiques et mécaniques (l'interception, l'évapotranspiration, l'augmentation de la cohésion, la résistance mécanique due aux racines ne sont pas pris en compte). Les écoulements hydrologiques préférentiels (fissures, macropores) et le rôle de la neige ne sont également pas pris en compte.

L'incertitude est prise en compte dans les simulations par l'utilisation de fonctions de probabilités pour les paramètres du modèle, les conditions initiales et les conditions aux limites.

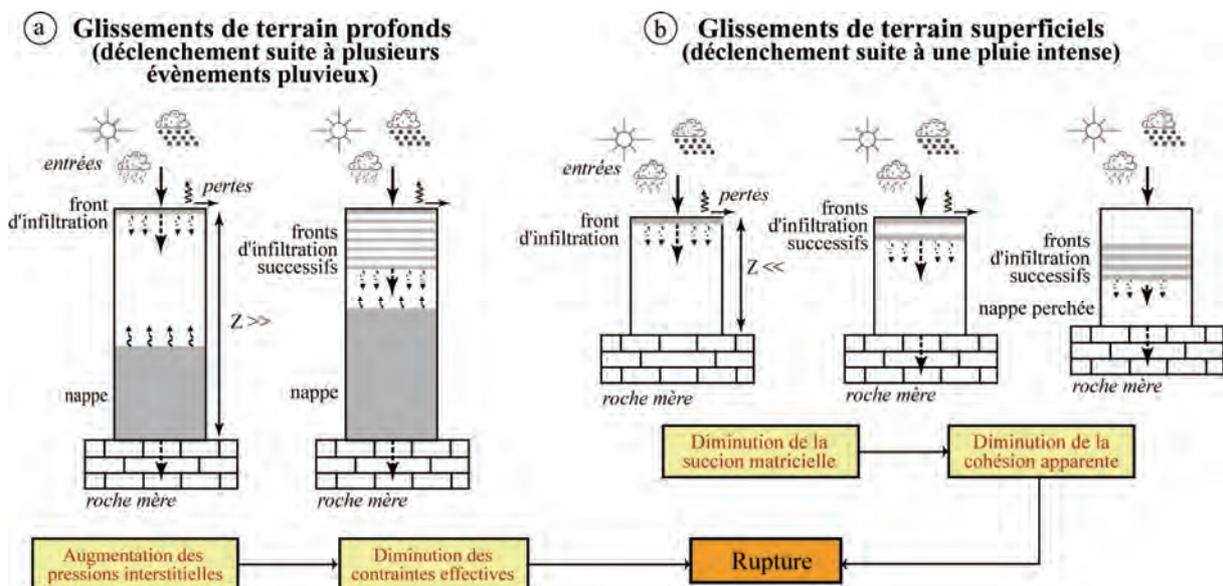


Fig. 8.1. Description des conditions de rupture observées pour des glissements profonds et superficiels (adapté de Malet *et al.*, 2007).

1.1. Stratégie d'analyse et de modélisation

A partir de ces hypothèses simplifiées, deux stratégies de modélisation physique sont appliquées.

1.1.1. Stratégie 1 : quantification de l'aléa à l'échelle d'un sous bassin représentatif

L'approche consiste à simuler le comportement hydrologique à l'échelle d'un bassin versant et à simuler les variations du facteur de sécurité F_s au cours du temps selon les variations des conditions aux limites (pluie, pressions interstitielles ; van Beek, 2002 ; Borga *et al.*, 2002a et b ; Coe *et al.*, 2004, Frattini *et al.*, 2004). **L'originalité de cette stratégie n°1 réside dans une approche à base physique couplée à une approche probabiliste.** Le but est d'identifier une probabilité

d'obtenir une maille de calcul avec un facteur de sécurité F_s en dessous d'un certain seuil pour les séries météorologiques observées sur le site.

L'analyse est centrée sur le sous bassin de *Bois Noir*, représentatif des conditions géomorphologiques du bassin de *Barcelonnette*. Il a été choisi pour :

- (i) **Son grand nombre de 'mouvements de versant'** en particulier des glissements translationnels ;
- (ii) **Sa forte susceptibilité aux mouvements translationnels** confirmée par les modélisations probabilistes réalisées dont les différents tests (statistiques, de prédiction, analyse 'expert') se sont révélés très concluants ;
- (iii) **Ses quelques données historiques disponibles** qui permettront de vérifier les résultats des simulations.

1.1.2. *Stratégie 2 : quantification de l'aléa par types de mouvements de versant et identification de seuils de déclenchement*

La stratégie se démarque de la première en étant fondée sur l'identification de seuils de déclenchement pour chaque type de '*mouvements de versant*' choisi (glissement translationnel complexe et glissement rotationnel), selon les deux approches couplées de la stratégie 1. **Le but, ensuite, est de transposer ces seuils à l'échelle du bassin de Barcelonnette** afin d'obtenir une carte d'aléa à partir de la carte de susceptibilité probabiliste. Pour cela, la stratégie est fondée sur :

- (i) **L'identification de seuils climatiques de déclenchement** par des simulations de probabilités de rupture pour plusieurs combinaisons de durée/hauteur de pluie pour **chaque type de 'mouvements de versant'** ;
- (ii) **L'intégration sur l'ensemble du bassin de Barcelonnette de ces probabilités de rupture** pour les secteurs à forte susceptibilité pour chaque type de '*mouvements de versant*'. Cette intégration s'effectue selon une procédure spécifique tenant compte des zones de susceptibilité forte, du type de formations superficielles, de leurs épaisseurs et du gradient de pente.

Les simulations reposent sur des conditions initiales et aux limites définies par des fonctions de probabilité (teneurs en eau dans le versant, niveaux d'eaux ; *i.e.* nappe phréatique, caractéristiques des pluies).

1.2. **Modélisation distribuée à base physique : objectifs et description**

1.2.1. *Objectifs de la modélisation*

La modélisation physique entreprise pour tenter de quantifier l'aléa '*mouvements de versant*' nécessite :

- (i) **Des hypothèses sur les mécanismes hydrologiques et mécaniques** des '*mouvements de versant*' observés (Figs.8.2.a et b) ;
- (ii) **Une représentation spatialisée des variables d'entrée** (type de formations superficielles, épaisseur des formations superficielles, caractéristiques hydrologiques et géotechniques) et **de sortie** (niveaux d'eau, teneur en eau, facteur de sécurité).

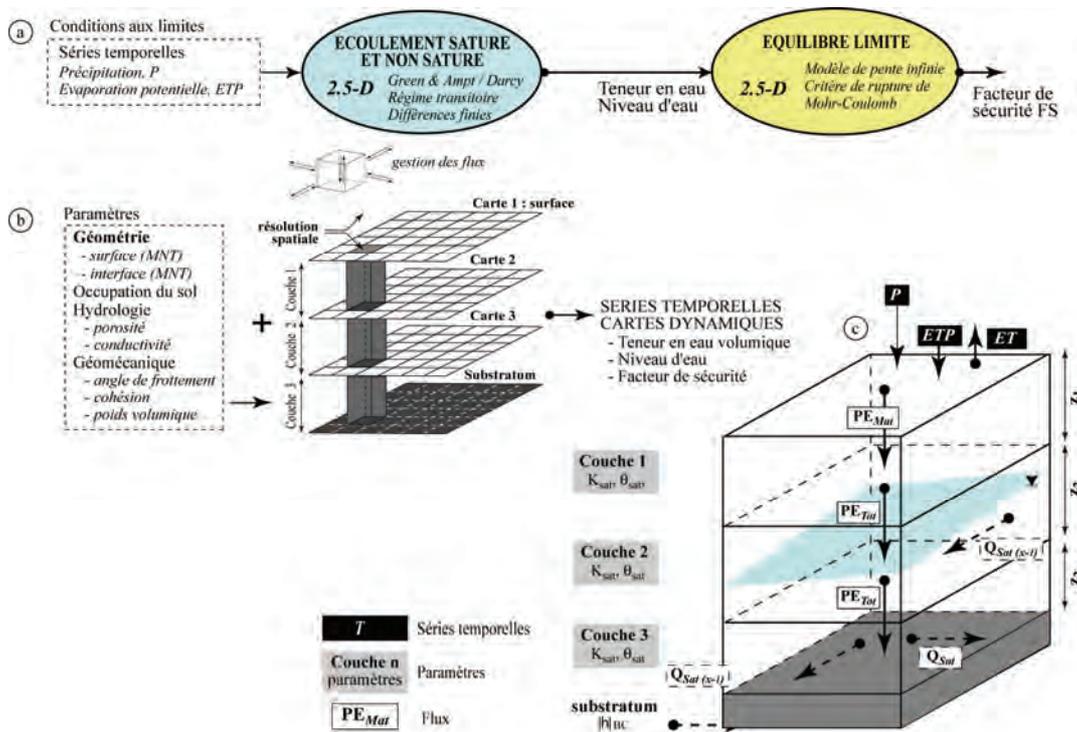
Ainsi, un modèle dynamique, distribué spatialement et à base physique, a été sélectionné afin de représenter l'hydrologie des versants instables et leurs conditions de stabilité (facteur de sécurité F_s), à partir des forçages atmosphériques et des géométries de versants observés dans le bassin de *Barcelonnette*. En milieu méditerranéen montagnard, la distribution des précipitations est aléatoire et caractérisée par des épisodes pluvieux extrêmes et courts ; ainsi, le caractère dynamique du modèle numérique est lié aux chroniques temporelles utilisées en conditions aux

limites. En raison des fluctuations à court-terme de l'humidité volumique et de la nappe, le modèle décrit l'écoulement en régime transitoire. Le caractère distribué du modèle permet également de prendre en compte la variabilité naturelle des paramètres sur le terrain, et de limiter la divergence entre l'échelle du modèle, l'échelle du processus et l'échelle de mesure. En raison de l'utilisation de relations physiques, l'échelle du modèle dépend de l'échelle à laquelle les propriétés du matériau ont été recueillies et à laquelle les expressions analytiques ont été définies. A partir de ces considérations, le modèle distribué à base physique *STARWARS* a été sélectionné ; Il a été développé par van Beek (2002) pour une modélisation hydrologique à l'échelle du bassin versant, et modifié par Malet (2003) pour une modélisation hydro-mécanique à l'échelle de sites instables.

1.2.2. Description du modèle hydrologique

Une description détaillée du modèle *STARWARS* est donnée dans van Beek (2002), Malet (2003) et Malet *et al.* (2005). Seules les principales hypothèses et relations modélisées sont rappelées ci-après :

- (i) **Le modèle numérique est formalisé à partir de relations analytiques, linéaires et non linéaires.** Tous les paramètres du modèle peuvent être obtenus à partir de mesures sur le terrain ou déduites de séries chronologiques. Le code est écrit dans le méta-langage *PCRaster* (Van Deursen, 1995). Un schéma explicite en différence finies à droite est utilisé pour la résolution numérique. L'espace est discrétisé en volumes élémentaires de mêmes dimensions (cellule) selon une configuration raster (Fig. 8.2.b) ; les incréments de temps sont d'égale longueur ;



a. Structure modulaire du code de calcul STARWARS et du modèle géotechnique. b. représentation 2.5D de la géométrie par combinaison des cartes et des relations entre cellules. c. Processus et flux représentés dans le modèle hydrologique spatialisé STARWARS ; les acronymes des différentes couches font références au tableau 8.2.

Fig. 8.2. Modèle à base physique utilisé : conceptualisation et représentation schématique (adapté de Malet, 2003 ; Malet *et al.*, 2005).

- (ii) **Le modèle est construit selon une structure modulaire avec un noyau de base** (pour la résolution de l'équation du bilan hydrique et de l'équation d'écoulement de la nappe) **et des modules complémentaires** (Fig. 8.2.c). Dans sa version originale, le modèle comprend un module d'interception et de transpiration de la végétation décrit par Van Beek (2002) et des modules 'double porosité', 'écoulement latéral' et 'manteau neigeux' ont été développés par Malet (2003). Ceux-ci ne sont pas utilisés pour notre travail ;
- (iii) Le **noyau de base** du modèle intègre les processus de précipitation (P), d'évapotranspiration (ET), de percolation matricielle dans la zone non saturée (PE_{Mat}), de percolation en profondeur dans la zone saturée (PE_{Tot}) et d'écoulement latéral de la nappe libre (Q_{sat}). Un schéma simplifié de la structure du modèle est indiqué en figure 8.2.c ; un schéma détaillé est fourni par van Beek (2002). Les équations sont détaillées en annexe 8.1.

L'écoulement transitoire en milieu saturé et non saturé dans les directions verticales et latérales est décrit par des variables d'état (teneur en eau volumique exprimée en terme de degré de saturation relatif $-\theta$ - conductivité hydraulique $-K$ - potentiel de pression $-\Psi$), **des relations de définition** (charge piézométrique $-H$ - capacité capillaire $-Cap$), **une relation dynamique de processus** (loi de Darcy généralisée) et une **relation de bilan** (équation de continuité). Par rapport au modèle proposé par Van Beek (202) et Malet (2003), développé pour des sites aux mécanismes hydrologiques fortement documentés, des simplifications ont été réalisées :

- (i) **Le modèle d'infiltration vertical retenu est le modèle 1D de Green et Ampt** (1911) pour lequel les hypothèses sont les suivantes : pendant la durée d'une pluie et la durée de l'infiltration dans le sol, le front d'infiltration progresse à vitesse constante, la teneur en eau volumique est constante au-dessus et en-dessous du front d'infiltration, et la succion matricielle en dessous du front d'infiltration est constante (spatialement et dans le temps) pendant la progression du front d'infiltration (Kirkam et Powers, 1972). Le schéma simplifié des variations de pressions d'eau du modèle de Green et Ampt est indiqué sur la figure 8.3. Cette simplification permet de limiter le nombre de données d'entrée du modèle et demeure réaliste en termes de conceptualisation compte tenu du manque d'information sur les processus hydrologiques qui contrôlent les 'mouvements de versant' modélisés ;

$$inf^t = \Delta t \cdot K_s \cdot \left(1 + \frac{\psi_f \cdot (\theta_s - \theta)}{w^t} \right) \quad [\text{Eq. 8.1}]$$

- (ii) où, inf^t = infiltration ; Δt = variation dans le temps ; K_s = la conductivité hydraulique à saturation ($m \cdot s^{-1}$) ; ψ_f = la succion matricielle au front d'infiltration (pression négative, *i.e.* tension) ; θ = la teneur en eau volumique initiale (sans dimension) ; θ_s = la teneur en eau à saturation (sans dimension) ; w^t = teneur en eau en temps t .
- (iii) L'écoulement est décrit en fonction du potentiel de gravité uniquement gZ ;
- (iv) **Le potentiel hydrique ψ_n est négligé pour l'écoulement dans la zone non saturée.** En conséquence, la percolation est limitée à l'écoulement gravitaire vertical. Au dessus de la zone saturée, le gradient piézométrique i définit l'écoulement latéral. Les écoulements dans un profil de terrain différencié superposé à un contact lithologique imperméable (substrat *in situ*) sont modélisés selon un découpage en trois couches (Fig. 8.2.a et b, Fig. 8.3). Les stocks d'eau et les flux sont comptabilisés en unités de tranches d'eau équivalentes. La tranche d'eau de la couche n est convertie par la teneur en eau à saturation de la couche n , en degré de saturation relatif θ_n . La percolation est proportionnelle au temps de transit de l'eau du sol au-dessus de la zone non saturée (cf. modèle de Green et Ampt, 1911). Le flux de percolation est alors calculé par la perte proportionnelle de la capacité capillaire Cap de la zone non saturée, pour une couche n , pendant l'incrément de temps Δt (Eq. 8.2).

$$perc^t = w^t \cdot \Delta t \cdot \frac{1 - \exp(\Delta t/T_v) \cdot (\exp(\Delta t/T_v))}{1 + \frac{(1 - \exp(\Delta t/T_h))}{(1 - \exp(\Delta t/T_v))}} \quad [\text{Eq. 8.2}]$$

où, $perc^t$ = la percolation ; w^t = teneur en eau au temps t ; Δt = variation dans le temps ; T_v = transmitivité verticale ; T_h = transmitivité horizontale.

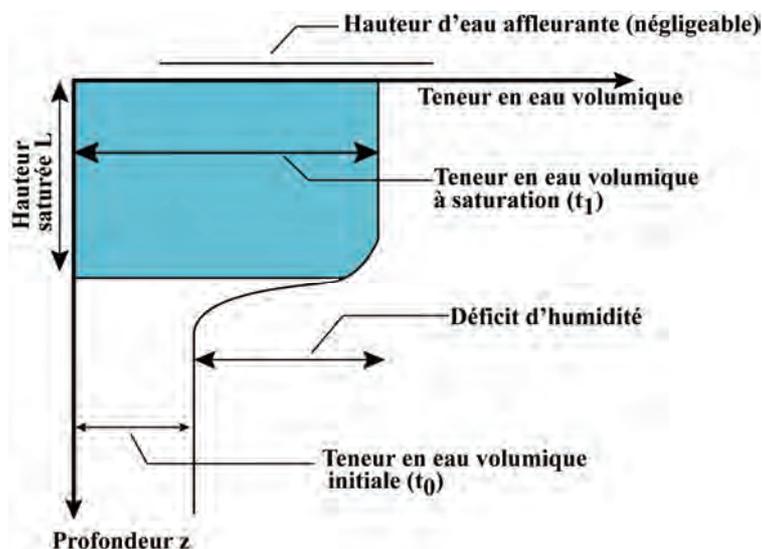


Fig. 8.3. Représentation du modèle d'infiltration de Green et Ampt (1911).

- (v) **Le flux d'écoulement latéral, Q_{sat} , au-dessus de la zone saturée est déterminé par le gradient piézométrique, i , et la conductivité à saturation K_{sat} équivalente, selon une condition de Courant.** La génération d'un niveau de nappe libre est, dans la nature, dépendante des pertes par percolation à travers le contact avec le substratum imperméable ; dans notre cas, elle est simulée par le modèle en imposant une condition aux limites inférieures avec l'hypothèse d'un substratum imperméable (K_{sat} faible) : ainsi, il n'y a pas de perte d'eau et une nappe perchée se forme instantanément. Le gradient piézométrique, i , est défini par l'altitude absolue de la surface phréatique et une direction locale de drainage (L_{dd}).
- (vi) **Le bilan hydrologique de la zone saturée définit ainsi un niveau de nappe d'eau libre au début du pas de temps suivant.** Pour éviter des erreurs de budget, les écoulements, latéral et vertical, sont a-dimensionnalisés par rapport au stock disponible. Les pertes sont additionnées et comparées au stock disponible. Tout stock supérieur au stock maximal de la couche n est évacué par exfiltration. Ce flux est dirigé selon le L_{dd} de la surface topographique. Ce stock d'eau est considéré, au pas de temps suivant, dans la cellule aval la plus proche, comme une détention superficielle disponible pour l'évapotranspiration réelle. Ce flux d'exfiltration, de faible importance, assure la stabilité numérique du modèle. Un module détaillé est incorporé dans le modèle pour simuler la perte due à l'évapotranspiration réelle, ET , dans la couche superficielle. La demande évaporatoire est représentée dans le modèle par l'évapotranspiration potentielle EP , introduite comme une série temporelle. L'interception des pluies par la végétation n'est pas prise en compte dans le modèle.

1.2.3. Description du modèle géotechnique pour le calcul du facteur de sécurité

L'approche classique pour estimer la stabilité d'un versant est de calculer un coefficient de sécurité F_s pour différents mécanismes de rupture potentiels (Chap. 1., § 1.7). Une situation instable ($F_s < 1$) est prédite lorsque les forces motrices sont supérieures aux forces résistantes. Dans notre cas, l'objectif du calcul de stabilité est :

- (i) **D'évaluer la variation du coefficient de sécurité F_s** pour différentes pressions interstitielles (*i.e.* niveau d'eau) et de teneurs en eau dans la zone non saturée ;
- (ii) **De localiser spatialement les secteurs de 'faiblesse'** (*i.e.* les secteurs où la probabilité de rupture est la plus élevée).

Le calcul d'un facteur de sécurité suppose que le terrain se comporte comme un solide rigide-plastique obéissant aux lois classiques de la rupture par cisaillement (critère de Mohr-Coulomb). Comme la plupart des 'mouvements de versant' observés ont une géométrie translationnelle, une surface de rupture plane et plus ou moins parallèle à la surface topographique, **la méthode directe de la pente infinie à l'équilibre limite a été utilisée.**

Le modèle de calcul est celui d'un massif de sol infini reposant par une interface plane sur un substratum, avec un écoulement parallèle à la pente. La figure suivante représente une tranche de sol et les forces qui lui sont appliquées : W le poids du bloc de sol considéré, V et H les efforts sur les côtés du bloc, N et T les réactions normale et tangentielle à la base du bloc, U_l l'effort dû à la pression d'eau latérale, et U l'effort dû à la pression d'eau à la base. Compte tenu de l'hypothèse de pente infinie, on peut admettre que V et H s'équilibrent de part et d'autre et que $U_{am} = U_{av}$. En écrivant que la résultante des forces appliquées est nulle, on peut calculer N et T , ainsi que le coefficient de sécurité $F_s = T_{max} / T$ (Fig. 8.4).

Dans notre cas, les niveaux d'eau dynamiques simulés avec le modèle hydrologique ont été introduits en conditions initiales de pressions interstitielles (U) dans le modèle de pente infinie.

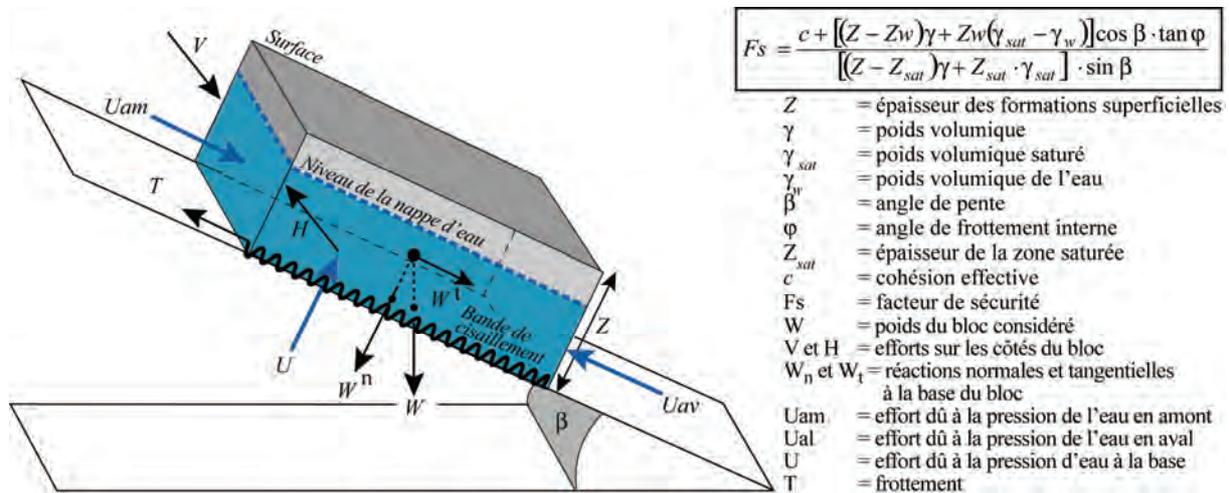


Fig. 8.4. Modèle de pente infinie.

Les incertitudes sur les paramètres d'entrée sont prises en compte en approximant les valeurs de cohésion (c) et d'angle de frottement interne (ϕ) par une fonction de probabilités pour chaque type de matériau observé.

Tab. 8.1. Paramètres d'entrée pour le modèle hydrologique et géotechnique.

Symbole	Signification	Valeurs	
		Marnes noires	Moraines
K_s	Conductivité hydraulique à saturation ($m.s^{-1}$),	$5.10^{-6} m.s^{-1}$	$3.10^{-4} m.s^{-1}$
θ^t	Ruissellement de surface	0.5	1
Z	Épaisseur des formations superficielles	0.5 m	Entre 0.5 et 15 m
γ	Poids volumique ($kN.m^{-3}$)	12.5	-
γ_{sat}	Poids volumique saturé ($kN.m^{-3}$)	16.5	17.5
φ	Angle de frottement interne ($^{\circ}$)	31	31.5
c	Cohésion effective (kPa)	15	5
F_s	Facteur de sécurité	-	-

2. ÉVALUATION DE L'ALÉA À L'ÉCHELLE D'UN SITE INSTABLE

L'évaluation de l'aléa à l'échelle d'un site instable nécessite un jeu de variables plus précis que celui acquis pour les simulations obtenues avec les modèles d'analyse spatiale probabiliste, notamment pour les épaisseurs des formations superficielles. C'est pourquoi, pour cette évaluation, il a été décidé de se focaliser sur un site dont :

- (i) Les types de 'mouvements de versants', leur mécanismes de rupture et certaines dates de déclenchement sont connus ;
- (ii) Les caractéristiques environnementales représentatives du bassin de *Barcelonnette* offrent assez de possibilités d'observations des épaisseurs de formations superficielles pour effectuer des levés réguliers et précis ;
- (iii) La susceptibilité forte est avérée.

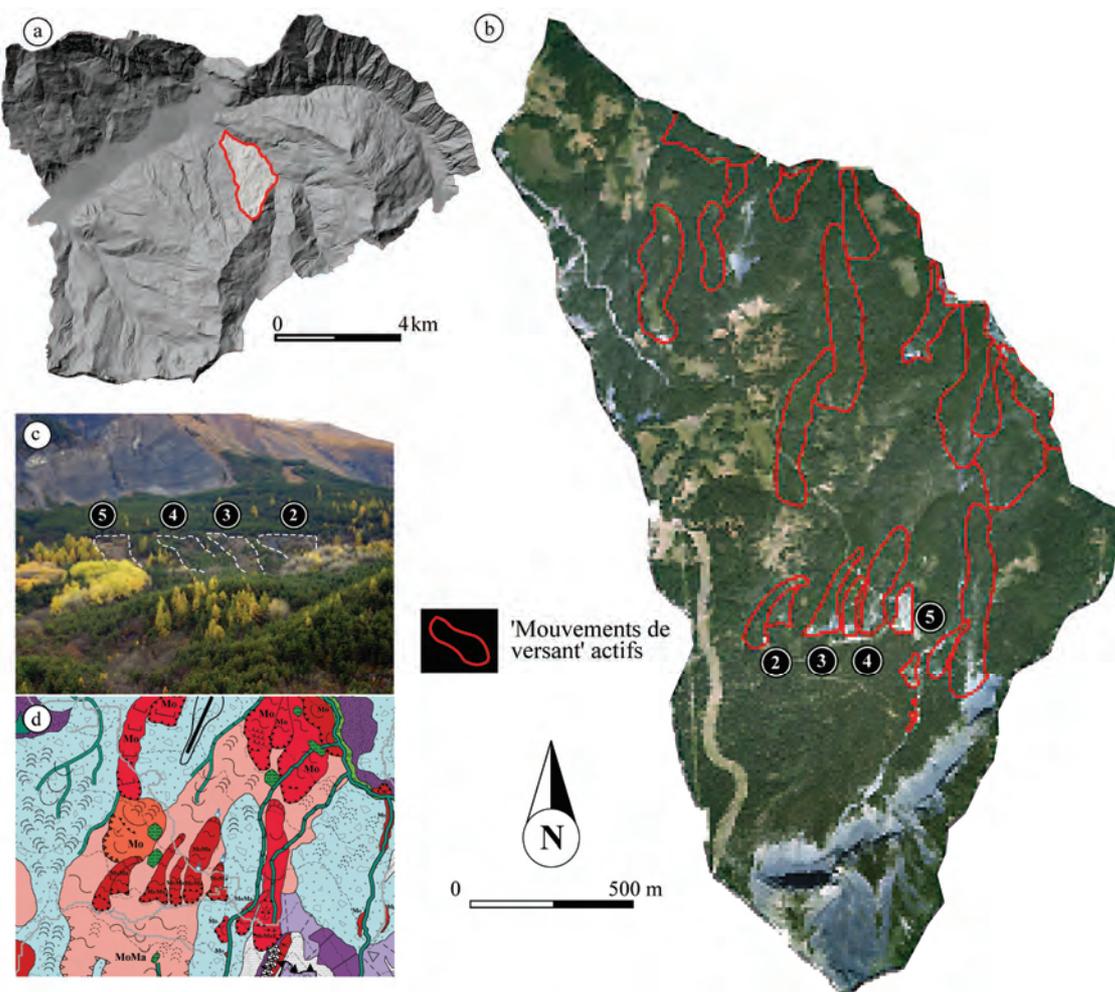
Le sous bassin de *Bois Noir*, présentant toutes ces caractéristiques, a donc été choisi pour appliquer la stratégie d'évaluation de l'aléa n°1. Cette section présente d'abord le site de *Bois Noir*, ses caractéristiques et les instabilités de versant. Puis, la stratégie d'analyse, les paramètres retenus et les résultats sont ensuite exposés. Ces résultats sont alors comparés à une photo-interprétation diachronique entre les périodes 1948 et 2002.

2.1. Le site local : Bois Noir

Le sous bassin de *Bois Noir* a été décrit en partie dans la section § 1.1.2.2 du chapitre 3. Quelques exemples de 'mouvements de versant' l'affectant ont aussi été présentés succinctement. Il s'agit maintenant de décrire plus précisément sa géomorphologie et ses instabilités.

2.1.1. La géomorphologie du site

Le sous bassin de *Bois Noir* est situé, sur le versant *Ubac* du bassin de *Barcelonnette*, le long du *Riou Versant* à 2.5 km au sud-est de Jausiers (Fig. 8.5). Exposé principalement du nord-ouest vers le nord-est, ce secteur présente une superficie de 3.5 km² entre 2200 m et 1280 m d'altitude. Deux unités litho-morphologiques se distinguent nettement sur le terrain avec un secteur amont marqué par des affleurements rocheux et une partie aval, entaillée dans les marnes noires, aux pentes plus douces et boisées marquées par de nombreuses instabilités de versant (Fig. 8.5) :



a. Localisation du sous bassin de Bois Noir. b. Localisation des 'mouvements de versant' (Orthophoto ; IGN, 2004). c. Panorama sur les glissements translationnels complexes caractéristiques du site. d. Extrait de la carte morphodynamique.

Fig. 8.5. Localisation du sous bassin de Bois Noir et caractéristiques géomorphologiques.

- (i) **En amont**, les versants sont caractérisés par des affleurements calcaires et marneux avec des escarpements abrupts sujets à plusieurs écroulements rocheux. Les parties inférieures des versants sont recouvertes par des éboulis colonisés peu à peu par une végétation arbustive
- (ii) **En aval**, entre 1800 m et 1300 m d'altitude environ, les versants, aux pentes faibles à moyennement fortes (10 et 35°), sont marqués par de multiples bossellements et ruptures de pentes hérités des différentes phases de déglaciation du Quaternaire (Chap. 2). Localement les marnes noires sont entaillées par des ravines profondes (Serre Corbeau) permettant l'observation directe des dépôts morainiques d'épaisseurs variables (1 à 15 m).

2.1.2. Les 'mouvements de versant' observés

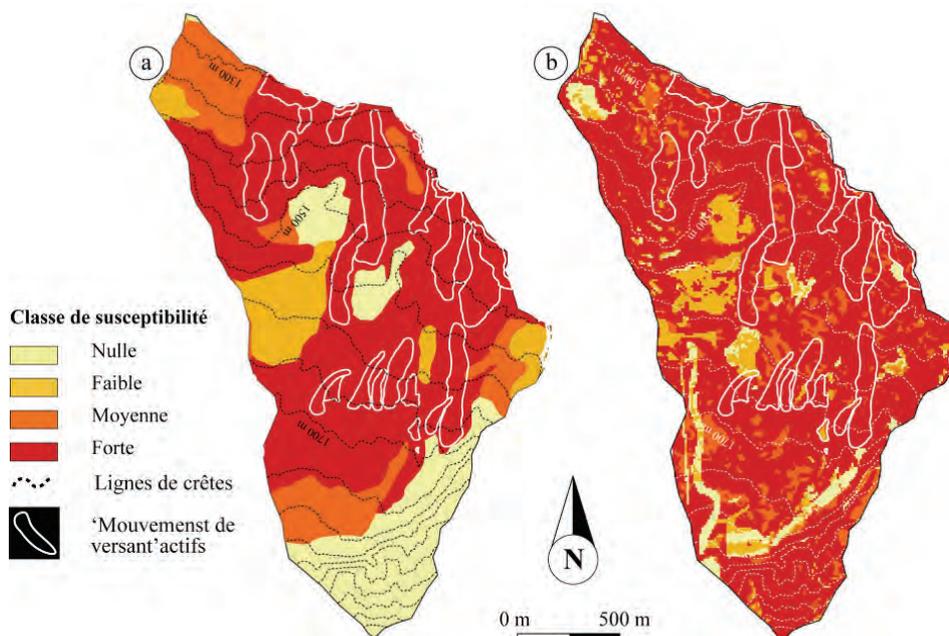
Les 'mouvements de versant' superficiels à moyennement superficiels (entre 2 m et 10 m d'épaisseur) observés sur le sous bassin de Bois Noir sont majoritairement des *glissements translationnels complexes*, et aussi des *glissements rotationnels* le long des berges du Riou versant.

- (i) **Les glissements translationnels complexes** se déclenchent principalement sous forêt et dans les dépôts morainiques ou à l'interface moraines/marnes noires offrant une surface de rupture préférentielle qui favorise l'instabilité. Parfois, le substrat marneux, fortement tectonisé favorise la rupture comme c'est le cas pour le glissement dit de 'Bois Noir' déclenché en avril 1994. D'une épaisseur comprise entre 2 et 6 m, ils sont généralement actifs surtout dans la partie la plus à l'est du secteur. Cette partie du secteur est très humide bénéficiant des apports des cours d'eau intermittents en amont et d'un abandon du drainage vers 1800 m d'altitude ;
- (ii) **Les glissements rotationnels** sont favorisés par un sapement basal du torrent et une forte humidité issue de sagnes permanentes localisées à l'amont immédiat (sagnes alimentées par de multiples cours d'eau intermittents). Ces glissements se déclarent au sein des moraines sur une épaisseur généralement comprise entre 2 et 6 m.

2.1.3. Un secteur reconnu comme très susceptible

L'analyse de la susceptibilité a permis de définir les variables les plus influentes de ces 'mouvements de versant' (cf. Chap. 6 ; Chap. 7)

Le secteur, reconnu de manière experte comme fortement susceptible, bénéficie aussi d'une carte simulée par méthode probabiliste performante : les erreurs relative sont de 0.10, et les indices de qualité dérivés de la matrice de confusion révèlent une très bonne adéquation de la classe forte (S4) sur ce secteur. La figure 8.6 présente les deux cartes de susceptibilité 'expert' et simulée.



a. Carte de susceptibilité 'expert'. b. Carte de susceptibilité unifiée simulée par la Théorie de l'évidence.

Fig. 8.6. Cartes de susceptibilité 'expert' et simulée par la Théorie de l'évidence sur le site de Bois Noir.

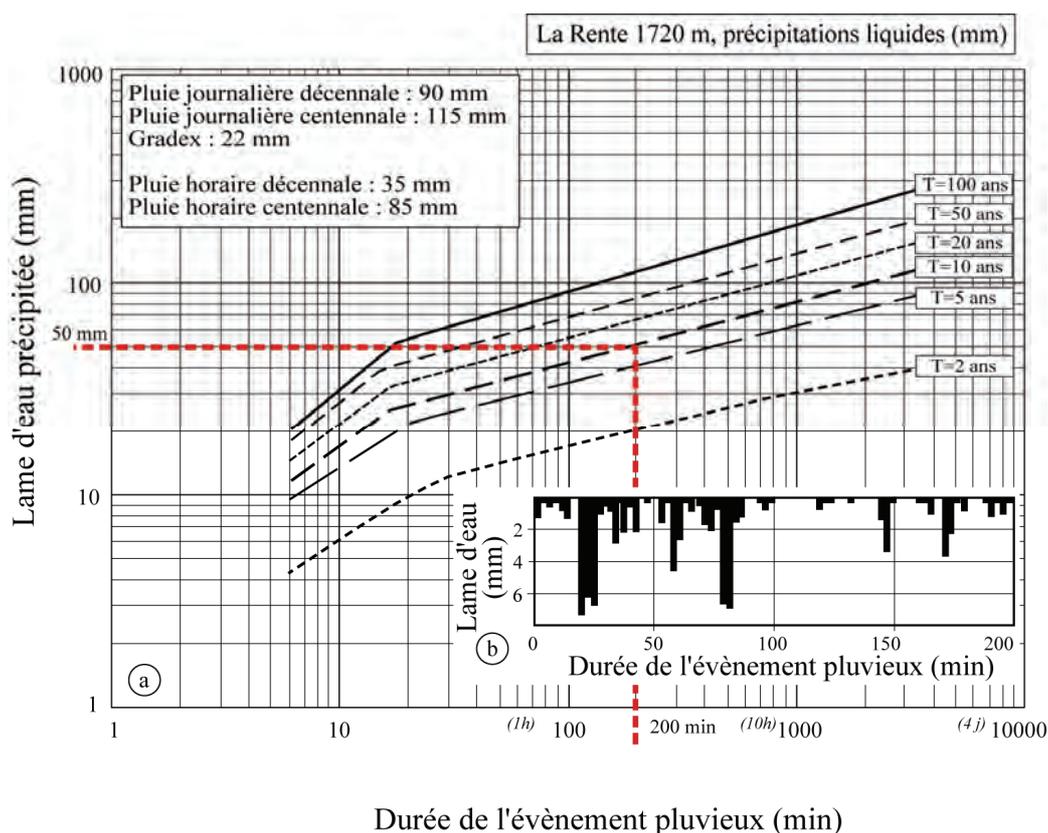
2.2. Analyse de sensibilité du modèle hydrologique et géomécanique et résultats

2.2.1. Méthodologie de l'analyse de sensibilité

L'analyse de sensibilité du modèle hydrologique et du modèle géotechnique de pente infinie est réalisée en faisant varier les paramètres du modèle et en comparant les séries simulées à une

série de référence. Un paramètre est modifié pour chaque test. L'objectif de cette analyse est d'identifier les paramètres les plus influents, et de tester la fiabilité du modèle.

L'analyse de sensibilité a été réalisée sur un volume théorique de 100 m X 200 m x 5 m a une résolution spatiale de 10 m. Ce volume est proche des dimensions caractéristiques observées pour les glissements de terrain du site. Le volume théorique comprend 1.10^5 cellules ; le volume rectangulaire a été incliné artificiellement selon un angle β par rapport à l'horizontale ; les interfaces des couches sont parallèles. A partir de conditions initiales identiques, les variations de teneurs en eau et les fluctuations piézométriques ont été modélisées pour un événement pluviométrique de 200 min et d'une récurrence de 10 ans (Fig. 8.7).



a. évènements pluvieux d'altitude (La rente, 1700 m). B. Précipitations caractéristiques pour une période de retour de 10 ans.

Fig. 8.7. Courbes hauteur-durée-fréquence des précipitations (loi de Montana bilinéaire) et précipitations caractéristiques pour une période de retour de 10 ans (modifié de Malet, 2003).

La sensibilité aux paramètres Z (épaisseur des sols), β (pente du versant), γ (poids volumique), c (cohésion) et φ (angle de frottement interne) a été testée (Tab.8.2). Cette méthodologie est similaire à celle utilisée par Malet (2003). Les variations des paramètres ont été calculées en ajoutant ou soustrayant au paramètre moyen 10, 20, 30, 40, et 50% de l'écart-type de la distribution. Si la variabilité du paramètre est inconnue, une estimation a été réalisée.

La hauteur d'eau libre stockée dans le profil divisée par l'épaisseur totale du profil a été utilisée comme estimateur de la qualité de la simulation. En conditions initiales, ont été utilisées une nappe d'eau libre à une position constante à -2 m sous la surface topographique et une teneur en eau moyenne de 31% dans la zone non saturée. Pour comparer les résultats, les variations dans les séries simulées sont exprimées par le ratio entre la quantité d'eau stockée dans le profil au début de la simulation et la quantité d'eau finale. Des valeurs négatives indiquent une diminution du stock d'eau sur les deux années simulées ; des valeurs positives indiquent une

augmentation du stock d'eau. La simulation de référence avec les paramètres moyens présente une diminution de 31% du stock d'eau sur les deux années, essentiellement liée à l'évapotranspiration réelle.

2.2.2. Résultats de l'analyse de sensibilité

2.2.2.1. Les paramètres les plus influents

La figure 8.8 représente les variations de la quantité d'eau stockée pour les différentes combinaisons de paramètres hydrologiques et hydrodynamiques. Les paramètres les plus influents sont, par ordre d'importance : (i) l'épaisseur des formations superficielles (Z), (ii) le gradient de pente (β), (iii) le poids volumique (γ), (iv) l'angle de frottement interne (α), (v) la cohésion effective (c).

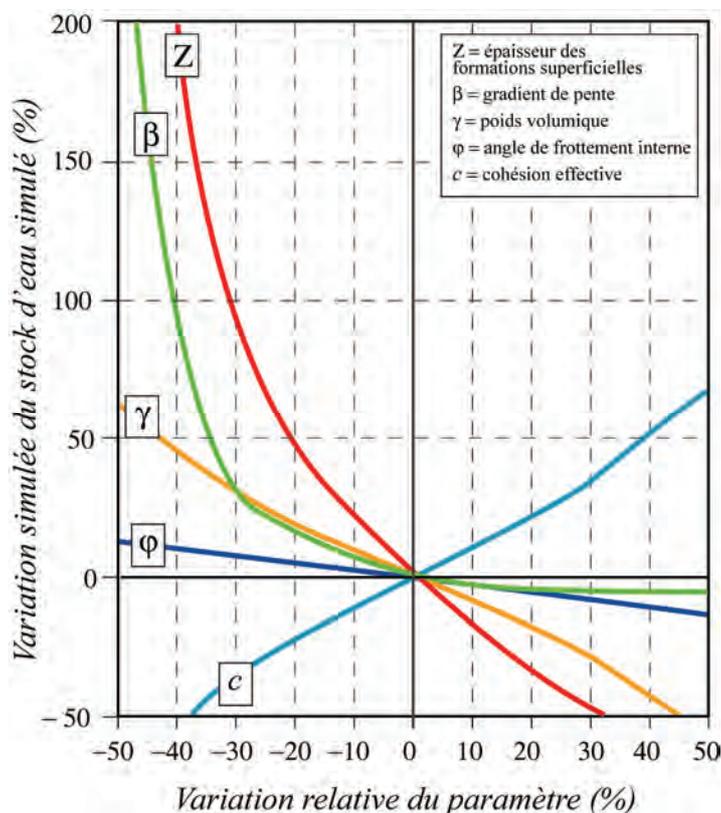


Fig. 8.8. Analyse de sensibilité des paramètres du noyau de base de STARWARS exprimée comme une variation de la quantité d'eau stockée dans le profil.

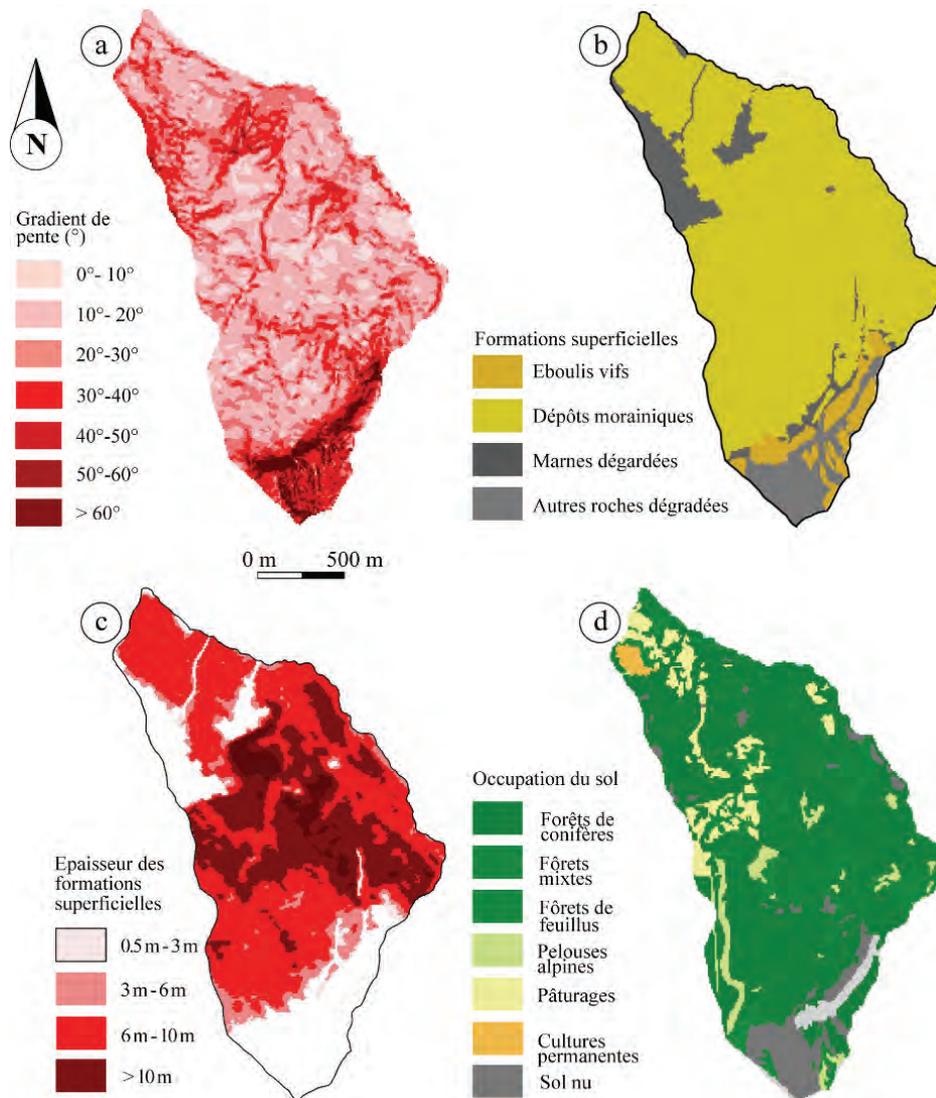
Les deux paramètres les plus influents sont :

- (i) **L'épaisseur des formations superficielles (Z)** : une variation de $\pm 40\%$ fait varier le stock d'eau de $+200\%$ à -35% dans le profil. Ce résultat indique que pour les types de 'mouvement de versant' se déclenchant essentiellement dans les moraines, le choix d'introduire ce paramètre pour évaluer l'aléa est essentiel.
- (ii) **Le gradient de pente (β)** : une variation de -40% fait varier le stock d'eau de $+200\%$ à pratiquement 0 dans le profil. A partir d'un certain angle de pente (β), la variation du stock simulé est nulle. Pour les variations négatives, elles sont en cohérence avec les épaisseurs de formations superficielles directement liées à l'angle de pente (β). Plus l'angle de pente est faible plus les formations superficielles sont épaisses, plus le stock d'eau potentiellement stockée dans le profil est important.

2.3. Application du modèle

Le modèle hydrologique et géomécanique a ensuite été utilisé avec la géométrie du sous bassin. La figure 8.9 présente les différentes cartes des paramètres utilisées pour les simulations. Ces variables sont issues de celle utilisées pour les simulations de la susceptibilité par modèles d'analyse spatiale.

Par rapport à la carte d'épaisseur utilisée pour les modèles probabilistes (*Chap.4, § 3.1.3*), la carte utilisée pour l'analyse de l'aléa est plus détaillée. Le sous bassin de *Bois Noir* offre un nombre de coupes naturelles élevé, permettant de bien délimiter des secteurs de fortes ou de faibles épaisseurs de formations superficielles. Ainsi une centaine de mesures ont été réalisées en octobre 2005. Elles ont ensuite été interpolées par *krigeage* ordinaire (issu d'un semi-variogramme spécifique). Les épaisseurs maximum observées sont de l'ordre de 15 m. Elles correspondent aux bourrelets morainiques décrits en section § 1.1.2 du chapitre 2.



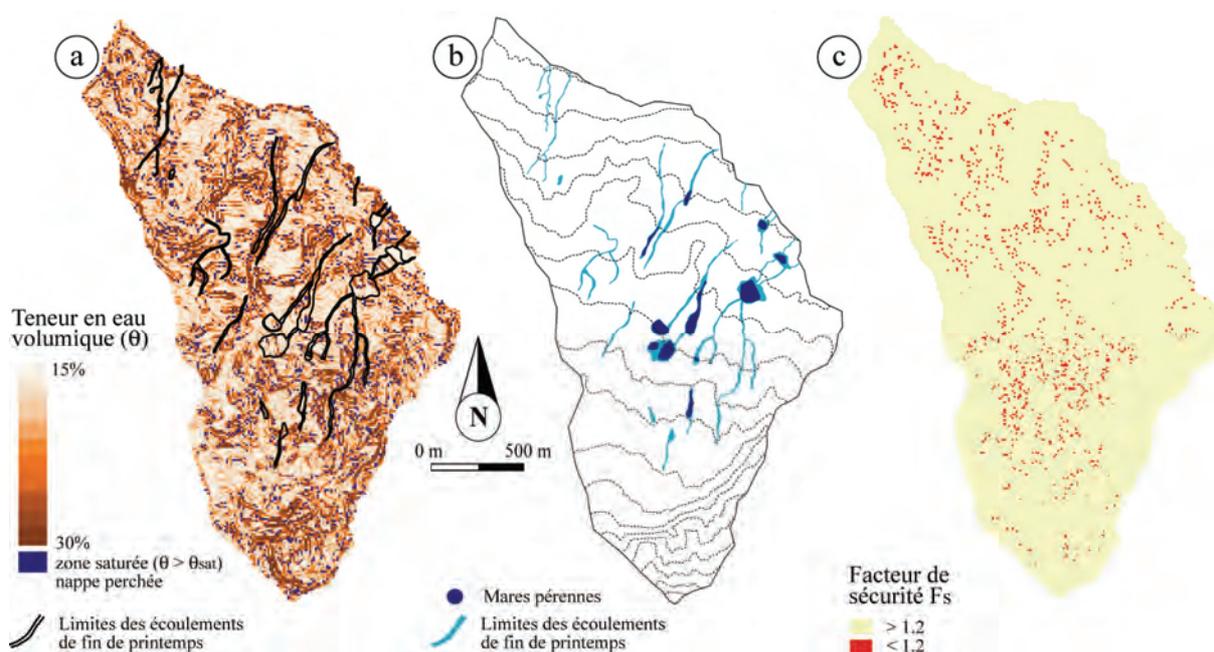
a. carte des gradients de pente. b. Carte des formations superficielles (seules les marnes dégradées et les dépôts morainiques sont retenus pour l'analyse de l'aléa). c. Cartes des épaisseurs de formations superficielles. d. Carte de l'occupation du sol.

Fig. 8.9. Variables utilisées pour les simulations hydrologique et géotechnique du sous bassin de Bois Noir.

Les paramètres introduits dans le modèle sont indiqués dans le tableau 8.1. Les conditions initiales (teneurs en eau volumiques spatialisées, niveaux d'eau spatialisés) sont définies à partir d'une simulation sur vingt années à partir des séries temporelles de précipitation, température, et évapotranspiration potentielle du poste *Météo-France* de *Barcelonnette* (1980-2000). La série chronologique de température et de pluie du poste *Météo-France* de *Jausiers* sur la période 1964-2002 a été utilisée en conditions aux limites, afin de reproduire l'activité hydrologique et géomorphologique du bassin versant au cours de cette période.

2.3.1. Simulations : au pas de temps journalier

Pour l'hydrologie des versants, la figure 8.10.a montre un exemple de simulation des teneurs en eau selon la série chronologique introduite pour la période 1964-2002 pour le 12 mars 1978, date où le maximum d'eau simulée est stocké dans le sous bassin. Les conditions hydrologiques sont donc les plus favorables aux instabilités (Fig. 8.10.c).



a. Carte de l'hydrologie simulée au 12 mars 1978 et superposition des écoulements de fin d'hiver. b. Carte des écoulements de fin d'hiver des mares pérennes. c. Carte des coefficients de sécurité associés à la carte a.

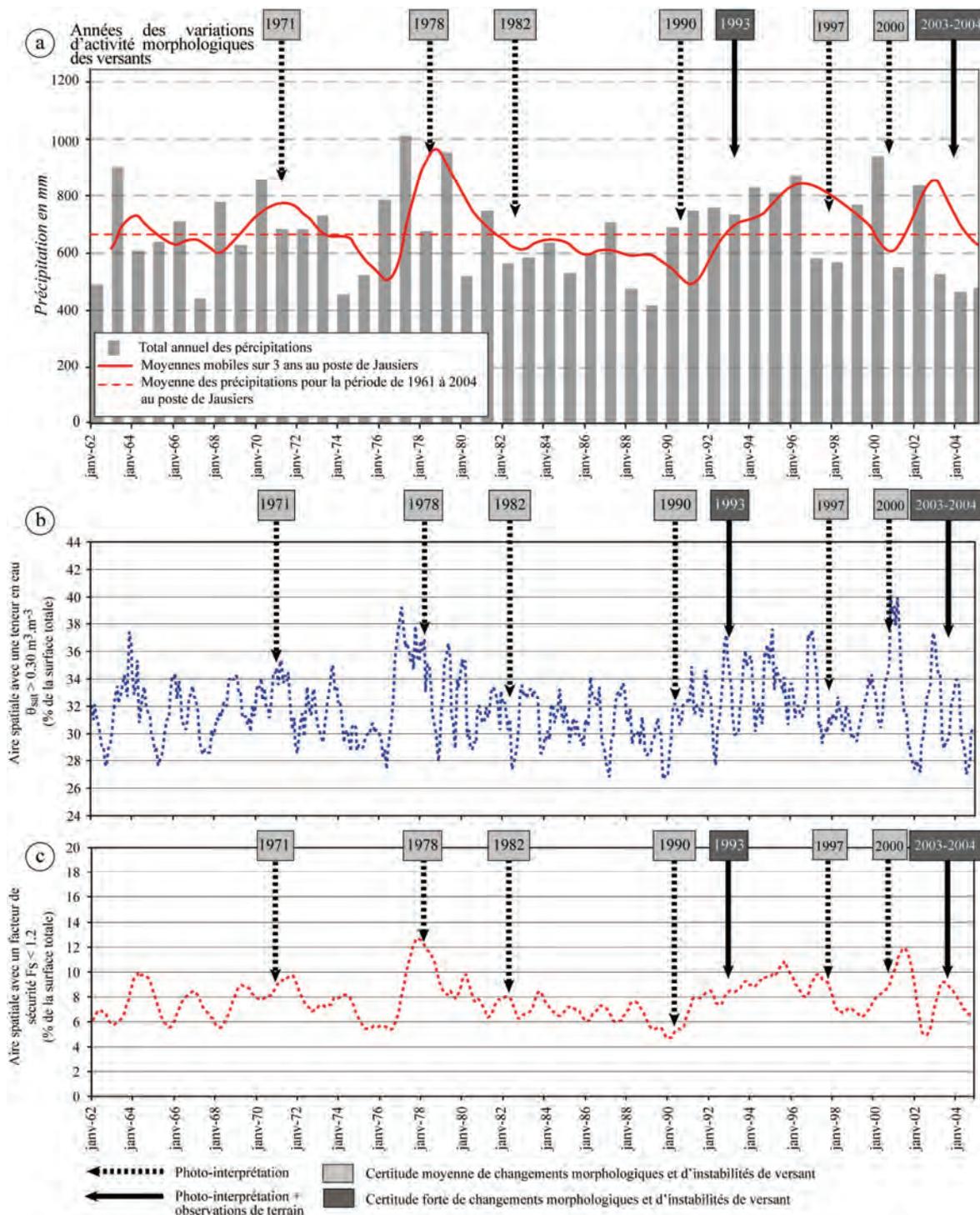
Fig. 8.10. Cartes de l'hydrologie simulée et observée et des facteurs de sécurité associés pour le sous bassin de Bois Noir au 12 mars 1978.

En l'absence de mesures *in situ*, la méthode pour valider ces simulations a été de les comparer avec des observations de terrain (Fig. 8.10.b). Cette approche est celle utilisée par van Beek (2002), en absence de mesures de niveaux d'eau. La superposition de la carte des observations des écoulements et des mares pérennes observés à la fin du printemps (carte levée en avril 2005) avec la carte des stock d'eau simulée (Fig. 8.10.a) montre une bonne adéquation des maximum d'eau simulée. On notera tout de même que la carte simulée présente les conditions extrêmes estimées. Il convient donc de prendre en compte ces résultats avec prudence.

2.3.2. Mise en relation du coefficient de sécurité et des évènements recensés

Les simulations temporelles des niveaux de nappes et des coefficients de sécurité (F_s) sont présentées sur la figure 8.11. Les deux courbes sont mises en relation avec les précipitations annuelles enregistrées au poste de Jausiers et les variation d'activité morphologiques des versants

observés par photo-interprétation pour la période 1961-2002 (Fig. 8.12), et par photo-interprétation et relevés de terrain à partir de 2002.



a. Précipitations annuelles enregistrées au poste de Jausiers pour la période 1961-2004. b. Simulations du niveau de la nappe par le modèle hydrologique et mise en relation avec les instabilités observées ; la courbe indique l'aire spatiale de teneur en eau simulée pour $\theta_{sat} > 0.30 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. c. Simulations des coefficients de sécurité : la courbe montre la surface du sous bassin (%) avec un coefficient de sécurité $F_s < 1.2$.

Fig. 8.11. Simulations des niveaux de nappes et des coefficients de sécurité associés pour la période 1961-2004 au sous bassin de Bois Noir.

1971	1978	1982
<p>Caractéristiques de la photographie aérienne</p> <ul style="list-style-type: none"> • Numéro de mission : F3539 - 3639 • Numéro de la photographie : 057 • Echelle de la photographie originelle : 1/30 000 • Altitude de prise de vue (mer) : 5600 m à 6200 m 	<p>Caractéristiques de la photographie aérienne</p> <ul style="list-style-type: none"> • Numéro de mission : F3539 - 3639 • Numéro de la photographie : 10 • Echelle de la photographie originelle : 1/30 000 • Altitude de prise de vue (mer) : 5800 m 	<p>Caractéristiques de la photographie aérienne</p> <ul style="list-style-type: none"> • Numéro de mission : IFN 04 • Numéro de la photographie : 882 • Echelle de la photographie originelle : 1/17 000 • Altitude de prise de vue (mer) : 6022 m
<p>Observations</p> <p>L'escarpement n°3 semble évoluer vers l'amont : mouvement régressif ?</p> <p>Les autres glissements semblent ne pas évoluer.</p> <p>Une partie du chemin dit de "Bois noir" n'est plus visible.</p> <p>Le tracé du chemin est peu visible en partie est.</p>	<p>Observations</p> <p>Ouverture de la piste vers l'amont.</p> <p>La piste semble être déformée vers l'aval à l'est du glissement n°4, cependant aucune trace de glissement n'est visible.</p> <p>Les escarpements des 4 glissements ont évolué vers l'amont. Il reste toutefois difficile de les délimiter.</p>	<p>Observations</p> <p>Aucune évolution des glissements n° 2, 3 et 4.</p> <p>Le glissement n°1 semble s'être élargi vers l'est (flèche blanche).</p> <p>La piste est déformée vers l'aval à l'est du glissement n°4. Cependant, la morphologie n'est pas très visible.</p>

Fig. 8.12. Changements morphologiques observés par photo-interprétation sur le secteur du sous bassin de Bois Noir entre 1971 et 1982.

La courbe de la figure 8.11.b indique la proportion de surface du sous bassin saturée qui représente un indicateur du stock d'eau dans le versant.

On remarque que les années avec un stock d'eau élevé correspondent aux années aux variations d'activité morphologiques majeures des versants (occurrence ou réactivation d'instabilités de versant), notamment pour les années 1978, 1993 et 2000.

Enfin, une carte de probabilités de rupture pour toute la période de simulation est créée. La **classification est effectuée de manière binaire**, avec des **secteurs stables** et des **secteurs instables** selon une possibilité d'obtenir un F_s sous un certain seuil. La figure 8.13 indique les fréquences des mailles de calcul instables sur toute la durée de la période simulée et les courbes de probabilités associées en fonction des valeurs de F_s . La carte représente, sur la durée de la simulation la probabilité d'obtenir des F_s en dessous de certains seuils, et donc d'identifier des secteurs 'probablement toujours stables' ($F_s > 1.5$), 'probablement conditionnellement instable' ($1.2 > F_s < 1.5$), et 'probablement toujours instables' ($F_s < 1.2$).

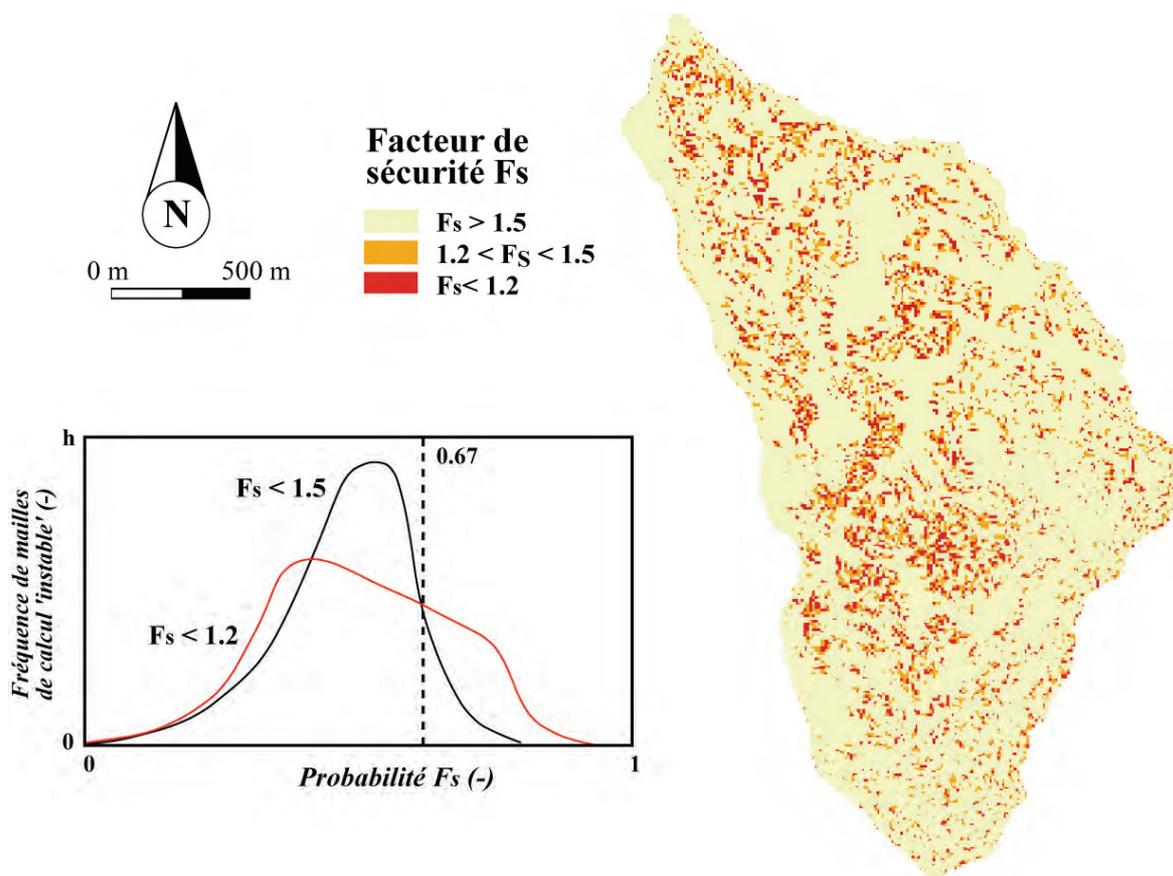


Fig. 8.13. Carte de probabilité de rupture simulée pour la période de 1961-2004 pour le sous bassin de Bois Noir.

2.4. Conclusion

La carte finale obtenue (Fig. 8.13) peut représenter une estimation de l'aléa exprimé en tant que probabilité de rupture. Toutefois, le nombre de cellules à forte probabilités de rupture est sous-estimé car seule la totalité des cellules au $F_s < 1.2$, pour la totalité de la période simulée, sont retenues. Cette carte présente donc les probabilités de rupture maximum pour le sous bassin de Bois Noir avec une surface en aléa fort de 0.21 km^2 .

Toutefois, pour obtenir cette carte de probabilité de rupture, il est nécessaire d'acquérir une information sur les épaisseurs de formations superficielles assez détaillée. Cette carte a été obtenue par des investigations de terrain sur toute la surface de sous bassin, ce dernier offrant de bonnes conditions d'observations avec grand nombre de coupes naturelles. Cette stratégie de cartographie des épaisseurs a été réalisée pour l'ensemble du bassin (Chap. 4, § 3.1.1). Toutefois, de grandes incertitudes concernent les épaisseurs de formations sur les interfluves car peu d'observations sont possibles (pas ou peu de coupes naturelles). Ces incertitudes limitent donc la transposition de cette approche à l'ensemble du versant Ubac.

3. IDENTIFICATION DE SEUILS DE DECLENCHEMENT ET EVALUATION DE L'ALEA SUR L'ENSEMBLE DU BASSIN

L'évaluation de l'aléa à l'échelle d'un grand bassin versant large ou d'un bassin de risque, comme le versant Ubac du bassin de Barcelonnette, n'est pas réaliste avec la stratégie évoquée ci-

dessus. En particulier, cela nécessite d'obtenir une image très précise des épaisseurs de formations superficielles, qui est la variable de contrôle la plus sensible du modèle.

Une approche originale, se focalisant sur les secteurs de susceptibilité forte simulée par approche probabiliste, est donc proposée. Cette approche associe l'analyse de seuils de déclenchement météorologiques par types de 'mouvements de versant' représentatifs, le calcul de probabilités de rupture pour chaque type de mouvements, puis la régionalisation de ces probabilités par une matrice reliant probabilités de rupture et classes d'épaisseur de formations superficielles uniquement pour les classes de susceptibilité forte.

3.1. Stratégie d'analyse

La stratégie d'analyse repose sur l'utilisation du modèle hydrologique et géomécanique décrit en section § 2 pour différentes géométries de 'mouvements de versant'. La figure 8.14 détaille la méthodologie qui consiste à :

- (i) Traduire les conditions initiales et aux limites des simulations sous la forme des fonctions de densité de probabilités ;
- (ii) Effectuer des tirages aléatoires (Monte-Carlo) de valeurs de variables à partir des fonctions de densité de probabilités ;
- (iii) Réaliser des simulations pour chaque type de phénomène afin de déterminer la probabilité d'occurrence de chacun des résultats en termes de facteurs de sécurité.

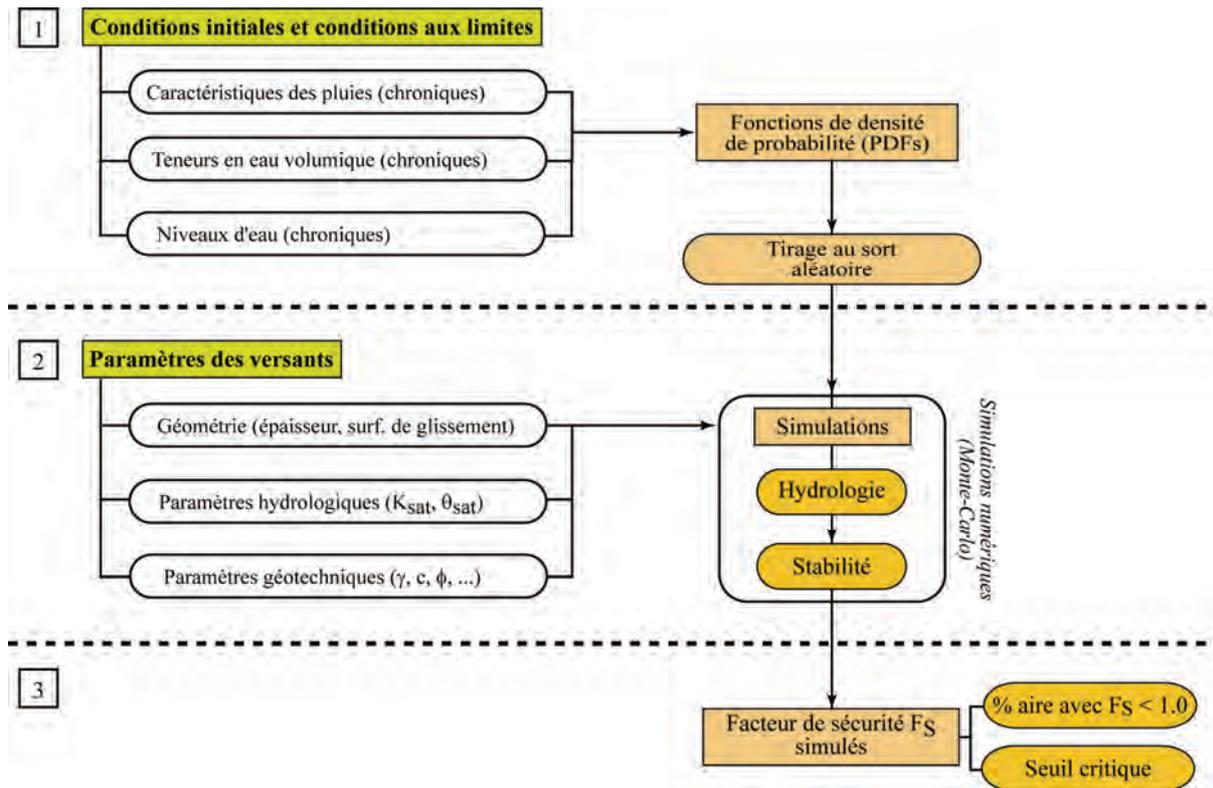


Fig. 8.14. Stratégie utilisée pour l'approche n°2 de cartographie de l'aléa.

3.2. Variables de contrôle, conditions initiales et aux limites

Les paramètres introduits pour les simulations sont indiquées dans la figure 8.15.

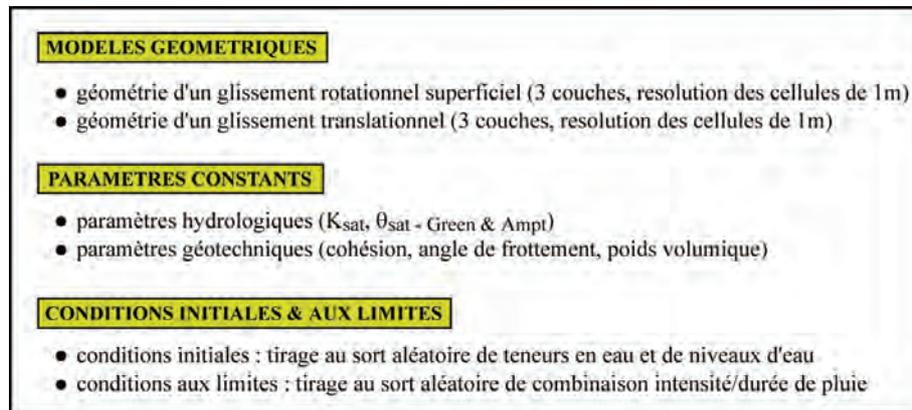


Fig. 8.15. Paramètres utilisés dans le modèle.

3.2.1. Les 'mouvements de versant'

Les 'mouvements de versant' retenus sont ceux évoqués précédemment, c'est-à-dire des glissements translationnels et des glissements rotationnels. Leurs caractéristiques géomorphologiques et géométriques sont données dans le chapitre 3. Pour cette approche cartographique la géométrie caractéristique des deux types de glissements est définie de manière détaillée. L'interface des couches est définie par des MNT issus d'une analyse pré et post rupture. La structuration du modèle s'effectue en 3 couches avec un MNT de la topographie un MNT des dépôts morainique et un MNT de la roche mère.

3.2.2. Conditions aux limites et conditions initiales des simulations

Les fonctions de densité de probabilités des séries chronologiques de pluies journalières, des teneurs en eau et des niveaux d'eau dans le sol ont été calculés à partir des données météorologiques du poste d'altitude de *La Rente* (sur la période 1993-2005) et hydrologiques observés sur le glissement-coulée de Super-Sauze (teneurs en eau et niveaux d'eau dans le sol sur la période 1997 – 2004).

Puis une loi de distribution a été ajustée sur les fonctions de densité de probabilités des trois variables afin de décrire la répartition des valeurs qu'elles peuvent prendre et de réaliser des tirages aléatoires. Dans notre cas, une loi de distribution de type gamma inverse (loi de distribution à deux paramètres α , paramètre de forme et β , paramètre d'échelle- de variables continues qui est la réciproque d'une variable distribuée selon une distribution gamma centrée-réduite) a été utilisée compte tenu de l'asymétrie des histogrammes de densités, et dont les paramètres sont définis en figure 8.15.

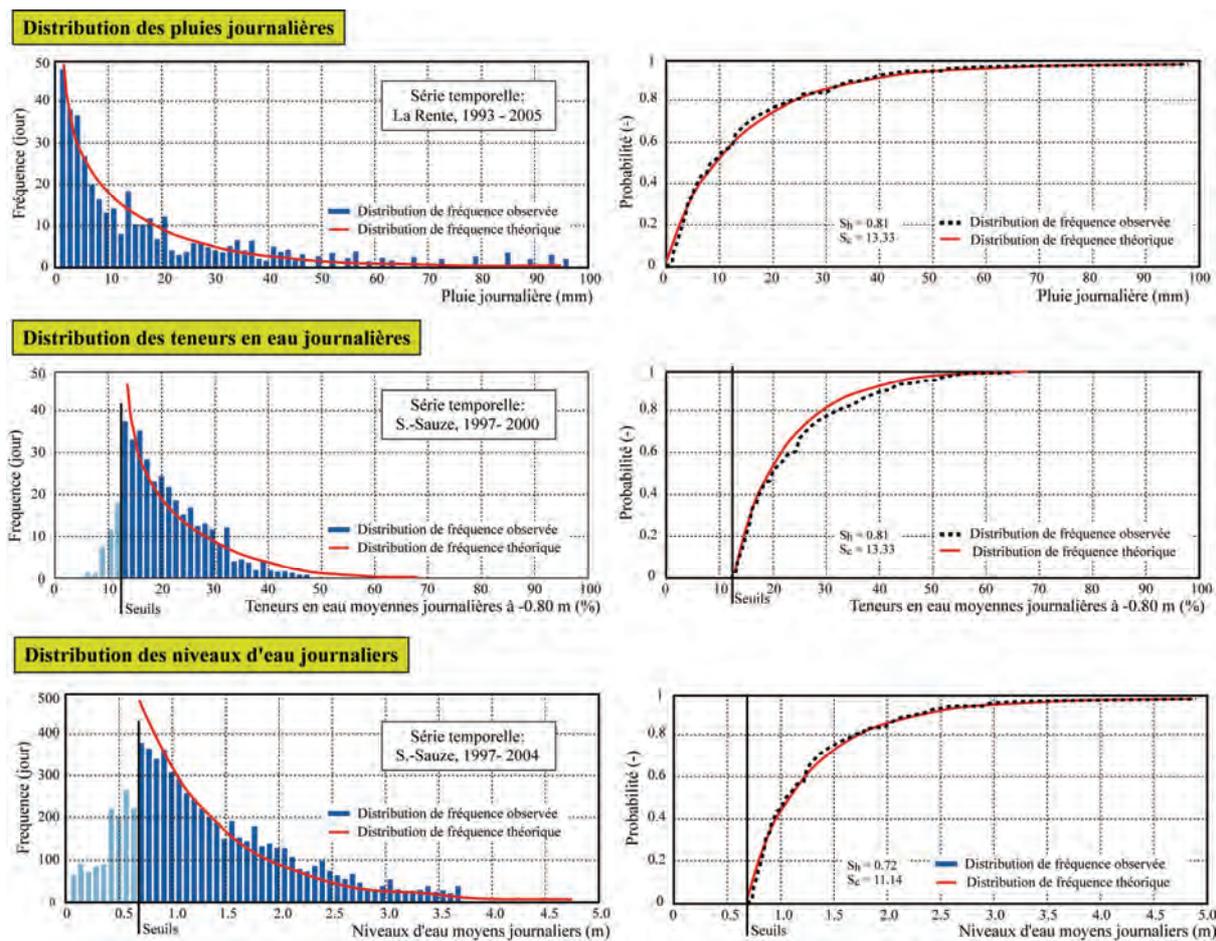


Fig. 8.16. Distribution des pluies, des teneurs en eau et des distributions d'eau journaliers au poste de la Rente et fonctions de probabilités de type gamma inverse dérivées.

La distribution gamma inverse des fonctions de densités de probabilités est définie pour un intervalle $x > 0$:

$$f(x; \alpha, \beta) = \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} x^{-\alpha-1} \exp\left(-\frac{\beta}{x}\right) \quad [\text{Eq. 8.3}]$$

où : α est le paramètre de forme et β est le paramètre d'échelle.

Les densités de probabilités et les ajustements des fonctions de probabilités de type gamma inverse sont représentés en figure 8.16. Des tirages aléatoires sur les trois variables sont alors générées par inversion des trois fonctions de type gamma. Les paramètres hydrologiques et géotechniques utilisés sont indiqués dans le tableau 8.1.

3.3. Simulations de probabilités de rupture – Approche de Monte-Carlo

Plusieurs tirages au sort de conditions initiales et de conditions aux limites ont été réalisés de manière indépendante à partir des trois lois de distributions, et la possibilité des combinaisons a été vérifiée de manière experte (concordance des paramètres tirés au sort). Si la concordance des paramètres n'était pas jugé plausible, un nouveau tirage au sort d'un paramètre était réalisé. Au final, 200 combinaisons possibles ont été introduites dans le modèle hydrologique et géomécanique.

Les probabilités de rupture sont calculées pour une fonction de densité de probabilité g_F :

$$P(F \leq 1) = \int_{F=1}^{\infty} g_F(F) dF \quad [\text{Eq. 8.4}]$$

Cette approche est flexible (van Beek, 2002) car seule la distribution de F_s est suscitée. Les distributions des variables incluses comme sources d'incertitude pour la fonction sont considérés comme connus par les mesures de terrain. Pour une distribution normal, la probabilité de rupture est- alors donnée par l'intégration d'une courbe normal standardisée pour une étendue $-\infty < F \leq 1$, où z est donné par :

$$z = \frac{x - M[F]}{\sqrt{V[F]}} \quad [\text{Eq. 8.5}]$$

où x est la variable et V la variance.

Le module de stabilité des pentes utilise les équations 8.4 et 8.5 pour déterminer la probabilité de rupture pour une distribution normale.

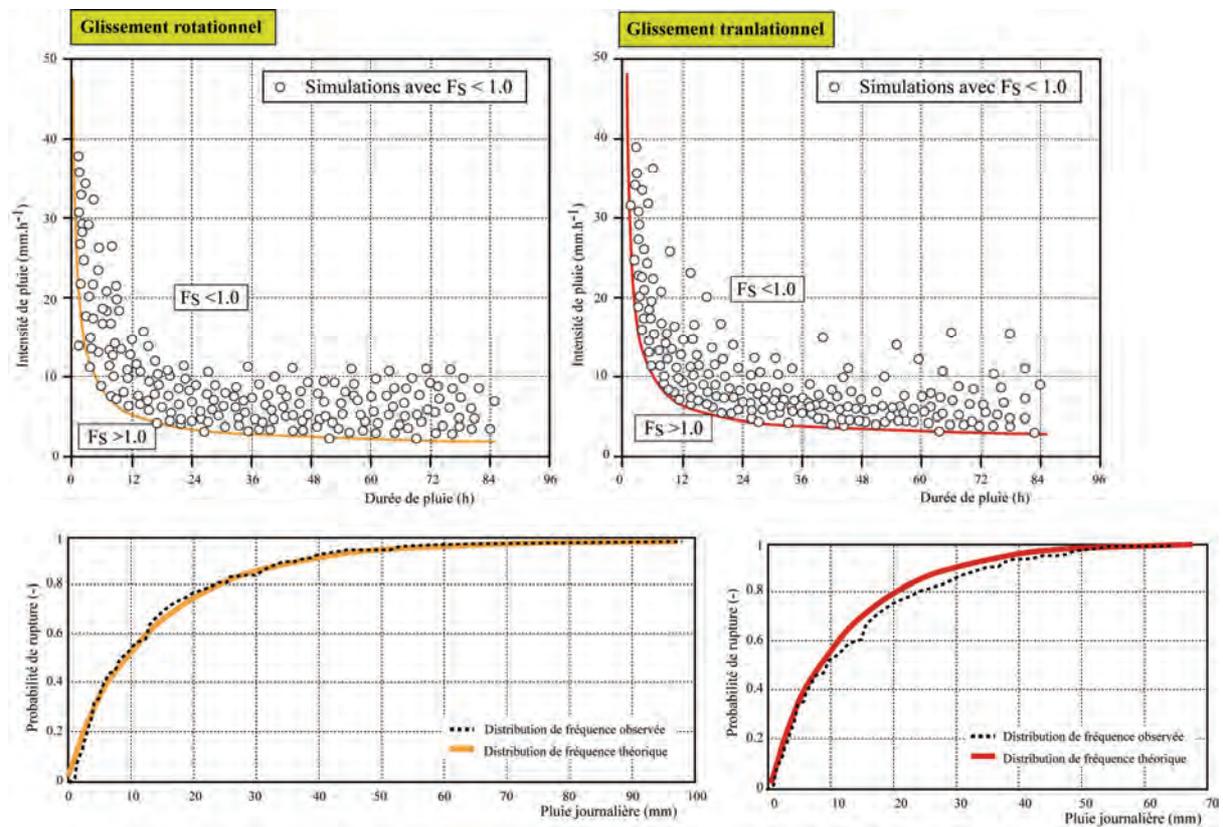


Fig. 8.17. Résultats des simulations de probabilité de rupture selon 200 combinaisons possibles.

La figure 8.17 détaille les résultats pour les deux types de mouvements. Seules les combinaisons de conditions aux limites qui ont abouti à un facteur de sécurité $F_s < 1.0$ sont représentées. Un minimum de 80% des mailles de calcul de la surface des 'mouvements de versant' avec un $F_s < 1.0$ est nécessaire pour pouvoir 'classer' le versant comme instable. Les seuils de déclenchement sont identiques pour glissements translationnels et rotationnels.

La figure 8.18 montre que les seuils identifiés de pluie, pour les simulations pour le bassin de Barcelonnette, sont dans la gamme des seuils empiriques observés par Caine (1980), Cancelli et Nova (1985), Wiczorek (1987), Larsen et Simon (1993) pour des environnements climatiques similaires.

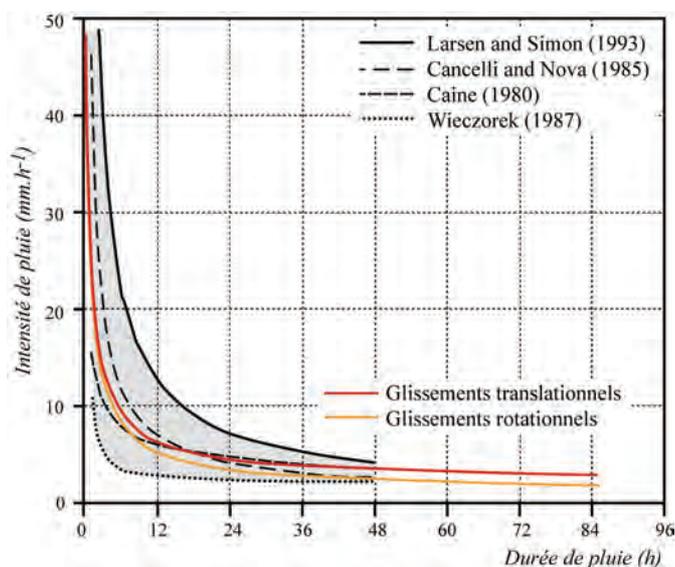


Fig. 8.18. Comparaison des seuils critiques de précipitations identifiés pour l'analyse de l'aléa dans le bassin de Barcelonnette et d'autres sites aux caractéristiques climatiques semblables.

Le modèle hydrologique couplé à un modèle de stabilité de pente et les simulations de Monte-Carlo permettent ainsi d'analyser la composante temporelle de rupture des versants, et ce de manière stochastique. Des seuils de précipitations critiques pour le déclenchement de 'mouvements de versant' sont proposés. Toutefois, la méthodologie comporte deux limites : (i) une simplification de la géométrie des phénomènes, (ii) une simplification des processus de rupture et (iii) la non prise en compte des contraintes de déformations. Malgré ces limitations, le caractère stochastique des simulations permet de réduire considérablement les incertitudes et d'identifier certaines tendances.

3.4. Régionalisation des probabilités de rupture - Carte d'aléa à l'échelle du bassin versant

La cartographie de l'aléa à l'échelle du bassin intègre uniquement la composante temporelle sous la forme de probabilité de rupture à partir des seuils de précipitations critique simulées. L'intensité des phénomènes n'est pas prise en compte dans l'analyse.

3.4.1. Probabilités de rupture par type de mouvements de versant : application sur l'ensemble du bassin

Pour obtenir la carte d'aléa, il a été décidé de se focaliser essentiellement sur les secteurs de susceptibilité forte modélisée pour chaque type de phénomène retenu. Comme l'épaisseur des formations superficielles est le paramètre le plus influent, trois classes d'épaisseur de formations superficielles ont été définies à partir de la carte des épaisseurs du versant *U_{bac}* (Chap. 4, § 3.1.3). Le croisement des deux cartes (susceptibilité forte et classes d'épaisseur) permet d'obtenir des unités géomorphologiques pour chaque type de phénomène pour lesquelles les probabilités de rupture sont appliquées suivant la matrice de croisement de la figure 8.19.

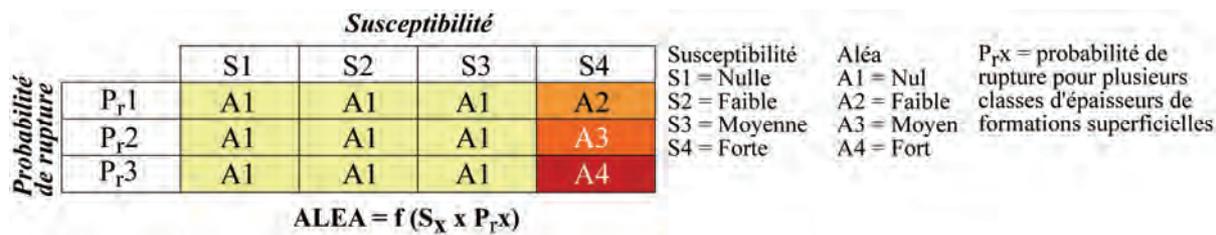
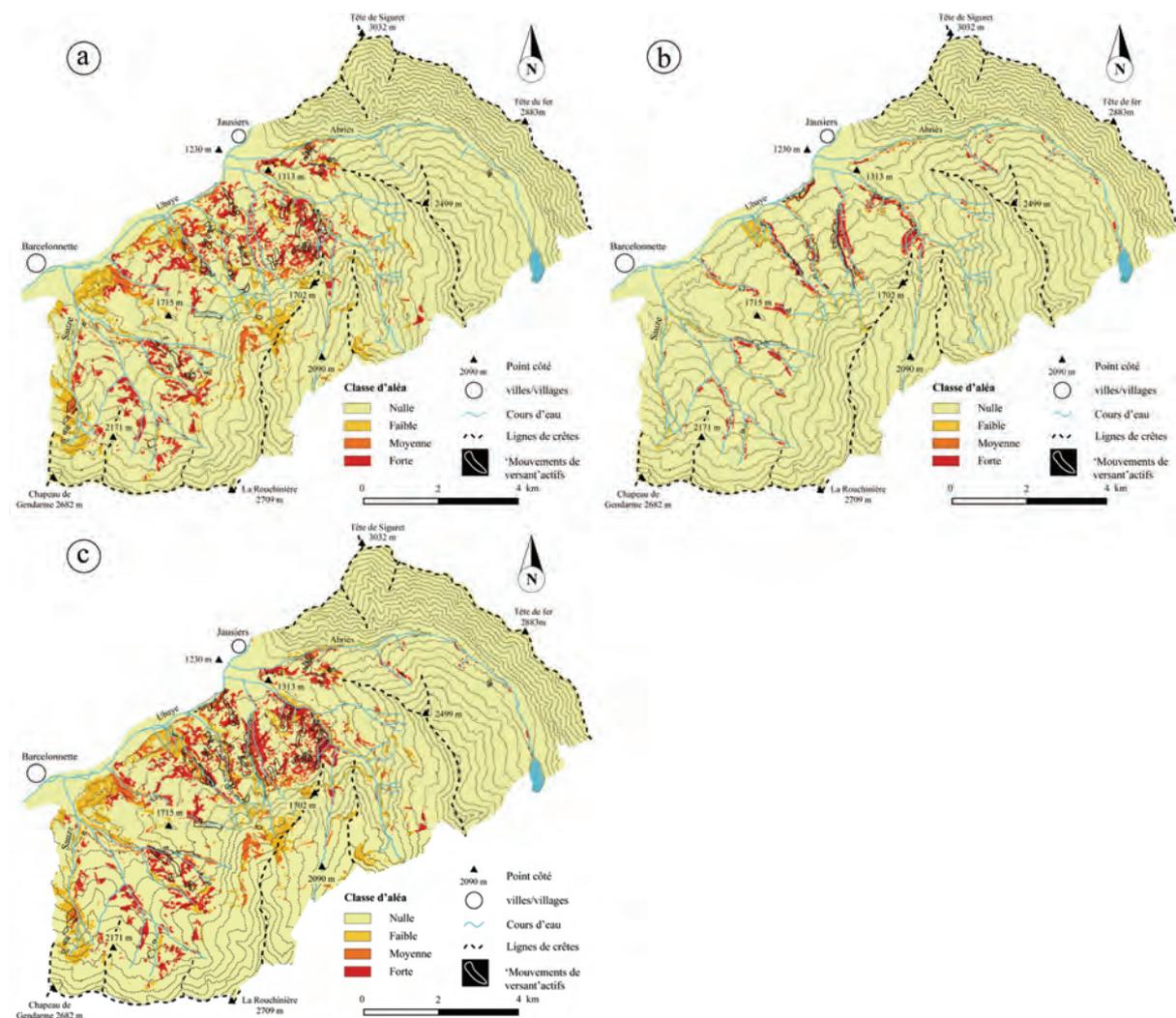


Fig. 8.19. Matrice de croisement pour la définition des classes d'aléa.

3.4.2. Résultats

La figure 8.20 présente trois cartes obtenues pour chaque type de mouvement de versant par croisement entre les unités géomorphologiques et les secteurs de susceptibilité forte ; la troisième carte associe les deux précédentes en privilégiant les classes d'aléa fort. Les classes d'aléa sont estimées pour 3 probabilités de rupture différentes illustrées dans la figure 8.19.

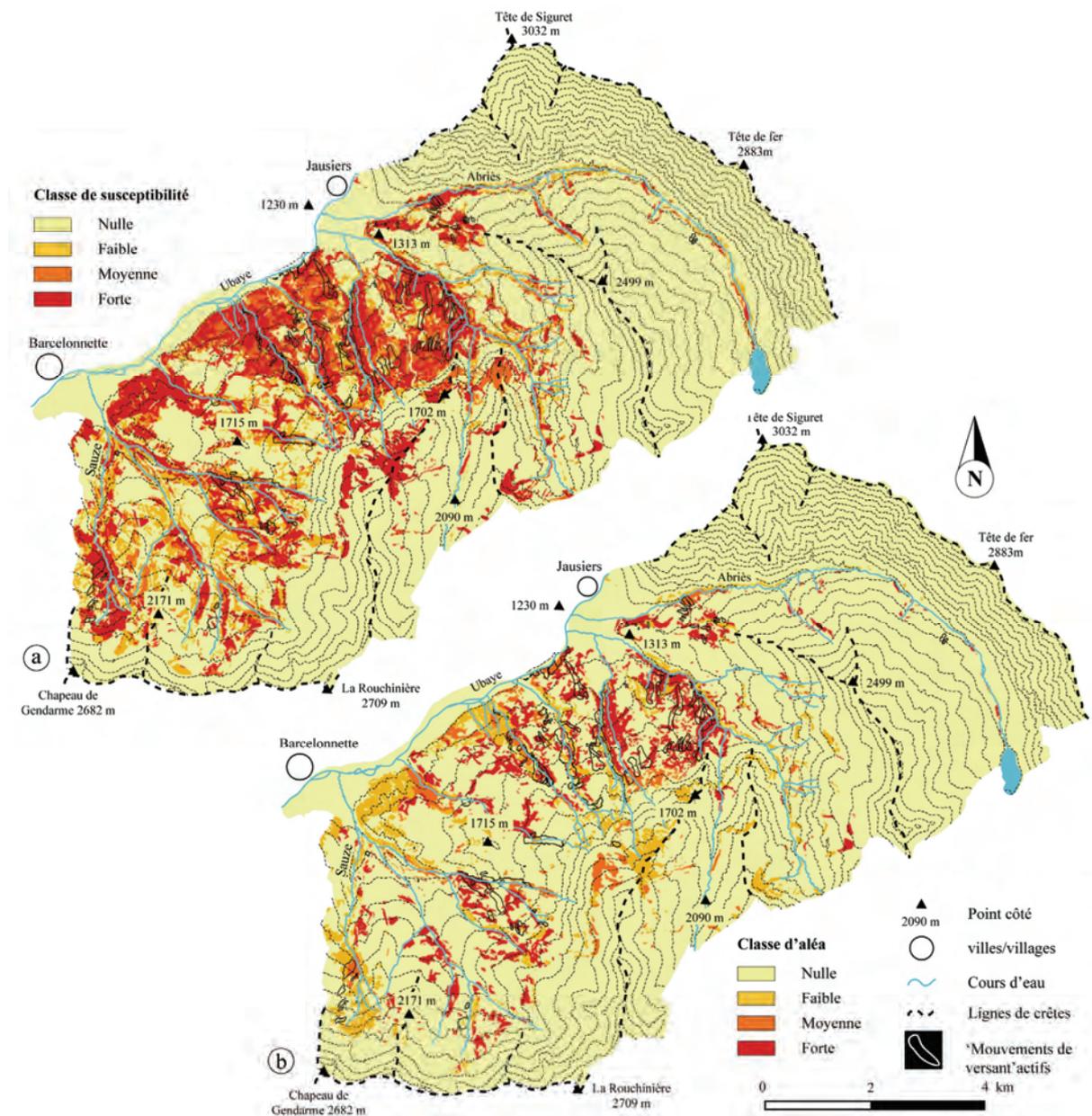


a. Carte d'aléa simulée pour les glissements translationnels complexes. b. Carte d'aléa simulée pour les glissements rotationnels de berge. d. Carte d'aléa simulée unifiée.

Fig. 8.20. Cartes d'aléa (probabilité de rupture) simulées pour le versant Ubac.

3.5. Conclusion

La figure 8.21 compare la carte d'aléa simulée et la carte de susceptibilité simulée par *Théorie de l'évidence* pour les deux types de 'mouvements de versant'. La carte d'aléa simulée (Fig.8.20.b) permet de bien discerner les secteurs 'probablement toujours instables' (aléa fort), 'probablement conditionnellement instable' (aléa moyen) ou 'probablement toujours stables' (aléa faible).



a. Carte de susceptibilité simulée par la Théorie de l'évidence. Les surfaces sont simulées pour deux types de 'mouvements de versant'. b. Carte d'aléa obtenue en combinant carte de susceptibilité et approche probabiliste de l'aléa. Les deux cartes réunissent deux cartes simulées pour les glissements translationnels complexes et les glissements rotationnels de berge.

Fig. 8.21. Carte de susceptibilité simulée par la Théorie de l'évidence et carte d'aléa obtenue en combinant carte de susceptibilité et approche probabiliste de l'aléa.

Ainsi, une telle approche permet de spatialiser, à l'échelle d'un bassin de risque ou d'un bassin versant large, les probabilités de rupture. Elle permet sur la base d'une carte de

susceptibilité, simulée par approche probabiliste, d'isoler des secteurs à forte probabilité de rupture. **Dans le cadre d'une cartographie réglementaire, ce type de document permet de mieux cibler les secteurs véritablement favorables à l'instabilité.** Toutefois, **la méthodologie proposée doit encore être affinée par une meilleure connaissance des mécanismes de rupture, des observations de variables de déclenchement sur des sites caractéristiques.**

4. CONCLUSION DU CHAPITRE 8

Les différentes simulations réalisées par les deux approches de cartographie de l'aléa grâce à un modèle à base physique sont exploratoires. L'objectif était de montrer qu'il est possible de simuler des probabilités de rupture pour des seuils critiques de précipitations en combinant modèles à base physique et simulation de type Monte-Carlo.

Pour cela deux approches ont été appliquées. La première approche a été appliquée sur un site (site de *Bois Noir*) dont la géomorphologie est bien connue. Les résultats sont encourageants, montrant une bonne adéquation entre les simulations à forte probabilité de rupture ($FS < 1.2$) et les événements recensés par photo-interprétation et/ou observations de terrain. Cependant, la méthodologie est limitée par un manque d'information précise sur les épaisseurs de formations superficielles ailleurs dans le bassin de *Barcelonnette*. **L'acquisition d'une information plus détaillée des épaisseurs au sein du bassin devrait permettre d'envisager une tentative à une plus grande échelle.**

La deuxième approche est fondée sur des simulations de rupture par des fonctions de densités de probabilités, une approche de Monte-Carlo et la simulation numérique des probabilités de rupture.

Par rapport aux tentatives de production de cartes d'aléa par modèles probabilistes récemment proposées (Zêzere *et al.*, 2004 ; Guzzetti *et al.*, 2005 ; Remondo *et al.*, 2005), **les approches utilisées dans cette recherche tiennent compte véritablement des processus physiques des versants.** Ces cartes apparaissent alors plus réalistes, produisant des surfaces potentiellement instables.

CONCLUSION GENERALE

Ce projet de recherche a consisté en l'étude de la susceptibilité et de l'aléa 'mouvements de versant' à l'échelle du 1/10 000^{ème} à partir d'observations morphologiques, d'une cartographie morphodynamique détaillée, d'une cartographie 'expert' et de simulations numériques par modèle d'analyse spatiale sous SIG. Cette recherche a été menée principalement dans le bassin de Barcelonnette, et dans un site secondaire de transposition, le bassin versant du *Moulin*. Le terme 'mouvements de versant' regroupe dans ce travail des glissements de terrain plus ou moins superficiels qui se déclenchent généralement à l'interface du substratum et des formations superficielles (moraines ou colluvions).

Dans le cadre de la cartographie PPR au 1/10 000^{ème}, les cartes d'aléa de type 'expert' sont issues d'une analyse géomorphologique et de règles subjectives fondées sur l'expérience du scientifique en charge du zonage. Par une analyse simple et par analogie, avec des environnements similaires (ayant connu ou non des 'mouvements de versant'), l'expert caractérise les secteurs en zone d'aléa fort, moyen, faible ou nul. Si la méthode est simple et rapide à mettre en place, sa reproductibilité reste difficile notamment (i) en raison de la nature discontinue, dans le temps et l'espace, des phénomènes (manque de données historiques fiables et complètes, difficultés à identifier les causes des phénomènes) et, (ii) en raison des erreurs d'appréciation de l'expert.

Ainsi, dans la majorité des cas, les cartes proposées ne sont que des cartes de susceptibilité. Pour réduire la subjectivité et s'affranchir de l'opinion de l'expert, des méthodologies d'analyse spatiale, fondées sur des *principes probabilistes* et les *Systèmes d'Information Géographique*, ont été développées. Cependant, ces méthodologies d'analyse éprouvées à méso-échelle (1/50 000^{ème} - 1/25 000^{ème}) étaient peu utilisées aux échelles 'larges', soit au 1/10 000^{ème}. Il subsistait ainsi un vaste champ de recherche qui nous apparaissait très intéressant à explorer. Ainsi, se voulant une alternative aux méthodes expertes dites subjectives, il fallait tester et comparer des modèles d'analyse spatiale à cette même échelle de travail du 1/10 000^{ème}.

Ce projet de recherche s'insérait donc dans cette logique de comparaison de différentes méthodologies de cartographie de la susceptibilité ; mais il fallait aussi aller plus loin en tentant (i) **une transposition** vers des sites aux caractéristiques environnementales semblables et (ii) **un passage vers une véritable cartographie de l'aléa** tenant compte des différents processus (les *mouvements de versant*).

Le travail s'est appuyé sur différents projets de recherche, avec principalement, le projet de recherche européen *ALARM* (*Assessment of Landslides Risk and Mitigation in mountain areas*) pour la cartographie de la susceptibilité par différents modèles d'analyse spatiale sous SIG, et secondairement, avec le programme national de recherche ACI – FNS 'Aléas et Changements Globaux', *GACH2C* (*Glissement Alpains à Contrôle Hydrologique et Changement Climatique : développement méthodologique, simulations numériques et scénarios d'événements*) pour le passage vers

l'aléa. Ces projets de recherche ont favorisé plusieurs collaborations notamment, celle avec l'équipe de l'*Istituto per la Dinamica dei Processi Ambientali* de l'*Université de Milan Bicocca*, qui avait les compétences nécessaires pour la mise en œuvre des modèles d'analyse spatiale par SIG ou encore le *Laboratoire Image et Ville* de l'*Université Louis Pasteur de Strasbourg* qui a apporté, en particulier, son expertise dans le domaine du traitement des images aériennes et spatiales.

Notre démarche a donc été conduite à l'échelle du 1/10 000^{ème} ce qui était, et reste encore, assez rare pour une cartographie de la susceptibilité par SIG. Cela a conduit à la construction de bases de données spécifiques, à la fois pour les phénomènes et pour les facteurs environnementaux à prendre en compte (facteurs de prédisposition). Construire des bases de données détaillées à cette échelle de travail et sur un site complexe nécessitait une connaissance précise du terrain d'étude ; en cela la cartographie morphodynamique a été une base indispensable à notre recherche. En outre, cette démarche, conduisant à s'appuyer pour chaque étape de calage et de validation des modèles d'analyse spatiale sur cette cartographie, a permis de tenir compte véritablement de la connaissance du terrain, pour les données d'entrée, mais également pour les 'retours terrain' en phase d'analyse des résultats obtenus.

La **première partie** consiste en un état de l'art des méthodologies de cartographie de la susceptibilité et de l'aléa pour différentes échelles de travail. Les bases de données adaptées et indispensables pour chaque approche et pour chaque échelle sont abordées.

Ceci permet de cibler les approches de cartographie à utiliser. Pour l'analyse de la susceptibilité, trois approches sont donc choisies pour leur facilité de mise en place et pour leur résultats : une approche semi-quantitative par *Logiques floues* et deux approches probabilistes, une approche bivariée basée sur le théorème de Bayes (*Théorie de l'évidence*) et une approche multivariée fondée sur les *Régressions logistiques*. Pour le passage à l'aléa, le choix porte sur un modèle à base physique (*STARWARS*) testé et éprouvé pour d'autres instabilités de versant dans le bassin de *Barcelonnette*. Pour tester ces approches, les données d'entrées sont obtenues grâce à une cartographie morphodynamique levée à l'échelle du 1/10 000^{ème}. Cette carte sert de base à notre recherche et permet de comparer et de discuter les différents résultats obtenus.

La **deuxième partie** présente les différentes variables : **variables à modéliser (i.e. les 'mouvements de versant')**, **variables prédictives (i.e. les facteurs de prédisposition)**, **variables disponibles ou produites spécifiquement**. Les différentes 'mouvements de versant' sont successivement décrits puis analysés pour les différents versants du bassin de *Barcelonnette*. Les classifications de l'activité et la typologie sont testées par des analyses discriminantes pas à pas. Ces analyses confirment le choix de quatre classes d'activité mais montrent aussi les limites des mesures et des indices morphométriques pour réaliser une typologie des phénomènes. Au final, 220 'mouvements de versant' sont retenus pour les différentes analyses spatiales.

Les variables prédictives utilisées sont soit disponibles (MNT, occupation du sol) soit construites spécifiquement. L'objectif est de savoir si les variables disponibles sont adaptées à notre recherche. Le croisement successif de plusieurs variables à modéliser (totalité des phénomènes, par types par zone d'ablation) et l'analyse des distributions montrent que seules les zones d'ablation et les variables construites spécifiquement sont plus à même de différencier des caractéristiques propres à chaque type de 'mouvements de versant'. Un jeu de variables prédictives de base est alors défini pour chaque type de 'mouvements de versant'.

Dans la troisième partie, plusieurs méthodes de cartographie sont testées : la méthode 'expert', une méthode semi-quantitative fondée sur les *Logiques floues* et deux méthodes probabilistes (*Théorie de l'évidence* et *Régressions logistiques*). Une tentative de transposition puis de passage à l'aléa est effectuée grâce à un modèle à base physique (*STARWARS*).

La carte 'expert' est réalisée suivant la méthode officielle française (cartographie PPR), en ce sens, c'est une véritable carte d'aléa qui a été levée. Ce document sert de base pour valider les cartes obtenues par les modèles d'analyse spatiale.

Les **procédures de calage/validation pour les cartographies de la susceptibilité** sur un site de calage représentatif permettent de déterminer le meilleur jeu de variables prédictives par plusieurs itérations avec les variables à modéliser. D'une manière générale, **il faut une néo-variable prédictive (NVP) combinant plusieurs variables prédictives mais ayant aussi un sens 'géomorphologique' pour augmenter la performance de chaque approche**. Les différentes simulations de la susceptibilité montrent que :

- (i) **Pour les logiques floues**, la stratégie spécifique est fondée sur une succession d'hypothèses avec un moteur d'inférence en deux temps : dans un premier temps, la NVP est définie ; dans un second temps, le meilleur opérateur entre variables est déterminé. Les combinaisons se rapprochant le plus de notre vision '*expert*' sont obtenues avec l'opérateur γ ($\gamma = 0.975$) ;
- (ii) **Pour les approches probabilistes, la stratégie spécifique de calage est fondée sur la Théorie de l'évidence qui demeure la plus sensible aux différentes variables introduites**. Cette stratégie, basée sur le nombre de cellules représentatives à introduire et l'introduction d'une NVP, montre que 200 cellules est un nombre suffisant pour obtenir une indépendance conditionnelle des variables et des résultats fiables d'un point de vue statistique. Pour un nombre inférieur de cellules, les résultats doivent être considérés avec prudence ; le test de confiance statistique (test de *Student T*) se révèle alors indispensable ;
- (iii) **Les Régressions logistiques sont peu adaptées à notre échelle de travail. En effet, le jeu de variables retenu pour chaque type de phénomène est introduit dans le modèle d'analyse spatial fondé sur les Régressions logistiques**. Les différents résultats indiquent que les cartes obtenues par la *Théorie de l'évidence* sont plus performantes : les différents phénomènes ainsi que les classes de susceptibilité de la carte '*expert*' sont mieux identifiés. Le modèle d'analyse spatial par *Régressions logistiques* n'est pas adapté lorsque le nombre de cellules est inférieur à 200, le modèle devenant trop sensible et trop instable ;
- (iv) **Entre les résultats obtenus par Logiques floues et par la Théorie de l'évidence, les cartes issues du modèle spatial probabiliste sont celles qui se rapprochent le plus de la carte '*expert*'**. Cependant, pour les deux approches, les classes de susceptibilité faible et moyenne sont mal reconnues. Ceci est en partie dû aux stratégies de modélisation optimisée pour reconnaître la classe de susceptibilité forte.

La transposition des meilleurs résultats sur le versant *Adret* et sur un site secondaire indique que le site de calage doit correspondre rigoureusement aux caractéristiques des sites de transposition. En cas de différences, les résultats de la transposition sont moyens ou mauvais comme c'est le cas pour le versant *Adret*. En revanche pour le site secondaire du bassin versant du *Moulin*, les résultats sont bons. Ces résultats encourageants montrent qu'il faut encore (i) acquérir certaines données notamment sur la structure lithologique, (ii) tenter des transpositions sur d'autres sites pour arriver à des courbes de prédiction '*modèle*' par type de phénomène.

Le passage à l'aléa s'effectue par deux approches : la première à l'échelle locale, la seconde à l'échelle du bassin de risque.

- (i) **A l'échelle locale**, la carte obtenue représente une estimation de l'aléa exprimée en tant que probabilité de rupture maximum pour 42 ans. Ainsi, la surface évaluée en aléa fort est faible, mais tient compte véritablement des processus physique en jeu ;
- (ii) **A l'échelle du bassin de risque**, la stratégie spécifique pour trouver des seuils de déclenchement est appliquée sur la base de fonction de densités de probabilités et les cartes de susceptibilité probabiliste. Les seuils sont définis pour deux types de 'mouvements de versant' se déclenchant fréquemment (*i.e.* glissements translationnels et glissements rotationnels). Une fois définies les classes d'aléa sont déterminées selon une matrice de croisement avec les classes de susceptibilité. Les

cartes obtenues apparaissent réduire les surfaces en aléa fort par rapport à la carte 'expert'. Cependant, les processus physiques étant réellement pris en compte, ce type de carte peut être une alternative aux cartes de susceptibilité simulée.

Ce travail sur l'analyse de la susceptibilité et de l'aléa '*mouvement de versant*' est une modeste contribution aux différentes recherches sur les méthodes cartographiques semi-automatiques et automatiques de l'aléa '*mouvements de versant*'. Cette recherche, par son **approche originale** basée (i) sur l'introduction de la géomorphologie dans des modèles spatiaux et (ii) sur une stratégie de calage/validation/transposition à l'échelle du 1/10 000^{ème}, rarement effectuée auparavant, **doit servir à rappeler que le géomorphologue reste au cœur du processus de cartographie**. Ceci est particulièrement vrai lorsqu'une forte incertitude entoure les phénomènes étudiés, comme c'est le cas pour les '*mouvements de versant*'. Toutefois, ces résultats sont exploratoires et nécessitent des améliorations notamment pour :

- (i) **Améliorer l'identification des toutes les classes de susceptibilité**. En effet, les trois modèles d'analyse spatiale ont tendance à sous estimer les classes de susceptibilité faible et moyenne. Les cartes obtenues sont alors binaires avec une bonne identification des classes de susceptibilité faible et forte ;
- (ii) **Simplifier le processus de calage des cartographies probabilistes** qui nécessitent encore une procédure fondée sur des statistiques multidimensionnelles ; procédure longue à mettre en œuvre ;
- (iii) **Simplifier la connexion entre les approches probabilistes de la susceptibilité et les approches à base physiques** tenant compte des processus physiques.

Ainsi malgré les nombreux résultats acquis durant cette thèse de doctorat, plusieurs aspects, méthodologiques ou de modélisation, restent à clarifier. Ils constituent autant de pistes et de perspectives de recherches, à poursuivre ou à engager, pour les prochaines années. Ces perspectives concernent en particulier :

- (i) **L'acquisition des épaisseurs de formations superficielles sur l'ensemble du bassin par méthode géophysique**, par exemple. Cette variable acquise permettrait par différentes stratégies de calage d'appliquer la première méthode de cartographie de l'aléa sur un bassin plus grand et de tenter une cartographie de l'aléa plus précise ;
- (ii) **La transposition des stratégies de cartographie de la susceptibilité sur d'autres sites**, afin de vérifier si les différentes étapes sont valables uniquement pour le bassin de Barcelonnette ou bien, s'il est possible d'obtenir des seuils et des courbes '*modèle*' pour des environnements alpins similaires ;
- (iii) **L'établissement de nouvelles hypothèses** tenant compte des classes de susceptibilité faible et moyenne afin d'affiner les cartes finales de susceptibilité ;
- (iv) **Le rapprochement des approches 'expert' et probabilistes** par le développement de méthodologies hybrides combinant par exemple *Logiques floues* et *Théorie de l'évidence* ;
- (v) **Le développement des approches multicritères** comme l'analyse par processus hiérarchique analytique tenant compte du raisonnement humain et de l'incertitude associée ;
- (vi) **Le paramétrage et le calage des méthodes probabilistes sur des unités géomorphologiques homogènes** (acquises de manière semi-automatique par exemple, à partir d'un MNT et de formations superficielles). Un tel calage permettrait probablement d'obtenir des cartes proches de celles réalisées sur des '*facettes homogènes*' par l'expert ;
- (vii) **L'intégration de l'intensité des phénomènes dans les modèles à base physique**. L'intensité caractéristique de chaque type de phénomènes pourrait être intégrée aux différentes cartes de susceptibilité par des **matrices de croisement spécifiques**.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ACI-FNS ECCO, 2003-2005 Ecosphère Continentale : Processus et Modélisation. 'Flux, inféroflux et érosion hydriques dans les marnes et formations associées : étude des processus naturels et de leurs interactions, modélisation et simulation (ORE Draix)'. Coordination : D. Richard (ETNA, Cemagref, Grenoble).
- Ackermann, F., 1999. Airborne laser scanning. Present status and future expectations. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 54, 64–67.
- Agterberg F.P., Bonham-Carter, G.F., Wright, D.F., 1990. *Statistical pattern integration for mineral exploration*. In Ga'al, G., Merriam, D.F., (Eds), Computer applications in resource estimation prediction and assessment of metals and petroleum. Oxford, UK: Pergamon Press, 1–12.
- Agterberg, F.P., Bonham-Carter, G.F., Cheng, Q., Wright, D.F., 1993. *Weights of evidence modelling and weighted logistic regression for mineral potential mapping*. In: Davis, J.C., Herzfeld, U.C. (Eds.), Computer in Geology, 25 years of Progress. Oxford University Press, Oxford, 13–32.
- Agterberg, F.P., Cheng, Q., 2002. Conditional independence test for weights of evidence modeling. *Natural Resources Research*, 11, 249–255.
- Aleotti, P., Chowdhury, R., 1999. Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 58, 21–44.
- Alexander, D.E., 1993. *Landslides as polycasual phenomena*. In: Nemeč, J., Nigg, J.M., Siccardi, F. (Eds), Prediction and perception of natural hazards: advances in natural and technological hazards research. Kluwer, Dordrecht, 93–99.
- Alexander, D.E., 2000. *Confronting catastrophe*. New York, Oxford University Press.
- Alexander, D.E., 2002. *Principles of emergency planning and management*. New York, Oxford University Press.
- Amadesi, E., Vianello, G., 1978. Nuova guida alla realizzazione di una carta della stabilità dei versanti. *Mem. Soc. Geol. It.*, 19, 53–60.
- Amiot, A., Nexon, C., 1995. *Inventaire des aléas dans le Bassin de Barcelonnette depuis 1850*. Mémoire de Maîtrise de Géographie Physique, Université Louis Pasteur, 173p.
- An, P., Moon, W. M., Rencz, A., 1991. Application of fuzzy set theory for integration of geological, geophysical and remote sensing data. *Canadian Journal of Exploration Geophysics*, 27, 1–11.
- Anbalagan, R., 1992, Terrain evaluation and zonation mapping in mountainous terrain. *Engineering Geology*, 32, 269–277.
- Anbalagan, R., Singh B. 1996. Landslide Hazard and Risk Assessment Mapping of Mountainous Terrains — A Case Study from Kumaun Himalaya, India. *Engineering Geology*, 43 (4), 237–246.
- Anderson, M.G., Lloyd, D.M., 1991. Using a combined slope hydrology–stability model to develop cut slope design charts. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 91(2), 705–718.
- Antoine, P. 1977. Réflexion sur la cartographie ZERMOS et bilan des expériences en cours. *Bulletin du BRGM*, III (1), pp. 9.20.
- Antoine, P., Giraud, A., 1992. Typologie des mouvements de versant dans un contexte opérationnel. *Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur*, 51, 57–62.
- Antoine, P., Giraud, A., Meunier, M., Van Asch, T.W.J., 1995. Geological and geotechnical properties of the 'Terres Noires' in the southeastern France: weathering, erosion, solid transport and instability. *Engineering Geology*, 40, 223–234.
- Ardizzone, F., Cardinali, M., Carrara, A., Guzzetti, F., Reichenbach, P., 2002. Uncertainty and errors in landslide mapping and landslide. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol. 2 (1-2), 3–14.
- Arnaud, F., 2007. *Influence de la végétation arborée sur l'activité des glissements de terrain superficiels. exemple du bassin de Barcelonnette, Alpes de Haute-Provence (France)*. Mémoire de Master II recherche 'Géosciences, Environnement et Risques' et d'ingénieur ENGEES, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 42 p.

- Artru, P., 1972. *Les Terres Noires du Bassin Rhodanien (Bajocien supérieur à Oxfordien moyen) : stratigraphie, sédimentologie, géochimie*. Thèse de Doctorat, Université de Lyon III, 182 p.
- Assier, A., 1993. *L'englacement des Alpes du sud franco-italiennes du petit âge de glace à la fin du 20^e siècle*. Thèse de Doctorat, Université Joseph Fourier, Grenoble, 487p.
- Atkinson, P.M., Massari, R., 1998. Generalised linear modelling of susceptibility to landsliding in the central Apennines, Italy. *Computers and Geosciences*, 24, 373–385.
- Augier, C., Flageollet, J.C. 1992. *Cartographie morphodynamique de la commune d'Enchastrayes, Ubaye, Alpes de Haute-Provence, et sa notice explicative*. Rapport interne, Université Louis Pasteur, 25 p. + une carte.
- Augier, C., Rebmann, T., 1990. *Etude et cartographie géomorphodynamiques des risques naturels affectant la commune d'Enchastrayes, Ubaye, Alpes de Haute-Provence*. Mémoire de Maîtrise de Géographie Physique, Université Louis Pasteur Strasbourg, 75 p.
- Awongo, M.-L., 1984. *Stratigraphie, sédimentologie et géochimie des Terres Noires du Jurassique moyen et supérieur de la Provence (Sud-Est de la France)*. Thèse de Doctorat, Université de Marseille III, 144 p.
- Ayalew, L., Yamagishi, H., 2005. The application of GIS-based logistic regression for susceptibility mapping in the Kakuda-Yahiko Mountains, Central Japan. *Geomorphology*, 65 (1–2), 15–31.
- Ayalew, L., Yamagishi, H., Ugawa, N., 2004. Landslide susceptibility mapping using GIS-based weighted linear combination, the case in Tsugawa area of Agano River, Niigata Prefecture, Japan. *Landslides*, 1, 73–81.
- B**aeza, C. and Corominas, J., 2001. Assessment of shallow landslide susceptibility by means of multivariate statistical techniques, *Earth Surface Processes and Landforms*, 26, 1251–1263.
- Baigorria Paz, G., A., 2005. *Climate interpolation for land resources and land use studies in mountainous regions*. PhD Thesis, University of Wageningen, 168p.
- Baillargeon, S., 2005. *Le krigeage : revue de la théorie et application à l'interpolation spatiale de données de précipitations*. Mémoire de Maîtrise es Sciences de la Faculté des Etudes Supérieures de l'Université de Laval, 137 p. <http://www.theses.ulaval.ca/2005/22636/22636.pdf>
- Baldelli, P., Aleotti, P., Polloni G., 1996. *Landsliding-susceptibility numerical mapping at the Messina Strait crossing site, Italy*. In Senneset, K. (Ed): Proceedings of the 7th International Symposium on Landslides, Trondheim, Norway, Balkema, Rotterdam, 1, 153–158
- Ballais, 1996. L'âge du modelé de roubines dans les Préalpes du Sud : l'exemple de la région de Digne. *Géomorphologie*, 4, 61-68.
- Ballandras, S., Nevière, C., 1991. Le détritisme torrentiel holocène intra-alpin : l'exemple du Bassin de Barcelonnette (Alpes du Sud). *Physio-Géo*, 22/23, 15-20.
- Barlow, J., Martin, Y., Franklin, S.E., 2003. Detecting translational landslide scars using segmentation of Landsat ETM+ and DEM data in the northern Cascade Mountains, British Columbia. *Canadian Journal of Remote Sensing*, Vol. 29 (4), 510–517.
- Barredo, J.I., A. Benavides, J. Hervàs, and C.J.V. Westen, 2000. Comparing heuristic landslide hazard assessment techniques using GIS in the Tirajana basin, Gran Canaria Island, Spain. *International Journal of Applied Earth observation and Geoinformation*, 2 (1), 9-23.
- Barsch, D. and Liedtke, H., 1980. Principles, scientific value and practical applicability of the geomorphological map of the Federal Republic of Germany at the scale of 1 : 25,000 (GMK 25) and 1 : 100,000 (GMK 100). *Zeitschrift für Geomorphologie Supplement Band*. 36, 296-313.
- Barsch, D., Fränzle, O., Leser, H., Liedtke, H., Stäblein, G., 1978. *Das GMK 25 Musterblatt für das Schwerpunktprogramm geomorphologische Detailkartierung in der Bundesrepublik Deutschland*. Berliner Geographische Abhandlungen, 30, 7-19.
- Baum, R. L.; Coe, J.A.; Godt, J.W.; Harp, E.L.; Reid, M.E.; Savage, W.Z.; Schulz, W.H.; Brien, D.L.; Chleborad, A.F.; McKenna, J.P. and Michael, J.A., 2005. Regional landslide-hazard assessment for Seattle, Washington, USA. *Landslides*, 2 (4), 266-279.
- Bayes, T., 1763. An Essay towards solving a Problem in the Doctrine of Chances. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 53 p.
- Beck, E., 2002. *Cartographie de la susceptibilité aux mouvements de terrain à l'aide de modèles. Application à un bassin de risques de la commune de Jausiers (Alpes-de-Haute-Provence, France)*. Mémoire de DEA 'Systèmes Spatiaux et Environnement', Université Louis Pasteur, Strasbourg I. 90 p.
- Beguierà, S., 2006. Validation and evaluation of predictive models in hazard assessment and risk management. *Natural Hazards*, 17, 315–329.
- Beguierà, S., Lorente, A., 1999. *Landslide hazard mapping by multivariate statistics: a comparison of methods and case study in the Spanish Pyrenees*. The Damocles Project Work, Contract No. EVG1-CT 1999-00007. Technical report. 20 p.

- Bell, R., Glade, T., 2004. Quantitative Risk Analysis for landslides-Examples from BÍldudalur, NW Iceland. *Natural Hazards and Earth System Science*, 4 (1), 117-131.
- Benayoun, R., Laritchev, O., de Mongolfier, J., Tegny, J., 1971. Linear programming with multiple objective functions: STEP method (STEM). *Mathematical Program*, 1 (3), 366-375.
- Benzecri, J.P., 1973. *L'analyse des données*. Tome 2 : L'analyse des correspondances. Dunod.
- Bergeri, I., Michel, R., Boutin, J.-P., 2002. Pour tout savoir ou presque sur le coefficient de Kappa. *Revue de Médecine Tropicale*, Vol.2 (6), 634-636.
- Bertolini, G., Guida, M., Pizziolo, M., 2005. Landslides in Emilia-Romagna region (Italy): strategies for hazard assessment and risk. *Landslides*, 2-4, 302-312.
- Bertolini, G., Pellegrini, M., 2001. The landslides of the Emilia Apennines (northern Italy) with reference to those which resumed activity in the 1994-1999 period and required Civil Protection interventions. *Quaderni di Geologia Applicata* 8, Pitagora (Ed), Bologna, Italy.
- Bertolini, G., Pellegrini, M., Tosatti, G., 2001. (Eds) Le frane della regione Emilia-Romagna, oggetto di interventi di protezione civile nel periodo 1994-1999. *Quaderni Geologia Applicata* 8, Vol.1 (215 pp.), Vol.2 (213 pp.), Pitagora Ed., Bologna.
- Berz, G., 1992. Losses in the range of US\$ 50 billion and 50,000 people killed. Munich'Re list of major natural disasters in 1990. *Natural Hazards*, 5 (1), 95-102.
- Besson, L., 1996. *Les Risques naturels en montagne. Traitement, prévention, surveillance*. Artès-Publialp, Grenoble, 438 p.
- Beven, K.J., Kirkby, M J., 1979. A physically based variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological Science Bulletin*, 24(1), 43-69.
- Binhagi E., Luzi, L., Madella, P., Pergalani, F., Rampini, A., 1998. Slope instability zonation: a comparison between certainty factor and fuzzy Dempster-Shafer approaches. *Natural Hazards*, 17, 77-97.
- Bishop, M., 1995. *Neural networks for pattern recognition*. Clarendon Press, 482 p.
- Blanchard, R., 1950. *Les grandes Alpes françaises du Sud*. Tome V : Les Alpes Occidentales. Arthaud, Grenoble, 512 p.
- Bonham-Carter, G.F., 1994. *Geographic Information System for Geoscientists: Modelling with GIS*. Pergamon Press, Oxford, 398 p.
- Bonham-Carter, G.F., Agterberg, F.P., Wright, D.F., 1989. *Weights of evidence modelling: a new approach to mapping mineral potential*. In: Agterberg, F.P., Bonham-Carter, G.F. (Eds.), *Statistical Applications in Earth Sciences*. Geological Survey of Canada, Ottawa, 171-183.
- Bonham-Carter, G.F., Agterberg, F.P., Wright, D.F., 1990. *Statistical pattern integration for mineral exploration*. In: Gaal, G., Merriam, D.F. (Eds.), *Computer Applications in Resource Estimation: Prediction and Assessment for Metals and Petroleum*. Pergamon Press, Oxford, 1-21.
- Bonnard, Ch., Forlati, F., Scavia, C., 2004. *Identification and mitigation of large landslide risks in Europe: advances in risk assessment*. In Bonnard Ch., Forlati F., Scavia C (Eds), IMIRILAND Project, Balkema, Rotterdam, 317 p.
- Bonnet-Staub, I., 1998. *Mécanismes d'initiation et facteurs déclenchants des laves torrentielles dans les Alpes françaises - Contribution à la maîtrise du risque*. Thèse de Doctorat de l'Ecole des Mines de Paris, 230p.
- Borga, M., Dalla Fontana G., Cazorzi, F., 2002a. Analysis of topographic and climatologic control on rainfall-triggered shallow landsliding using a quasi-dynamic wetness index. *Journal of Hydrology*, 268, 56-71.
- Borga, M., Dalla Fontana G., Gregoretti, C., Marchi, L., 2002b. Assessment of shallow landsliding by using a physically based model of hillslope stability. *Hydrological Processes*, 16 (14), 2833-2851.
- Borgefors, G., 1986. Distance transformations in digital images. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 34 (3), 344-371.
- Borja-Baeza, R.C., Esteban-Chávez, O., Marcos-López, J., Peña-Garnica, R. J., Alcántara-Ayala, I., 2006. Slope instability on pyroclastic deposits: Landslide distribution and risk mapping in Zacapoaxtla, Sierra Norte de Puebla, Mexico. *Journal of Mountain Science*, 3-1, 1-19.
- Bossu, G., 1995. *Cartographie morphodynamique de la vallée de l'Abriès (Commune de Jausiers, Alpes-de-Haute-Provence)*. Mémoire de Maîtrise 'Systèmes Spatiaux et Environnement', Université Louis Pasteur, Strasbourg, 72 p.
- Bossu, G., 1996. *Evaluation de la vulnérabilité aux laves torrentielles. Application au torrent du Sauze (Commune d'Enchastrayes, Alpes-de-Haute-Provence)*. Mémoire de DEA 'Systèmes Spatiaux et Environnement', Université Louis Pasteur, Strasbourg, 69 p.
- Brabb, E.E., 1984. *Innovative approaches to landslide hazard mapping*. Proceedings of Fourth International Symposium on Landslides, Toronto, p. 307-324.
- Bravard, J.P., Vérot-Bourrély, A., Franc, O., Aralud, C., 1997. Paléodynamique du site fluvial de Lyon depuis le Tardiglaciaire. *Documents d'Archéologie en Rhône-Alpes n° 15, Dynamique du paysage*, Lyon, 177-201.

- Brenning, A., 2005. Spatial prediction models for landslide hazards: review, comparison and evaluation. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 5 (6), 853-862.
- BRGM, 1974. Carte et notice géologique de Barcelonnette au 1 : 50 000^{ème}, XXXV-39. *Bureau des Recherches Géologiques et Minières*, Orléans.
- Brimicombe, A.J., 2003. *GIS, environmental modelling and engineering*, Taylor & Francis, London, 312 p.
- Bromhead, E.N., 1992. *The stability of slopes*. 2nd Edition, Chapman & Hall, London, 304 p.
- Bromhead, E.N., 1996. *Slope stability modeling: an overview*. In Dikau, R, Brunnsden, D., Schrott, L., Ibsen M.-L. (Eds), *Landslide Recognition: identification, movement and causes*, Wiley, Chichester, 231-235.
- Brooks, S.M., Richards, K.S., Anderson, M.G., 1993. *Shallow Failure Mechanisms during the Holocene: Utilisation of a Coupled Slope Hydrology-Slope Stability Model*. In Thomas, D.S.G., and Allison, R.J., (Eds.), *Landscape Sensitivity*, John Wiley & Sons, 149-175.
- Buckley, S.J., Wills, J.P., Mitchell, H.L., 2004. *Improving The Accuracy of Photogrammetric Absolute Orientation Using Surface Matching*. ISPRS 2004, International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 20th Edition, Istanbul, Turkey. 12-23 July 2004. 6p.
- Bulut, F., Boynukalin S. Tarhan, F., Ataoglu, E., 2000. Reliability of landslide isopleth maps. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 58-2, 95-98.
- Buma, J. Van Asch. T.W.H., 1996. *Slide Rotational*. In Dikau, R., Brunnsden, D., Schrott L., Ibsen, M., (Eds.), *Landslide Recognition*. Report No. 1 of the European Commission Environment Programme Contract N° EV5V-CT94-0454, 43-61.
- Buma, J., Dehn, M., 1998. A method for predicting the impact of climate change on slope stability. *Environmental Geology*, 35 (2-3), 190-196.
- Bunza, G., Jürging, P., Löhmannsröben, R., Schauer, T., Ziegler, R., 1996. Abfluss- und Abtragsprozesse in Wildbacheinzugsgebieten - Grundlagen zum integralen Wildbachschutz. Schriftenreihe des Bayerischen Landesamtes für Wasserwirtschaft, Heft 27, 25-36.
- Burrough, P.A., Mc Donnel, 1996. *Principles of Geographical Information Systems*, Oxford University Press, 333 p.
- Burrough, P.A., Mc Millan R.A., Van Deursen, W., 1992. Fuzzy classification methods for determining land suitability from soil profile observations and topography. *Journal of Soil Science*, 43, 193-210
- BUWAL, 1999. BUNDESAMT FÜR UMWELT WALD UND LANDSCHAFT, *Risikoanalyse bei graviten naturgefahren, Methode. Umwelt-Materialien NR 107/L*, BUWAL, Berne, 115 p.
- Caine, N., 1980. The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows. *Geografiska Annaler*, 62A, 23-27.
- Cancelli, A., Nova, R., 1985. *Landslides in soil debris cover triggered by rainstorms in Valtellina (central Alps, Italy)*. In Sassa, K., (Ed.), *Proceedings of 4th International Conference on Landslides*, Tokyo, The Japanese Landslide Society, Tokyo, 267-272.
- Canuti, P., Casagli, N., Farina, P., Leva, D., Tarchi, D., Nico, G., 2003. *Some examples of slope movements monitored by ground-based SAR interferometry*. In: Picarelli L. (Ed.) *Proceedings IC-FSM2003 International Conference on Fast Slope Movements: Prediction and Prevention for Risk Mitigation: 71-77*. Sorrento (Italy), May, 2003, 11-13.
- Canuti, P., Garzonio, C.A., Rodolfi, G., 1979. Dinamica morfologica di un ambiente soggetto a fenomeni franosi e ad intensa attività agricola. Area rappresentativa di Montespertoli, Firenze. *Annali Istituto Sperimentale Studio e Difesa del Suolo*, Firenze, Vol. 10, 81-102.
- Cardinali, M., Reichenbach, P., Guzzetti, F., Ardizzone, F., Antonini, G., Galli, M., Cacciano, M., Castellani, M. and Salvati, P., 2002. A geomorphological approach to the estimation of landslide hazards and risks in Umbria, Central Italy. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2 (1/2), 57-72.
- Caris, J.P.T., Van Asch, T.W.J., 1991. Geophysical, geotechnical and hydrological investigations of a small landslide in the French Alps. *Engineering Geology*, 31, 249-276.
- Carranza, E.J.M., Hale, M., 2001. Geologically constrained fuzzy mapping of gold mineralization potential, Baguio district, Philippines. *Natural Resources Research*, 10-2, 125-136.
- Carrara, A., 1983. Multivariate models for landslide hazard evaluation. *Mathematical Geology*, 15, 403-426.
- Carrara, A., 1988. *Drainage and divide networks derived from high-fidelity digital terrain models*. In: Chung C.F. et al., (Eds), *Quantitative analysis of mineral and energy resources*, NATO-ASI Series, D. Reidel Pub. Co., Dordrecht, 581-597
- Carrara, A., 1989. *Landslide hazard mapping by statistical methods: a "black-box" model approach*. *Proceedings of the International Workshop Natural Disasters in European-Mediterranean Countries*, Perugia, June 27-July 1, 1988, CNR-USNSF, 205-224.
- Carrara, A., 1992. *Landslide hazard assessment*. *Proceed. 1st Simp. Inter. Sensores Remotos y Sistema de Inform. Geogr. para el Studio de Riescos Natur.*, March 10-12, 1992, Bogota', 329-355.

- Carrara, A., 1993. *Potentials and pitfalls of GIS technology in assessing natural hazards*. In: Reichenbach P., Guzzetti F., and Carrara A., (Eds), Abstracts, Proceed. Int. Workshop GIS in Assess. Nat. Hazards, Perugia, Sept. 20-22, 1993, 128-137.
- Carrara, A., Bitelli, G, Carla' R. 1997. Comparison of techniques for generating digital terrain models from contour lines. *International Journal of Geographical Information Science*, 11, 451-473.
- Carrara, A., Cardinali, M., Detti, R., Guzzetti, G., Pasqui, V., Reichenbach, P., 1991. GIS techniques and statistical models in evaluating landslide hazard. *Earth Surface Processes and Landforms*, 16, 427-445.
- Carrara, A., Cardinali, M., Guzzetti, F., 1992. *Uncertainty in assessing landslide hazard and risk*. ITC Journal, 2, 172 - 183.
- Carrara, A., Cardinali, M., Guzzetti, F., Reichenbach, P., 1995. *GIS technology in mapping landslide hazard*. In Carrara, A., Guzzetti, F. (Eds.), *Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards*. Kluwer, Dordrecht, The Netherlands, 135-176.
- Carrara, A., Cardinali, M., Guzzetti, F., Reichenbach, P., 1999. *Use of GIS technology in the prediction and monitoring of landslide hazard*. In Carrara A. and Guzzetti F. (Eds), *Techniques and tools for assessing and mapping natural hazards*, Natural Hazards, 20, 117-135.
- Carrara, A., Cardinali, M., Detti, R., Guzzetti, F., Pasqui, V., Reichenbach P., 1990. *Geographical information systems and multivariate models in landslide hazard evaluation*. In: ALPS 90 Alpine Landslide Practical Seminar, Sixth International Conference and Field Workshop on Landslides, Aug 31-Sept 12, Milan, Italy. Università degli Studi de Milano, 17-28
- Carrara, A., Catalano, E., Sorriso-Valvo, M., Reali, C., Osso, I., 1978. Digital terrain analysis for land evaluation. *Geol. Appl. ed Idrogeol.* 13, 69-127.
- Carrara, A., Guzzetti, F., Cardinali, M., and Reichenbach, P., 1998. *Current limitations in modelling landslide hazard*. In Buccianti, A., Nardi, G., and Potenza, R (Eds), *Proceedings of IAMG'98*, Ischia, Italy, October 3-7, 1998, 195-203.
- Carrara, A., Pugliese Caratelli E., Merenda, L., 1977. Computer-based data bank and statistical analysis of slope instability phenomena. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 21 (2), 187-222.
- Casadei, M., Dietrich, W.E., Miller, N.L., 2003. Testing a model for predicting the timing and location of shallow landslide initiation in soil-mantled landscapes. *Earth Surface Processes and Landforms*, 28, 925-950.
- Catani, F., Casagli, N., Ermini, L., Righini, G., Menduini, G., 2005. Landslide hazard and risk mapping at catchment scale in the Arno River Basin. *Landslides*, 2(4), 329-343.
- Catenacci, V., 1992. *Il dissesto geologico e geoambientale in Italia dal dopoguerra al 1990*. Memorie Descrittive della Carta Geologica d'Italia, Servizio Geologico Nazionale, 47, 301 p.
- Chàcon, J., Irigaray, C., Fernández, T., El Hamdouni, R., 2006. Engineering geology maps: landslides and geographical information systems. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 65, 341-411.
- Chang, K. and Tsai, B., 1991. The effect of DEM resolution on slope and aspect mapping. *Cartography and Geographic Information Systems*, 18, pp. 69-77.
- Charlier, C., Decrop, G., 1997. *De l'expertise scientifique au risque négocié : le cas du risque en montagne*. Editions Cemagref, Antony, 101 p.
- Chau K.T., Chan, J.E., 2005. Regional bias of landslide data in generating susceptibility maps using logistic regression: Case of Hong Kong Island. *Landslides*, 2-4, 280-290.
- Chau, K.T., Sze, Y.L. Fung, W.Y., Wong, W.Y., Fong, E.L., Chan, L.C.P., 2004. Landslide hazard analysis for Hong Kong using landslide inventory and GIS. *Computers and Geosciences*, 30 (4), 429-443.
- Cheng, Q., Agterberg, F.P., 1999. Fuzzy weights of evidence method and its application in mineral potential mapping. *Natural Resources Research*, 8 (1), 27-35.
- Chi, K.-H., Park, N.-W., Chung, C. F., 2002. *Fuzzy logic integration for landslide hazard mapping using spatial data from Boeun, Korea*. ISPRS congress 2002, Commission IV, Geospatial Theory, Processing and Applications, Ottawa, 2002.
- Chodzco, J., Lecompte, M., Lhenaff, R., Marre, A., 1991. Vitesse de l'érosion dans les 'Roubines' des Baronnies (Drôme). *Physio-Géo*, 22-23, 21-28.
- Chondroyannis, P., 1992. *L'Ubaye, la forêt reconstruite. Le sentier de découverte du Riou-Bourdoux*. Editions de l'Office National des Forêts, Paris, 112 p.
- Chowdhury, R., Flentje, P. 1998. *A Landslide Database for Landslide Hazard Assessment*. Proceedings of the Second International Conference on Environmental Management (ICEM2), February 10-13th 1998, Wollongong, Australia, Elsevier (Oxford) Vol. 2, 1229-1237.
- Chung, C.F. Fabbri, A.G., 1993. Representation of geoscience data for information integration. *Journal of Non-Renewable Resources*, 2 (2), 122-139.
- Chung, C.F., Fabbri, A. G., 1998. *Three Bayesian prediction models for landslide hazard*. In Buccianti, A., Nardi, G., and Potenza, R (Eds), *Proceedings of IAMG'98*, Ischia, Italy, October 3-7, 1998, 204-211.

- Chung, C.F. Fabbri, A.G., 1999. Probabilistic prediction models for landslide hazard mapping. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 65, 1388–1399.
- Chung, C.F. Fabbri, A.G., 2001. *Prediction models for landslide hazard using fuzzy set approach*. In: Marchetti, M. and Rivas, V. (Eds), *Geomorphology and Environmental Impact Assessment*, Balkema, Rotterdam, p. 31–47.
- Chung, C.F., 2006. Likelihood ratio functions for modeling the conditional probability of occurrence of future landslides for risk assessment. *Computers and Geosciences*, 32, 1052–1068.
- Chung, C.F., Fabbri, A.G., 2003. Validation of spatial prediction models for landslide hazard mapping. *Natural Hazards*, 30, 451–472.
- Chung, C.F., Fabbri, A.G., Van Westen, C.J., 1995. *Multivariate regression analysis for landslide hazard zonation*. In Carrara, A. and Guzzetti, F., (Eds), *Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards*, Kluwer, Dordrecht, The Netherlands, pp. 107–133.
- Claessens, L., Knapen, A., Kitutu, M.G., Poesen, J., Deckers, J.A., 2007. Modelling landslide hazard, soil redistribution and sediment yield of landslides on the Ugandan footslopes of Mount Elgon. *Geomorphology*, 90 (2), 23-35.
- Claessens, L., Heuvelink, G.B.M., Schoorl, J.M., Veldkamp, A., 2005. DEM resolution effects on shallow landslide hazard and soil redistribution modelling. *Earth Surface Processes and Landforms*, 30, 461-477.
- Clark Labs, 1999-2006. <http://www.clarklabs.org/products/innovations.cfm>.
- Clerici A. 2002. *A GRASS GIS based shell script for landslide susceptibility zonation*. In Proceedings of the open source free software GIS-GRASS users conference. Trento, Italy 11–13 September 2002.
- Clerici, A., Perego, S., Tellini, C., Vescovi, P., 2002. A procedure for landslide susceptibility zonation by the conditional analysis method. *Geomorphology*, 48, 349–364.
- Clerici, A., Perego, S., Tellini, C., Vescovi, P., 2006. GIS-based automated procedure for landslide susceptibility mapping by the Conditional Analysis method: the Baganza valley case study (Italian Northern Apennines). *Environmental Geology*, 50 (7), 941-961.
- Cliquot, E., Gueremy, P., Lhenaff, P., Marre, A., 1993. Une carte de la dynamique des formes de terrain : la dépression de Ponchille (massif des Baronnies, Préalpes françaises du Sud). *Bulletin du Centre de géomorphologie de Caen*, 42, 231-240,
- Coe, J.A., Michael, J.A., Crovelli, R.A., Savage, W.Z., 2000. *Preliminary map showing landslide densities, mean recurrence intervals, and exceedance probabilities as determined from historic records, Seattle, Washington*. U.S. Geological Survey, Open-File Report 00-303, 25 p., 1 sheet.
- Coe, J.A., Michael, J.A., Crovelli, R.A., Savage, W.Z., Laprade, W.T., Nashem, W.D., 2004. Probabilistic assessment of precipitation-triggered landslides using historical records of landslide occurrence, Seattle, Washington. *Environmental and Engineering Geoscience*, 10 (2), 103–122.
- Cohen, J., 1960. A coefficient of agreement for nominal scales. *Educational and Psychological Measurement*, 20, 37–46.
- Colas, G., Locat, J., 1993. Glissement et coulée de La Valette dans les Alpes de Haute-Provence : présentation générale et modélisation de la coulée. *Bulletin de Liaison du Laboratoire des Ponts et Chaussées*, 187, 19-28.
- Colombo, A., Lanterni, L., Ramasco, M., Troisi, C., 2005. Systematic GIS-based landslide inventory as the first step for effective landslide hazard-management. *Landslides*, 2, 291–301.
- Corominas J., Moya J. 1999. Reconstructing recent landslide activity in relation to rainfall in the Llobregat River basin, Eastern Pyrenees, Spain. *Geomorphology*, 30, 73-93.
- Corominas, J., Amigó, J., Copons, R., Vilaplana, J.M., Altimir, J., 2003. Integrated Landslide Susceptibility Analysis and Hazard Assessment in the Principality of Andorra. *Natural Hazards*, 30 (3), 421–435.
- Corsini, A.; Farina, P.; Antonello, G; Barbieri, M.; Casagli, N.; Coren, F.; Guerri, L.; Ronchetti, F.; Sterzai, P.; Tarchi, D., 2006. Space-borne and ground-based SAR interferometry as tools for landslide hazard management in civil protection. *International Journal of Remote Sensing*, 27 (12), 2351-2369.
- CRIGE-PACA, 2004. *Occupation du sol 1999, version 3 - guide technique*. Mise à jour février 2004. 57 p. <http://www.crige-paca.org - Guide utilisation ocsol99 v1 1.pdf>
- Crovelli, R.A., 2000. *Probability models for estimation of number and costs of landslides*, U.S. Geological Survey, Open File Report 00-249.
- Crozier M.J., 1984. *Field assessment of slope instability*. In Brunnsden D., and Prior, D.B., (Eds), *Slope Instability*. Wiley, New York, 103-142.
- Crozier, M. J. 1996. *Magnitude/frequency issues in landslide hazard assessment*. In Mausbacher, R. and Schulte, A. (Eds) *Beitrag zur Physiogeographie*. Barsch Festschrift, Heidelberger Geographische Arbeiten. Heft 104, 221-236.
- Crozier, M.J., 1973. Techniques for the morphometric analysis of landslips. *Zeitschrift fur Geomorphologie*, 17, 78-101.
- Crozier, M.J., Glade, T., 2005. *Landslide hazard and risk: issues, concepts and approach*. In Glade, T., Anderson, M., Crozier, M.J. (Eds.), *Landslide Hazard and Risk*. Wiley, Chichester, p. 1–40.

- Cruden D.M., Varnes D.J. 1996. *Landslide types and processes*. In Turner, A.K., Shuster, R.L., (Eds), *Landslides: Investigation and Mitigation*. Transportation Research Board, Special Report 247, 36-75.
- Cruden, D.M., Fell, R., (Eds), 1997. *Fatal Landslides and Landslide Risk in Canada*. Landslide Risk Assessment, Balkema, Rotterdam, 371 p.
- D'**Agata, C., Zanutta, A., 2006, Reconstruction of the recent changes of a debris-covered glacier (Brenva Glacier, Mont Blanc Massif, Italy) using indirect sources: Methods, results and validation. *Global and Planetary Change*, 56, 57–68.
- D'Ercole, C., Groves, D.I., Knox-Robinson, C.M., 2000. Using fuzzy logic in a Geographic Information System environment to enhance conceptually based prospectivity analysis of Mississippi Valley-type mineralisation. *Australian Journal of Earth Sciences*, 47, 913-927.
- Dai, F.C., Lee, C.F., Ngai, Y.Y., 2002. Landslide risk assessment and management overview. *Engineering Geology*, 64, 65–87.
- Dai, F.C., Lee, C.F., Xu, Z.W., 2001. Assessment of landslide susceptibility on the natural terrain of Lantau Island, Hong Kong, *Environmental Geology*, 40 (3), 381–391.
- Davis, J.C., 2002. *Statistics and Data Analysis in Geology*, Third Edition. John Wiley & Sons, New York, 638 p.
- De Graff, L.W.S., de Jong, M.G.G., Rupke, J., Verhofstad, J., 1987. A geomorphological mapping system at scale 1:10,000 for mountainous areas. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 31(2), 229–242.
- De Graff, J.V., Canuti, P., 1988. Using isopleth mapping to evaluate landslide activity in relation to agricultural practices. *Bulletin of IAEG*, 38, 61–71.
- Dehn, M., Buma, J., 1999. Modelling future landslide activity based on general circulation models. *Geomorphology*, 30, 175-187.
- Delsigne, F., Lahousse, P., Flez, C., Guiter, G. 2001. Le Riou Bourdoux: un 'monstre' alpin sous haute surveillance. *Revue Forestière Française*, 5, 527-541
- Demek, J., Embleton, C. (Ed.), 1978. *Guide to Medium Scale Geomorphological Mapping*. Schweizerbart, Stuttgart, 348 p.
- Descroix, L., Olivry, J.C., 2002. Spatial and temporal factors of erosion by water of black marl in the badlands of the French Southern Alps. *Hydrological Sciences Journal*, 47(2), 227-242.
- Dietrich, W.E., Montgomery, D.R., 1998. *SHALSTAB A digital terrain model for mapping shallow landslide potential*. Technical report by NCASI, 18 p. <http://socrates.berkeley.edu/~geomorph/shalstab/>
- Dietrich, W.E., Reiss, R., Hsu, M.-L., Montgomery D.R., 1995. A process-based model for colluvial soil depth and shallow landsliding using digital elevation data. *Hydrological Processes*, 9, 383-400.
- Dikau, R., Brunsden, D., Schrott, L., Ibsen, M.-L., 1996. *Landslides Recognition, Identification, Movement and Causes*. John Wiley & Sons, New York, 251 p.
- Donati, L., Turrini, M.C., 2002. An objective method to rank the importance of the parameters predisposing to landslides with the GIS methodology: application to an area of the Appennines (Valnerina; Perugia, Italy). *Engineering Geology*, 63, 277–289.
- Duan J., Grant, G.E., 2000. *Shallow landslide delineation for steep forest watersheds based on topographic attributes and probability analysis*. In Wilson, J.P., and Gallant, J.C., (Eds), *Terrain Analysis: Principles and Applications*, John Wiley & Sons, New York, 311–329.
- Dubayah, R., Rich, P.M., 1995. Topographic solar radiation models for GIS. *International Journal of Geographical Information Science*, 9, 405–419.
- Duman T.Y., Can, T., Emre, O., Kecer, M., Dogan, A., Ates, S., Durmaz, S., 2005. Landslide inventory of Northwestern Anatolia. *Engineering Geology*, 77, 99–114.
- Duman, T.Y., Can, T., Gokceoglu, C., Nefeslioglu, H.A., Sonmez, H., 2006. Application of logistic regression for landslide susceptibility zoning of Cekmece Area, Istanbul, Turkey. *Environmental Geology*, 51, p. 241–256.
- Dumas B., Guérémy P., Lecompte M., Lhénaff R., Raffy J., 1987. Mouvements de terrain et érosion hydrique dans les Baronnies méridionales : méthodes d'étude et premiers résultats. *Travaux de l'Institut Géographique de Reims*, 69/72, 68-93.
- Dumolard, P., Dubus, N., Charleux, L., 2003. *Les statistiques en Géographie*. Ed. Belin. Paris, 239 p.
- E**EA, European Environment Agency, 2000. *The CORINE land cover technical guide - Addendum 2000*. Technical report N°40, prepared by Bossard, M., Feranec J., Otahel, J. 105 p. <http://reports.eea.europa.eu/tech40add/en/tech40add.pdf>
- Einstein, H.H., 1988. *Special lecture: Landslide risk assessment procedure*. Proc. 5th Int. Symp. on Landslides, Lausanne, Switzerland, Vol. 2, Balkema, Rotterdam, 1075-1090.

- Eisbacher, G.H., Clague, J.J., 1984. *Destructive Mass Movements in High Mountains: Hazard and Management*. Geological Survey of Canada, Paper 84-16, 230 p.
- El Shayeb, Y., 1999. *Apport de la logique floue à l'évaluation de l'aléa mouvement de terrain des sites géotechniques : propositions pour une méthodologie générale*. Thèse de doctorat, Ecole nationale supérieure des mines de Nancy, 198 p.
- Ercanoglu, M. 2005. Landslide susceptibility assessment of SE Bartin (West Black Sea region, Turkey) by artificial neural networks. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 5, 979-992.
- Ercanoglu, M., Gokceoglu, C., 2002. Assessment of landslide susceptibility for a landslide-prone area (north of Yenice, NW Turkey) by fuzzy approach. *Environmental Geology*, 41, 720-730.
- Ercanoglu, M., Gokceoglu, C., 2004. Use of Fuzzy Relations to Produce Landslide Susceptibility Map of a Landslide Prone Area (West Black Sea Region, Turkey). *Engineering Geology*, 75 (3-4), 229-250.
- Ercanoglu, M., Gokceoglu, C., van Asch, T.W.J., 2004. Landslide susceptibility zoning north of Yenice (NW Turkey) by multivariate statistical techniques. *Natural Hazards*, 32, 1-23.
- Ermini, L., Catani, F., Casagli, N., 2005. Artificial Neural Networks applied to landslide susceptibility assessment. *Geomorphology*, 66(1-4), 327-343.
- Esmali, A., Ahmadi, H., 2003. *Using GIS and remote sensing in mass movements hazard zonation - A case study in Germichay Watershed, Ardebil, Iran, GIS development*. Proceedings 2003, Map India 2003. <http://www.gisdevelopment.net/proceedings/mapindia/2003/dm.htm>
- Evans, I., 1980. An integrated system for terrain analysis and slope mapping, *Zeitschrift für Geomorphologie Supplement Band*, 36, 274-290.
- Evans, S.G., 1997. *Fatal landslides and landslide risk in Canada*. In Cruden, D., Fell, R., (Eds), *Landslide Risk Assessment*, Balkema, Rotterdam, 185-196.
- Evin, M., 1987. *Dynamique, répartition, âge des glaciers rocheux des Alpes du Sud*. Thèse de Doctorat d'Etat, Université Joseph Fourier, Grenoble, 308 p.
- F**abbri, A., Chung, C.F., Napolitano, P., Remondo, J., Zêzere J.L., 2002. *Prediction rate functions of landslide susceptibility applied in the Iberian Peninsula*. In Brebbia CA (Ed), *Risk analysis III, series: management information systems*, Vol. 5. WIT, Southampton, 703-718.
- Fabbri, A.G., Chung, C.J., Cendrero, A., Remondo, J., 2003. Is prediction of future landslide is possible with a GIS? *Natural Hazards*, 30, 487-499;
- Fell, R., 1994. Landslide risk assessment and acceptable risk. *Canadian Geotechnical Journal*, 31, 261-272.
- Fell, R., Ho, K., Lacasse, S., Leroi, E., 2005. *State of the art paper: A framework for landslide risk assessment and management*. International Conference on Landslide Risk Management, Vancouver, Canada, 31 May -3 June 2005.
- Fernández, T., Irigaray, C., El Hamdouni, R., Chacón, J., 2003. Methodology for Landslide Susceptibility Mapping by Means of a GIS. Application to the Contraviesa Area (Granada, Spain). *Natural Hazards*, 30, 297-308.
- Fielding, A.H., Bell, J.F., 1997. A review of methods for the assessment of prediction errors in conservation presence/absence models. *Environmental Conservation*, 24, 38-49.
- Finlay, P.J., Fell, R., 1997. Landslides: risk perception and acceptance. *Canadian Geotechnical Journal*, 34 (6), 169-188.
- Finlay, P.J., Fell, R., Maguire, P.K., 1997. The relationship between the probability of landslide occurrence and rainfall. *Canadian Geotechnical Journal*, 34 (6), 811-824.
- Flageollet, J.C., 1989. *Les mouvements de terrain et leur prévention*. Masson, Paris. 218 p.
- Flageollet, J.C., 1996. The time dimension in the study of mass movements. *Geomorphology*, 15, 185-190.
- Flageollet, J.-C., Maquaire, O., Martin, B., Weber, D., 1999. Landslides and climatic conditions in the Barcelonnette and Vars basins Southern French Alps, France. *Geomorphology*, 30, 65-78.
- Fleming, M., D., Hoffer, R., M., 1979. *Machine processing of landsat MSS data and DMA topographic data for forest cover type mapping*. LARS Technical Report 062879. Laboratory for Applications of Remote Sensing, Purdue University, West Lafayette, Indiana.
- Florinsky, I.V., 1998. Accuracy of local topographic variables derived from digital elevation models. *International Journal of Geographical Information Science*, 12, 47-61.
- Florinsky, I.V., Kuryakova, G., A., 2000. Determination of grid size for digital terrain modelling in landscape investigations - Exemplified by soil moisture distribution at a micro-scale. *International Journal of Geographic Information Science*, 14, 795-814.
- Fratini, P., Crosta, G.B., Fusi, N., Negro, P.D., 2004. Shallow landslides in pyroclastic soil : a distributed modeling approach for hazard assessment. *Engineering Geology*, 73, 277-295.

- Fu, P., Rich, P.M., 1999. *Design and implementation of the solar analyst: an ArcVIEW extension for modeling solar radiation at landscape scales*. 19th Annual ESRI International User Conference Proceedings, 26–30 July, ESRI, Redlands, CA (1999), p. 1–26.
- Garrett, J., 1994. Where and why artificial neural networks are applicable in civil engineering. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 8 (2), 129–130.
- Gentizon, C., Baud, M., Holzmann, C., Lambiel, C., Reynard, E., Schoeneich, P., 2001. *GIS and geomorphological mapping as management tools in alpine periglacial areas*. In M. Buchroithner (Ed.), *High Mountain Cartography 2000*, Grossglockner - Austria. Proceedings. Dresden, 2000, 215-228
- Giordano, R., 2005. *La valutazione ambientale strategica dei XX giochi olimpici invernali Torino 2006*. In Giordano R., (Ed.), Edicom Edizioni, Gorizia (2005).
- Glade, T., 2003. Vulnerability assessment in landslide risk analysis. *Die Erde*, 134, 121-138.
- Glade, T., Crozier, M.J., 2005. *A review of scale dependency in landslide hazard and risk analysis*. In Glade, T., Anderson, M., Crozier, M.J. (Eds.), *Landslide Hazard and Risk*, John Wiley & Sons, Chichester, p. 75–138.
- Godt, J.W., 1999. *Maps showing damaging landslides caused by El Nino rainstorms, winter season 1997-98, San Francisco Bay region, California*. U.S. Geological Survey (Ed), U.S. Geological Survey Miscellaneous Field Investigation Series Maps, MF-2325-A-J.
- Gokceoglu, C., 2001, Discussion on Landslide hazard zonation of the Khorshroostam area, Iran by A. Uromeihy and M.R. Mahdaviifar, *Bulletin of Engineering Geological Environment*, 58, 207–213. *Bulletin of Engineering Geological Environment*, 60, 79–80.
- Gokceoglu, C., Aksoy, H., 1996. Landslide susceptibility mapping of the slopes in the residual soils of the Mengen region (Turkey) by deterministic stability analyses and image processing techniques. *Engineering Geology*, 44, 147–161.
- Gokceoglu, C., Sonmez, H., Nefeslioglu, H., Duman, T.Y., Can, T., 2005. The 17 March 2005 Kuzulu landslide (Sivas, Turkey) and landslide-susceptibility map of its near vicinity. *Engineering Geology*, 81 (1), 65–83.
- Goodman, L.A., 1954. Kolmogorov-Smirnov tests for psychological research. *Psychological-Bulletin*, 51, 160-168.
- Goodman, L.A., Kruskal, W.H., 1954. Measures of association for cross classifications, *Journal of American Statistical Association*, 49, 732–764.
- Gorsevski, P.V., Gessler, P.E., 2003. *Bayesian modeling and GIS for evaluating landslide hazard*. ASPRS 2003, Annual Conference, Anchorage, AK, May 5-9, 2003.
- Gorsevski, P.V., Gessler, P.E., Foltz, R.B., 2000. *Spatial prediction of landslide hazard using logistic regression and GIS*. 4th International Conference on Integrating GIS and Environmental Modeling (GIS/EM4): Problems, Prospects and Research Needs. Banff, Alberta, Canada, September 2 - 8, 2000.
- Grayson, R.B., Blöschl, G., 2000. *Summary of pattern comparison and concluding remarks*, , In Grayson, R.B., and Blöschl, G., (Eds), *Spatial Patterns in Catchment Hydrology: Observations and Modeling*, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 355–367.
- Grayson, R.B., Blöschl, G., Western, A.W., McMahon, T.A., 2002. Advances in the use of observed spatial pattern of catchment hydrological response. *Advances in Water Resources*, 25, 1313-34.
- Greco, R., Sorriso-Valvo, M., Catalano, E., 2007. Logistic regression analysis in the evaluation of mass movements susceptibility: the Aspromonte case study, Calabria, Italy. *Engineering Geology*, 89, 47–66.
- Green W.H., Ampt, G.A., 1911. Studies on soil physics, part I, the flow of air and water through soils. *Journal of Agricultural Science*, 4 (1), 1-24.
- Greenway, D.R., 1987. *Vegetation and slope stability*. In Anderson and Richards (Eds.), *Slope Stability*, John Wiley & Sons, 187–231.
- Guerey, P., 1987. Principes de cartographie des risques inhérents à la dynamique des versants. *Travaux de l'Institut Géographique de Reims*, 69-72, 5-41.
- Guerey, P., Marre, A., 1996. Une nouvelle méthode de cartographie géomorphologique applicable aux aléas naturels. *Travaux de l'Institut Géographique de Reims*, 94-96, 5-45.
- Guillon, J., 2001. *Interprétation morphologique de l'évolution du glissement-coulée de Poche et caractérisation physico-mécanique des matériaux marneux (Alpes-de-Haute-Provence, France)*. Mémoire de Maîtrise de Géographie Physique, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 118 p.
- Guinau, M., Pallas, R., Vilaplana, J.M., 2005. A feasible methodology for landslide susceptibility assessment in developing countries: a case-study of NW Nicaragua alter Hurricane Mitch. *Engineering Geology*, 80, 316–327.
- Gustavsson, M., Kolstrup, E., Seijmonsbergen, A.C., 2006. A new symbol-and-GIS based detailed geomorphological mapping system: Renewal of a scientific discipline for understanding landscape development. *Geomorphology*, 77, 90-111.
- Guzzetti F, 2000, Landslide fatalities and the evaluation of landslide risk in Italy. *Engineering Geology*, 58, 89-107.

- Guzzetti, F., Reichenbach, P., Ardizzone, F., Cardinali, M., Galli, M., 2006. Estimating the quality of landslide susceptibility models. *Geomorphology*, 81, 166–184.
- Guzzetti, F., Carrara, A., Cardinali, M., Reichenbach, P., 1999. Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, central Italy. *Geomorphology*, 31, 181–216.
- Guzzetti, F., Reichenbach, P., Cardinali, M., Galli, M., Ardizzone, F., 2005. Probabilistic landslide hazard assessment at the basin scale. *Geomorphology*, 72: 272-299.
- H**accard, D., Beaudoin, B., Gigot, P., Jorda, M. 1989. *Carte géologique de la France (1/50 000^{ème}), feuille La Javie (918)*. BRGM, Orléans.
- Hansen, A., 1984. *Landslide hazard analysis*. In Brunsden, D., Prior, D.B. (Eds.), *Slope Instability*. John Wiley & Sons, New York, 532–602.
- Hantz, D., Vengeon, J.M., Dussauge Peisser C., 2003. An historical, geomechanical and probabilistic approach to rock fall hazard assessment. *Natural Hazard and Earth System Sciences*, 3, 693–701.
- Hengl, T., 2006. Finding the right pixel size. *Computers and Geosciences*. 32 (9), 1283-1298.
- Hengl, T., Gruber, S., Shrestha, D., 2003. *Digital Terrain Analysis in ILWIS*. Lecture Notes. International Institute for Geo-Information Science & Earth Observation (ITC), Enschede, 56 p.
- Hengl, T., Heuvelink, G.,B.,M., Stein, A., 2004, A generic framework for spatial prediction of soil variables based on regression-kriging, *Geoderma*, 120, 75–93.
- Hervàs, J., Barredo, J., Lomoschits, A., 2002. *Elaboración de mapas de susceptibilidad de deslizamientos mediante SIG, teledetección y métodos de evaluación multicriterio. Aplicación a la depresión de Tirajana (Gran Canaria)*. In Ayala, F. J., Coraminas, J., (Eds), *Mapas de susceptibilidad a los movimientos de ladera con técnicas SIG*. Fundamentos y aplicaciones en España. Instituto Geológico y Minero de España. 169-180
- Hervàs, J., 2003. *Lessons Learnt from Landslide Disasters in Europe*. EUR 20558 EN, European Commission, Ispra, Italy, 91 p.
- Hoon-Chi, K, Park, N.W., Chung, C;J., 2002. *Fuzzy logic integration for landslide hazard mapping using spatial data from Boeun, Korea*. Symposium on Geospatial Theory, Processing and Applications, 6 p. <http://www.isprs.org/commission4/proceedings02/pdfpapers/283.pdf>
- Horn, B.K.P., 1981. Hill shading and the reflectance map. *Proceedings IEEE*, 69 (1), 14-47.
- Hosmer, D.W., Lomeshow, S. 2000. *Applied logistic regression*. 2nd Ed. Wiley, New York, p. 373.
- Howell, D.C., 1997. *Statistical Methods for Psychology*. 4th Ed., ITP, De Boeck University, 768 p.
- Hungr, O., Evans, S.G., Bovis, M.J., Hutchinson J.N., 2001. A review of the classification of landslides of the flow type. *Environmental and Engineering Geoscience*, VII (3), 1-18.
- Hutchinson M.F., Gallant, J.C., 2000. *Digital elevation models and representation of terrain shape*. In Wilson, J.P., Gallant, J.C. (Eds), *Terrain Analysis*, John Wiley & Sons, Inc., New York., 51–85.
- I**bsen, M.-L., Brunsden, D., 1996. The nature, use and problems of historical archives for the temporal occurrence of landslides, with specific reference to the south coast of Britain, Ventnor, Isle of Wight. *Geomorphology*, 15, 241-258.
- IFEN, 2005. L'utilisation de CORINE Landcover 2000, Institut Français de l'Environnement. 15 p. http://crdp.ac-bordeaux.fr/epb/donnees/LE%20PAYS%20BASQUE.%20ESPACES%20&%20TERRITOIRES/Cartographie/Support%20cartographique/Documentation_CLC_I_050330.pdf
- IGN, 1971. Photographies Aériennes noir et blanc, 1/30 000^{ème}. Mission F 3539-3639.
- IGN, 1978. Photographies Aériennes noir et blanc, 1/30 000^{ème}. Mission F 3539-3639.
- IGN, 1982. Photographies Aériennes noir et blanc, 1/17 000^{ème}. Mission IFN 04.
- IGN, 1990. Photographies Aériennes noir et blanc, 1/30 000^{ème}. Mission FP 3439-3639.
- IGN, 1993. Photographies Aériennes noir et blanc, 1/20 000^{ème}. Mission FD 04P.
- IGN, 1996. Photographies Aériennes noir et blanc, 1/30 000^{ème}. Mission F 3539-3540.
- IGN, 1998. Descriptif technique de la BD Alti ®. http://www.ign.fr/telechargement/MPro/produit/BD_ALTI/DT_BDALTI.pdf
- IGN, 2000. Photographies Aériennes couleur, 1/25 000^{ème}, et Orthophoto (résolution 50 cm). Mission FD 04.
- IGN, 2004. Photographies Aériennes numériques (Orthophoto, résolution 80 cm). Mission FD 04.
- IGN, 2006a. Descriptif technique de la BD Topo ®. http://www.ign.fr/telechargement/MPro/produit/BD_TOPO/DT_BDPOPOpays_1_2.pdf
- IGN, 2006b. Descriptif technique de la BD Carto ®. http://www.ign.fr/telechargement/MPro/produit/BD_CARTO/DT_BDCARTO_3.pdf

- Irigaray, C., Fernández, T., El Hamdouni, R., Chacón, J., 1999. Verification of landslide susceptibility mapping: a case study. *Earth Surface Processes and Landforms*, 24, 537–544.
- Ives, J.D., Messerli, B., 1981, Mountain Hazards Mapping in Nepal Introduction to an Applied Mountain Research Project. *Mountain Research and Development*, Vol. 1, 3/4, 223-230.
- Iwahashi, J., Watanabe, S., Furuya, T., 2001. Landform analysis of slope movements using DEM in Higashikubiki area, Japan. *Computers and Geosciences*, 27 (7), 851–865.
- J**ade S., Sarkar, S. 1993. Statistical models for slope instability classification. *Engineering Geology*, 36, 91–98.
- Jennings, P.J., Siddle, H.J., Bentley, S.P., 1991. *A comparative study of indirect methods of landslip potential assessment*. In Chandler, R. J., (Ed.), *Slope Stability Engineering*, Thomas Telford, London, p. 143–148.
- Jobard, S., 2005. *Les glaciers du Haut Arc (Savoie) : caractérisation et impacts de la décrue post-Petit Age Glaciaire*. Thèse de Doctorat de l'Université de Savoie. 279 p.
- Joly, F., 1997. *Glossaire de géomorphologie : base de données sémiologiques pour la cartographie*. Masson/Armand Colin, Paris, 325 p.
- Jones, A.F., Brewer, P.A., Johnstone, E., Macklin, M.G., 2007. High-resolution interpretative geomorphological mapping of river valley environments using airborne LiDAR data. *Earth Surface Processes and Landforms*, 32 (10), 1574 – 1592.
- Jorda, M., 1980. Morphogenèse et évolution des paysages des Alpes de Haute-Provence depuis le Tardiglaciaire. Facteurs naturels et facteurs anthropiques. *Bulletin de l'Association des Géographes Français*, 472, 295-304.
- Jorda, M., 1983. *La morphogenèse postglaciaire des régions intra-alpines françaises du Sud. Le Bassin de Barcelonnette (Ubaye) du Tardiglaciaire au Subboréal*. In Jorda, M., (Ed), *Compte Rendu du Colloque International 'Premières Communautés Paysannes en Méditerranée Occidentale'*, Montpellier, France, CNRS Editions, Paris, 61-69.
- Jorda, M., 1985. La torrencialité holocène des Alpes françaises du Sud. Facteurs anthropiques et paramètres naturels de son évolution. *Cahiers Lignes de Préhistoire*, 2, 49-70.
- Jorda, M., 1992. Morphogenèse et fluctuations climatiques dans les Alpes françaises du Sud, de l'Age du Bronze au haut Moyen-Age. *Les Nouvelles de l'Archéologie*, 50, 14-20.
- Jorda, M., 1993. *Histoire des paléoenvironnements tardi- et post-glaciaires sud alpins de moyenne altitude. Essai de reconstitution cinématique*. Géomorphologie et aménagement de la Montagne, hommage à P. Gabert, CNRS, Nancy, 99–111.
- K**awakami, H., Saito, Y., 1984. *Landslide risk mapping by a quantification method*. In Proceedings of 4th International Symposium on Landslides, Vol. 2, Toronto, p. 535–540.
- Keaton, J.R., Degraaf, J.V. 1996. *Surface observation and geological mapping*. In Turner, A.K., Schuster, R.L. (Eds.), *Landslides Investigation and Mitigation*, Transportation Research Board, Special Report 247. National Research Council, Washington, 178 –230.
- Keefer, D.K., Wilson, R.C., Mark, R.K., Brabb, E.E., Brown, W.M. III, Ellen, S.D., Harp, E.L., Wieczorek, G.F., Alger, C.S., Zarkin, R.S., 1987. Real-time landslide warning during heavy rainfall. *Science*, 238, 921–925.
- Kemp, L.D., Bonham-Carter, G.F., Raines, G.L., Looney, C.G., 2001. Arc-SDM: ArcVIEW Extension for Spatial Data Modelling Using Weights of Evidence, Logistic Regression, Fuzzy Logic and Neural Network Analysis. <http://ntserv.gis.nrcan.gc.ca/sdm/>.
- Kendall, M., Stuart, A., 1979. *The Advanced Theory of Statistics: Inference and Relationship*. Griffin, London, 748 p.
- Kienholz H., 1977, Kombinierte Geomorphologische Gefahrenkarte von Grindelwald, Map Scale: 10,000. *Geographisches Institut der Universität Bern*, Bern, 204 p.
- Kienholz, H. 1978. Maps of geomorphology and natural hazard of Grindelwald, Switzerland, scale 1:10000. *Arctic and Alpine Research*, 10, 169–184.
- Kienholz, H., Krummenacher, B., 1995. *Légende modulable pour la cartographie des phénomènes*. Berne : OFEFP et OFEE.
- Kienzle, S.W., 2004. The effect of DEM raster resolution on first order, second order and compound terrain derivatives. *Transactions in GIS*, 8(1), 83-111.
- Kirchoffer, S., 1994. Végétation arborée et mouvements de terrain dans le secteur de la Frache (Commune de Jausiers, Alpes-de Haute-Provence). Mémoire de Maîtrise de Géographie Physique, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 132 p.
- Kirkam, D., Powers, W.L. 1972. *Advanced Soil Physics*. John Wiley & Sons, Inc.
- Klaassen, L.H., 1973. Economic and social projects with environmental repercussions: A shadow project approach. *Regional and Urban Economics*, 3 (1), 83-102.

- Knox-Robinson, C.M., 2000. Vectorial fuzzy logic: a novel technique for enhanced mineral prospectivity mapping, with reference to the orogenic potential of the Kalgoorlie Terrane, Western Australia. *Australian Journal of Earth Sciences*, 47, 929-941.
- Koehle, S. 1994. *Cartographie géo-morphodynamique d'un versant instable, le bassin de Barcelonnette, commune de Jausiers-secteur Sud (Alpes de Haute-Provence)*. Mémoire de Maîtrise de l'UFR de Géographie de Strasbourg, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 78 p.
- Kojima, H., Chung, C.F., van Westen, C.J., 2000. Strategy on landslide type analysis based on expert knowledge and the quantitative prediction model. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 33, 701-708.
- Ko Ko, C., Flentje, P., Chowdhury, R., 2004. Landslides qualitative hazard and risk assessment method and its reliability. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Vol. 63 (2), 149-165.
- Komac, M., 2006. A landslide susceptibility model using the Analytical Hierarchy Process method and multivariate statistics in prealpine Slovenia. *Geomorphology*, 74, 17-28.
- Krige, D.G., 1966. Two dimensional weighted moving average trend surfaces for ore-evaluation. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*. 66, 13-38.
- L**aaribi, A., 2000, *SIG et analyse multicritère*, Hermès (Eds.), Paris, 192 p.
- Lambiel, C., Reynard, E., 2002. Cartographie de la distribution du pergélisol et datation des glaciers rocheux dans la région du Mont Gelé (Valais). *Physische Geographie*, 41, 91-104.
- Lan, H.X., Zhou, C.H., Wang, L.J., Zhang, H.Y., Li, R.H., 2004. Landslide hazard spatial analysis and prediction using GIS in the Xiaojiang watershed, Yunnan, China. *Engineering Geology*, 76, 109-128.
- Larsen, M. C. , Simon, A., 1993. A rainfall intensity-duration threshold for landslides in a humid-tropical environment, Puerto Rico. *Geografiske Annaler* 75A, 13-23.
- Le Mignon, G., Cojean, R. 2002. *Rôle de l'eau dans la mobilisation de glissement-coulées (Barcelonnette, France)*. In Rybar, J., Stemberk, J., Wagner, P., (Eds), *Landslides, Proceedings of the 1st European Conference on Landslides*, Prague, Czech Republik, Swets & Zeitlinger, Lisse, 239-244.
- Le Moigne, J.L., 1986. *Sciences de l'intelligence, sciences de l'artificiel*. Actes du Colloque de La Grande Motte, février 1984, Presses Universitaires de Lyon.
- Lebart L., Piron, M., Morineau, A., 2006. *Statistique exploratoire multidimensionnelle : visualisation et inférence en fouille de données*, 4^e éd., DUNOD, Collection sciences sup, 463 p.
- Lecarpentier, C., 1963. *La crue de juin 1957 et ses conséquences morphodynamiques*. Thèse de Doctorat, Université des Lettres et Sciences Humaines de Strasbourg, 319 p.
- Lecompte M., Lhénaff R., Marre A. 1996. Premier bilan de 6 années de mesures sur l'ablation dans des roubines des Baronnies méridionales (Préalpes françaises du Sud). *Revue de Géographie Alpine*, n° spécial 'Les processus d'érosion en milieu montagnard. Bilan et méthodes', 84 (2), 11-16.
- Ledoux, B., 1995. *Les catastrophes naturelles en France*. Payot et Rivages, Paris, 455p.
- Lee, S., Choi, J., 2004. Landslide susceptibility mapping using GIS and the weight of evidence model. *International Journal of Geographical Information Science*, 18(8), 789-814.
- Lee, S., Chwae, U., Min, K., 2002. Landslide susceptibility mapping by correlation between topography and geological structure: the Janghung area, Korea. *Geomorphology*, 46, 149-162.
- Lee, S., Ryu, J.H., Min K.D., Won, J.S., 2003, Landslide susceptibility analysis using GIS and artificial neural network. *Earth Surface Processes and Landforms*, 27, 1361-1376.
- Légier, A. 1977. *Mouvement de terrain et évolution récente du relief dans la région de Barcelonnette (Alpes-de-Haute-Provence)*. Thèse de Doctorat, Université Joseph Fourier, Grenoble, 163p.
- Léone, F., Velázquez, E., 1996. Analyse en retour de la catastrophe de la Josefina (Equateur, 1993): contribution à la connaissance du concept de vulnérabilité appliqué aux mouvements de terrain. *Bulletin de l'IFEA*, 25 (3), 461-478.
- Leroi, E., 1996, *Landslide hazard-Risk maps at different scales: objectives, tools and development*. In Senneset, K., (Ed), *Proceedings of the 7th International Symposium on Landslides*, Trondheim, Norway, Balkema, Rotterdam, 35-52.
- Leroi, E., 2005. Global rockfalls risk management process in 'La Désirade' Island (French West Indies). *Landslides*, 2, 358-365.
- Li, Z., 1992. Variation of the accuracy of digital terrain models with sampling rate interval. *Photogrammetric Record* 14 (79), 113-127.
- Li, Z., 1994. A comparative study of the accuracy of digital terrain models (DTMs) based on various data models. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 48, 2-11.
- Lichfield, N., Kettle, P., Whitbread, M., 1975. *Evaluation in the Planning Process*. Oxford, Pergamon, 326 p.

- Liener, S., Kienholz, H., Liniger, M., Krummenacher, B., 1996. *SLIDISP, A procedure to locate landslide prone areas*. In Senneset, K., (Ed), Proceedings of the 7th International Symposium on Landslides, Trondheim, Norway, Balkema, Rotterdam, 279-284.
- Longley, P.A., Goodchild, M.F., Maguire D.J., and Rhind, D.W., 2001. *Geographic Information Systems and Science*. Wiley, Chichester, UK, 536 p.
- Luzi, L., Pergalani, F., Terlien, M.T.J., 2000. Slope vulnerability to earthquakes at subregional scale, using probabilistic techniques and geographic information systems. *Engineering Geology*, 58, 313–336.
- M**alet, 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 en Sciences de la Terre, Géomorphologie Dynamique. Université Louis Pasteur, Strasbourg, 364 p.
- Malet, J.-P., Auzet, A.-V., Maquaire, O., Ambroise, B., Descroix, L., Estèves, M., Vandervaere, J.-P., Truchet, E., 2003. Investigating the influence of soil surface features on infiltration on marly hillslopes. Application to callovo-oxfordian black marls slopes in the Barcelonnette basin (Alpes-de-Haute-Provence, France). *Earth Surface Processes and Landforms*, 28(5), 547-564.
- Malet, J.-P., Durand, Y., Remaître, A., Maquaire, O., Etchevers, P., Guyomarch'h G., Déqué, M., van Beek, L.P.H. 2007. *Assessing the influence of climate change on the activity of landslides in the Ubaye Valley*. In McInnes, R. and Fairbank, H., (Eds), Proceedings International Conference on Landslides and Climate change - Challenges and Solutions, Wiley, London (in press).
- Malet, J.-P., Maquaire, O., Calais, E., 2002a. The use of Global Positioning System for the continuous monitoring of landslides. Application to the Super-Sauze earthflow (Alpes-de-Haute-Provence, France). *Geomorphology*, 43, 33-54.
- Malet, J.-P., Maquaire, O., Klotz, S. 2000. The Super-Sauze flowslide (Alpes-de-Haute-Provence, France): triggering mechanisms and behaviour. In Bromhead, E., Dixon, N., Ibsen, M.-L. (Eds), *Landslides in Research, Theory and Practice*. Proceedings of the 8th International Symposium on Landslides, Cardiff, Wales, T. Telford, London, 999-1006.
- Malet, J.-P., Remaître, A., Ancey, C., Locat, J., Maquaire O., 2002b. Caractérisation rhéologique des coulées de débris et des laves torrentielles du Bassin de Barcelonnette (Alpes-de-Haute-Provence, France). Premiers résultats. *Rhéologie*, 1, 17-25.
- Malet, J.-P., Remaître, A., Ancey, C., Locat, J., Meunier, M., Maquaire, O., 2001. *Caractérisation rhéologique des coulées de débris et laves torrentielles du bassin marneux de Barcelonnette (Alpes-de-Haute-Provence, France)*. Premiers résultats. In Coussot, P., (Ed), Actes du 36^e Colloque du Groupe Français de Rhéologie : 'Rhéologie, Génie civil et Environnement', Marne-la-Vallée, France, 261-266.
- Malet, J.-P., Thiery, Y., Maquaire, O., Puissant, A., 2006. Landslide susceptibility, vulnerability and risk assessment through GIS procedures: a tentative application in the South French Alps. *Revue Internationale de Géomatique, European Journal of GIS and Spatial Analysis*, 16 (3-4), 499-525.
- Malet, J.-P., van Asch, T.W.J., van Beek, R., Maquaire, O., 2005. Forecasting the behaviour of complex landslides with a spatially distributed hydrological model. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 5, 71–85.
- Malgot, J, Mahr, T., 1979. Engineering geological mapping of the west Carpathian landslide areas. *Bulletin International of Association of Engineering Geologists*, 19, 116–121.
- Manné, S., Schwin, L. C., 1998. *Etude morphologique et évolution historique du glissement-coulée de Poche. Commune de Jausiers, Alpes-de-Haute-Provence*. Mémoire de Maîtrise de Géographie Physique, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 149 p.
- Maquaire, O., 2002, *Aléas géomorphologiques (mouvements de terrain) : processus, fonctionnement, cartographie*. Mémoire d'habilitation à Diriger des Recherches. Université Louis Pasteur, Strasbourg, 219 p. un volume d'annexes.
- Maquaire, O, Ritzenthaler, A., Fabre, D., Ambroise, B., Thiery, Y., Truchet, E., Malet J-Ph., Monnet, J., 2002. Caractérisation des profils de formations superficielles par pénétrométrie dynamique à énergie variable : application aux marnes de Draix (Alpes-de-Haute-Provence, France). *Comptes Rendu de l'Académie des Sciences (Geoscience)*, 334, 835-841.
- Maquaire, O., Malet J.-P., 2006. *Shallow landsliding*. In Boardman, J. Poesen, J., (Eds), Soil Erosion in Europe, Wiley, Chapter 2.8, 583-598
- Maquaire, O., Malet, J.P., Remaître, A., Locat, J., Klotz, S., Guillon, J., 2003. Instability conditions of marly hillslopes: towards or gullyng? The case of the Barcelonnette basin, South-East France. *Engineering Geology*, 70, 109–130.
- Maquaire, O., Ritzenthaler, A., Thiery, Y., Truchet, E., Auzet, A.-V., Fabre, D. Ambroise, B., 2001. *Cartographie et caractérisation hydrodynamique des formations superficielles pour l'étude de la genèse des crues dans le bassin versant du Laval (Draix, Alpes-de-Haute-Provence)*. In Milieux poreux et transferts hydriques, Bulletin du Groupe Francophone d'Humidimétrie et de Transferts en Milieux Poreux, 46, avril, 169-174.

- Maquaire, O., Thiery, Y., Malet, J-P., Weber, C., Puissant, A., Wania, A., 2004. *Current practices and assessment tools of landslide vulnerability in mountainous basins. Identification of exposed elements with a semi-automatic procedure*. In Lacerda, W.A., Ehrlich, M., Fountoura, S.A.B., Sayão, A.S.F., (Eds.), *Landslides evaluation and stabilization*, Vol. I, Balkema, Rotterdam, Netherlands.
- Marinoni, O., 2004. Implementation of the analytical hierarchy process with VBA in ArcGIS. *Computers and Geosciences*, 30: 637-646.
- Mark, R.K., Ellen, S.D., 1995. *Statistical and Simulation Models for Mapping Debris-Flow Hazard*. In Carrara, A., Guzetti, F. (Eds.), *Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards*. Kluwer, Dordrecht, The Netherlands, 93-106.
- MATE/MATL, 1999. *Plan de Prévention des Risques (PPR): Risques de Mouvements de terrain*. Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement (MATE), Ministère de l'Équipement des Transports et du Logement (METL). La Documentation Française, Paris. 74 p.
- Mathys, N., Brochot, S., Meunier, M., 1996. L'érosion des Terres Noires dans les Alpes du sud: contribution à l'estimation des valeurs annuelles moyennes (bassins versants expérimentaux de Draix, Alpes-de-Haute-Provence). *Revue de Géographie Alpine*, 1984 (2), 17– 27.
- M^c Calpin, J., 1984. *Preliminary age classification of landslides for inventory mapping*. 21st Annual Symposium on Engineering Geology and Soils Engineering, Proceedings, University of Idaho, Moscow, ID, 99-111.
- M^c Calpin, J., Rice, J.B. Jr, 1987. *Spatial and temporal analysis of 1200 landslides in a 900 km² area, middle Rocky Mountains*. In International Conference and Field Workshop on Landslides, 5th, Christchurch, New Zealand, 1987, Proceedings (1987), 137–146.
- Meijerink, A.M.J., 1988, Data acquisition and data capture through terrain mapping units. *ITC Journal*, vol. 1, 23-44.
- Meunier, M., 1991. *Éléments d'Hydraulique Torrentielle. Études Montagne*, N°1, Editions Cemagref, Antony, 278 p.
- Miramont, C., 1998. *Morphogénèse, activité érosive et détritisme alluvial holocènes dans le bassin de la moyenne Durance*. Thèse de Doctorat, Université d'Aix-Marseille, 286 p.
- Miska, L., Hjort, J. 2005. Evaluation of current statistical approaches for predictive geomorphological mapping. *Geomorphology*, 67, 299–315.
- Montgomery, D.R., and Dietrich, W.E., 1994. A Physically-Based Model for the Topographic Control on Shallow Landsliding, *Water Resources Research*, 30, 1153-1171.
- Montgomery, D.R., Sullivan, K., and Greenberg, H., 1998. Regional test of a model for shallow landsliding. *Hydrological Processes special issue on GIS in Hydrology*, 12 (6), 943-955.
- Mora, S., 1995, The impact of natural hazard on socio-economic development in Costa Rica. *Environmental and Engineering Geoscience*, 1, 291–298.
- Moreiras, S.M., 2005. Landslide susceptibility zonation in the Rio Mendoza Valley, Argentina. *Geomorphology*, 66, 345–357.
- Moreno D., 2004. *Cartographie de la susceptibilité aux mouvements de terrain des zones ravinées dans les marnes noires. Application aux bassins-versants de Draix et de Barcelonnette (Alpes du Sud)*. Mémoire de DEA de Géographie Physique., Université Louis Pasteur, Strasbourg, 104 p.
- Morgenstern, N. R., 1992. *The Evaluation of Slope Stability—A 25 Year Perspective*. Proc. Stability and Performance of Slopes and Embankments—II, Berkeley, California, Vol. 1, 1–26.
- Moriyama, Y., Horiuchi, S., 1993. *The budget for fiscal 1993*. Sabo Flood Control, 25, 60–64.
- Mulder, H.F., 1991. *Assessment of Landslide Hazard*. Faculty of Geographical Science. University of Utrecht, The Netherlands, 150 p.
- N**agarajan, R., Roy, A., Vinod Kumar, R., Mukherjee, A., Khire, M.V., 2000. Landslide hazard susceptibility mapping based on terrain and climatic factors for tropical monsoon regions. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 58, 275–287.
- Negnevitsky, M., 2002. *Artificial Intelligence — A Guide to Intelligent Systems*. Addison-Wesley Co., United Kingdom, 394 p.
- Neuhäuser, B., Terhorst, B., 2007. Landslide susceptibility assessment using 'weights-of-evidence' applied to a study area at the Jurassic escarpment (SW-Germany). *Geomorphology*, 86 (1-2), 12-24.
- Nguyen, V.U., 1985a. Safety factors and limit states analysis in geotechnical engineering. *Canadian Geotechnical Journal*, 22, 144.
- Nguyen, V.U. 1985b. Some fuzzy set applications in mining geomechanics. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 22, 369–379.
- Nijkamp, P., Rietveld, P., Voogd, H., 1990. *Multicriteria evaluation in physical planning*. North-Holland, Amsterdam.
- Nishimoto, H., 1993. *The supplementary budget for fiscal 1992*. Sabo Flood Control, 25, 68–69.

Noverraz, F., 1999. *Identification des phénomènes, cartographie*. In SHGN (Service hydrologique et géologique national) en collaboration avec l'Institut de Géologie et de Paléontologie de l'université de Fribourg (Eds), *Mouvements de terrain et cartes de danger*, Schwarzsee.

OFEE, OFEFP, 1995. *Légende modulable pour la cartographie des phénomènes*. Recommandations dangers naturels. Office fédéral de l'économie des eaux (OFEE), Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEFP). Berne.

OFEFP/OFEG/OFAT 1997. *Prise en compte des dangers dus aux mouvements de terrain dans le cadre des activités de l'aménagement du territoire*. Recommandations. Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEFP), Office fédéral des eaux et de la géologie (OFEG), Office fédéral de l'aménagement du territoire (OFAT), OFCL n° 310.023.f, Berne, Suisse.

Ohlmacher, G.C., 2004. *Landslide inventory map of the Easton SW and Easton 7.5 minute quadrangles Jefferson and Leavenworth Counties, Kansas*. Kansas Geological Survey Map M-115A, 1:36,000 scale.

Ohlmacher, G.C., Davis, J. C., 2003. Using multiple logistic regression and GIS technology to predict landslide hazard in northeast Kansas, USA. *Engineering Geology*, 69, 331-343.

O'Loughlin, E.M., 1986. Prediction of surface saturation zones in natural catchments by topographic analysis. *Water Resources Research*, 22, 794-804.

Openshaw, S., Openshaw, C., 1997. *Artificial intelligence in geography*. John Wiley & Sons, Chichester, 329 p.

OPEST, 1995, *Rapports de l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques n° 1540*, Vol 6. <http://www.assemblee-nationale.fr/11/rap-off/R1540-06.asp>

Otto, J.C., Dikau, R., 2004. Geomorphologic System Analysis of a High Mountain Valley in the Swiss Alps. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 48 (3), 323-341.

Ownegh. M., 2003. *Land use planning and integrated management of natural hazards in Golestan Province*. In Seminar on flood hazard prevention and mitigation, 15-16 January, (2003), Gorgan, Iran, 9 p.

Oyagi, N., 1989. *Geological and economic extent of landslides in Japan and Korea*. In Brabb, E.E., Harrod, B.L., (Eds), *Landslides: extent and economic significance*. Balkema, Rotterdam, 289-302.

Pachauri, A.K., Pant, M., 1992. Landslide hazard mapping based on geological attributes. *Engineering Geology*, 32, 81-100.

Pack, R.T., Tarboton D.G., Goodwin, C.N., 2001. *Assessing terrain stability in a GIS using SINMAP*. 15th Annual GIS Conference, GIS 2001, British Columbia.

Pack, R.T., Tarboton, D.G., Goodwin, C.N., 1998. *The SINMAP approach to terrain stability mapping*. In Proceedings of 8th Congress of the International Association of Engineering Geology, Vancouver, British Columbia, Canada, 1157-1165.

Palmquist, R.C., Bible, G., 1980. Conceptual modelling of landslide distribution in time and space. *Bulletin of International Association of Engineering Geologists*, 21, 178-186.

Panizza, M., Pasuto, A., Silvano, S., Soldati, M., 1996. Temporal occurrence and activity of landslides in the area of Cortina d'Ampezzo (Dolomites, Italy). *Geomorphology*, 15, 311-326.

Parise, M., 2001. Landslide mapping techniques and their use in the assessment of the landslide hazard. *Physical Chemical Earth (C)*, 26 (9), 697-703.

Parise, M., Jibson, W.R., 2000. A seismic landslide susceptibility rating of geologic units based on analysis of characteristics of landslides triggered by the 17 January, 1994 Northridge, California earthquake. *Engineering Geology*, 58, 251-270.

Pasuto, A., Soldati, M., 1999. The use of landslide units in geomorphological mapping: an example in the Italian Dolomites. *Geomorphology*, 30(1-2), 53-64.

Pasuto, A., Silvano, S., Tagliavini, F., Zannoni, A. (Eds), *ALARM, Assesment of LANDslides Risk and Mitigation in mountain areas*, Final Report, EC Contract No. EVG1-CT-2001-00038, 2004.

Perotto-Baldiviezo, H.L., Fisher, R.F., Wu, X.B., Thurow, T.L., Smith C.T., 2004. GIS-based spatial analysis and modeling for landslide hazard assessment in steeplands, Southern Honduras. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 103 (1), 165-176.

Personnaz, L., Rivals, I., 2003. *Réseaux de neurones formels pour la modélisation, la classification et la commande*. Ed. CNRS, coll. Sciences et Techniques de l'Ingénieur, Paris, 387 p.

Petley, D.N., Bulmer, M.H.K, Murphy, W., 2002. Patterns of movement in rotational and translational landslides. *Geology*, 30 (8), 719-722.

Peucker, T.K., Fowler, R.J., Little, J.J., Mark, D.M., 1978. *The triangulated irregular network*. In Proceedings of the DTM Symposium. American Society of Photogrammetry - American Congress on Survey and Mapping, St. Louis, Missouri, 24-31.

- Pierre, S., Remaître, A., 1999. *Etude de la lave torrentielle du 19 août 1996 sur le torrent de Faucon*. Mémoire de Maîtrise de Géographie Physique, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 158 p.
- Pierrehumbert G., 1998. *L'informatique en cartographie géomorphologique. La région du Schilthorn (Oberland bernois, Suisse)*. Mémoire de Licence. Lausanne, Institut de Géographie.
- Pilouk, M., 1992. *Fidelity improvement of DTM from contours*. MSC thesis, ITC. 99 p.
- Pistocchi, A., Luzi, L., Napolitano, P., 2002. The use of predictive modelling techniques for optimal exploitation of spatial databases: a case study in landslide hazard mapping with expert system-like methods. *Environmental Geology*, 41, 765–775.
- Plan, J., 1968. La Fenêtre de Barcelonnette. *Bulletin du Service de la Carte Géologique de la France*, LXV-280, 126 p.
- PNRH, 2001-2003 : 'Etude et modélisation des mécanismes impliqués dans la formation des crues sur bassins versants torrentiels marneux (production, stockage et transfert de l'eau et des sédiments)'. Coordination : D. Richard (ETNA, Cemagref, Grenoble).
- Porwal, A., Carranza, E.J.M., Hale, M., 2003. Knowledge-driven and Data-driven Fuzzy models for reductive Mineral Potential Mapping. *Natural Resources Research*, 12, (1), 1-25.
- Quintlé, L., 1995. *Repérage d'anciens glissements de terrain dans le bassin de Barcelonnette d'après la photo-interprétation, l'étude de cartes et vérifications sur le terrain : secteur Sud (Jausiers/Enchastrayes)*. Mémoire de Maîtrise de Géographie Physique, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 95 p.
- Quintlé, L., 1996. *Essai méthodologique sur le repérage d'anciens glissements de terrain, application à la moyenne Ubaye, Sud de la commune de Jausiers*. Mémoire de DEA de Géographie Physique, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 67 p.
- Raetzo, H., Lateltin, O., Bollinger, D., Tripet, J.-P., 2002. Hazard assessment in Switzerland – codes of practice for mass movements. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 61, 263–268.
- Reger J.P., 1979. Discriminant analysis as possible tool in landslide investigations. *Earth Surface Processes and Landforms*, 4, 267-273.
- Reichenbach, P., Galli, M., Cardinali, M., Guzzetti, F., Ardizzone, F., 2005. *Geomorphologic mapping to assess landslide risk: concepts, methods and applications in the Umbria Region of central Italy*. In Glade, T., Anderson, M., Crozier, M.J. (Eds.), *Landslide Hazard and Risk*, John Wiley & Sons, Chichester, 429–468.
- Remaître, A., 2000. *Détermination des zones d'initiation et de contribution des laves torrentielles dans les bassins marneux. Applications au bassin de Barcelonnette (Alpes-de-Haute-Provence)*. Mémoire de DEA, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 153 p.
- Remaître, A., 2006. *Morphologie et dynamique des laves torrentielles : Applications aux torrents des Terres Noires du bassin de Barcelonnette (Alpes du Sud)*. Thèse de Doctorat de Géographie physique, humaine, économique et régionale de l'Université de Caen Basse-Normandie, 486 p.
- Remaître, A., Malet, J.-P., Ancey, C., Locat, J., Maquaire, O., 2005a. Flow behaviour and runout modelling of a complex debris flow in clay-shales basin. *Earth Surface Processes and Landforms*, 30, 479-488.
- Remaître, A., Maquaire, O., Pierre, S., 2002. Zones d'initiation et de contribution des laves torrentielles dans les bassins marneux. Exemple du torrent de Faucon (Bassin de Barcelonnette, Alpes-de-Haute-Provence). *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 2002-1, 71-84.
- Remaître, A., Maquaire, O., Malet, J.P., 2005b. Morphology and sedimentology of a complex debris flow in clay-shales basin. *Earth Surface Processes and Landforms*, 30, 339-348.
- Remondo, J., Fabbri, A., Chung, C.J., González, A., Díaz de Terán, J.R., Cendrero, A. 2003b. Validation of Landslide Susceptibility Maps; Examples and Applications from a Case Study in Northern Spain. *Natural Hazards*, 30, 437–449.
- Remondo, J., González-Díez, A., Díaz de Terán, J.R., Cendrero, A., 2003a. Landslides susceptibility models utilising spatial data analysis techniques. A case study from the lower Deba Valley, Guipúzcoa (Spain). *Natural Hazards*, 30, 267–279.
- Remondo, J., Soto, J., González-Díez, A., Díaz de Terán, J.R., Cendrero, A., 2005. Human impact on geomorphic processes and hazards in mountain areas in northern Spain. *Geomorphology*, 66, 69–84.
- Reynard, E., 1997. Carte géomorphologique des Lapiés de Tsanfleuron (Hautes Alpes Calcaires, Valais). *Bull. de la Société Neuchâteloise de Géographie*, 41, 23-38.
- Reynard, E., Holzmann, C., Lambiel, C., Phillips, M. 2005. *Légende géomorphologique de l'IGUL et Guide pratique pour le levé de cartes géomorphologiques*. Lausanne : Institut de Géographie, 33 p.
- Reynard, E., Schoeneich, P., 1995. *Introduction aux méthodes en géographie physique*. Lausanne : Institut de Géographie (coll. "Matériaux pour les cours et séminaires" n° 29).
- Rezig, S., 1998. *Modélisation probabiliste de l'aléa 'mouvements de terrain' – Développement d'une méthode quantitative pour l'aide à l'expertise*. Thèse Ecole Centrale, Paris, 205 p.

- Rezig, S., Favre, J.L., Leroi, E., 1996. *The probabilistic evaluation of landslide risk*. In Senneset, K., (Ed), Proceedings of the 7th International Symposium on Landslides, Trondheim, Norway, Balkema, Rotterdam, 351-356.
- Rib H.T, Liang T., 1978. *Recognition and identification*. In Schuster, R.L., and Krizek, R.J., (Eds), Landslides: Analysis and Control, Transportation Research Board National Academy of Sciences, Special Report vol. 176, 34–80.
- Richard, D., Mathys, N., 1999. *Historique, contexte technique et scientifique des BVRE de Draix : caractéristiques, données disponibles et principaux résultats acquis au cours de dix ans de suivi*. In Mathys, N., (Ed), Les bassins versants expérimentaux de Draix, laboratoire d'étude de l'érosion en montagne, Cemagref-Editions, Antony, 11-28.
- Rickenmann, D., 1999. Empirical relationships for debris-flows. *Natural Hazards*, 19, 47-77.
- Ritzenthaler, A., 2000. *Ravinement, météorisation et instabilité des marnes noires callovo-oxfordiennes, Bassins versants de Draix et de Barcelonnette*. Mémoire de Maîtrise de Géographie. Physique, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 132 p.
- Ritzenthaler, A., 2001. *Apport de la caractérisation des formations superficielles de marne à la détermination des zones de production de sédiments par mouvements de masse dans les bassins-versants marneux. Applications aux bassins-versants de Draix et de Barcelonnette (Alpes du Sud)*. Mémoire de D.E.A. de Géographie. Physique, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 125 p.
- Romeder, J-M., 1973. *Méthodes et Programme d'Analyse Discriminante*. Dunod, Paris.
- Romero, C., 1991. *Handbook of Critical Issues in Goal Programming*. Pergamon Press, Oxford, 124 p.
- Rosso, R., Rulli, M.C., Vannucchi, G. 2006. A physically based model for the hydrologic control on shallow landsliding. *Water Resources Research*, 42, 16p. <http://www.agu.org/journals/wr/wr0606/2005WR004369/2005WR004369.pdf>
- Rousseaux, F., 2004. Caractérisation d'erreurs sur un modèle numérique de terrain en fonction de zones morphologiques. *Géomatique Expert*.
- Roy, B., 1968. *Classement et choix en présence de points de vue multiples*. La méthode ELECTRE. RIRO n° 8, 57-75.
- Rupke, J., Cammeraat, E., Seijmonsbergen, A.C., van Westen, C.J., 1988. Engineering geomorphology of the Widentobel catchment, Apenzell and Sankt Gallen, Switzerland. A geomorphological inventory system applied to geotechnical appraisal of slope stability. *Engineering Geology* 26, 33–68.
- Saaty, L.T., Vargas L.G., 2001. *Models, methods, concepts, and applications of the analytic hierarchy process*. Kluwer Academic, Boston, 333 p.
- Saaty, T.L., 1977. A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of Mathematical Psychology*, 15, 234-281.
- Saha, A.K, Gupta, R.P., Arora, M.K., 2002. GIS-based landslide hazard zonation in the Bagirathi (Ganga) Valley, Himalayas. *International Journal of Remote Sensing*, 23 (2), 357–369.
- Saha, A.K, Gupta, R.P., Sarkar, I., Arora, M.K., Csaplovics, E., 2005. An approach for GIS-based statistical landslide susceptibility zonation—with a case study in the Himalayas. *Landslides*, 2, 61–69.
- Salomé, A.I., Beukenkamp, P.C., 1989. Geomorphological mapping of a high mountain area, in black and white. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 3 (1), 119- 123.
- Santacana, N., Baeza, C., Corominas, J., de Paz, A., Marturiá, J., 2003. A GIS-Based Multivariate Statistical Analysis for Shallow Landslide Susceptibility Mapping in La Pobla de Lillet Area (Eastern Pyrenees, Spain). *Natural Hazards*, 30, 281–295.
- Sawatzky, D.L., Raines, G.L., Bonham-Carter, G.F., Looney, C.G., 2004. ArcSDM3: ArcMAP extension for spatial data modelling using weights of evidence, logistic regression, fuzzy logic and neural network analysis. <http://www.ige.unicamp.br/sdm/ArcSDM3/>.
- Schärli, A., 1985. *Décider sur plusieurs critères, panorama de l'aide à la décision multicritère*. Lausanne, Suisse : Presses polytechniques et universitaires romandes, 304 p.
- Schmidt, F., 2001. *Generation and analysis of digital terrain models for agricultural applications*. In: Grenier, G., Blackmore, S. (Eds), Third European Conference on Precision Agriculture, June 18th-21st, Montpellier, France, 109-114.
- Schmidt, J., Dikau, R., 1999. *Extracting geomorphometric attributes and objects from digital elevation models - Semantics, methods, future needs*. In: Dikau, R., Saurer, H., (Eds.), GIS for Earth Surface Systems - Analysis and Modelling of the Natural Environment. Schweizbart'sche Verlagsbuchhandlung, 153-173
- Schmutz, M., 2000. *Apport des méthodes géophysiques à la connaissance des glissements-coulées développés dans les marnes noires. Application à Super-Sauze (Alpes-de-Haute-Provence, France)*. Thèse de Doctorat, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 230 p.
- Schoeneich P., Imfeld P. 1996. *Un karst dans les conglomérats du flysch de la nappe du Niesen (Chaîne du Pic Chaussy, Préalpes vaudoises)*. In KPIK-Rapports de recherche Institut de Géographie, Université de Fribourg, 8, 73-78.

- Schoeneich, P., 1993. *Comparaison des systèmes de légendes français, allemand et suisse - principes de la légende IGUL*. In P. Schoeneich et E. Reynard (Eds), *Cartographie géomorphologique - Cartographie des risques*. Actes de la Réunion annuelle de la Société Suisse de Géomorphologie, 19 au 21 juin 1992 aux Diablerets et à Randa. Lausanne : Institut de Géographie Lausanne, coll. Travaux et recherches, 9, 15-24.
- Schoeneich, P., 1998. *Le retrait glaciaire dans les vallées des Ormonts, de l'Hongrin et de l'Etivaz (Préalpes vaudoises)*. Lausanne : Institut de Géographie Lausanne, coll. Travaux et recherches, 14.
- Schoeneich, P., Reynard, E., Pierrehumbert, G., 1998. *Geomorphological mapping in the Swiss Alps and Prealps*. In Kriz, K., (Ed.), *Hochgebirgskartographie Silvretta '98*. Wiener Schriften zur Geographie und Kartographie 11, 145-153.
- Schulz, W.H., 2007. Landslide susceptibility revealed by LIDAR imagery and historical records, Seattle, Washington. *Engineering Geology*, 89, 67-87.
- Schuster, R.L., 1996. *Socioeconomic significance of landslides*. In Turner, A.K., Schuster, R.L. (Eds) *Landslides Investigation and Mitigation*, Transportation Research Board, Special Report 247. National Research Council, Washington, 12-35.
- Sharifi, M.A., Retsios, V. 2003. *Site selection for waste disposal through spatial multiple criteria decision analysis*. In Proceedings of the 3rd International conference on decision support for telecommunications and information society, DSTIS, 4-6 September 2003, Warsaw, Poland, 15 p.
- Shepard, D., 1968. *A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data*. Proceedings of the 1968 ACM National Conference, 5 17-524.
- Sidle, R.C., Pearce, A.J., O'Loughlin, L., 1985. Hillslope stability and land use. *Water Resources Monograph*, 11, American Geophysical Union, Washington, DC.
- Sivan, O., 2000. *Torrents de l'Ubaye*. Editions Sabença de la Valeia, Barcelonnette, 48p.
- Soeters, R., van Westen, C.J., 1996. *Slope instability, recognition, analysis, and zonation*. In Turner, A.K., Schuster, R.L. (Eds.), *Landslides Investigation and Mitigation*, Transportation Research Board, Special Report 247. National Research Council, Washington, 129-177.
- Soriso Valvo, M., 2002. *Landslides; from inventory to risk*. In Rybář, J., Stemberk, J., Wagner, P. (Eds.), *Landslides*, Proceedings of the International European Conference on Landslides. Balkema, Rotterdam, 79-93.
- Spiegelhalter, D., 1986. *Uncertainty in expert systems*. In Gale, W.A., (Ed), *Artificial Intelligence and Statistics*. Addison-Wesley, Reading, 17-55.
- Spiegelhalter, D., Kill-Jones, R.P., 1984. Statistical and knowledge approaches to clinical decision-support systems, with an application in gastroenterology. *Journal of the Royal Statistical Society*, 147, 35-77.
- 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, 53-66.
- Sterlacchini, S., 2000. Applicazione di un modello previsionale di tipo bayesiano per la valutazione della pericolosità connessa a movimenti versante. *Quaderni di Geologia applicata*. 7 (4-2), 95-109.
- Sterlacchini, S., Maseti, M., Poli, S., 2004. *Spatial integration of thematic data for predictive landslide mapping: a case study from Oltrepo Pavese area, Italy*. In Lacerda, W.A., Ehrlich, M., Fountoura, S.A.B., Sayão, A.S.F. (Eds.), *Landslides Evaluation and Stabilization*. Balkema, Rotterdam, 109-116.
- Stevenson, P.C., 1977. An empirical method for the evaluation of relative landslide risk. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 16, 69-72.
- Süzen, M.L., 2002. *Data driven landslide hazard assessment using geographical information systems and remote sensing*. M.E.T.U. PhD Thesis, Unpublished. 196 p.
- Süzen, M.L., Doyuran, V., 2004a. Data driven bivariate landslide susceptibility assessment using geographical information systems: a method and application to Asarsuyu catchment, Turkey. *Engineering Geology*, 71, 303-321.
- Süzen, M.L., Doyuran, V., 2004b. A comparison of the GIS based landslide susceptibility assessment methods: multivariate versus bivariate. *Environmental Geology*, 45, 665-679.
- Taborton, D.G., 1997, A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models. *Water Resources Research*, 33 (2), 309-319.
- Tangestani M.H., 2004. *Landslide susceptibility mapping using the fuzzy gamma operation in a GIS, Kakan catchment area, Iran*. GIS development, Proceedings 2003, Map India 2003, 6p. http://www.gisdevelopment.net/application/natural_hazards/landslides/mi03040.htm .
- Teitz, M.B., 1968. Locational strategies for competitive systems. *Journal of Regional Science*, 8, 135-148.
- Terlien, T.J., De Louw, P.G.B., van Asch, T.W.J., Hetterschijt, R.A.A., 1996. *The assessment and modelling of hydrological Failure conditions of landslides in the Puriscal area (Costa Rica) and the Manizalis Region (Colombia)*. In Anderson, M.G., Brooks, S.M. (Eds), 1996. *Advances in Hillslope Processes* Wiley, Chichester, 837-855.

- Terlien, T.J., van Westen, C.J., van Asch T.W.J., 1995. *Deterministic modelling in GIS-based landslide hazard assessment*. In Carrara, A., Guzetti, F. (Eds.), *Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards*. Kluwer, Dordrecht, The Netherlands, 57–77.
- Thiart, C., Bonham-Carter, G.F., Agterberg, F.P., 2003. *Conditional independence in weights of evidence: application of an improved test*. IAMG, International Association for Mathematical Geology, September 7th–12th, 2003, Portsmouth, United-Kingdom, 6 p.
- Thiery, Y., 1999. *Evolution géomorphologique et dynamique de versants de la haute vallée du Charuis (Baronnies méridionales, France)*. Mémoire de Maîtrise, GREURCA, Université de Reims Champagne-Ardenne, p. 126, 1 carte en annexe.
- Thiery Y., 2000. *Quelques éléments de géomorphologie et morphogenèse de la moyenne vallée du Bouinenc à travers l'exemple des BVE de Draix (de la fin du Pléni-glaciaire Supérieur à l'Holocène Supérieur)*. Mémoire de DEA 'Dynamique des milieux naturel et anthropiques passés et actuels', USTL, Lille, 156 p.
- Thiery Y., Truchet E., Ritzenthaler A., Maquaire O., Ambroise B, Fabre D, Auzet A-V., 2002. *Cartography and Hydrodynamic characterisation of superficial deposits for the study of the flood genesis in The Laval catchment basin (Draix, Alpes de Haute-Provence, France)*. In Delahaye D., Levoy F., Maquaire O., (Eds), *Geomorphology: from expert opinion to modelling, a tribute to Professor Flageollet J-C.*, 26th-27th April, Strasbourg, France, 361-364.
- Thiery, Y., Malet, J-P., Maquaire, O., 2006. *Test of Fuzzy Logic Rules for Landslide Susceptibility Assessment*. SAGEO 2006, Colloque International de Géomatique et d'Analyse Spatiale. Recherches & Développements. Strasbourg, 11-13 septembre 2006, 16 p.
- Thiery, Y., Malet, J.-P., Sterlacchini, S., Puissant, A., Maquaire, O., 2005. *Analyse spatiale de la susceptibilité des versants aux mouvements de terrain, comparaison de deux approches spatialisées par SIG*. *Revue Internationale de Géomatique/European Journal of GIS and Spatial Analysis* 15, 227–245.
- Thiery, Y., Malet, J-P., Sterlacchini, S., Puissant, A., Maquaire, O., 2007. *Landslide susceptibility assessment by bivariate methods at large scales: application to a complex mountainous environment*. *Geomorphology*, 9 (1-2), 38-59.
- Thiery, Y., Sterlacchini, S., Malet, J.-P., Puissant, A., Maquaire, O., 2004a. *Strategy to reduce subjectivity in landslide susceptibility zonation by GIS in complex mountainous environments*. In Toppen, F., Prastacos, P. (Eds.), *Proceedings of AGILE 2004: 7th AGILE Conference on Geographic Information Science*. 29th April–1st May 2004, Heraklion, Greece, 623–634.
- Thiery, Y., Sterlacchini, S., Malet, J-P., Puissant, A., Maquaire, O., 2004b. *Modélisation spatiale de la susceptibilité des versants aux mouvements de terrain, Stratégie et application d'une analyse bivariée par SIG*. Cassini 04, 7^{ème} Conférence du GDR SIGMA, Géomatique et Analyse spatiale, 02-04 juin 2004, Grenoble, France, 61-66. http://www.lsr.imag.fr/Cassini04/Cassini2004/jeudi/diapo_cassini2004_YT3.pdf
- Thiery, Y., Puissant, A., Malet, J.-P., Remaître, A., Beck, E., Sterlacchini, S., Maquaire, O., 2003. *Towards the construction of a spatial database to manage landslides with GIS in mountainous environment*. *Proceedings of AGILE 2003: The Science behind the Infrastructure*, 6th AGILE Conference on Geographic Information Science. 24th-26th, April 2003, Lyon, France, 37–44.
- Thompson, J.A., .C. Bell, C.,Butler, C.A., 2001. *Digital elevation model resolution: effects on terrain attribute calculation and quantitative soil-landscape modeling*. *Geoderma*, 100, 67-89.
- Thurston, N., Degg, M., 2000. *Transferability and terrain reconstruction within a GIS landslide hazard mapping Model, Derbyshire Peak District*. In Bromhead, E.N., Dixon, N., Ibsen, M-L.,(Eds.), *Landslides in research, theory and practice*, *Proceedings of the 8th International Symposium on Landslides*, 26-30 June 2000. Cardiff, UK, Thomas Telford, 1467-72.
- Tomassone, R., 1988. *Comment interpréter les résultats d'une analyse factorielle discriminante ?* Ed. INRA, 56 p.
- Tricart, J. 1965. *Principes et Méthodes de la Géomorphologie*. Masson, Paris.
- Tripet, J.-P., Bollinger, D., Noverraz, F., 1993. *Cartes des mouvements de terrain : Proposition de légende*. In Schoeneich, P., Reynard, E. (Eds), *Cartographie géomorphologique - cartographie des risques*. Actes de la Réunion annuelle de la Société Suisse de Géomorphologie, 19 au 21 juin 1992 aux Diablerets et à Randa. Lausanne : Institut de Géographie, coll. Travaux et Recherches, 9, 67-73.
- Truchet E., 2000. *Caractérisation physique et hydrodynamique des formations superficielles du BVRE du Laval (Alpes du Sud, France)*. Mémoire de Maîtrise de Géographie Physique, Université Louis Pasteur, Strasbourg. 122 p.
- Truchet E., 2001. *Caractérisations physiques et hydrodynamiques des formations superficielles du B.V.R.E. du Laval pour une modélisation des transferts d'eau (Draix, Alpes du Sud, France)*. Mémoire de DEA de Géographie Physique., Université Louis Pasteur, Strasbourg, 99 p.
- Turrini, M.C., Visintainer, P., 1998. *Proposal of a method to define areas of landslide hazard and application to an area of the Dolomites, Italy*. *Engineering Geology*, 50, 255–265.

- UNDP/BCPR, 2004, *Reducing disaster risk. A challenge for development*, UNDP/Bureau for Crisis Prevention and Recovery, New York, <http://www.undp.org/bcpr/disred/rdr.htm>.
- UNDRO (United Nations Disaster Relief Coordinator), 1979. *Natural Disasters and Vulnerability Analysis*. In Report of Expert Group Meeting (9-12 July 1979), UNDRO, Geneva.
- Uromeihy, A., Mahdavi M.R., 2000. Landslide hazard zonation of the Khorshrostan area, Iran. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 58, 207–213.
- Valadão, O. P., Ganar, J.L., Queiroz, G., Ferreira, T., 2002. Landslides density map of S. Miguel Island, Azores archipelago. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2 (1/2), 51-56.
- Van Asch, T.W.J., Buma, J., 1997. Modelling groundwater fluctuations and the frequency of movement of a landslide in the Terres Noires region of Barcelonnette, France. *Earth Surface Processes and Landforms*, 22, 131–141.
- Van Beek, R., 2002. Assessment of the influence of changes in climate and land use on landslide activity in a Mediterranean environment. Netherlands Geographical Studies no. 294, KNAG, Faculty of Geosciences, Utrecht University, 366 p.
- Van den Eeckhaut, M., Vanwalleghem, T., Poesen, J., Govers, G., Verstraeten, G., Vandekerckhove, L., 2006. Prediction of landslide susceptibility using rare events logistic regression: a case-study in the Flemish Ardennes (Belgium). *Geomorphology*, 76, 392–410.
- Van Deursen, W.P.A., 1995. *Geographical information systems and dynamic models*. Netherlands Geographical Studies, KNAG, Utrecht, 190, 198 p.
- Van Westen, C.J., 1993. *Application of Geographic Information Systems to Landslide Hazard Zonation*. Ph-D Dissertation, Technical University Delft. ITC-Publication Number 15, ITC, Enschede, The Netherlands, 245 p.
- Van Westen, C.J., 2000. The modelling of landslide hazards using GIS. *Surveys in Geophysics*, 21, 241–255.
- Van Westen, C.J., 2004. *Geo-Information tools for landslide risk assessment: an overview of recent developments*. In Lacerda, W.A., Ehrlich, M., Fountoura, S.A.B., Sayão, A.S.F. (Eds.), *Landslides Evaluation and Stabilization*. Balkema, Rotterdam, pp. 39–56.
- Van Westen, C.J., Soeters, R., Sijmons, K., 2000. Digital Geomorphological landslide hazard mapping of the Alpage area, Italy. *International Journal of Applied. Earth Observatory and Geoinformation*, 2 (1), 51–59.
- Van Westen, C.J., Rengers, N., Soeters, R., 2003. Use of geomorphological information in indirect landslide susceptibility assessment. *Natural Hazards*, 30, 399–419.
- Van Westen, C.J., Rengers, N., Terlien, M.T.J., Soeters, R., 1997. Prediction of the occurrence of slope instability phenomena through GIS-based hazard zonation. *Geol. Rundsch*, 86, 404-414.
- Van Westen, C.J., van Asch, T.W.J., Soeters, R., 2006. Landslide hazard and risk zonation: why is it still so difficult? *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 65, 167–184.
- Van Zuidam R.A., 1986. *Aerial photo-interpretation in terrain analysis and geomorphologic mapping*. Smits Publishers, The Netherlands, 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, (3-4), 309-320.
- Varnes D.J., 1978. *Slope Movement Types and Processes*. In Special Report 176: Landslides: Analysis and Control. In: Schuster, R.L., Krizek, R.J., (Eds), Transport Research Board, National Research, 11–33.
- Varnes, D.J., 1984. *Landslide Hazard Zonation, a review of principles and practice*. IAEG Commission on Landslides. UNESCO, Paris, 63 p.
- Verstappen, H.T., van Zuidam, R.A., 1968. *ITC textbook of Photo-Interpretation*, VII:2—ITC system of geomorphological survey. ITC, Delft, The Netherlands.
- Veyret, Y., 2003. *Les risques* (sous la direction d'Y. Veyret), Ed. SEDES, Paris, 255 p.
- Vincke, P. 1989. *L'aide multicritère à la décision*. Ellipses, 179 p.
- Viville, D, Ambroise, B., Korosec, B. 1986. Variabilité spatiale des propriétés texturales et hydrodynamiques des sols dans le bassin-versant du Ringelbach (Vosges, France). *Zeitschrift für Geomorphology Supplement Band* 60, 21-40.
- Wachal, D.J., Hudak, P.F., 2000. Mapping landslide susceptibility in Travis County, Texas, USA. *GeoJournal*, 51, 245–253.
- Walker, J.-P., Willgoose, G.R., 1999. On the effect of digital elevation model accuracy on hydrology and geomorphology. *Water Resources Research*, 35 (7), 2259-2268.
- Wang, H.B, Sassa, K., 2005. Comparative evaluation of landslide susceptibility in Minamata area, Japan. *Environmental Geology*, 47(7), 956–966.

- Weber, D., 2001. *Contribution de la géomorphologie à la connaissance des mouvements de terrains dans les 'Terres noires' alpines : le glissement-coulée de Super-Sauze (Alpes de Haute Provence, France)*. Thèse de Doctorat, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 311 p.
- Weiss, E.E.J., 1988. *Tree-ring patterns and the frequency and intensity of mass movements*. Bonnard, C. (Ed.), *Landslides, Proceedings of 5th International Symposium in Landslides*. Balkema, Rotterdam, 481-483.
- Wieczorek, G.F., 1984. Preparing a detailed landslide-inventory map for hazard evaluation and reduction. *Bulletin of the Association of Engineering Geologist*, 21 (3), 337-342.
- Wieczorek, G.F., 1987. *Effect of rainfall intensity and duration on debris flows in central Santa Cruz Mountains, California*. In Costa, J.E., Weiczorek, G.,F., (Eds), *Debris flow/avalanches: process, recognition and mitigation*. Reviews in Engineering Geology, Vol. 7, Geological Society of America, Boulder, Colo., 93-104.
- Wilkinson, P.L., Brooks S.M., Anderson, M.G., 2000. Design and application of an automated non-circular slip surface search within a Combined Hydrology and Stability Model (CHASM). *Hydrological Processes*, 14 (11/12), 2003-2017.
- Wills, C.J., Mc Crinck, T.P., 2002. Comparing landslide inventories: the map depends on the method. *Environmental and Engineering Geoscience*, 8, 279-293.
- Wise, S., 2002. *GIS Basics*. Taylor and Francis, New York, 218 p.
- Wood, J.D., 1996. *The geomorphological characterisation of digital elevation models*. PhD Thesis, University of Leicester, UK. <http://www.soi.city.ac.uk/~jwo/phd>
- Wright, R.H., Campbell, R.H., Nilsen, T.H., 1974. Preparation and use of isopleth maps of landslide deposits. *Geology*, 2, 483-485
- Wu, S.R., Jin, Y.M., Zhang, Y.S., Shi, J.S., Dong, C., Lei, W.Z., Shi, L., Tan C.X., Hu, D.G., 2004. Investigations and assessment of the landslide hazards of Fengdu County in the reservoir region of the Three Gorges project on the Yangtze River. *Environmental Geology*, 45, 560-566.
- Wu, T.H., Tang, W.H., Einstein, H., 1996. *Landslide hazard and risk assessment*. In Turner, A.K., Schuster, R.L. (Eds.), *Landslides Investigation and Mitigation*, Transportation Research Board, Special Report 247. National Research Council, Washington, 106-118.
- Wu, W., Sidle, R.C., 1995. A distributed slope stability model for steep forested basins. *Water Resources Research*, 31, 2097-2110.
- Y**esilnacar, E.K., Topal, T., 2005. Landslide Susceptibility Mapping: comparison between logistic regression and neural networks in a medium scale study, Hendek region Turkey. *Engineering Geology*, 79, 251-266.
- Yin, K.L., Yan, T.Z., 1988. *Statistical prediction model for slope instability of metamorphosed rocks*. In Bonnard, C. (Ed.), *Landslides, Proceedings of 5th International Symposium in Landslides*. Balkema, Rotterdam, 1269-1272.
- Yoshimatsu, H., Abe, S., 2006. A review of landslide hazards in Japan and assessment of their susceptibility using an analytical hierarchic process (AHP) method. *Landslides*, 3, 149-158.
- Z**adeh, L.A., *Fuzzy set theory and its applications*. Dordrecht, Kluwer Acad. Publ., 1965.
- Zaknich, A., 2003. *Neural networks for intelligent signal processing*. Series on advanced biology and logic-based intelligence, World Scientific Publishing, 256-273.
- Zevenbergen, L.W., Thorne, C.R., 1987. Quantitative Analysis of land surface topography. *Earth Surface Processes and Landforms*, 12, 47-52.
- Zêzere J.L., 2002. Landslide susceptibility assessment considering landslide typology. A case study in the area north of Lisbon (Portugal). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2, 73-82.
- Zêzere J.L., Ferreira, A.B., Rodrigues, M.L. 1999. Landslides in the north of Lisbon Region (Portugal): conditioning and triggering factors. *Physical Chemical Earth (Part A)* 24, 925-934.
- Zêzere J.L., Reis, E., Garcia, R., Oliveira, S., Rodrigues, M.L., Vieira, GI, Ferreira, A.B., (2004) Integration of spatial and temporal data for the definition of different landslide hazard scenarios in the area north of Lisbon (Portugal). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 4, 133-146.
- Zêzere J.L., Trigo, R., Trigo, I. 2005. Shallow and deep landslides induced by rainfall in the Lisbon Region (Portugal): assessment of relationships with the North Atlantic oscillation. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 5, 331-344
- Zhang, W., Montgomery, D.R., 1994. Digital elevation model grid size, landscape representation, and hydrologic simulations. *Water Resources Research*, 30(4), 1019-1028.
- Zimmerman, H.-J., Zysno, P., 1980. Latent connectivities in human decision making. *Fuzzy sets and Systems*, 4, 37-51.

TABLE DES FIGURES

Fig. I.1. Cadre théorique de l'évaluation, de la gestion et du traitement du risque pour les mouvements de versant.	- 11 -
Fig. I.2. Les différentes composantes de l'évaluation du risque à travers l'exemple du glissement-coulée de la Valette dans le bassin de Barcelonnette (Alpes-de Haute-Provence, France).	- 12 -
Fig. I.3. Représentation schématique des étapes et des méthodes suivies dans cette recherche.	- 17 -
Fig. 1.1. Cartographie d'inventaire des mouvements de versant.	- 27 -
Fig. 1.2. Cartographie de densités des mouvements de versant par SIG.	- 28 -
Fig. 1.3. Cartographie qualitative indexée.	- 29 -
Fig. 1.4. Exemples d'unités homogènes pour le calcul de l'aléa sous SIG.	- 32 -
Fig. 1.5. Cartographie de la susceptibilité par approche bivariée.	- 34 -
Fig. 1.6. Cartographie de l'aléa par approche multivariée.	- 37 -
Fig. 1.7. Problèmes relatifs à l'échantillonnage des facteurs avec des unités homogènes par polygones pour une analyse statistique.	- 40 -
Fig. 1.8. Principes d'un réseau de neurones artificiels.	- 45 -
Fig. 1.9. Cartographie de la susceptibilité par l'analyse des périodes de retour des phénomènes.	- 48 -
Fig. 1.10. Schématisation du calcul du coefficient de sécurité pour un bloc rocheux.	- 49 -
Fig. 1.11. Evaluation qualitative des différentes techniques de zonage de la susceptibilité et de l'aléa pour un bassin versant.	- 55 -
Fig. 1.12. Relation conceptuelle entre la complexité des approches, le nombre de données et le pouvoir prédictif des approches.	- 59 -
Fig. 1.13. Représentation des unités de terrain homogènes dans un environnement SIG et des tables attributaires associées pour une évaluation de l'aléa à l'échelle régionales.	- 64 -
Fig.1.14. Stratégie de calage/validation/transposition des différentes approches utilisées pour cette recherche.	- 67 -
Fig. 2.1. Extension et stratigraphie des marnes et des schistes argileux dans les Alpes françaises.	- 70 -
Fig. 2.2. Croquis morphostructural et coupe géologique des Alpes du Sud.	- 71 -
Fig.2.3. Morphostructure du bassin de Barcelonnette.	- 72 -
Fig. 2.4. Extension du bassin de Barcelonnette et coupes géologiques simplifiées le long de la vallée de l'Ubaye.	- 75 -
Fig. 2.5. Morphologie générale du bassin de Barcelonnette.	- 76 -
Fig. 2.6. Les glaciers du bassin de Barcelonnette et les dépôts morainiques associés.	- 78 -
Fig. 2.7. Illustrations de l'évolution historique des appareils torrentiels du bassin de Barcelonnette.	- 79 -
Fig. 2.8. Diagramme ombrothermique de la station climatique de Barcelonnette (1975-2004).	- 81 -
Fig. 2.9. Extraits de cartes géologiques et géomorphologiques du secteur de Bois Noir.	- 83 -
Fig. 2.10. Relation entre les 'mouvements de versant' et les précipitations.	- 85 -
Fig. 2.11. Morphologie générale des bassins versants de Draix.	- 86 -

Fig. 2.12. Extrait de la carte géomorphologique au 1/10 000 ^{ème} de la vallée du Bouinenc. L'extrait est centré sur les bassins versants du Laval et du Moulin.	- 87 -
Fig. 2.13. Formations superficielles du BVRE du Moulin.....	- 88 -
Fig. 2.14. Carte des 'mouvements de versant' du Moulin et typologie des mouvements.	- 89 -
Fig. 2.15. Structures et légendes des systèmes de cartographie géomorphologique 'officielles nationales'	- 92 -
Fig.2.16. Système de cartographie géomorphologique 'IGUL'.....	- 93 -
Fig. 2.17. Système de cartographie géomorphologique 'champenois'.....	- 93 -
Fig. 2.18. Système de cartographie géomorphologique 'TESLEC'	- 94 -
Fig.2.19. Système de cartographie géomorphologique 'strasbourgeois'.	- 94 -
Fig. 2.20. Système de cartographie géomorphologique par unité homogène sous environnement SIG.	- 95 -
Fig. 2.21. Couleurs adoptées pour illustrer les processus morphogénétiques, leur activité et leur âge estimé.	- 97 -
Fig. 2.22. Exemples de formes issus de processus à différents degrés d'activité.	- 98 -
Fig. 2.23. Les indicateurs d'activité : la morphologie.....	- 99 -
Fig. 2.24. Indicateurs d'activité : la végétation et les pistes.....	- 100 -
Fig. 2.25. Schéma conceptuel de la relation torrents 'mouvements de versant' dans le bassin de Barcelonnette.....	- 101 -
Fig. 2.26. Légende adoptée pour les degrés d'activité des 'mouvements de versant' selon caractéristiques morphologiques associées.	- 102 -
Fig. 2.27. Panorama du versant de Poche en 1894 et en 2004.....	- 104 -
Fig. 2.28. Légende de la carte morphodynamique.	- 105 -
Fig. 2.29. Extrait de la carte morphodynamique au 1/10 000 ^{ème} du secteur d'Abriès, versant Ubac, bassin de Barcelonnette.....	- 106 -
Fig. 2.30. Carte morphodynamique du BVRE du Moulin.....	- 107 -
Fig.2.31. Cartographie et base de données relationnelles des 'mouvements de versant' et des escarpements dans un environnement SIG.	- 108 -
Fig. 3.1. Bassin de Barcelonnette secteur de recherche principal : limites des communes et localisation du secteur Ubac.....	- 116 -
Fig. 3.2. Carte géomorphologique simplifiée du versant Ubac.....	- 116 -
Fig. 3.3. Photographies illustrant les principales caractéristiques morphologiques du versant Ubac.	- 117 -
Fig. 3.4. Localisation et caractéristiques principales des trois secteurs du versant Ubac (site de calage).....	- 118 -
Fig. 3.5. Coupe géologique simplifiée de la vallée de l'Abriès	- 119 -
Fig. 3.6. Photographies illustrant les principales caractéristiques morphologiques du secteur de la vallée de l'Abriès.....	- 120 -
Fig. 3.7. Extrait de la carte géomorphologique au 1/10 000 ^{ème} du secteur d'Abriès.....	- 121 -
Fig. 3.8. Coupe schématique du glissement translationnel complexe de Lans.	- 122 -
Fig. 3.9. Photographies illustrant les principales caractéristiques morphologiques du secteur intermédiaire.....	- 124 -
Fig. 3.10. Coupe géologique simplifiée du secteur intermédiaire.	- 125 -
Fig. 3.11. Extrait de la carte morphodynamique du secteur intermédiaire : le versant de Bois Noir.....	- 125 -
Fig. 3.12. Versant de Bois Noir et mouvement déclenché en avril 1993.	- 126 -
Fig. 3.13. Extrait de la carte morphodynamique du secteur intermédiaire : le Riou des Ribes.....	- 127 -
Fig. 3.14. Mouvements des Patignons dans la zone de Villard de Faucon : localisation et enjeux.	- 128 -
Fig. 3.15. Photographies illustrant les principales caractéristiques morphologiques du secteur d'Enchastrayes.....	- 130 -
Fig. 3.16. Coupe géologique simplifiée du secteur d'Enchastrayes.	- 131 -
Fig. 3.17. Coupe géologique simplifiée du glissement de Bourre.....	- 132 -

Fig. 3.18. Localisation et caractéristiques principales des trois bassins versants de l'Adret.	- 134 -
Fig. 3.19. Photographies illustrant les principales caractéristiques morphologiques du versant Adret.	- 135 -
Fig. 3.20. Carte morphodynamique du bassin versant du torrent de Faucon.....	- 136 -
Fig. 3.21. 'Mouvements de versant' du bassin versant du Faucon.....	- 137 -
Fig. 3.22. Carte morphodynamique du bassin versant du torrent du Bourget.	- 138 -
Fig. 3.23. Carte morphodynamique du bassin versant du torrent de Sanières.	- 140 -
Fig. 3.24. Fiche descriptive synthétique des écroulements (rock falls).....	- 143 -
Fig. 3.25. Fiche descriptive synthétique des glissements banc sur banc (rock block slides).....	- 144 -
Fig. 3.26. Fiche descriptive synthétique des glissements translationnels rocheux (rock slides).....	- 145 -
Fig. 3.27. Fiche descriptive synthétique des mouvements composites et complexes (complex slides –earthflow).....	- 146 -
Fig. 3.28. Fiche descriptive synthétique des glissements translationnels complexes (complex translational slides).....	- 147 -
Fig. 3.29. Fiche descriptive synthétique des glissements rotationnels de berge (rotational slides).....	- 148 -
Fig. 3.30. Distribution par taille des 'mouvements de versant' dans le bassin de Barcelonnette.	- 150 -
Fig. 3.31. Pourcentage de 'mouvements de versant' selon le type, l'activité, la pente moyenne et leur profondeur pour les versants Ubac, Adret et pour l'ensemble du Bassin de Barcelonnette.....	- 151 -
Fig. 3.32. Relation entre la profondeur et l'activité des 'mouvements pour les versant' pour les versants Ubac, Adret et pour l'ensemble du bassin de Barcelonnette.....	- 152 -
Fig. 3.33. Distribution par taille de la totalité des 'mouvements de versant' du versant Ubac.	- 153 -
Fig. 3.34. Proportion des différents types de 'mouvements de versant' selon leur activité, leur profondeur et leur pente moyenne (versant Ubac).....	- 154 -
Fig. 3.35. Proportion de 'mouvements de versant' selon le type, l'activité, la pente moyenne et l'épaisseur pour les trois grands secteurs du versant Ubac.....	- 155 -
Fig. 3.36. Classification de l'activité des 'mouvements de versant' avec le meilleur jeu de variables discriminantes suivant le premier plan factoriel.....	- 160 -
Fig. 3.37. Mesures nécessaires pour le calcul des indices morphométriques.	- 163 -
Fig. 3.38. Classification des 'mouvements de versant' avec le meilleur jeu de variables discriminantes suivant le premier plan factoriel.	- 166 -
Fig. 4.1. Représentation schématique de la stratégie d'acquisition d'un MNT adapté au site d'étude pour une échelle du 1/10 000 ^{ème}	- 175 -
Fig. 4.2. Localisation et caractéristiques des secteurs tests pour l'acquisition du MNT adapté.	- 176 -
Fig. 4.3. RMSE calculées sur les dérivées pour différentes résolutions de MNT issues d'interpolations par la technique de krigeage.	- 176 -
Fig. 4.4. RMSE calculées pour les MNT d'une maille de 10 m générés avec différentes séries de triplets.....	- 177 -
Fig. 4.5. RMSE calculées pour les MNT interpolés par différentes techniques (maille de 10 m).	- 178 -
Fig. 4.6. Exemples d'erreurs générées par les différents algorithmes d'interpolation sur les dérivées.....	- 178 -
Fig. 4.7. MNT dérivé de la BD Alti® ré-échantillonnée au pas de 10 m et ses dérivées premières.	- 181 -
Fig. 4.8. MNT optimisé pour le bassin de Barcelonnette et ses dérivées premières.	- 182 -
Fig. 4.9. MNT du Moulin et ses dérivées.	- 184 -
Fig. 4.10. Nomenclature et répartition des classes pour les bases de données acquises pour le bassin de Barcelonnette.....	- 186 -
Fig. 4.11. BD 'occupation du sol' produites spécifiquement pour le bassin de Barcelonnette (localisation centrée sur Bois Noir et le torrent de la Frache).....	- 188 -
Fig. 4.12. Occupation du sol du BVRE du Moulin.	- 189 -
Fig. 4.13. Répartition des classes d'occupation du sol pour chaque base de données acquise.	- 190 -

Fig. 4.14. Répartition des classes d'occupation du sol pour chaque base de données construite.....	- 191 -
Fig. 4.15. Type et répartition des formations superficielles du bassin de Barcelonnette.....	- 193 -
Fig. 4.16. Répartition et description des formations superficielles du BVRE du Moulin.....	- 195 -
Fig. 4.17. Epaisseurs estimées et répartition des dépôts morainiques du bassin de Barcelonnette.....	- 196 -
Fig. 4.18. Lithologie du bassin de Barcelonnette et distribution des classes par versant.....	- 197 -
Fig. 4.19. Lithologie du BVRE de Draix.....	- 198 -
Fig. 4.20. Carte des failles observées et supposées du bassin de Barcelonnette.....	- 198 -
Fig. 4.21. Localisation des affleurements rocheux et de leur pendage par rapport à la pente.....	- 199 -
Fig. 4.22. Localisation des affleurements rocheux et de leur pendage par rapport à la pente dans le BVRE du Moulin.....	- 200 -
Fig. 5.1. Représentation schématique des zones d'un mouvement de versant et méthodologie d'optimisation de la VM.....	- 210 -
Fig. 5.2. Représentation schématique de l'analyse de sensibilité mise en place pour identifier les variables prédictives pour chaque variable à modéliser retenue.....	- 211 -
Fig. 5.3. Types et zones de 'mouvements de versant' retenus pour la stratégie d'analyse des VP (facteurs de prédisposition principaux).....	- 212 -
Remarque : Les lettres correspondent aux localisations des différents 'mouvements de versant' détaillés dans la figure 5.3.....	- 213 -
Fig. 5.4. Localisation sur le versant Ubac des 'mouvements de versant' retenus pour l'identification des facteurs de prédisposition.....	- 213 -
Fig. 5.5. Fréquence des gradients de pente selon le MNT et les différents types de VM par type de 'mouvements de versant'.....	- 215 -
Fig. 5.6. Fréquences obtenues entre la VM1 et la VP 'exposition des versants' issue de la BD Alti ® et BD ALARM.....	- 216 -
Fig. 5.7. Fréquence des différentes VP issues des BD 'occupation du sol' disponibles (CLC1, CLC2, CRIGE) selon la VM.....	- 218 -
Fig. 5.8. Fréquence des différentes VP issues des BD 'occupation du sol' (BD ALARM et BD ALARMc) produites spécifiquement pour selon la VM.....	- 219 -
Fig. 5.9. Distribution des différentes formations superficielles et de leurs épaisseurs pour la VM3 selon les différents types de 'mouvements de versant'.....	- 221 -
Fig. 5.10. Distribution des classes de pendage pour VM3 pour trois types de 'mouvements de versant'.....	- 222 -
Fig. 5.11. Fréquences cumulées des distances aux cours d'eau en mètres.....	- 223 -
Fig. 6.1. Carte 'expert' (qualitative) des 'mouvements de versant' du versant Ubac.....	- 234 -
Fig. 6.2. Exemples illustrant la démarche adoptée pour la cartographie 'expert' du bassin de Barcelonnette.....	- 236 -
Fig. 6.3. Intégration de l'extension amont-aval et latérale des 'mouvements de versant' pour la cartographie 'expert' : exemple du glissement-coulée de Poche (glissement complexe et composite).....	- 236 -
Fig. 6.4. Méthodologie utilisée pour l'évaluation de la susceptibilité aux 'mouvements de versant' par méthode semi-quantitative fondée sur la théorie des Logiques floues.....	- 240 -
Fig. 6.5. Localisation du secteur test d'application d'une méthode semi-quantitative basée sur la théorie des Logiques floues (versant Ubac, bassin de Barcelonnette).....	- 244 -
Fig. 6.6. Cartes représentant les VP utilisées pour l'analyse semi-quantitative du secteur test.....	- 245 -
Fig. 6.7. Valeurs d'appartenance pour les VP 'constantes' pour chaque type de 'mouvements de versant'.....	- 246 -
Fig. 6.8. Erreurs relatives (ξ) des classes de VP posant des problèmes de détermination des valeurs d'appartenance.....	- 247 -
Fig. 6.9. Exemple de combinaison de VP avec l'opérateur flou SOMME pour obtenir une NVP ; application aux mouvements translationnels complexes.....	- 250 -

Fig. 6.10. Exemples de cartes de susceptibilité obtenues par Logiques floues pour les glissements translationnels complexes et rotationnels de berge avec le meilleur jeu de VP et les opérateurs SOMME ou γ ($\gamma=0.975$). ..	253 -
Fig. 6.11. Cartes de susceptibilité produites par approches semi-quantitative et qualitative ('expert') pour le secteur de calage.....	254 -
Fig. 6.12. Carte des différences entre les surfaces reconnues en susceptibilité forte pour la carte 'expert' et la carte semi-quantitative unifiée.....	256 -
Fig. 6.13. Analyse comparative des résultats, fiche n°1 : problème de la zone tampon 'hydrologie' pour les glissements de berge dans le secteur de Bois Noir.....	257 -
Fig. 6.14. Analyse comparative des résultats, fiche n° 2 : problème de caractérisation globale dans le secteur de l'Abriès.....	258 -
Fig. 7.1. Représentation schématique de la stratégie de cartographie de susceptibilité par étapes successives pour les approches probabilistes et choix de la meilleure approche d'analyse spatiale par SIG.	270 -
Fig. 7.2. Représentation schématique des cellules prises en compte pour retenir le jeu de cellules représentatif pour les VM de chaque type de 'mouvements de versant'.....	272 -
Fig. 7.3. Erreur relative (ξ) et identifications de seuils pour identifier les classes de susceptibilité des simulations selon différentes quantités de cellules introduites dans l'approche probabiliste bivariée	275 -
Fig. 7.4. Interprétation et regroupements des classes de la NVP pour les glissements translationnels complexes à partir de quatre plans factoriels construits avec les quatre premières composantes de l'ACM.	279 -
Fig. 7.5. Exemples de cartes de susceptibilité et de courbes de ppost cumulées obtenues avec la Théorie de l'évidence après calage.....	281 -
Fig. 7.6. Exemples de simulations sans NVP et avec NVP.....	282 -
Fig. 7.7. Exemples de cartes de susceptibilité simulées par Régressions logistiques.....	284 -
Fig. 7.8. Courbes de prédiction des simulations par Théorie de l'évidence et par Régressions logistiques pour chaque type de 'mouvements de versant'.	286 -
Fig. 7.9. Courbes de prédiction des simulations par Théorie de l'évidence et par Logiques floues pour chaque type de 'mouvements de versant'.	289 -
Fig. 7.10. Cartes de susceptibilité unifiées simulées par la Théorie de l'évidence et l'approche semi-quantitative par logiques floues pour le site de calage.....	292 -
Fig. 7.11. Carte des différences entre les surfaces reconnues en susceptibilité forte pour la carte 'expert' et les surfaces simulées en susceptibilité forte par les approches semi-quantitative et probabiliste pour le site de calage.. ..	293 -
Fig. 7.12. Analyse comparative des résultats, fiche n°1 : problème de la zone tampon 'hydrologie' pour les glissements de berge dans le secteur de Bois Noir.....	294 -
Fig. 7.13. Analyse comparative des résultats, fiche n° 2 : problème de caractérisation globale et particulière pour les glissements d'interfluves dans le secteur de l'Abriès.....	295 -
Fig. 7.14. Analyse comparative des résultats, fiche n° 3 : problème d'identification pour les glissements translationnels superficiels de berge dans le secteur du torrent de Poche.....	296 -
Fig. 7.15. Carte de susceptibilité 'expert' et unifiée obtenue par Théorie de l'évidence pour le versant Ubac.....	299 -
Fig. 7.16. Cartes de susceptibilité 'expert' et simulée unifiée obtenue par Théorie de l'évidence pour le versant Adret.....	302 -
Fig. 7.17. Carte de susceptibilité des glissements banc sur banc pour le bassin versant du Moulin.	304 -
Fig. 7.18. Exemples de glissements banc sur banc le long de diaclases parallèles à la pente dans le bassin versant du Moulin.	304 -
Fig. 8.1. Description des conditions de rupture observées pour des glissements profonds et superficiels	311 -
Fig. 8.2. Modèle à base physique utilisé : conceptualisation et représentation schématique.....	313 -
Fig. 8.3. Représentation du modèle d'infiltration de Green et Ampt (1911).	315 -
Fig. 8.4. Modèle de pente infinie.....	316 -

Fig. 8.5. Localisation du sous bassin de Bois Noir et caractéristiques géomorphologiques.....	-318 -
Fig. 8.6. Cartes de susceptibilité 'expert' et simulée par la Théorie de l'évidence sur le site de Bois Noir.....	- 319 -
Fig. 8.7. Courbes hauteur-durée-fréquence des précipitations (loi de Montana bilinéaire) et précipitations caractéristiques pour une période de retour de 10 ans	-320 -
Fig. 8.8. Analyse de sensibilité des paramètres du noyau de base de STARWARS exprimée comme une variation de la quantité d'eau stockée dans le profil.	-321 -
Fig. 8.9. Variables utilisées pour les simulations hydrologique et géotechnique du sous bassin de Bois Noir.	-323 -
Fig. 8.10. Cartes de l'hydrologie simulée et observée et des facteurs de sécurité associés pour le sous bassin de Bois Noir au 12 mars 1978.	-323 -
Fig. 8.11. Simulations des niveaux de nappes et des coefficients de sécurité associés pour la période 1961-2004 au sous bassin de Bois Noir.....	- 3254 -
Fig. 8.12. Changements morphologiques observés par photo-interprétation sur le secteur du sous bassin de Bois Noir entre 1971 et 1982.	-325 -
Fig. 8.13. Carte de probabilité de rupture simulée pour la période de 1961-2004 pour le sous bassin de Bois Noir.	-326 -
Fig. 8.14. Stratégie utilisée pour l'approche n°2 de cartographie de l'aléa.	-327 -
Fig. 8.15. Paramètres utilisés dans le modèle.....	-328 -
Fig. 8.16. Distribution des pluies, des teneurs en eau et des distributions d'eau journaliers au poste de la Rente et fonctions de probabilités de type gamma inverse dérivées.....	-329 -
Fig. 8.17. Résultats des simulations de probabilité de rupture selon 200 combinaisons possibles.....	- 330 -
Fig. 8.18. Comparaison des seuils critiques de précipitations identifiés pour l'analyse de l'aléa dans le bassin de Barcelonnette et d'autres sites aux caractéristiques climatiques semblables.....	- 331 -
Fig. 8.19. Matrice de croisement pour la définition des classes d'aléa.	- 332 -
Fig. 8.20. Cartes d'aléa (probabilité de rupture) simulées pour le versant Ubac.	- 332 -
Fig. 8.21. Carte de susceptibilité simulée par la Théorie de l'évidence et carte d'aléa obtenue en combinant carte de susceptibilité et approche probabiliste de l'aléa.....	- 333 -

TABLE DES TABLEAUX

Tab. 1.1. Les différentes échelles d'analyse retenues pour l'évaluation de l'aléa 'mouvements de versant'	24 -
Tab. 1.2. Avantages, inconvénients et précision spatiale du découpage par unité homogène pour la cartographie statistique de l'aléa 'mouvements de versant'	33 -
Tab. 1.3.a. Avantages, inconvénients et utilité des SIG pour les méthodes d'évaluation de la susceptibilité et de l'aléa à différentes échelles.....	56 -
Tab. 1.3.b. Avantages, inconvénients et utilité des SIG pour les méthodes d'évaluation de la susceptibilité et de l'aléa à différentes échelles.....	57 -
Tab. 1.4. Etapes et temps de travail pour l'évaluation de l'aléa 'mouvements de versant' de manière manuelle et sous un environnement SIG pour différentes échelles de travail.	60 -
Tab. 1.5. Inventaire des données d'entrée nécessaires pour l'évaluation de la susceptibilité et de l'aléa 'mouvements de versant' à l'échelle du bassin versant.	62 -
Tab. 3.1. Typologie des 'mouvements de versant et caractéristiques observées sur le terrain dans le bassin de Barcelonnette.....	142 -
Tab. 3.2. Variables et coefficients retenus pour l'élaboration d'un Indice de Confiance Cartographique (ICC)	156 -
Tab. 3.3. Règles retenues pour élaborer les classes d'ICC.	157 -
Tab. 3.4. Description des 11 variables explicatives pour l'activité des 'mouvements de versant' et coefficients affectés selon les différentes classes retenues.	158 -
Tab. 3.5. Résultats par itérations successives et variables discriminantes retenues de l'ADL pas à pas pour l'activité des 'mouvements de versant'.....	159 -
Tab. 3.6. Résultats intra groupes de l'ADL pas à pas pour l'activité des 'mouvements de versant'.	161 -
Tab. 3.7. Indices morphométriques pour l'analyse discriminante.....	163 -
Tab. 3.8. Quelques indices morphométriques dérivés pour les 'mouvements de versant' du versant Ubac. ...	164 -
Tab. 3.9. Résultats par itérations successives et variables discriminantes retenues de l'ADL pas à pas pour la typologie des 'mouvements de versant'.....	165 -
Tab. 3.9. Résultats intra groupe de l'ADL pas à pas pour la typologie des 'mouvements de versant'.	167 -
Tab. 4.1. RMSE et indice de qualité pour les MNT interpolé avec le semi-variogramme n°3.....	179 -
Tab. 4.2. RMSE et indices de qualité pour le MNT BB et la BD Alti ®.	180 -
Tab. 4.3. Spécificités de la BD altimétrique (Lidar aéroporté) de Draix et du BVRE du Moulin.	183 -
Tab. 4.3. Spécificités de la BD altimétrique (Lidar aéroporté) de Draix et du BVRE du Moulin.	183 -
Tab. 4.4. Nomenclature des différentes BD 'occupation du sol'.	187 -
Tab. 4.5. Caractéristiques des formations superficielles du bassin de Barcelonnette.	192 -
Tab. 4.6. Synthèse des variables acquises et produites spécifiquement pour cette recherche.	201 -
Tab. 5.1. Variables retenues suivant la méthode d'analyse.	207 -
Tab. 5.2. Stratégie retenue pour le choix des VP dans le cadre d'une analyse de susceptibilité aux 'mouvements de versant' pour l'inventaire des publications consultées.	208 -

Tableau 5.3. Caractéristiques générales des VP disponibles et produites spécifiquement pour une même information.	- 214 -
Tab. 5.4. Variables de base retenues pour chaque type de 'mouvement de versant'.....	- 224 -
Tab. 6.1. Caractéristiques retenues pour les 'mouvements de versant'.	- 228 -
Tab. 6.2. Analyse qualitative du gradient de pente associé à chaque type de 'mouvement de versant'.	- 229 -
Tab. 6.3. Classes de gradient de pente retenues pour la cartographie 'expert'.....	- 229 -
Tab. 6.4. Classes d'occupation du sol retenues pour la cartographie 'expert'.....	- 229 -
Tab. 6.5. Dégradation de l'occupation du sol retenue pour les secteurs sans 'mouvements de versant'.	- 231 -
Tab. 6.6. Classes de formations superficielles retenues pour la cartographie 'expert'.....	- 232 -
Tab. 6.7. Classes de susceptibilité expertes et règles associées.	- 233 -
Tab. 6.8. Exemples de secteurs de la carte 'expert' sujets à discussion.	- 237 -
Tab. 6.9. VP utilisées pour l'analyse de sensibilité sur les valeurs d'appartenance.....	- 242 -
Tab. 6.10. Statistiques dérivées du tableau de contingence.....	- 243 -
Tab. 6.11. Valeurs d'appartenance pour chaque classe de VP retenues pour l'analyse semi-quantitative.....	- 248 -
Tab. 6.12. Valeurs d'appartenance des NVP obtenues par l'opérateur algébrique SOMME pour chaque type de 'mouvements de versant'.	- 249 -
Tab. 6.13. Exemple de résultats de simulations avec des NVP et des opérateurs différents pour chaque type de 'mouvements de versant'.	- 252 -
Tab. 6.14. Indices de qualité dérivés du tableau de contingence.	- 255 -
Tab. 7.1. Critères d'évaluation et de validation pour obtenir une carte de susceptibilité aux 'mouvements de versant' et tests et niveaux de qualité associés.....	- 269 -
Tab. 7.2. Caractéristiques des VM introduites dans le modèle d'analyse spatiale par Théorie de l'évidence pour identifier le nombre et la localisation des cellules les plus représentatives.....	- 271 -
Tab. 7.3. Erreur relative (ξ) associée aux simulations réalisées avec différentes localisations de cellules représentant la VM3.	- 275 -
Tab. 7.4. Exemples de résultats des tests de corrélation et d'association entre VMg et différentes VP pour les glissements translationnels complexes.....	- 276 -
Tab. 7.5. Contribution des VP à la variance des axes 1 à 4 pour les six types de 'mouvements de versant'...-	- 277 -
Tab. 7.6. Contributions et valeurs-tests calculées pour chaque classe de VP lors de l'AMC réalisée pour des glissements translationnels complexes.....	- 278 -
Tab. 7.7. Sensibilité des simulations pour chaque type de 'mouvements de versant' : erreur relative et résultats de la dépendance conditionnelle pour les meilleures combinaisons de VP et NVP.	- 280 -
Tab. 7.8 Confiance statistique des meilleures simulations par type de 'mouvements de versant' par Théorie de l'évidence.....	- 283 -
Tab. 7.9. Erreur relative pour les meilleures simulations obtenues par Théorie de l'évidence et Régressions logistiques pour chaque type de 'mouvements de versant'.....	- 285 -
Tab. 7.10. Erreur relative pour les meilleures simulations obtenues par Théorie de l'évidence et Régressions logistiques pour chaque type de 'mouvements de versant'.....	- 290 -
Tab. 7.11. Indices de qualité dérivés du tableau de contingence.	- 291 -
Tab. 7.12. Erreur relative associée à chaque carte simulée par la Théorie de l'évidence sur le versant Ubac et Adret.	- 300 -
Tab. 7.13. Indices de qualité dérivés du tableau de contingence pour les cartes simulées transposées sur la totalité du versant Ubac et sur le versant Adret.	- 301 -
Tab. 8.1. Paramètres d'entrée pour le modèle hydrologique et géotechnique.	- 317 -

Annexe 1. Critères de classifications des ' <i>mouvements de versant</i> '	- 377 -
Annexe 2.1. Exemples de codes couleurs de la RCP 77 (CNRS, 1970)	- 386 -
Annexe 2.2. Légende de la carte morphodynamique.....	- 391 -
Annexe 3.1. Caractéristiques des ' <i>mouvements de versant</i> ' du bassin de Barcelonnette par versants.....	- 394 -
Annexe 3.2. Caractéristiques des ' <i>mouvements de versant</i> ' de l'ubac par grands secteurs	- 396 -
Annexe 3.3. Caractéristiques morphométriques des ' <i>mouvements de versant</i> ' de l'ubac.....	- 398 -
Annexe 3.4. Caractéristiques morphométriques ' <i>dérivées</i> ' des ' <i>mouvements de versant</i> ' de l'Ubac	- 400 -
Annexe 4.1. Méthode d'acquisition d'un semi de points pour une base de données altimétrique	- 402 -
Annexe 4.2. Méthodes empiriques pour évaluer une maille théorique de mnt -	403 -
Annexe 4.3. Les différentes méthodes d'interpolation sélectionnées	- 405 -
Annexe 4.4. Caractéristiques des semi-variogrammes pour les secteurs tests ..	- 408 -
Annexe 4.5. Tests de précision utilisés pour l'analyse de sensibilité des MNT -	409 -
Annexe 4.6. Nomenclature de la base de données occupation du sol CLC.....	- 410 -

Annexe 4.7. Métadonnées et description des classes de sol pour la BD 'occupation du sol' ALARM et ALARMc	- 411 -
Annexe 6. Principes des Logiques floues	- 415 -
Annexe. 7.1. Analyse bivariée par Théorie de l'evidence : principes.....	- 420 -
Annexe 7.2. Le modèle de Régression logistique	- 424 -
Annexe 7.3. Nombre de VM retenues et nombre de cellules représentatives pour la recherche du jeu de cellules optimum pour les modèles d'analyse spatial probabilistes.....	- 426 -
Annexe 7.4. Analyse des correspondances multiples (ACM) : principes.....	- 428 -
Références bibliographiques - Annexe.....	-429-

ANNEXE 1. CRITERES DE CLASSIFICATIONS DES 'MOUVEMENTS DE VERSANT'

Les 'mouvements de versants' font partie des mouvements de masse qui réunissent les mouvements de terrain et les mouvements de sol, dus à la reptation du sol sous l'effet de la gravité, du gel/dégel ou le brassage des particules par activité biologique (Flageollet, 1989).

Ce sont des phénomènes hydro-gravitaires dont la forme et l'ampleur sont diverses en raison de la multiplicité des mécanismes d'initiation et d'évolution (érosion, dissolution, déformation et rupture sous charge statique ou dynamique...) liés à la topographie (pente du versant, dénivelée, forme du versant,...), à la lithologie (caractéristiques physiques et mécaniques des matériaux), à la structure géologique (pendage, fracturation, superposition des couches, etc.), aux nappes aquifères, à la teneur en eau des matériaux. Par définition, un mouvement de terrain est « *un déplacement gravitaire d'une masse de sol, de débris ou de roche déstabilisés sous l'effet de sollicitations naturelles (fontes de la neige, forte précipitations, tremblement de terre, action de la mer etc.) ou anthropiques (terrassement, exploitation du sous-sol, déboisement, pompage, etc.)* » (Flageollet, 1989 ; Cruden, 1991 ; Maquaire, 2002).

Ces phénomènes font l'objet de nombreuses recherches dans diverses disciplines (géomorphologie, géologie, mécanique des sols, géographie humaine, économie, aménagement etc.). Cette diversité a conduit à un champ lexical vaste aux définitions et classifications distinctes selon un ou plusieurs critères. Par conséquent, pour décrire un même phénomène, le vocabulaire utilisé peut-être hétérogène ce qui conduit à des ambiguïtés, surtout lorsque les termes anglais sont traduits de manière hasardeuse (Flageollet, 1989 ; Maquaire, 2002).

Afin d'éviter tout abus de langage, et d'utiliser une terminologie cohérente, il a été jugé essentiel de clarifier et définir les phénomènes analysés dans ce travail. Ainsi, cette annexe fait le point sur :

- (i) Les classifications existantes ;
- (ii) Les critères de classifications généralement utilisés en insistant sur la difficulté d'évaluer l'âge et l'activité des phénomènes ;
- (iii) La classification retenue pour cette recherche.

1.1. Classifications existantes

La **classification internationale proposée par Varnes** (1978, 1984) est généralement la plus utilisée. Reprise entre autres par Cruden et Varnes (1996), elle se base sur deux grands critères :

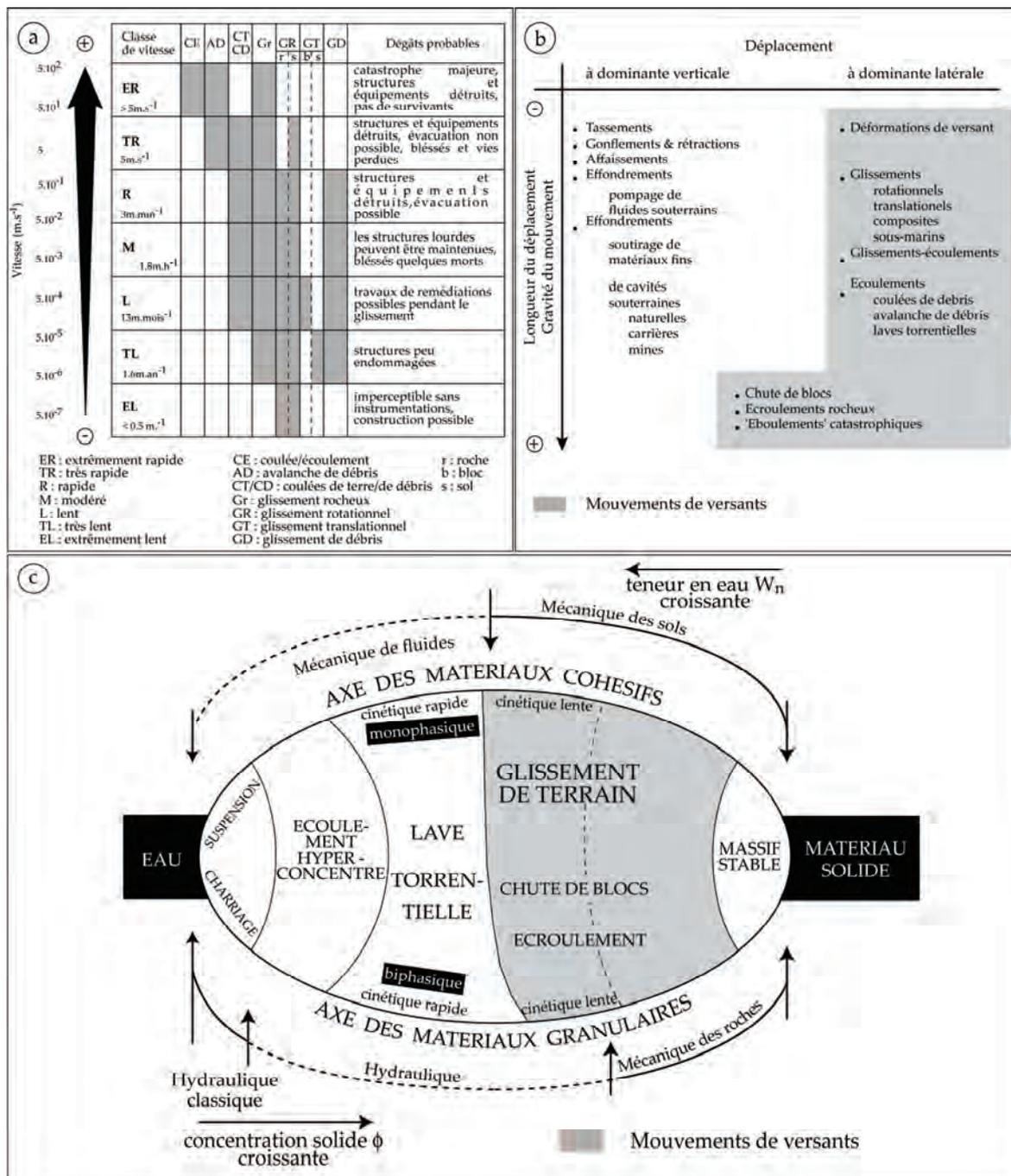
- (i) les processus ;
- (ii) les mécanismes d'initiation.

A ces critères s'ajoutent s'ajoutent la **vitesse de déplacements** (Fig. A1.a), **l'activité et la morphologie** des phénomènes.

Flageollet (1989) préfère prendre en compte la composante principale du déplacement (Fig. A1.b) en distinguant la **composante verticale** (famille des affaissements et effondrements) et la **composante latérale** (famille des 'mouvements de versant' au sens large ou *Landslides*).

Enfin, certains comme Meunier (1991) se basent de la **proportion relative de matériaux solide et d'eau** (Fig. A.1.c). Cette classification permet de distinguer la transition entre les différents domaines de la mécanique des roches, des sols et des fluides et de l'hydraulique torrentielle.

Depuis, quelques tentatives d'**harmonisation** ont été proposées, comme par exemple Leroueil *et al.* (1996) qui se base sur **trois critères principaux comme le type de matériau, le type de mouvement et le stade d'activité du mouvement**, ou encore celle de Dikau *et al.* (1996) qui décrivent les **mécanismes de rupture et d'évolution des phénomènes**.



a. D'après le degré de dégâts engendrés selon la vitesse du phénomène (Cruden et Varnes, 1996). b. D'après le degré de dégâts engendrés par type de phénomène (Flageollet, 1989). c. D'après les domaines de comportement des matériaux (Meunier 1991).

Fig. A1. Exemples de classification des mouvements de terrain.

1.2. Critères de classification

Si les classifications énumérées précédemment tiennent compte de critères différents, certains reviennent régulièrement comme (WP/WLI, 1990, 1991, 1993a et b, 1994 ; Dikau et al., 1996) :

- (i) La vitesse qui intervient directement sur l'appréciation de la vulnérabilité des éléments exposés (Cruden et Varnes, 1996) ;
- (ii) **L'activité** (actif, en suspens, réactivé, inactif ; Varnes, 1978 ; Mc Alpin, 1984 ; Wieczorek, 1984 ; Dikau *et al.*, 1996), qui se traduit par des formes topographiques particulières, plus ou moins adoucies par l'érosion ou par un état de la végétation différent (arbres morts, troncs déformés, etc..., Gueremy, 1987). Plusieurs états d'activité peuvent être retenus, par exemple Mc Alpin (1984), Wieczorek (1984) ou Dikau *et al.* (1996) en donnent sept ;
- (iii) **L'âge** qui peut être déterminé par la datation de végétaux fossilisés par la masse déplacée, par dendrochronologie ou par lichenométrie (Lang *et al.*, 1999).
- (iv) Le **degré de dégâts** potentiels engendré par les phénomènes. Proposée par Flageollet en 1989 (Fig.. A1.b), cette classification se base sur la longueur du phénomène et sa composante principale (verticale ou latérale) ;
- (v) La **proportion relative de matériau solide et d'eau** dans la masse déplacée (Meunier, 1991) ;
- (vi) Les **types de matériaux affectés** et leur comportement géotechnique (Sassa, 1985) ;
- (vii) **L'épaisseur et le type** et le matériau affecté (Lateltin *et al.*, 2005 ; Maquaire et Malet, 2006) ;
- (viii) La **répartition d'activité** (progressif, rétrogressif, bidirectionnel, régressif, limité, en mouvement, à élargissement latéral, Dikau *et al.*, 1996) ;
- (ix) la **morphologie** (simple, complexe, composite, emboîté, multiple, Cruden et Varnes, 1996) qui précisent toute éventuelle combinaison ou succession de mouvements élémentaires dans la zone instable.

La vitesse, l'activité liée à l'âge des phénomènes sont les critères qui reviennent le plus souvent, mais ce sont ceux qui posent le plus de problèmes. Ainsi, pour ces critères, les points suivant détaillent la difficulté d'obtenir une information de qualité et une nomenclature adaptée à l'échelle du 1/10 000^{ème}.

1.2.1. *La vitesse : critère principal pour évaluer le risque*

D'une manière générale, pour l'évaluation du risque '*mouvements de versant*', la **vitesse de déplacement** est considérée comme un des critères principaux de classification (Maquaire, 2002). Cette dernière intervient directement sur l'appréciation de la vulnérabilité des éléments exposés (Cruden et Varnes, 1996). Pour Varnes (1978) et Cruden et Varnes (1996 ; Fig. 1.1a) sept classes de vitesse sont déterminées : (i) extrêmement lent, (ii) très lent, (iii) lent, (iv) modéré, (v) rapide, (vi) très rapide, (vii) extrêmement rapide. Chaque classe est accompagnée d'une description du/des type(s) de réaction et des impacts significatifs en terme de vies humaines ou de dégâts aux constructions. Par exemple, si la vitesse du phénomène est élevée, son impact sur les biens et personnes sera plus fort, entraînant des dégâts matériels considérables et des pertes humaines (van Westen *et al.*, 2006).

Ce '*facteur*' vitesse est celui pris en compte dans le guide '*PPR mouvements de terrain*' (*Plans de Prévention des Risques*, MATE/MATL, 1999) pour distinguer les différents mouvements de terrain. Toutefois, une certaine simplification des classes est effectuée. En effet, les vitesses prises en compte par Varnes (1978) et Cruden et Varnes (1996) nécessitent des mesures pour chaque type de phénomène observé, ce qui pour une cartographie préventive et informative demanderait du temps et une multiplication de sites de mesures ce qui n'est pas en adéquation avec une mise en œuvre rapide de ce type de document reposant sur une appréciation qualitative du risque. Ainsi, deux ensembles sont différenciés avec :

- (i) Les **mouvements lents**, dont les déformations sont progressives avec ou sans rupture, mais en principe sans accélération brutale. Ces mouvements peuvent être surveillés et contrôlés, et ne menacent pas directement la sécurité des personnes. Toutefois, il faut tenir compte d'accélération brusques possibles comme par exemple à *La Salle en Beaumont (Isère)* en janvier 1994 où un glissement de type rotationnel fit 4 victimes et détruisit plusieurs habitations ;
- (ii) Les **mouvements rapides** comportant des accélérations brutales, avec deux sous-groupes selon le mode de propagation des matériaux, en masse ou à l'état remanié.

1.2.2. *L'âge et l'activité : critères indispensables pour une classification à l'échelle du 1/10 000^{ème}.*

A l'échelle du 1/10 000^{ème}, pour une cartographie prévisionnelle et préventive, un des objectifs est de pouvoir fournir une réponse à court terme sur le déclenchement ou la réactivation proche d'un mouvement de manière temporaire ou durable. **De ce fait, les critères pris en compte sont, en général, en plus de la vitesse des phénomènes, leur état d'activité, leur âge et leur fréquence (période de retour).**

L'**activité et l'âge** des phénomènes ont été définis dans plusieurs publications du milieu des années 80 au milieu des années 90 (Varnes, 1978 ; Palmquist et Bible, 1980 ; M^c Alpin, 1984 ; Wicczorek, 1984 ; Gueremy, 1987 ; Einstein, 1988 ; MATE/MATL, 1989 ; Bisci et Dramis, 1993 ; Tripet *et al.*, 1993 ; Quintlé, 1995 ; Cendrero et Dramis, 1996 ; Dikau *et al.*, 1996 ; Flageollet, 1996 ; González Díez *et al.*, 1996 ; Gueremy et Marre, 1996 ; Ibsen et Brunsden, 1996 ; Keaton et De Graaf, 1996 ; Panizza *et al.*, 1996 ; Corsini *et al.*, 1999 ; Corominas et Moya, 1999 ; Dikau et Schrott, 1999 ; González Díez *et al.*, 1999 ; Lang *et al.*, 1999). Dans la majorité des cas, sont considérés trois niveaux d'activité (fossile, latent ou dormant, actif) qui peuvent être associé à une période donnée (Pléistocène, Holocène, actuel).

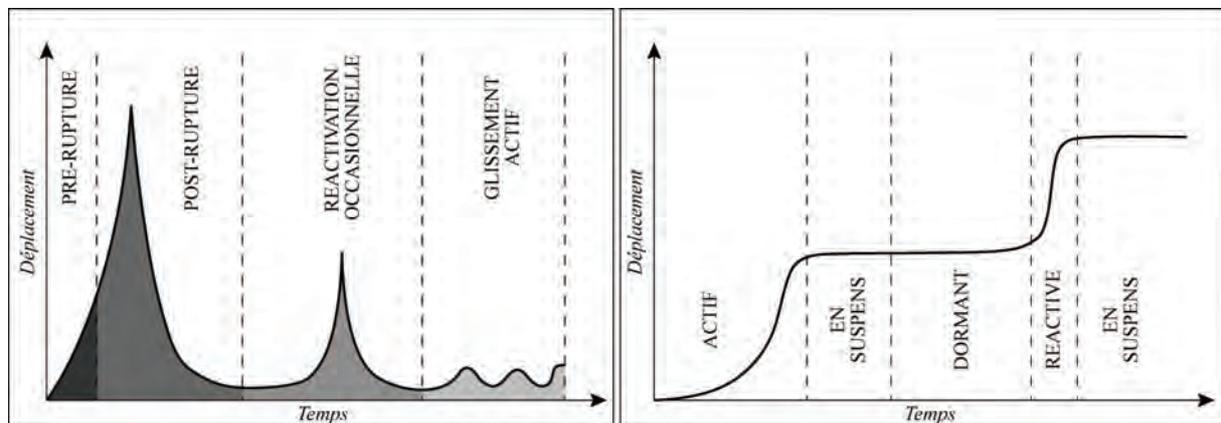


Fig. A1.2. Concept de déplacement et d'activité pour les 'mouvements de versant', l'échelle temps dépend des sites de recherches (adapté de Vaunat et Leroueil, 2002 et Dikau *et al.*, 1996).

Toutefois ces deux critères sont difficiles à mesurer. Ils se traduisent par des formes topographiques particulières plus ou moins adoucies par l'érosion ou par un état de la végétation différents des secteurs alentours (arbres morts, troncs déformés, etc., Gueremy, 1987). Ces deux critères peuvent aussi être différents d'un site à l'autre : par exemple, Crozier (1984) considère un mouvement comme latent si sa période de dernière activité remonte au delà de 10 000 ans ; pour Yanal et Uhui (1987), les 'mouvements de versant' sont considérés comme latent s'il n'y a pas eu d'activité depuis 1 000 ans ; enfin pour Gueremy et Marre (1996) les 'mouvements de versant' sont considérés comme latent si la période de dernière activité est de plus de 100 ans. A cette

information, pour avoir une évaluation complète de l'état d'activité, il est souvent joint le rythme d'évolution et la **fréquence du phénomène (période de retour)**.

La question est donc de savoir comment déterminer les périodes de référence et de retour à prendre en compte pour considérer un phénomène comme actif, latent ou fossile dans le cadre d'une classification des phénomènes ?

Pour cela la meilleure méthode est de recourir à un suivi des phénomènes par mesures de déplacement (Maquaire, 2002). Toutefois, pour un site étendu il n'est pas possible d'équiper tous les phénomènes, il faut alors recourir à des bases de données existantes, s'attacher à analyser les archives locales, effectuer une analyse des photographies aériennes sur plusieurs périodes, etc. Plusieurs axes de réflexion ont révélé qu'il n'existe pas de méthode idéale. Dans la majorité des cas, l'état d'activité est un compromis entre les informations disponibles, les données de terrain, la connaissance experte. Dans un cas extrême lorsque aucune information n'est disponible, une simple estimation est alors réalisée sur la base des observations de terrain et des critères morphologiques comme la fraîcheur des formes et/ou l'état de la végétation (Fig. A1.4). Si l'information est réellement incertaine les classes d'état d'activité pourront alors être simplifiées au maximum en distinguant seulement un état actif ou inactif.

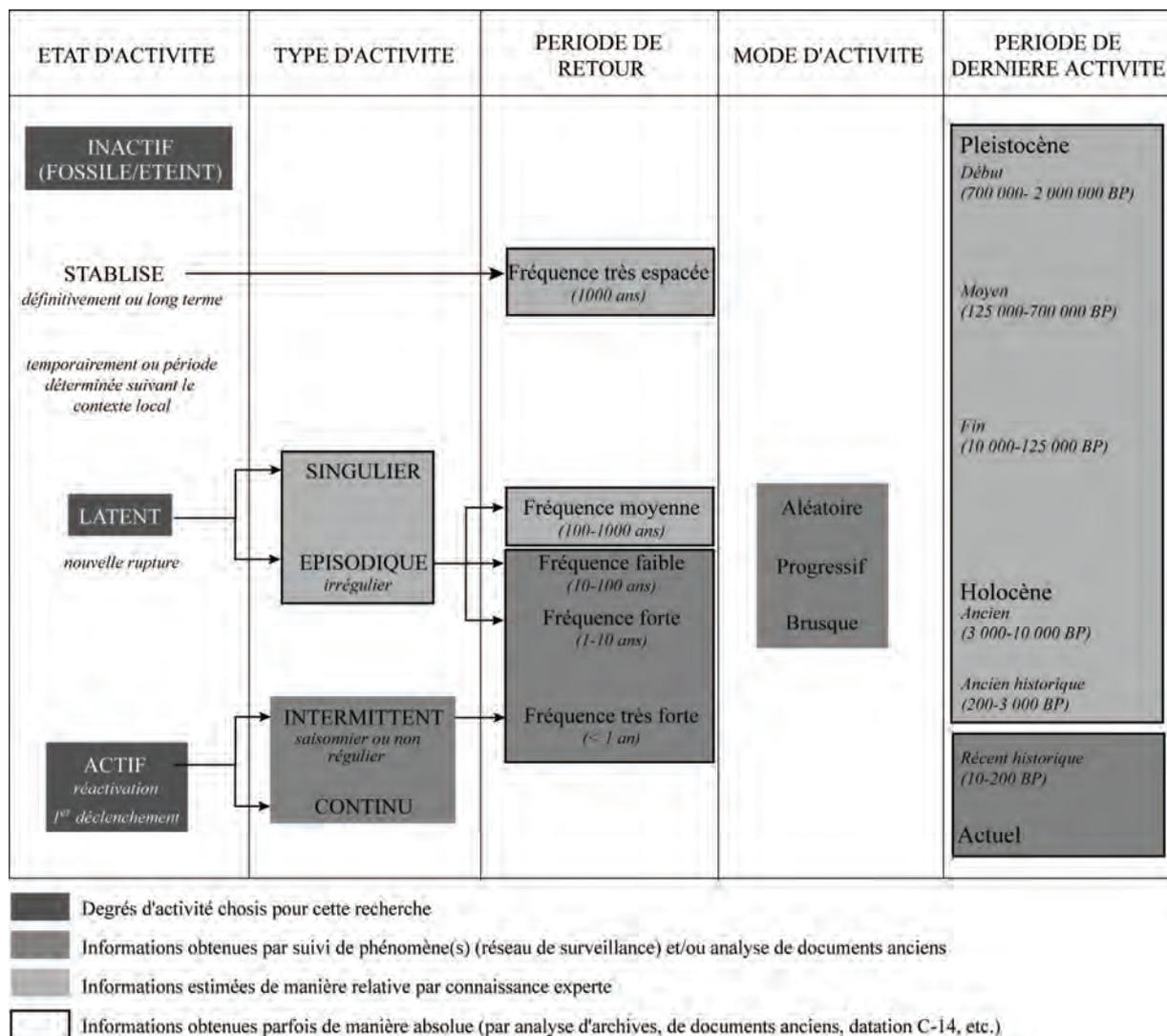


Fig. A1.3. Terminologie généralement adoptée pour classer l'activité des 'mouvements de versant' (adapté de Flageollet, 1996)

Malgré ces difficultés, quelques synthèses sont proposées sur la base de différentes informations sur la période de retour, l'activité considérée et l'âge de différents phénomènes (Flageollet, 1996 ; Keaton et De Graaf, 1996 ; Panizza *et al.*, 1996) comme par exemple les figures A1.3 et 4.

AGE	PERIODE DE RETOUR (return period)	CHANGEMENT MORPHOLOGIQUE	ACTIVITE (activity)	
<p>Présent</p> <p>↑</p> <p>Pléistocène</p>	1 jour	<p>Formes fraîches, la morphologie est distincte des alentours, les fissures sont bien visibles.</p>	<p>Continu (continuous)</p>	ACTIF (ACTIVE)
	1 an	<p>La morphologie reste différente de alentours, cependant, les formes sont plus douces que précédemment.</p>	<p>Fissures (cracks)</p> <p>Suspendu (suspended)</p> <p>Réactivé (reactivated)</p> <p>Intermittent (intermittent)</p>	
	10 ans	<p>Les formes sont modifiées par un drainage de surface, de l'érosion, le glissement se recouvre de végétation.</p>	<p>Abandonné (abandoned)</p> <p>Stabilisé (stabilised)</p> <p>Latent (dormant)</p>	INACTIF (INACTIVE)
	> 1000 ans	<p>Les formes sont légèrement perceptibles, il ne reste que des traces morphologiques du phénomène</p>	<p>Fossile (relict)</p>	

Fig. A1.4. Exemples de l'activité des phénomènes selon la morphologie, l'état d'activité et la période de retour (d'après, Varnes, 1978 ; Mc Alpin, 1984 ; Wiczorek, 1984 ; Dikau *et al.*, 1996 ; Flageollet, 1996 ; Keaton et De Graaf, 1996).

1.3. Classification des 'mouvements de versant' adoptée dans ce travail

La classification adoptée dans cette recherche est inspirée des travaux de Cruden et Varnes (1996) et de Dikau *et al.* (1996)¹ qui définissent six grands types de 'mouvements de versant' avec (i) les chutes, (ii) les basculements, (iii) les glissements, (iv) les déplacements latéraux, (v) les écoulements, (vi) les phénomènes complexes et composites (Tab. A1.1). Parmi les six grands types, les glissements de terrain seront principalement analysés dans cette recherche.

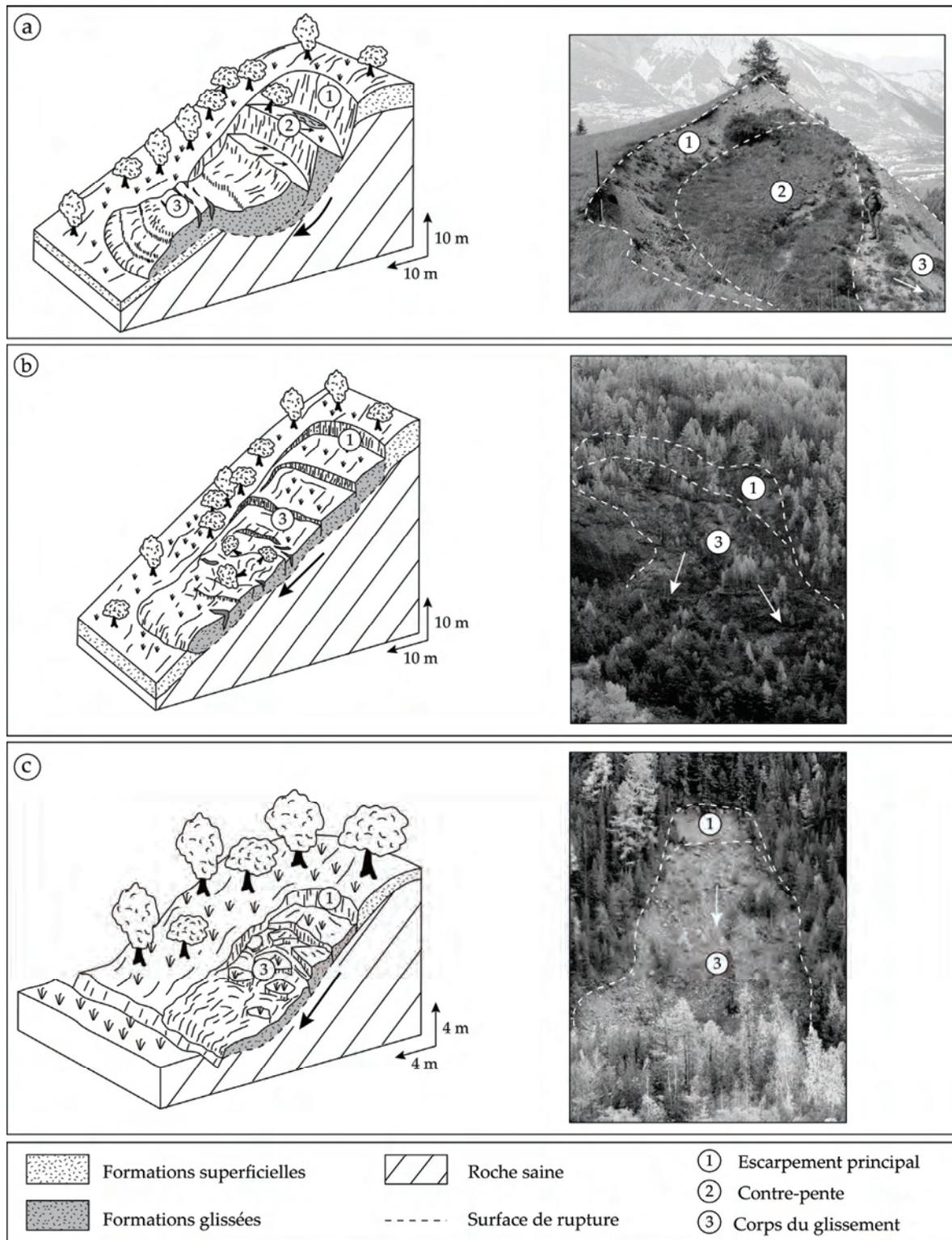
¹ Cette classification reprend les propositions et les classifications données dans le cadre du programme de recherche européen EPOCH. Elle offre le double avantage de détailler la morphologie des phénomènes et de les illustrer par divers schémas et photographies ce qui permet de les comparer avec nos observations et de limiter les erreurs d'interprétation.

Ils comprennent les mouvements rotationnels et les mouvements translationnels qui se différencient principalement par la forme de leur surface de rupture (Tab. A1.1 et Fig. A1.5a et b). Pour les types, les critères de description retenus sont :

(i) La **morphologie des phénomènes** ;

Tab. A1.1. Classification des 'mouvements de versant' (adaptée de Dikau et al., 1996a; et Maquaire, 2002). En gris les mouvements retenus pour cette recherche.

n°	Français	Anglais
i	Chute (de bloc, de pierre, de débris, de sol) : Eroulement rocheux	Fall (stone, pebble, boulder, debris, soil)
ii	Basculement (de roche, de débris, de sol)	Topple (rock, soil)
iiia	Glissement rotationnel : <ul style="list-style-type: none"> • Glissement simple (rotationnel), • Glissements emboîtés, • Glissements successifs 	Slide (rotational): <ul style="list-style-type: none"> • Single slide: slump (popular), rotational slip, rotational slide, • Multiple slide: multiple rotational landslide, multiple slump, • Successive slide: successive rotational landslide, successive slumping
iiib	Glissement translationnel : <ul style="list-style-type: none"> • Glissement de bloc, glissement banc sur banc • Glissement de sol, • Glissement rocheux, • Glissement de débris, • Glissement évoluant en coulée boueuse (foirage) 	Slide (translational): <ul style="list-style-type: none"> • Block slide: rock block slide, slab slide (for soil/earth), • Slab slide: debris block slide, soil block slide, earth block slide, sheet slide, flake slide, complex (association of rotational slide in up stream and translational slide in down stream), • Rock slide, • Debris slide: shallow translational slides, sheet slides, soil slips, • Mudslide
iv	Déplacement latéral : <ul style="list-style-type: none"> • Déplacement latéral de roches, • Déplacement latéral de sol 	Lateral spreading: <ul style="list-style-type: none"> • 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
v	Ecoulement : <ul style="list-style-type: none"> • Déformation lente de versant rocheux, fauchage, • Coulée boueuse, coulée de sable, • Lave torrentielle, • Coulée de débris 	Flow: <ul style="list-style-type: none"> • 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
vi	Phénomène complexe et composite : <ul style="list-style-type: none"> • Eboulement, éroulement de grande ampleur (d'extension catastrophique), • Glissement-coulée très rapide, • Glissement-coulée lent 	Complex and compound: <ul style="list-style-type: none"> • Rock avalanche: rockfall avalanche, rock-slide avalanche, rockfall-debris avalanche, • Flow slide, • Earthflow



a. Glissement de type rotationnel (iia, glissement simple, Tableau 1.1). b. Glissement de type translationnel (iib, glissement de sol, Tableau 1.1). c. Glissement translationnel (iib, glissement de débris, Tableau 1.1).

Fig. A1.5. Exemples de 'mouvements de versant' étudiés pour cette recherche.

- (ii) **L'épaisseur des phénomènes** (très superficiel, superficiel, profond, *very shallow, shallow, deep-seated*) ;
- (iii) Le **type de matériau affecté** (roche, roche dégradée, formations superficielles autochtones/allochtones, *bedrock, weathered bedrock, autochthonous/allochthonous superficial deposits*) ;
- (iv) La localisation (interfluves, versants proches des torrents ; Maquaire et Malet, 2006) ;
- (v) **L'état d'activité** qui sera l'objet d'un relevé minutieux et divers indices représentatifs des types de phénomènes.

Au total six types de 'mouvements de versant' sont donc définis avec :

- (i) **Les glissements translationnels complexes** (*translational complex slides*) ;
- (ii) **Les glissements translationnels superficiels de berge** (*very shallow translational slides* ou *debris slides*) ;
- (iii) **les glissements translationnels superficiels d'interfluves** (*very shallow translational slides* ou *debris slides*) ;
- (iv) **Les glissements rotationnels de berge** (emboîtés et successifs, *multiple rotational slides, successive rotational slides*) ;
- (v) **les glissements rotationnels d'interfluves** (simples ou emboîtés, *single rotational slide* ou *multiple rotational slides*) ;
- (vi) **Les glissements banc sur banc** (*rock block slides*) ;

On sera également amené à distinguer les chutes de blocs et écroulements (*falls, rock-falls*), les glissements complexes et composites (glissement-coulées lents, *earthflows*) et la solifluxion qui sont mentionnés dans l'inventaire des phénomènes mais qui ne sont pas utilisés pour la cartographie de l'aléa et la modélisation.

ANNEXE 2.1. EXEMPLES DE CODES COULEURS DE LA RCP 77 (CNRS, 1970)

1 . CONTEXTE STRUCTURAL

(2ème terme)

A . TYPE DE REGION STRUCTURALE . (case 1)

A l'échelle du 1:50 000ème, il sera exceptionnel que plusieurs régions structurales de type différent apparaissent sur une même feuille. Ce sera, cependant, le cas de massifs anciens et de leur couverture, de chaînes plissées et de leur piémont, de massifs volcaniques récents et de leur substratum. Il a été décidé d'affecter une couleur à chaque grand type de régions structurales.

1 - MASSIF ANCIEN



2 - COUVERTURE DU SOCLE



3 - CHAINE PLISSEE



4 - PIEMONT MOLASSIQUE



5 - ACCUMULATION VOLCANIQUE

B . LITHOLOGIE . (cases 2 et 4)

La variété des grands types de roches oblige à recourir aux lettres. Une combinaison de deux lettres permettra d'indiquer les faciès mixtes. De plus, le degré de consolidation figurera dans la case 4.

Le figuré lithologique se décompose en deux : un signe représentant le type de roche; une trame indiquant le degré de cohésion. Ainsi une roche meuble sera représentée sur fond blanc. Tous les autres types de roches seront figurés par un signe sur une trame, plus ou moins foncée selon le degré de cohésion. (Dans les figurés ci-dessous, il n'est pas tenu compte de cette trame).

1° - Les types de roches

Le type de roche (majuscules de A à Z) est défini à partir des critères usuels des géologues.

- ROCHES CRISTALLINES ET METAMORPHIQUES

AA - granite



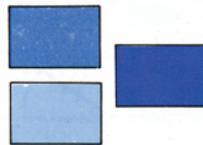
II . CONTEXTE MORPHOGENETIQUE

(3 ème terme)

A . SYSTEMES MORPHOGENETIQUES . (cases 1 à 3)

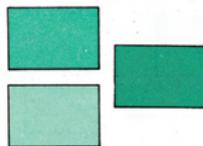
La notation du contexte morphogénétique doit permettre de faire apparaître des générations de formes successives , la forme la plus récente étant notée avant la forme la plus ancienne . Les types de systèmes morphogénétiques retenus pour la France sont individualisés chacun au moyen d'une couleur .

1 . ACTIONS MARINES ET LITTORALES Y COMPRIS LACUSTRES .



Cette rubrique doit englober tout ce qui est lié à la présence d'un littoral , y compris les dunes littorales . Les dunes littorales seront ainsi nettement distinguées des phénomènes éoliens de l'intérieur des terres , plus rares (dunes continentales d'Alsace , par exemple) . Ceci se justifie par le fait que la signification morphoclimatique des deux types de manifestations éoliennes est toute différente . Les actions éoliennes littorales se reproduisent dans des conditions climatiques variées , y compris tempérées , et semblent rares sous un climat froid . Au contraire les manifestations éoliennes terrestres sont caractéristiques de climats nettement plus froids que l'actuel (climats de steppes froides et de déserts périglaciaires) .

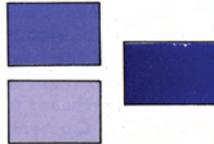
2 . ACTIONS FLUVIATILES



Une couleur spéciale a été adoptée pour ce type de dynamique , afin de souligner l'unité des phénomènes fluviaux et de donner une plasticité accrue aux cartes . En fait , la plus grande partie des terrasses date , en France , des périodes froides . Mais dans les cas douteux , ceux des nappes alluviales que l'on hésite à rapporter à des conditions périglaciaires ou tempérées , les divergences sont minimisées puisqu'elles apparaîtront au niveau des symboles indiquant l'âge . Les manifestations périglaciaires visibles dans les nappes alluviales , par contre , seront figurées dans la teinte périglaciaire . Tel sera le cas des cryoturbations , blocs transportés à l'état gelé , blocs glaciels , etc . . Il en sera de même des apports latéraux venant se mélanger dans les nappes alluviales , (coulées de solifluxion notamment) . Pour celle-ci le bord de la nappe alluviale sera figuré au moyen d'un mélange de signes granulométriques les uns de couleur "périglaciaire" , l'(apports latéraux) , les autres de couleur "fluviale" (apports longitudinaux) . L'examen du matériel (nature lithologique , morphométrie) fournit des critères objectifs solides pour cette distinction . Il est ainsi possible , grâce à

la solution adoptée de mettre clairement en lumière les rapports entre le façonnement des versants et la dynamique des fonds de vallées.

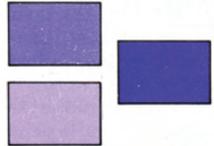
3. ACTIONS GLACIAIRES



Des problèmes analogues se posent à propos des manifestations glaciaires. On peut distinguer deux cas :

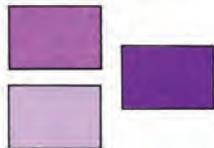
- les phénomènes juxta-glaciaires : ils seront traités suivant la règle qui vient d'être définie à propos des actions fluviales. Dans un dépôt de kame, par exemple, on figurera un mélange de matériel d'origine glaciaire et de matériel d'origine non glaciaire (périglacière par exemple). La forme elle-même sera figurée dans la couleur "glaciaire", puisqu'elle doit son existence au glacier.
- les nappes alluviales à l'aval des glaciers : près du front glaciaire la quasi-totalité du matériel est d'origine glaciaire et doit être figurée en teinte "glaciaire". Vers l'aval, la part des apports latéraux non-glaciaires augmente dans les nappes fluvio-glaciaires. Un mélange de signes granulométriques, les uns de la couleur "glaciaire" les autres de la couleur "fluviale", permettra de mettre ce fait en lumière. Seules les formes typiques de la marge glaciaire seront indiquées en couleur "glaciaire". Les formes fluviales banales apparaîtront en couleur "fluviale", le matériel permettant de faire apparaître jusque très loin du glacier l'influence de celui-ci (par exemple jusque dans la Crau ou le Bas-Rhône)

4. DOMAINE PERIGLACIAIRE HUMIDE



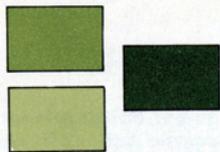
Il s'agit des manifestations du froid exigeant une humidité importante, principalement de la gélifluxion amorphe (head). Dans les régions de climat périglaciaire humide, on ne rencontre pratiquement pas de loess non-remaniés. L'Ouest et le Nord-Ouest de la France sont des régions typiques de ce domaine pendant la majeure partie du Würm.

5. DOMAINE PERIGLACIAIRE SEC



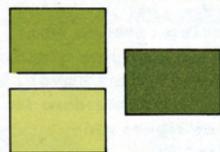
Il est défini par opposition au domaine périglaciaire humide. Les éolisations et les loess, et, dans une certaine mesure, les matériaux de gélifraction centimétriques, de type grève ou grève, en sont caractéristiques. Il semble qu'au Würm, dans une partie de la France du Nord, il y ait eu la succession d'un climat périglaciaire humide, à gélifluxion, puis d'un climat sec à éolisation et loess. Les conditions locales et régionales influent, bien entendu, sur leur importance respective et sur leur caractère plus ou moins typique. La distinction permet de mettre en évidence une telle succession. Il est toujours possible, lorsque la distinction ne peut être faite sur une coupure, de ne faire apparaître qu'un seul type de périglaciaire "indifférencié".

6 . DOMAINE TEMPERE HUMIDE



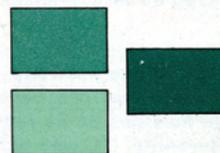
Il se définit par une couverture végétale dense, avec prédominance de la pédogénèse en surface. La façade occidentale de la France en offre, actuellement, une bonne image. Les mouvements de masse sont généralement importants. Le lessivage est intense. Dans diverses régions françaises, une phase de climat humide, caractérisée par d'importants mouvements de masse, a pu être mise en évidence au début de l'Holocène. Il sera possible de la distinguer des formes plus récentes en figurant ses effets sous la couleur "tempéré humide".

7 . DOMAINE TEMPERE SEC



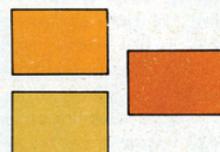
Il est particulièrement bien représenté, actuellement, dans les régions méditerranéennes à étés secs. La dégradation de la couverture végétale est facilitée et les phénomènes de morphogénèse anthropique prennent aisément des formes bien visibles (ravins notamment). Certains auteurs attribuent à des périodes de climat sec diverses formations du Quaternaire ancien. Ils pourront les mettre en évidence sur les cartes au moyen de la teinte particulière réservée à ce domaine.

8 . DOMAINE TROPICAL ET SUBTROPICAL HUMIDE



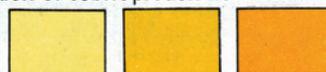
En France, les traces laissées par de tels climats remontent presque toutes au Tertiaire. Peu de formes subsistent. Ce sont surtout des formations superficielles qui sont parvenues jusqu'à nous, essentiellement des formations d'altération, initialement épaisses. Les granites pourris, les bauxites, certaines argiles à silex et meulière sont les manifestations les plus habituelles de telles conditions climatiques. Les formes reconnaissables les plus fréquentes sont des alvéoles, généralement modifiées par les systèmes morphoclimatiques ultérieurs. Quelques mornes rocheux, chaos de blocs et tors peuvent être attribués à des climats tropicaux et subtropicaux humides. Une telle interprétation doit naturellement s'appuyer sur des études poussées des types d'altération, parmi lesquelles des analyses minéralogiques d'argiles.

9 . DOMAINE TROPICAL ET SUBTROPICAL SEC



Comme pour le domaine précédent il s'agit essentiellement d'héritages du Tertiaire. Les épandages de sables de Lozère en sont un exemple. Les formes les plus fréquentes sont des glacis ou pédiments, dominés par des inselbergs plus ou moins dégradés par l'évolution ultérieure. Les mêmes précautions doivent être prises que pour les formes issues des climats tropicaux et subtropicaux humides.

... ACTIONS EOLIENNES

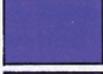
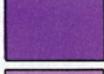
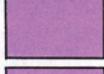
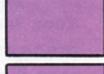
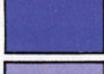
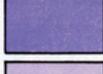
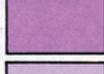
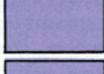
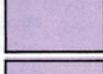
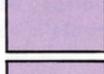
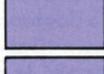
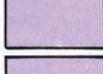
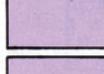
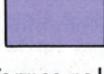
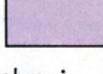
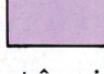


B . AGE

Il est essentiel de souligner le fait que nous insistons sur des générations de formes successives. Le système adopté, de nuances d'intensité dans une teinte, ne permet pas de distinguer plus de trois variantes dans un

même système morphogénétique. Quand elles sont possibles, les distinctions plus poussées ne peuvent être introduites qu'au moyen de symboles. Cette solution introduit beaucoup de souplesse et permet de ne pas mettre trop fortement en lumière des interprétations qui peuvent devoir être révisées. L'essentiel est la distinction entre périodes de climat froid, à manifestations périglaciaires ou glaciaires, et de périodes de climat tempéré caractérisées par une situation de biostasie.

Cas simples, échelle chronologique élémentaire.

1. Holocène	Q^0			
2. Würm	Q_1			
3. interglaciaire Riss-Würm	$Q'_{1,2}$			
4. Riss	$Q_{1,2}$			
5. Interglaciaire Mindel-Riss	$Q''_{1,2,3}$			
6. Mindel	$Q_{1,2,3}$			
7. Interglaciaire Gunz-Mindel	$Q'''_{1,2,3,4}$			
8. Gunz	$Q_{1,2,3,4}$			
9. Villafranchien supérieur	Q_V			

Cas complexes, formes polychroniques et âges imprécis.

Les formes polychroniques sont celles qui ont continué de se façonner de la même manière pendant plusieurs périodes différentes, comme c'est le cas de certains aplanissements (pédiments et glacis entre autres), certaines accumulations alluviales, certains versants, etc..

exemple : forme datant du Riss et du Würm : $Q_{1,2}$

Les formes d'âge imprécis pour lesquelles on hésite entre plusieurs périodes différentes sont notées en donnant les âges extrêmes en commençant par le plus ancien pour terminer par le plus récent :

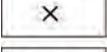
exemple : forme datant soit du Riss soit du Würm : $Q_{1,2}$

ANNEXE 2.2. LEGENDE DE LA CARTE MORPHODYNAMIQUE.

● Processus morphogénétique

Age estimé	Pléistocène		Holocène		Historique		Actuel	
	20 000 B.P.		10 000 B.P.		150 B.P.		Présent	
Degré d'activité	Fossile		Dormant		Actif			
Mouvements de versant					Intermittent		Permanent	
Action glaciaire								
Action périglaciaire								
Action fluviale								
Action torrentielle								
Action chimique								
Action anthropique								

● Formes et formations dues à l'action glaciaire

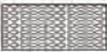
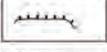
	Moraines
	Arc morainique
	Glacier rocheux
	Bloc ératique
	Rebord de formations glaciaires
	Terrasse de Kame
	Rebord de terrasse de Kame

● Formes et formations dues à l'action périglaciaire

	Tablier d'éboulis actif
	Tablier d'éboulis fixé
	Cône d'éboulis actif
	Cône d'éboulis fixé
	Colluvions marneux
	Autres colluvions

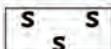
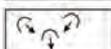
● Formes et formations dues à l'action de l'eau

- Ravinement	
	Secteur de ravines (bad-lands)
	Ravine simple
- Formes et formations lacustres	
	Tourbières
	Sagnes

- Formes et formations alluviales et torrentielles	
	Formations alluviales
	Formations torrentielles
	Rebord de terrasse
	Cône de déjection torrentiel
	Vallon en berceau
	Vallon en V

• **Formes et formations de 'mouvements de versant'**

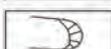
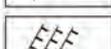
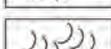
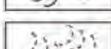
- Type de mouvement de versant

	Translational (translational slide)
	Rotationnel (rotational slide)
	Complexe à composante translationnel (translational complex)
	Glissement rocheux (rock-slide)
	Banc sur banc (rock-block slide)
	Eroulement (rock-fall)
	Solifluxion (solifluction)
	Mouvements superficiels

- Formations affectées

Ma	Marnes callovo-oxfordiennes
F	Flyschs
Mo	Moraines
Cm	Colluvions sur marne
Cf	Colluvions sur autre(s) formation(s)
E	Eboulis
A	Formations alluviales ou torrentielles

- Formes

	Escarpeement principal (forme fraîche)
	Escarpeement principal (forme estompée)
	Escarpeement principal (forme très estompée)
	Escarpeement secondaire
	Bourrelet frontal
	Bourrelet latéral
	Fissures
	Contre-pente
	Gradins multiples
	Bossellement
	Bossellement estompé

● **Autres formes et formations**

- Talus rocheux



Supérieure à 50 m



Entre 30 et 50 m



Inférieure à 30 m

- Autres



Chaos de blocs



Couloir d'éboulis et d'avalanche

● **Aménagement**



Bâti



Route



Piste



Canaux d'irrigation



Conduite souterraine



Captage



Réservoir

● **Lithologie**



Marnes



Flyschs

● **Hydrographie**



Cours d'eau permanent



Cours d'eau temporaire

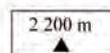


Source



Lac/étang

● **Topographie**



Point coté



Sommet



Courbes de niveaux

ANNEXE 3.1. CARACTERISTIQUES DES 'MOUVEMENTS DE VERSANT' DU BASSIN DE BARCELONNETTE PAR VERSANTS

N. = Nombre ; min. Minimum ; max. = Maximum ; \bar{x} = Moyenne ; σ = Ecart-type ; T. = Total ; GBB = Glissement bans sur banc ; GTR = Glissement translationnel rocheux ; GC = Glissement-coulée ; TSB = glissement translationnel de berge ; TSI = Glissement translationnel d'interfluve ; TC = Glissement translationnel complexe ; RB = Glissement rotationnel de berge ; RI = Glissement rotationnel d'interfluve.

		N.	Surface (m2)					Volume (m3)				
			min.	max.	\bar{x}	σ	T.	min.	max.	\bar{x}	σ	T.
Bassin de Barcelonnette	GBB	31	239,1	7391,1	2317,2	1857,1	71833,5	263,6	16464,5	5011,4	4694,6	155354,4
	GTR	11	55485,7	569106,2	259772,8	129654,0	2857500,7	554856,5	18153979,0	8023470,6	5695918,5	88258176,5
	GC	5	816,9	143851,9	54105,7	63990,6	270528,3	816,9	1438518,6	531077,9	647888,5	2655389,7
	TSB	120	96,9	42202,6	2522,5	4527,0	302699,7	193,9	168810,5	6716,1	17174,0	805931,0
	TSI	77	72,0	13646,4	2331,6	2519,4	179532,8	72,0	34818,3	5887,6	7241,7	453345,8
	TC	97	210,5	752723,4	50789,6	99351,8	4926595,4	421,0	23789961,0	793748,7	3346213,1	76993625,9
	RB	66	308,8	57508,1	11144,4	12486,1	735532,4	308,8	575080,5	44231,8	83307,2	2919297,5
	RI	74	282,6	637406,7	51337,5	114657,6	3798977,2	564,5	6374066,9	404117,3	1165832,9	29904677,4
T.	482	72,0	13143904,7	54426,1	601399,8	13143904,7	72,0	23789961,0	419392,5	2157819,4	202147207,7	
Versant Ubac	GBB	31	239,1	7391,1	2317,2	1857,1	71833,5	263,6	16464,5	5011,4	4694,6	155354,4
	GTR	9	149454,2	569106,2	282292,1	124102,0	2540628,8	2901584,3	18153979,0	9018740,4	5676134,6	81168664,0
	GC	5	816,9	143851,9	54105,7	63990,6	270528,3	816,9	1438518,6	531077,9	647888,5	2655389,7
	TSB	63	401,0	15423,3	2820,1	2569,4	177664,8	401,0	30846,6	5949,0	6107,2	374785,4
	TSI	57	72,0	13646,4	2673,8	2803,3	152407,5	72,0	34818,3	6519,7	8124,0	371622,8
	TC	87	210,5	396250,4	42268,7	69489,8	3677374,6	421,0	23789961,0	554329,3	2622137,7	48226652,6
	RB	64	308,8	57508,1	11414,4	12584,1	730523,7	308,8	575080,5	45443,6	84310,9	2908393,0
	RI	54	282,6	515323,5	39428,4	75760,2	2129133,7	564,5	5153235,0	259650,6	771773,3	14021131,1
T.	370	72,0	569106,2	26351,6	66249,8	9750094,8	72,0	23789961,0	405086,5	2096402,9	149881992,9	
Versant Adret	GTR	2	55485,7	261386,2	158435,9	102950,3	316871,9	554856,5	6534656,0	3544756,3	2989899,8	7089512,5
	TSB	57	96,9	42202,6	2193,6	5970,1	125034,9	193,9	168810,5	7564,0	24048,8	431145,6
	TSI	20	377,0	3543,6	1356,3	869,6	27125,4	754,0	12843,1	4086,1	3069,1	81723,0
	TC	10	4976,0	752723,4	124922,1	218193,4	1249220,8	19903,8	22581702,0	2876697,3	6630017,4	28766973,3
	RB	2	1965,3	3043,4	2504,4	539,1	5008,7	3043,4	7861,0	5452,2	2408,8	10904,5
	RI	20	1009,9	637406,7	83492,2	178122,9	1669843,4	2477,2	6374066,9	794177,3	1792262,8	15883546,3
T.	112	96,9	752723,4	30301,9	110883,1	3393809,9	193,9	22581702,0	466653,7	2348708,4	52265214,7	

N. = Nombre ; *min.* Minimum ; *max.* = Maximum ; \bar{x} = Moyenne ; σ = Ecart-type ; *T.* = Total ; *GBB* = Glissement bans sur banc ; *GTR* = Glissement translationnel rocheux ; *GC* = Glissement-coulée ; *TSB* = glissement translationnel de berge ; *TSI* = Glissement translationnel d'interfluve ; *TC* = Glissement translationnel complexe ; *RB* = Glissement rotationnel de berge ; *RI* = Glissement rotationnel d'interfluve.

		N.	Epaisseur (m)				Angle de pente moyen (°)				Activité			
			min.	max.	\bar{x}	σ	min.	max.	\bar{x}	σ	AC	AI	L	F
Bassin de Barcelonnette	<i>GBB</i>	31	1,0	25,0	4,9	4,6	12,4	47,0	31,5	7,4	80,6	19,4	-	-
	<i>GTR</i>	11	5,0	100,0	53,1	36,9	22,1	27,5	24,8	1,6	-	-	-	100,0
	<i>GC</i>	5	3,0	15,0	7,6	4,4	18,1	32,6	24,8	5,6	100,0	-	-	-
	<i>TSB</i>	120	1,0	8,0	2,6	1,3	11,9	56,3	30,2	10,0	35,8	63,3	0,8	-
	<i>TSI</i>	77	1,0	6,0	3,0	1,3	13,2	47,0	26,5	7,5	26,0	66,2	7,8	-
	<i>TC</i>	97	1,0	50,0	9,1	7,4	11,4	31,2	19,7	4,6	26,8	45,4	16,5	11,3
	<i>RB</i>	66	1,0	40,0	6,3	6,7	10,1	56,2	21,8	7,0	62,1	33,3	4,5	-
	<i>RI</i>	74	1,0	70,0	7,2	9,6	11,1	50,8	22,0	7,6	12,2	35,1	41,9	10,8
	T.	482	1,0	100,0	6,5	11,0	10,1	60,5	26,4	10,2	35,1	46,9	11,8	6,2
Versant Ubac	<i>GBB</i>	31	1,0	25,0	4,9	4,6	12,4	47,0	31,5	7,4	80,6	19,4	-	-
	<i>GTR</i>	9	5,0	100,0	58,8	1483,1	22,1	26,7	24,7	1,4	-	-	-	100,0
	<i>GC</i>	5	3,0	15,0	7,6	38,5	18,1	32,6	24,8	5,6	100,0	-	-	-
	<i>TSB</i>	63	1,0	8,0	3,1	1,4	11,9	39,3	27,0	6,3	68,3	30,2	1,6	-
	<i>TSI</i>	57	1,0	6,0	3,2	1,3	13,2	40,9	25,8	6,8	35,1	54,4	10,5	-
	<i>TC</i>	87	1,0	50,0	8,9	7,6	11,4	31,2	19,3	4,5	29,9	44,8	13,8	11,5
	<i>RB</i>	64	1,0	40,0	6,4	6,8	10,1	56,2	21,8	7,1	64,1	31,3	4,7	-
	<i>RI</i>	54	1,0	70,0	7,0	10,5	11,1	50,8	19,8	6,1	16,7	33,3	38,9	11,1
	T.	370	1,0	100,0	7,2	12,1	10,1	56,2	23,4	7,3	45,7	35,9	11,6	6,8
Versant Adret	<i>GTR</i>	2	10,0	25,0	17,5	7,5	23,2	27,5	25,3	2,2	-	-	-	100,0
	<i>TSB</i>	57	1,0	4,0	2,5	1,0	12,4	56,3	33,8	12,0	-	100,0	-	-
	<i>TSI</i>	20	1,0	4,0	3,1	1,1	14,7	47,0	28,6	9,0	-	100,0	-	-
	<i>TC</i>	10	3,0	8,0	6,5	7,5	18,6	26,9	23,6	3,2	-	-	40,0	60,0
	<i>RB</i>	2	1,0	4,0	2,5	1,5	22,1	22,6	22,3	0,3	-	100,0	-	-
	<i>RI</i>	20	2,0	10,0	5,8	2,7	17,2	48,5	27,8	8,3	-	40,0	50	10,0
	T.	112	1,0	30,0	4,3	4,3	12,4	56,3	30,5	10,7	-	83,0	12,5	4,5

ANNEXE 3.2. CARACTERISTIQUES DES 'MOUVEMENTS DE VERSANT' DE L'UBAC PAR GRANDS SECTEURS

N. = Nombre ; min. Minimum ; max. = Maximum ; \bar{x} = Moyenne ; σ = Ecart-type ; T. = Total ; GBB = Glissement bans sur banc ; GTR = Glissement translationnel rocheux ; GC = Glissement-coulée ; TSB = glissement translationnel de berge ; TSI = Glissement translationnel d'interfluve ; TC = Glissement translationnel complexe ; RB = Glissement rotationnel de berge ; RI = Glissement rotationnel d'interfluve.

		N.	Surface (m2)					Volume (m3)				
			min.	max.	\bar{x}	σ	T.	min.	max.	\bar{x}	σ	T.
Abrîs	GBB	14	311,8	7391,1	2603,8	1969,9	36453,6	311,8	16178,4	5570,6	4687,9	77988,1
	GTR	9	149454,2	569106,2	282292,1	124102,0	2540628,8	2901584,3	18153979,0	9018740,4	5676134,6	81168664,0
	TSB	29	401,0	15423,3	3314,9	3020,0	96132,1	401,0	30846,6	7580,5	6874,0	219833,9
	TSI	17	482,3	9097,7	3523,5	2654,2	59899,9	865,2	32910,6	10211,3	8904,8	173591,8
	TC	8	9137,9	384106,1	86739,0	117547,9	693912,1	18275,7	3841060,8	813208,2	1208739,5	6505665,6
	RB	2	367,8	1384,6	876,2	508,4	1752,5	367,8	4153,8	2260,8	1893,0	4521,7
	RI	5	1876,0	116858,5	29680,7	43826,1	148403,3	3751,9	1168585,1	254358,4	457532,6	1271791,9
T.	84	311,8	569106,2	42585,5	102891,4	3577182,2	311,8	18153979,0	1064548,3	3354399,2	89422056,9	
Intermédiaire	GBB	4	263,6	3453,1	1703,4	1140,2	6813,7	263,6	6906,2	3341,0	2365,0	13363,9
	GC	4	816,9	143851,9	37637,4	61339,1	150549,6	816,9	1438518,6	363900,5	620449,9	1455602,2
	TSB	23	684,7	11670,6	2669,7	2335,4	61403,4	923,3	23341,1	4754,6	5844,4	109355,1
	TSI	18	161,6	13646,4	3374,6	3394,1	60742,2	220,3	34818,3	7512,8	9202,5	135230,1
	TC	59	975,9	396250,4	39060,3	61746,3	2304555,3	975,9	5943756,6	260302,9	792087,9	15357873,0
	RB	53	308,8	57508,1	12320,0	13382,3	652962,3	308,8	575080,5	50197,0	91120,0	2660439,9
	RI	30	282,6	515323,5	52179,4	97172,0	1565380,8	847,9	5153235,0	384267,5	997787,8	11528024,7
T.	191	161,6	515323,5	25143,5	55960,6	4802407,2	220,3	5943756,6	163664,3	617555,8	31259888,8	
Enchastrages	GBB	13	72,0	48748,0	9985,5	16138,9	129811,0	72,0	126793,1	26258,6	42286,1	341361,5
	GC	1	52203,2	52203,2	52203,2	-	52203,2	365422,7	365422,7	365422,7	-	365422,7
	TSB	11	210,5	48160,8	8638,0	13259,6	95018,0	421,0	240803,9	31982,4	67253,0	351806,1
	TSI	22	321,1	56903,8	12391,9	15251,9	272621,4	321,1	485731,9	47383,2	100331,3	1042430,2
	TC	21	209,7	63107,1	8835,7	15941,9	185550,7	419,4	440639,8	45650,4	110900,1	958658,5
	RB	10	250,4	264332,9	49240,7	79523,1	492407,1	250,4	23789961,0	2548145,1	7089020,3	25481451,1
	RI	19	493,9	79259,0	10636,3	19004,8	202089,8	493,9	475553,9	42533,0	106337,9	808127,7
T.	97	72,0	264332,9	14739,2	32277,7	1429701,2	72,0	23789961,0	302569,7	2401977,7	29349257,8	

N. = Nombre ; *min.* Minimum ; *max.* = Maximum ; \bar{x} = Moyenne ; σ = Ecart-type ; *T.* = Total ; *GBB* = Glissement bans sur banc ; *GTR* = Glissement translationnel rocheux ; *GC* = Glissement-coulée ; *TSB* = glissement translationnel de berge ; *TSI* = Glissement translationnel d'interfluve ; *TC* = Glissement translationnel complexe ; *RB* = Glissement rotationnel de berge ; *RI* = Glissement rotationnel d'interfluve.

		N.	Epaisseur (m)				Angle de pente moyen (°)				Activité			
			min.	max.	\bar{x}	σ	min.	max.	\bar{x}	σ	AC	AI	L	F
Abriés	GBB	14	2,0	10,0	4,9	2,1	9,1	39,4	28,0	8,7	100,0	-	-	-
	GTR	9	4,0	100,0	58,8	38,5	21,9	26,7	24,3	1,6	-	-	-	100,0
	TSB	29	1,0	8,0	3,3	1,4	13,4	37,8	30,3	5,7	89,7	10,3	-	-
	TSI	17	2,0	6,0	4,1	1,1	9,8	37,4	24,9	7,9	58,8	41,2	-	-
	TC	8	2,0	50,0	15,6	15,7	17,8	25,2	20,4	2,3	-	37,5	50,0	12,5
	RB	2	2,0	5,0	3,5	1,5	28,4	38,2	33,3	4,9	100,0	-	-	-
	RI	5	3,0	30,0	9,6	10,2	14,4	23,4	19,1	3,5	20,0	60,0	20,0	-
	T.	84	1,0	100,0	11,2	21,8	9,1	39,4	26,7	7,3	63,1	19,0	6,0	11,9
Intermédiaire	GBB	4	1,0	5,0	3,3	1,5	16,4	48,1	34,5	11,5	100,0	-	-	-
	GC	4	3,0	15,0	7,0	4,7	18,0	33,4	24,0	6,0	100,0	-	-	-
	TSB	23	1,0	6,0	2,7	1,4	12,2	31,3	22,7	5,1	56,5	43,5	-	-
	TSI	18	1,0	5,0	3,2	1,2	11,7	41,2	22,6	7,6	33,3	55,6	11,1	-
	TC	59	1,0	30,0	8,9	6,1	11,5	30,1	18,4	4,4	44,1	37,3	6,8	11,9
	RB	53	1,0	40,0	7,0	7,3	10,4	56,9	21,8	7,2	66,0	28,3	5,7	-
	RI	30	1,0	70,0	7,6	12,3	11,0	50,8	18,8	7,0	23,3	26,7	40,0	10,0
	T.	191	1,0	70,0	6,7	7,5	10,4	56,9	20,8	6,9	49,8	34,0	11,0	5,2
Enchastrées	GBB	13	2,0	25,0	5,5	6,6	15,1	33,9	21,8	6,4	53,8	46,2	-	-
	GC	1	100,0	100,0	100,0	-	25,0	25,0	25,0	-	100,0	-	-	-
	TSB	11	2,0	5,0	3,5	0,8	11,4	34,7	24,2	6,6	36,4	54,5	9,1	-
	TSI	22	1,0	5,0	2,4	1,0	13,6	41,3	23,1	7,3	18,2	63,6	18,2	-
	TC	21	2,0	20,0	6,2	3,8	14,7	30,2	24,0	4,7	4,8	66,7	19,0	9,5
	RB	10	3,0	5,0	3,6	0,7	17,0	35,1	25,4	5,9	50,0	50,0	-	-
	RI	19	1,0	30,0	5,4	6,3	12,3	45,5	26,8	9,3	5,3	36,8	42,1	15,8
	T.	97	1,0	100,0	5,5	10,6	11,4	45,5	24,2	7,1	23,7	53,6	17,5	5,2

ANNEXE 3.3. CARACTERISTIQUES MORPHOMETRIQUES DES 'MOUVEMENTS DE VERSANT' DE L'UBAC

Les analyses sont effectuées avec les mouvements à ICC1.

N. = Nombre ; min. Minimum ; max. = Maximum ; \bar{x} = Moyenne ; σ = Ecart-type ; T. = Total ; GBB = Glissement bans sur banc ; GTR = Glissement translationnel rocheux ; GC = Glissement-coulée ; TSB = glissement translationnel de berge ; TSI = Glissement translationnel d'interfluve ; TC = Glissement translationnel complexe ; RB = Glissement rotationnel de berge ; RI = Glissement rotationnel d'interfluve. L = Longueur total du glissement ; Lx = Longueur de a zone d'accumulation ; Wx = largeur de la zone d'accumulation ; Dx = épaisseur de la zone d'accumulation estimée ; Lc = Longueur de la zone d'ablation ; Wc = largeur de la zone d'ablation ; Dc = hauteur de la zone d'ablation avant déclenchement ; D = hauteur de l'escarpement principal.

		N.	min.	max.	\bar{x}	σ	T.
L (m)	GBB	18	10,0	85,0	46,7	20,6	841,0
	GC	4	85,0	1060,0	542,5	418,3	2170,0
	TSB	44	15,0	445,0	75,0	67,4	3300,0
	TSI	31	7,0	340,0	90,9	65,9	3090,0
	TC	54	50,0	1910,0	316,4	304,0	19299,0
	RB	49	15,0	490,0	113,7	101,9	5799,0
	RI	20	25,0	1375,0	284,2	309,0	8241,0
	T.	220	7,0	1910,0	188,7	249,0	42740,0
Lx (m)	GBB	18	5,0	55,0	27,7	14,2	498,0
	GC	4	7,0	720,0	359,3	303,9	1437,0
	TSB	44	5,0	245,0	41,9	40,9	1845,0
	TSI	31	4,0	180,0	56,0	42,6	1904,0
	TC	54	30,0	1390,0	188,0	221,0	11470,0
	RB	49	5,0	260,0	60,9	59,0	3107,0
	RI	20	10,0	775,0	163,5	178,5	4742,0
	T.	220	4,0	1390,0	109,4	161,0	25003,0
Wx (m)	GBB	18	28,0	120,0	62,3	23,7	1122,0
	GC	4	10,0	90,0	57,5	29,5	230,0
	TSB	44	15,0	485,0	60,6	72,6	2665,0
	TSI	31	10,0	150,0	35,2	26,1	1198,0
	TC	54	15,0	485,0	88,2	80,1	5378,0
	RB	49	20,0	810,0	140,0	133,6	7138,0
	RI	20	15,0	530,0	113,9	111,5	3303,0
	T.	220	10,0	810,0	92,6	107,3	21034,0
Dx (m)	GBB	18	1,0	3,0	1,9	0,7	34,0
	GC	4	4,0	10,0	7,3	2,8	29,0
	TSB	44	1,0	5,0	1,9	0,9	85,0
	TSI	31	1,0	5,0	2,5	0,9	86,0
	TC	54	1,0	20,0	5,0	2,9	304,0
	RB	49	1,0	10,0	3,4	1,6	171,0
	RI	20	1,0	15,0	4,0	3,0	117,0
	T.	220	1,0	50,0	4,2	6,4	826,0
Lc (m)	GBB	18	3,0	52,0	18,5	12,5	333,0
	GC	4	25,0	340,0	170,0	129,8	680,0
	TSB	44	5,0	200,0	33,9	33,2	1490,0
	TSI	31	3,0	160,0	34,4	27,3	1171,0
	TC	54	20,0	520,0	128,9	97,0	7864,0
	RB	49	5,0	240,0	57,7	48,2	2944,0
	RI	20	11,0	600,0	123,3	141,9	3576,0
	T.	220	3,0	600,0	80,5	99,4	18058,0

N. = Nombre ; *min.* Minimum ; *max.* = Maximum ; \bar{x} = Moyenne ; σ = Ecart-type ; *T.* = Total ; *GBB* = Glissement bans sur banc ; *GTR* = Glissement translationnel rocheux ; *GC* = Glissement-coulée ; *TSB* = glissement translationnel de berge ; *TSI* = Glissement translationnel d'interfluve ; *TC* = Glissement translationnel complexe ; *RB* = Glissement rotationnel de berge ; *RI* = Glissement rotationnel d'interfluve. *L* = Longueur total du glissement ; *Lx* = Longueur de a zone d'accumulation ; *Wx* = largeur de la zone d'accumulation ; *Dx* = épaisseur de la zone d'accumulation estimée ; *Lc* = Longueur de la zone d'ablation ; *Wc* = largeur de la zone d'ablation ; *Dc* = hauteur de la zone d'ablation avant déclenchement ; *D* = hauteur de l'escarpement principal.

		<i>N.</i>	<i>min.</i>	<i>max.</i>	\bar{x}	σ	<i>T.</i>
<i>Wc (m)</i>	<i>GBB</i>	18	20,0	150,0	61,4	31,6	1106,0
	<i>GC</i>	4	30,0	280,0	158,8	116,6	635,0
	<i>TSB</i>	44	15,0	400,0	62,8	64,5	2762,0
	<i>TSI</i>	31	8,0	120,0	36,4	24,1	1237,0
	<i>TC</i>	54	20,0	470,0	103,4	84,8	6310,0
	<i>RB</i>	49	20,0	810,0	137,0	135,3	6986,0
	<i>RI</i>	20	20,0	890,0	145,4	178,5	4216,0
	<i>T.</i>	220	8,0	890,0	100,0	114,1	23252,0
<i>Dc (m)</i>	<i>GBB</i>	18	1,0	3,0	2,1	0,5	38,0
	<i>GC</i>	4	2,0	10,0	6,3	3,8	25,0
	<i>TSB</i>	44	1,0	5,0	2,0	0,8	87,0
	<i>TSI</i>	31	1,0	4,0	2,4	0,9	80,0
	<i>TC</i>	54	1,0	50,0	5,2	11,1	317,0
	<i>RB</i>	49	1,0	10,0	3,0	1,5	153,0
	<i>RI</i>	20	1,0	15,0	3,8	3,0	109,0
	<i>T.</i>	220	1,0	90,0	4,1	8,3	809,0
<i>D (m)</i>	<i>GBB</i>	18	2,0	15,0	5,1	3,0	91,0
	<i>GC</i>	4	5,0	100,0	31,3	39,9	125,0
	<i>TSB</i>	44	1,0	6,0	3,1	1,1	136,0
	<i>TSI</i>	31	1,0	6,0	3,6	1,3	121,0
	<i>TC</i>	54	1,0	50,0	8,2	7,3	503,0
	<i>RB</i>	49	1,0	40,0	7,0	7,3	359,0
	<i>RI</i>	20	2,0	70,0	8,3	13,1	242,0
	<i>T.</i>	220	1,0	100,0	8,1	15,1	1577,0

ANNEXE 3.4. CARACTERISTIQUES MORPHOMETRIQUES 'DERIVEES' DES 'MOUVEMENTS DE VERSANT' DE L'UBAC

Les analyses sont effectuées avec les mouvements à ICC1.

N. = Nombre ; min. Minimum ; max. = Maximum ; \bar{x} = Moyenne ; σ = Ecart-type ; T. = Total ; GBB = Glissement bans sur banc ; GTR = Glissement translationnel rocheux ; GC = Glissement-coulée ; TSB = glissement translationnel de berge ; TSI = Glissement translationnel d'interfluve ; TC = Glissement translationnel complexe ; RB = Glissement rotationnel de berge ; RI = Glissement rotationnel d'interfluve. L = Longueur total du glissement ; Lx = Longueur de a zone d'accumulation ; Wx = largeur de la zone d'accumulation ; Dx = épaisseur de la zone d'accumulation estimée ; Lc = Longueur de la zone d'ablation ; Wc = largeur de la zone d'ablation ; Dc = hauteur de la zone d'ablation avant déclenchement ; D = hauteur de l'escarpement principal.

		N.	min.	max.	\bar{x}	σ	T.
P	GBB	18	3,53E-02	0,25	0,12	0,06	2,11
	GC	4	1,42E-02	0,12	0,05	0,04	0,22
	TSB	44	8,99E-03	0,11	0,05	0,03	2,38
	TSI	31	5,88E-03	0,16	0,06	0,04	1,85
	TC	54	9,09E-03	0,13	0,03	0,02	1,77
	RB	49	1,08E-02	0,67	0,09	0,10	4,39
	RI	20	5,71E-03	0,12	0,03	0,02	0,68
	T.	220	5,71E-03	0,67	0,06	0,06	13,40
Di	GBB	18	0,47	1,78	0,91	0,27	16,44
	GC	4	0,18	2,00	0,69	0,76	2,76
	TSB	44	0,30	1,67	0,98	0,28	43,12
	TSI	31	0,27	3,00	1,12	0,61	34,64
	TC	54	0,30	3,50	0,99	0,53	53,70
	RB	49	0,72	1,76	1,04	0,20	50,88
	RI	20	0,55	1,33	0,90	0,17	17,93
	T.	220	0,18	3,50	1,00	0,41	219,47
De	GBB	18	0,12	0,48	0,23	0,10	4,11
	GC	4	0,29	0,36	0,32	0,03	1,27
	TSB	44	0,13	1,00	0,45	0,19	19,89
	TSI	31	0,25	0,60	0,39	0,10	12,17
	TC	54	0,31	0,71	0,43	0,08	23,23
	RB	49	0,17	0,72	0,52	0,11	25,27
	RI	20	0,32	0,86	0,49	0,10	9,77
	T.	220	0,12	1,00	0,44	0,14	95,71
T	GBB	18	1,07	5,00	3,59	1,24	64,64
	GC	4	0,28	2,38	1,64	0,81	6,55
	TSB	44	0,22	5,00	1,21	1,14	70,63
	TSI	31	0,60	3,00	1,69	0,73	52,40
	TC	54	0,38	2,40	1,41	0,46	76,21
	RB	49	0,40	5,00	1,13	0,71	55,43
	RI	20	0,42	2,17	1,13	0,37	22,63
	T.	220	0,22	5,00	1,58	1,03	348,49
EP	GBB	18	8,00	273,00	88,39	65,16	1591,01
	GC	4	28,00	178,50	123,42	56,91	493,68
	TSB	44	0,99	180,00	36,78	38,25	1618,40
	TSI	31	3,28	219,00	66,12	55,47	2049,71
	TC	54	0,79	167,00	47,44	45,47	2562,02
	RB	49	0,80	125,00	17,77	23,91	870,65
	RI	20	1,68	81,84	17,61	19,17	352,27
	T.	220	0,79	273,00	43,35	48,73	9537,74

N. = Nombre ; *min.* Minimum ; *max.* = Maximum ; \bar{x} = Moyenne ; σ = Ecart-type ; *T.* = Total ; *GBB* = Glissement bans sur banc ; *GTR* = Glissement translationnel rocheux ; *GC* = Glissement-coulée ; *TSB* = glissement translationnel de berge ; *TSI* = Glissement translationnel d'interfluve ; *TC* = Glissement translationnel complexe ; *RB* = Glissement rotationnel de berge ; *RI* = Glissement rotationnel d'interfluve. *L* = Longueur total du glissement ; *Lx* = Longueur de a zone d'accumulation ; *Wx* = largeur de la zone d'accumulation ; *Dx* = épaisseur de la zone d'accumulation estimée ; *Lc* = Longueur de la zone d'ablation ; *Wc* = largeur de la zone d'ablation ; *Dc* = hauteur de la zone d'ablation avant déclenchement ; *D* = hauteur de l'escarpement principal.

		<i>N.</i>	<i>min.</i>	<i>max.</i>	\bar{x}	σ	<i>T.</i>
<i>Cav</i>	<i>GBB</i>	18	0,57	4,00	1,29	0,70	23,29
	<i>GC</i>	4	0,06	0,71	0,23	0,28	0,93
	<i>TSB</i>	44	0,18	4,33	1,05	0,97	46,08
	<i>TSI</i>	31	0,12	2,86	0,59	0,57	18,31
	<i>TC</i>	54	0,11	1,09	0,33	0,22	17,92
	<i>RB</i>	49	0,25	9,53	2,74	2,21	134,46
	<i>RI</i>	20	0,23	5,11	1,69	1,77	33,77
	<i>T.</i>	220	0,06	9,53	1,25	1,57	274,76
<i>Cam</i>	<i>GBB</i>	18	0,26	4,07	1,61	1,00	29,03
	<i>GC</i>	4	0,25	0,35	0,31	0,04	1,24
	<i>TSB</i>	44	0,20	3,67	1,05	0,90	46,26
	<i>TSI</i>	31	0,13	2,14	0,51	0,38	15,96
	<i>TC</i>	54	0,11	1,01	0,37	0,19	19,95
	<i>RB</i>	49	0,18	9,54	1,89	1,90	92,44
	<i>RI</i>	20	0,20	1,75	0,61	0,39	12,11
	<i>T.</i>	220	0,11	9,54	0,99	1,20	216,99
<i>E</i>	<i>GBB</i>	18	0,56	2,14	1,16	0,32	20,87
	<i>GC</i>	4	0,50	5,50	3,25	1,82	13,00
	<i>TSB</i>	44	0,60	3,33	1,14	0,49	49,96
	<i>TSI</i>	31	0,33	3,67	1,15	0,63	35,78
	<i>TC</i>	54	0,29	3,33	1,32	0,68	71,08
	<i>RB</i>	49	0,64	1,88	1,08	0,19	53,11
	<i>RI</i>	20	0,89	1,83	1,17	0,24	23,38
	<i>T.</i>	220	0,29	5,50	1,21	0,62	267,18

ANNEXE 4.1. METHODE D'ACQUISITION D'UN SEMI DE POINTS POUR UNE BASE DE DONNEES ALTIMETRIQUE

Tab. A.4.1. Méthodes d'acquisition des données altimétriques et avantages, inconvénients. PA = Photographies Aériennes. CE = coût estimé (tient compte de l'aspect financier et temporel d'acquisition). IQE = indice de qualité estimé. Echelle d'estimation -- = très mauvais ; - = mauvais ; M = moyen ; + = bon ; ++ = très bon ; +++ = excellent. Devant la multiplicité des prix, le coût des MNT a été jugé de manière subjective sur la base des articles de Kraus et Pfeifer (1998), Wehr et Lohr (1998), Ackermann (1999), Baltasvias (1999a ; 1999b), Gomes Pereira et Wicherson (1999), Henry et al. (2002), Petzold et al. (1999), Thiery et al. (2003), Rousseaux (2004), Casas et al. (2006), Huaxing et al. (2006).

Méthode d'acquisition	Avantages	Inconvénients	Précision	CE	IQE	
Directes	Points GPS	Bonne modélisation du terrain lorsque le réseau de points est dense.	Travail de saisie important sur le terrain. Peut engendrer des volumes de données importants suivant le nombre de points enregistrés.	Si le semis est dense précision de ± 0.01 m	++	M à +++ suivant l'échelle de travail choisie.
	InSAR	Grande précision du relevé de points.	En secteur boisé le résultat peut-être biaisé. Selon le maillage retenu des détails topographiques peuvent être perdus.			+ à +++ suivant le terrain.
	LIDAR	Très grande précision du relevé de points. Les différents filtres permettent de déduire aussi bien la couverture du sol que le terrain naturel (bois, etc.).	Faible portée du scanner. Minimiser au maximum les secteurs d'ombre, nécessite la multiplication des prises de vue aussi bien au sol qu'aéroporté. Peut engendrer des volumes de données importants suivant le nombre de triplets enregistrés	± 0.01 m à 0.20 m en secteur dégagé	- à -- suivant la surface à traiter.	++ à +++ suivant la topographie.
	Photogrammétrie aéroportée	Méthode de saisie efficace en terrain dégagé. Résultats précis sur de petits secteurs.	Difficultés d'obtenir un bon modèle en secteur boisé ou lorsqu'il y a trop de secteurs d'ombre. Nécessite un filtrage, pas toujours efficace en secteur boisé. Selon le maillage retenu des détails topographiques peuvent être perdus. Peut engendrer des volumes de données importants suivant le nombre de triplets enregistrés.	± 0.10 m à 0.20 m en secteur dégagé	- à M suivant la surface à traiter.	M à ++ suivant la topographie, la résolution voulue et la surface boisée du site.
Indirectes	Numérisation courbes de niveaux	Coût peu élevé des documents et de la saisie de points.	La qualité et l'actualité des informations de bases conditionnent le résultat final. Selon le maillage retenu des détails topographiques peuvent être perdus. Les secteurs de terrains plats ont tendance à engendrer des artefacts. Peut engendrer des volumes de données importants suivant le nombre de triplets enregistrés.	En secteur montagneux la précision est de l'ordre de 0.5 m en terrains plats à 10 m en terrains très accidentés	++ à +++ suivant la surface à traiter.	M à ++ suivant l'échelle des cartes topographiques, la complexité et la connaissance du terrain, l'échelle de travail choisie.
	Photogrammétrie par PA IGN	Méthode de saisie efficace en terrain dégagé. Résultats précis en secteur dégagé.	Difficultés d'obtenir un bon modèle lorsque la topographie est complexe (fortement accidentée), en secteur boisé ou lorsqu'il y a trop de secteurs d'ombre. Nécessite un filtrage, peu efficace en secteur boisé. Selon le maillage retenu des détails topographiques peuvent être perdus. Peut engendrer des volumes de données importants suivant le nombre de triplets enregistrés.	En secteur montagneux la précision est de l'ordre de 0.5 m à 1 m en terrains plats à 10 m en terrains très accidentés	- à M suivant la surface à traiter.	M à ++ suivant la topographie, la résolution voulue et la surface boisée du site.

ANNEXE 4.2. METHODES EMPIRIQUES POUR EVALUER UNE MAILLE THEORIQUE DE MNT

Il est possible d'estimer la résolution optimum d'un MNT par deux méthodes empiriques (Hengl, 2006), dans le cas du bassin de Barcelonnette ces méthodes ont été appliquées pour déterminer une maille théorique maximum et optimum :

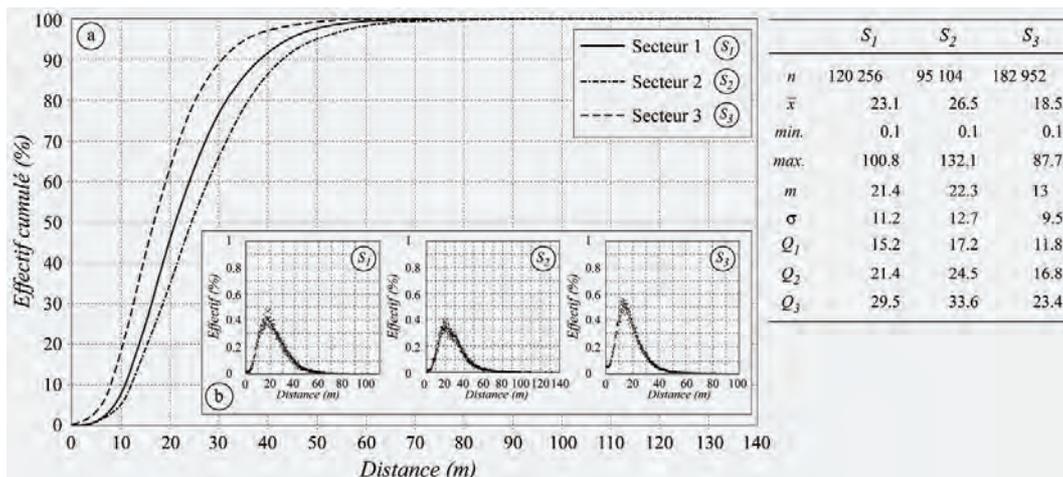
- (i) **La première méthode repose sur la longueur totale des lignes digitalisées et la surface du site d'étude** (Hengl *et al.*, 2003, 2004 ; Hengl, 2006). Dans ce cas, la résolution r se calcule selon les équations A.4.2.1 et A.4.2.2 qui représentent respectivement la résolution maximum (Eq. A.4.2.1) et la résolution optimum (Eq. A.4.2) :

$$r = \frac{A}{\sum L} \quad [\text{Eq. A.4.2.1}]$$

$$r = \frac{A}{2 \sum L} \quad [\text{Eq. A.4.2.2}]$$

Où r est la résolution du raster, A est la surface totale du site d'étude, et $\sum L$ est la longueur totale de toutes les courbes de niveaux digitalisées. Suivant ces formules empiriques, la résolution maximum théorique à prendre en compte est de 19.2 et la résolution optimum théorique est de 9.6 m.

- (ii) **La seconde méthode est basée sur le calcul de la distance minimum et maximum entre chaque triplet pour les huit autres alentours** (Kienzle, 2004). La figure A.4.1 montre les fréquences cumulées des distances entre les points et les statistiques associées aux distributions pour les 3 secteurs tests ; la majorité des points se situent entre 5 m et 50 m d'intervalle (90% des points ont une distance entre 1 et 40 m pour la zone 1, entre 2 m et 45 m pour la zone 2, et entre 5 m et 35 m pour la zone 3). Les différents critères de position (Fig. A.4.1) montrent que les moyennes sont comprises entre 18.5 pour le site n° 3 et 26.5 pour le site n° 2 avec des écarts-types respectifs de 13 m et 22.3 m. Les valeurs médianes sont aux alentours de 20 m.



a. Distance (m) entre les triplets en effectif cumulé. b. Distribution de la distance (m) entre les triplets en %. Pour les statistiques descriptives : n = effectif ; \bar{x} = moyenne ; $min.$ = valeur minimum ; $max.$ = valeur maximum ; σ = écart-type ; Q_1 = 1^{er} quartile ; Q_2 = 2nd quartile (médiane) ; Q_3 = 3^{ème} quartile.

Fig. A.4.1. Distance entre un triplet et les huit triplets les plus proches.

Toutefois, ces calculs empiriques ne donnent qu'une idée approximative de la résolution à prendre en compte et les effets sur les dérivatives ou les artéfacts liés à l'interpolation ne sont pas connus (Hengl *et al.*, 2004). Il convient donc de procéder à une analyse de sensibilité plus évoluée pour obtenir la taille optimum pour notre échelle de travail.

ANNEXE 4.3. LES DIFFERENTES METHODES D'INTERPOLATION SELECTIONNEES

Les techniques d'interpolation spatiale sont nombreuses ; une revue exhaustive peut-être trouvée dans Bonham-Carter (1993), Burrough et M^c Donnel (1996), Carrara *et al.* (1997), Wood (1996), Kidner *et al.* (1999), Wise (2002). Pour cette recherche, quatre méthodes ont été sélectionnées. Elles sont détaillées ci-après.

- (i) **Distance inverse pondérée** (*Inverse Distance Weighting, IDW*, Shepard ; 1968). Cette méthode classique est disponible dans la majorité des logiciels SIG commerciaux. L'algorithme de calcul est basé sur les postulats suivants : plus le point à interpoler est proche d'un point dont on connaît la valeur, plus la valeur du point à interpoler sera similaire à la plus proche valeur connue (Eqs. A4.3.1 et A4.3.2). Dans un premier temps, la distance entre le point recherché et les points connus aux alentours est calculée. Dans un second temps, le calcul du point recherché s'effectue grâce à la moyenne des valeurs des points environnants. La pondération correspond à l'inverse de la distance qui est pondérée en fonction des propriétés de la surface sous-jacente.

$$Z_j = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{Z_i}{h_{ij}^p}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{h_{ij}^p}} \quad [\text{Eq. A4.3.1}] \quad h_{ij} = \sqrt{d_{ij}^2 + \delta^2} \quad [\text{Eq. A4.3.2}]$$

où Z_j la valeur interpolée au point j ; Z_i est la valeur du point i connue ; n est le nombre de points utilisés pour l'interpolation ; d_{ij} est la distance entre j et le point le plus proche i ; p est le facteur de pondération 'puissance' (*power weighting*) ; h_{ij} est la distance effective entre j et le point i ; δ est le paramètre 'lissant'.

La méthode de calcul est rapide mais tend à créer des zones circulaires autour des valeurs observées (*bull's eyes effect*). Cet aspect peut être lissé en ayant une bonne connaissance de la surface à interpoler et en ajustant les différents paramètres (puissance, voisinage) pour garantir un résultat optimal.

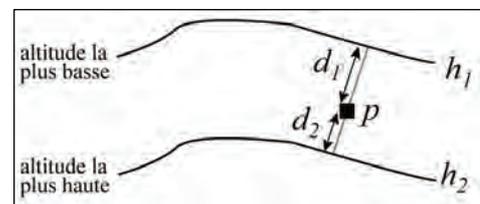
- (ii) **La méthode par réseau de triangulation irrégulière** (*Triangular Irregular Network, TIN* ; Peucker *et al.*, 1978) est une des méthodes les plus couramment utilisées (Wise, 2000, 2002 ; Casas *et al.*, 2006). **Méthode exacte**², basée sur la triangulation de Delauney (Burrough et M^c Donnel, 1996), elle prend en compte les fortes variabilités d'altitude sur de courtes distances. En outre, il est possible d'adapter la couverture de points d'échantillonnage. Par exemple des points irrégulièrement répartis peuvent être adaptés à un relief accidenté (en terrain escarpé plus de points sont utilisés, en terrain plat peu de points sont utilisés). Ainsi, la représentation d'une surface est considérée comme plus efficace que sous format raster en utilisant un échantillonnage irrégulier, les points échantillonnés étant reliés par des droites de manière à former des triangles dont la surface est généralement modélisée par un plan. De ce fait, la surface de chaque triangle est définie par les altitudes des trois points délimitant ledit triangle. Une sorte de 'mosaïque' est ainsi créée. Il est possible d'avoir recours à des types de polygones plus complexes que de simples triangles.

² Les méthodes d'interpolation exactes permettent de conserver les valeurs des données initiales dans l'information finale, la valeur d'échantillonnage est préservée (Lam, 1983). Les méthodes d'interpolation approximatives induisent une erreur résiduelle en chaque point de l'échantillon initial, les valeurs initiales ne sont pas préservées (Lam, 1983). Lorsque le nombre de mesures est large, certaines méthodes exactes 'géostatistiques' comme le Krigage (Krige, 1951, Matheron, 1963) offrent l'avantage de pouvoir être paramétrées de manière à être adaptées au site de recherche. En outre ces méthodes géostatistiques apportent des informations supplémentaires que les techniques plus simples ne permettent pas comme le nombre de mesures nécessaires et minimum ; la taille, l'orientation et la forme du secteur à prendre en compte pour l'interpolation ; le meilleur moyen d'obtenir de bonnes pondérations ; l'incertitude liée aux valeurs interpolées (Burrough et M^c Donnel, 1996 ; Davis, 2002).

Les résultats visuels sont excellents et les ruptures de pente, les talwegs et les interfluves sont très bien représentés. Toutefois, la technique est mal adaptée à certaines modélisations topologiques et donne un aspect caractéristique et peu esthétique aux représentations qu'elle sert à préparer (comme l'exposition des pentes). Le TIN est stocké en format vecteur, il est possible, par certains algorithmes adaptés, de le transformer en raster.

- (iii) La méthode basée sur la formule de **distance de Borgéfors** (*Borgéfors distance method*). Cette **méthode exacte** est assez peu utilisée pour l'interpolation de coordonnées. Cependant, les résultats issus de cette méthode exacte linéaire sont extrêmement bons (Borgéfors, 1996 ; Hengl *et al.*, 2003). L'algorithme calcul les altitudes selon la plus courte distance entre deux lignes digitalisées suivant la taille de la maille voulue. Le défaut majeur de cette méthode est que si la taille de la cellule est plus large que la distance entre deux lignes, des artefacts sont générés, ce qui est le cas dans les secteurs fortement accidentés. Cette méthode d'interpolation est disponible sous le logiciel ILWIS®.

$$h_p = h_2 + \left(\frac{d_2}{(d_1 + d_2)} \times (h_1 - h_2) \right) \quad [\text{Eq. A4.3.3}]$$

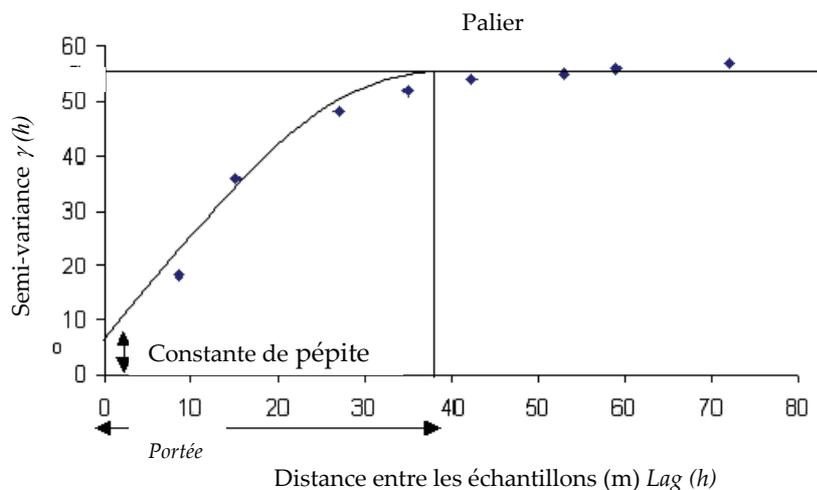


où h_p est la valeur interpolée au point p ; h_1 l'altitude la plus basse ; h_2 l'altitude la plus haute ; d_1 la distance entre h_1 et le point p ; d_2 la distance entre h_2 et le point p .

- (iv) **Les méthodes présentées précédemment ne prennent pas en considération la structure de dépendance spatiale des données. Le krigeage** est la première méthode d'interpolation spatiale qui en tient compte. **Cette méthode est souvent considérée comme la méthode la plus appropriée pour générer un MNT en terrain complexe** (Bonham-Carter, 1994, Burrough et M^c Donnel, 1996 ; Davis, 2002 ; Wise, 2002 ; Brimicombe, 2003). L'idée de base est de prévoir la valeur de la variable régionalisée étudiée en un site non échantillonné par une combinaison linéaire de données ponctuelles adjacentes. Nous n'irons pas dans le détail des fondements théoriques de la méthode. Ces derniers peuvent être trouvés dans Baillargeon (2005). Le paragraphe ci-dessous résume succinctement la méthode.

Le Krigeage est une méthode d'interpolation exacte qui estime les valeurs aux points non échantillonnés par une combinaison des données. Le poids des échantillons est pondéré par une fonction de structure qui est issue des données en tenant compte des distances, des valeurs et des corrélations. La fonction n'est pas fixée a priori mais suite à une analyse par variogramme. Ainsi, la valeur en un point est le produit d'un processus sous-jacent. La méthode fournit une variance d'estimation contrairement à d'autres approches et permet d'appréhender la structure spatiale du phénomène étudié et à modéliser. Dans les ouvrages traitant des méthodes d'interpolation sous SIG, le Krigeage n'est pas toujours inclus dans les méthodes exactes ou non exactes d'interpolation (Burrough et M^c Donnel, 1996, Davis, 2002). La méthode est alors incluse dans le seul champ de la géostatistique, dont elle fait partie intégrante, ou dans le champ des 'interpolateurs optimum', tout comme ses dérivées (krigeage simple, krigeage non linéaire, co-krigeage, krigeage stratifié etc. Burrough et M^c Donnel, 1996).

La particularité de cette méthode d'interpolation **exacte**³ est de diviser la variation spatiale en trois composantes : une composante représentant la structure général (tendance générale) du relief à modéliser, une composante régionale avec une variation spatiale complexe corrélée, et une composante aléatoire d'un bruit Gaussien représentant l'erreur résiduelle (Brimicombe, 2003). Il existe donc une certaine 'périodicité' pour ce profil. Cette 'périodicité' peut exister sur l'ensemble du relief (dans les trois dimensions) dans ce cas il est nécessaire de la modéliser en tout point du site grâce à un *semi-variogramme*⁴ (appelé souvent *variogramme*). La Fig. A.4.2 reprend les grands éléments nécessaires pour la création d'un semi-variogramme. Lorsque le semi-variogramme est adapté aux irrégularités du terrain, les résultats sont très satisfaisants. En outre, cette méthode est disponible dans plusieurs logiciels SIG commerciaux. Plusieurs méthodes dérivées du Krigeage existent ; une revue exhaustive de ces méthodes géostatistiques se trouve dans Burrough et Mc Donnel (1996).



Il existe trois propriétés reliées à ce graphique, soit la constante de pépité, le palier et la portée (Smith et al., 1993). La constante de pépité représente la valeur de $\gamma(h)$ pour $h=0$ qui s'apparente à l'erreur d'échantillonnage et à la variabilité présente à une distance inférieure à l'intervalle d'échantillonnage. Le palier, si présent, est caractérisé par l'atteinte d'un plateau où $\gamma(h)$ devient constant avec l'évolution de h . Si les échantillons sont reliés les uns aux autres, le semi-variogramme prend une allure linéaire dans sa phase initiale pour ensuite atteindre le palier (Nolin et al., 1997). Enfin, la valeur de h pour laquelle $\gamma(h)$ atteint le palier s'appelle la portée. Celle-ci s'avère très utile pour fixer l'intervalle optimale d'échantillonnage puisque les échantillons prélevés à une distance inférieure à la portée sont spatialement dépendants (Nolin et al., 1997).

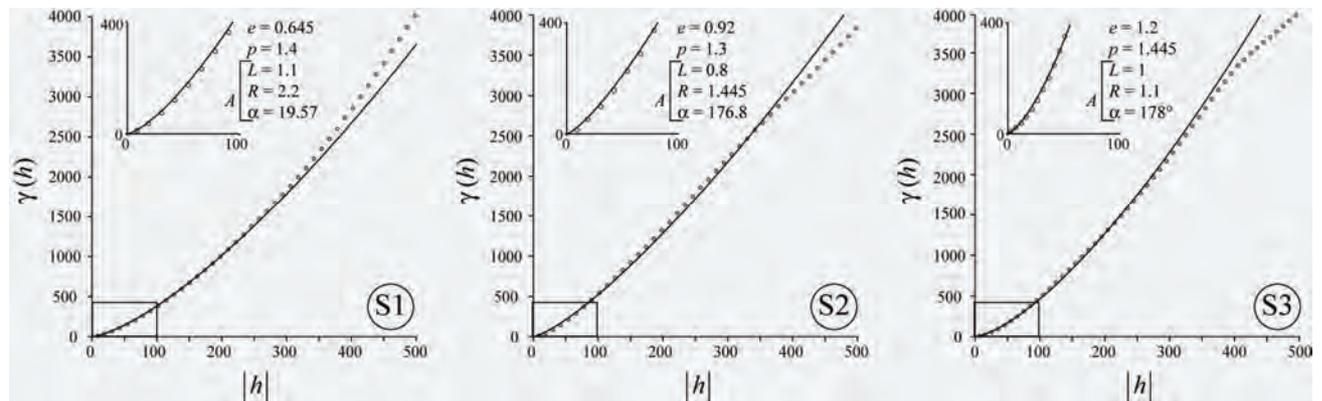
Fig. A.4.2. Semi-variogramme théorique.

³ Le krigeage est une méthode exacte lorsque l'effet de pépité est nul (Hengl et al., 2003).

⁴ Il existe plusieurs types de semi-variogramme, ces derniers sont détaillés dans Burrough et Mc Donnel (1996).

ANNEXE 4.4. CARACTERISTIQUES DES SEMI-VARIOGRAMMES POUR LES SECTEURS TESTS

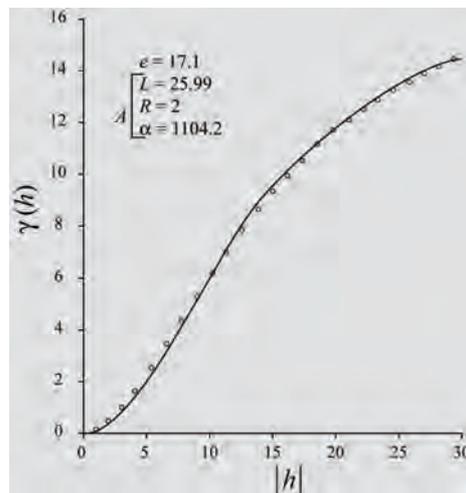
Les semi-variogrammes pour interpolés les trois MNT tests du bassin de *Barcelonnette* sont basés sur un modèle dit de *fonction de puissance*. Les caractéristiques de chacun sont données dans la figure A.4.3.



$\gamma(h)$ = semi-variance ; $|h|$ = distance entre les points ; e = échelle ; p = facteur de la fonction de puissance ; A = caractéristiques d'anisotropie ; L = longueur de l'ellipse ; R = Ratio de l'ellipse tenant compte de la distribution spatiale des triplets (longueur/largeur) ; α = angle de l'ellipse en $^\circ$.

Fig. A.4.3. Caractéristiques des semi-variogrammes pour les trois secteurs tests.

Le semi-variogramme utilisé pour l'interpolation du MNT du BVRE du *Moulin* est basé sur un modèle de fonction rationnelle quadratique. Les caractéristiques sont données dans la figure A.4.4.



$\gamma(h)$ = semi-variance ; $|h|$ = distance entre les points ; e = échelle ; A = caractéristiques d'anisotropie ; L = longueur de l'ellipse ; R = Ratio de l'ellipse tenant compte de la distribution spatiale des triplets (longueur/largeur) ; α = angle de l'ellipse en $^\circ$.

Fig. A.4.4. Caractéristiques du semi-variogramme pour le BVRE du Moulin.

ANNEXE 4.5. TESTS DE PRECISION UTILISES POUR L'ANALYSE DE SENSIBILITE DES MNT

Les quatre tests de précision pour évaluer la qualité des *MNT* sont basés sur certaines préconisations données par : Carrara *et al.* (1997), Florinsky (1998), Wood (1998), Hengl *et al.* (2003), 2004), Bonin et Rousseaux (2005), Hengl (2006), Ziadat (2007). Parce qu'une analyse quantitative des *MNT* n'est pas suffisante pour évaluer leur représentativité face à la réalité (Bonin et Rousseaux, 2005), un test visuel est effectué à chaque étape. Ce test permet de discerner des erreurs d'interpolation que les tests statistiques ne permettent pas d'évaluer. Les tests (i) et (ii) sont basés sur une évaluation semi-qualitative des *MNT* (Bonin et Rousseaux, 2005). Les tests (iii) et (iv) sont basés sur des mesures altitudinales (précision absolue) des *MNT*, et sur des mesures de la morphologie (précision relative) dérivée des *MNT*. Pour les *MNT* obtenus par TIN, une conversion en format raster est effectuée avant.

- (i) Le premier test requiert une analyse visuelle des artefacts préconisée par Carrara *et al.* (1997) ;
- (ii) Le second test se base sur la différence de la surface (nombre de cellules) occupée entre deux courbes de niveaux de 100 m et la surface entre les mêmes altitudes représentées par les *MNT*. La différence ne doit pas excéder 5% (Carrara *et al.*, 1997) ;
- (iii) **Le troisième test est constitué du calcul de la RMSE** (Eq. A4.3.5) pour tous les triplets utilisés pour l'interpolation dans les différents *MNT* et pour des points de contrôle. Ces points sont issus de données *IGN* et de points *GPS* relevés en Mai 2002 sur toute la surface du bassin

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_i^n (y'_i - y_i)^2} \quad [\text{Eq. A4.3.5}]$$

où y est la valeur du triplet ; y' est la valeur d'altitude modélisée ; n est le nombre de triplets introduits pour le calcul.

- (iv) **Le quatrième test repose sur le calcul de la RMSE sur les dérivées (gradient de pentes, exposition) des MNT.** Les *RMSE* des dérivées fournissent un complément d'information aux *RMSE* précédentes surtout lorsque les résultats sont proches quelque soient la maille prise en compte. Ce test permet de distinguer les *MNT* qui sont proche de la réalité c'est-à-dire qui prennent en compte la complexité du terrain. Pour les '*mouvements de versant*' cette composante est essentielle, les effets d'un mauvais modèle de terrain aux pentes non réalistes fausseraient les résultats de toute modélisation statistique et/ou déterministe. Les dérivées premières sont obtenues avec les formules Horn (1981).

ANNEXE 4.6. NOMENCLATURE DE LA BASE DE DONNEES OCCUPATION DU SOL CLC.

Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3	
1 TERRITOIRES ARTIFICIALISES	11 - Zones urbanisées	111 - Tissu urbain continu	
		112 - Tissu urbain discontinu	
	12 - Zones industrielles ou commerciales et réseaux de communication	121 - Zones industrielles ou commerciales	
		122 - Réseaux routiers et ferroviaires et réseaux de communication et espaces associés	
		123 - Zones portuaires	
		124 - Aéroports	
	13 - Mines, décharges et chantiers	131 - Extraction de matériaux	
		132 - Décharges	
		133 - Chantiers	
	14 - Espaces verts artificialisés, non agricoles	141 - Espaces verts urbains	
		142 - Equipements sportifs et de loisirs	
	2 TERRITOIRES AGRICOLES	21 - Terres arables	211 - Terres arables autres que serres, zones à forte densité de serres et rizières
212 - Périmètres irrigués en permanence			
213 - Rizières			
22 - Cultures permanentes		221 - Vignobles	
		222 - Vergers et petits fruits	
		223 - Oliveraies	
23 - Prairies		231 - Prairies	
24 - Zones agricoles hétérogènes		241 - Cultures annuelles associées aux cultures permanentes	
		242 - Systèmes culturaux et parcellaires complexes	
		243 - Surface essentiellement agricoles, interrompues par des espaces naturels importants	
		244 - Territoires agro-forestiers	
3 FORETS ET MILIEUX SEMI- NATURELS		31 - Forêts	311 - Forêt de feuillus
			312 - Forêts de conifères
			313 - Forêts mélangées
	32 - Milieux à végétation arbustive et/ou herbacée	321 - Pelouses et pâturages naturels	
		322 - Landes et broussailles	
		323 - Végétation sclérophylle	
		324 - Forêts et végétation arbustive en mutation	
	33 - Espaces ouverts, sans ou avec peu de végétation	331 - Plages, dunes et sables	
		332 - Roches nues	
		333 - Végétation clairsemée	
		334 - Zones incendiées	
		335 - Glaciers et neiges éternelles	
	4 ZONES HUMIDES	41 - Zones humides intérieures	411 - Marais intérieurs et tourbières de montagne
			412 - Tourbières
42 - Zones humides maritimes		421 - Marais maritimes	
		422 - Marais salants	
		423 - Zones intertidales	
5 SURFACES D'EAU	51 - Eaux continentales	511 - Cours et voies d'eau	
		512 - Plans d'eau	
	52 - Eaux maritimes	521 - Lagunes littorales	
		522 - Estuaires	
		523 - Mers et Océans	

ANNEXE 4.7. METADONNEES ET DESCRIPTION DES CLASSES DE SOL POUR LA BD 'OCCUPATION DU SOL' ALARM ET ALARMC

Données disponibles	<ul style="list-style-type: none"> - Une image satellite LANDSAT ETM+ corrigée (TM 30 m et P 15 m) du 28/08/00 (EURIMAGE 2002) - Deux images SPOT P (10 m) orthorectifiées du 17/10/94 (échange gracieux ENS-Lyon, C. Delacourt) - Modèle Numérique de Terrain au pas de 10 m - Bases de données IGN : BDOrtho® (2000), BDCarto® (2000), BDAIti® (2000) - Données GPS bi-fréquence, Mai 2002 (J.P. Malet) 		
Orthorectification	<p>Corrections géométriques de l'image LANDSAT réalisées à partir des images SPOT P, du MNT et des points GPS (logiciel Erdas Imagine : ajustement polynomial). Les coordonnées des objets répondent aux caractéristiques suivantes :</p> <p>Système géodésique : NTF Ellipsoïde de référence : Clarke 1880 IGN Point fondamental : Croix du Panthéon Méridien origine : Paris Projection associée : Lambert cartographique III Système altimétrique : Nivellement général de la France IGN 1969 (France continentale) Unité : mètre</p>		
Fusion	<p>Fusion de l'image Landsat multispectrale 30 m avec l'image panchromatique SPOT 10 m et production d'une image multispectrale à 10 m. (Algorithme de fusion par analyse en composante principale, Erdas Imagine).</p>		
Classification	<p>Occupation du sol obtenue à partir d'une procédure automatique de classification supervisée par maximum de vraisemblance (Erdas Imagine), complétée d'une procédure semi-automatique d'interprétation assistée par ordinateur pour améliorer la classification (versants à l'ombre, fond de vallée). Des vérifications sur le terrain et l'utilisation de données exogènes (photographies aériennes, plans topographiques, modèle numérique de terrain, cartes des peuplement forestiers) ont été également utilisées dans ce processus de reclassement (Erdas Imagine, Idrisi, ArcView) pour obtenir une classification de l'occupation du sol utilisable à une échelle du 1/10 000^e.</p>		
Classes d'occupation du sol	<p>Occupation du sol en 15 classes :</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Forêt et milieux naturels <ol style="list-style-type: none"> 1.1 Forêt de conifères dense 1.2 Forêt de conifères de densité moyenne à faible 1.3 Forêt de feuillus 1.4 Pelouses alpines et pâturages naturels 2. Territoires agricoles <ol style="list-style-type: none"> 2.1 Cultures permanentes 2.2 Prairies 3. Affleurements rocheux <ol style="list-style-type: none"> 3.1 Roches nues ou sols nus 3.2 Roche nue 4. Territoires artificialisés <ol style="list-style-type: none"> 4.1 Zones urbanisées 4.2 Zones industrielles 4.3 Aérodrome 4.4 Extraction de matériaux 5. Surfaces en eau <ol style="list-style-type: none"> 5.1 Cours d'eau 5.2 Lac, étangs 5.3 Alluvions 		
Echelle d'utilisation	1/10 000 ^e au 1/25 000 ^e		
Fichiers Description	<p>Nom du fichier : Description :</p> <table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="width: 50%; vertical-align: top;"> etm30.tif etm30_l3.tif bassin_etm30m_l3.tif bassin_fus10m_l3.tif barcelo_occsol_final10m.tif occsol_final.shp (+leg_occsol.avl) grid_final bassin_etude.shp limite_commune.shp </td> <td style="width: 50%; vertical-align: top;"> Image brute Landsat ETM+ (TIFF) Image orthorectifiée Landsat ETM+ (GeoTIFF) extrait de l'image orthorectifiée ETM+ (GeoTIFF) Image fusionnée ETM+P 10 m (GeoTIFF) Fichier raster occupation du sol (GeoTIFF) Fichier vecteur occupation du sol (SHAPE) Fichier grid occupation du sol (GRID) Limite du bassin d'étude (SHAPE) Limite des communes (SHAPE) </td> </tr> </table>	etm30.tif etm30_l3.tif bassin_etm30m_l3.tif bassin_fus10m_l3.tif barcelo_occsol_final10m.tif occsol_final.shp (+leg_occsol.avl) grid_final bassin_etude.shp limite_commune.shp	Image brute Landsat ETM+ (TIFF) Image orthorectifiée Landsat ETM+ (GeoTIFF) extrait de l'image orthorectifiée ETM+ (GeoTIFF) Image fusionnée ETM+P 10 m (GeoTIFF) Fichier raster occupation du sol (GeoTIFF) Fichier vecteur occupation du sol (SHAPE) Fichier grid occupation du sol (GRID) Limite du bassin d'étude (SHAPE) Limite des communes (SHAPE)
etm30.tif etm30_l3.tif bassin_etm30m_l3.tif bassin_fus10m_l3.tif barcelo_occsol_final10m.tif occsol_final.shp (+leg_occsol.avl) grid_final bassin_etude.shp limite_commune.shp	Image brute Landsat ETM+ (TIFF) Image orthorectifiée Landsat ETM+ (GeoTIFF) extrait de l'image orthorectifiée ETM+ (GeoTIFF) Image fusionnée ETM+P 10 m (GeoTIFF) Fichier raster occupation du sol (GeoTIFF) Fichier vecteur occupation du sol (SHAPE) Fichier grid occupation du sol (GRID) Limite du bassin d'étude (SHAPE) Limite des communes (SHAPE)		

DESCRIPTION DES CLASSES D'OCCUPATION DU SOL

<i>Exemple BDOOrtho@ (IGN, 2000)</i>	<i>Description de la classe d'occupation du sol</i>
	<p>1.1 Forêts de conifères denses Formation végétale principalement arborée où dominent les espèces forestières de conifères, en espace serré et compact.</p>
	<p>1.2 Forêts de conifères de densité moyenne Formation végétale principalement arborée, où les espèces forestières de conifères sont entrecoupées d'espaces non-arborés (pelouse alpine) ou de sols nus.</p>
	<p>1.3 Forêts de feuillus Formation végétale principalement arborée, où dominent les espèces forestières feuillues</p>
	<p>2.1. Cultures permanentes Surfaces cultivées régulièrement et généralement incluses dans un assolement</p>

<p><i>Exemple BDOOrtho@ (IGN, 2000)</i></p>	<p><i>Description de la classe d'occupation du sol</i></p>
	<p>3.2 Roche nue Affleurement rocheux gris foncé à noir</p>
	<p>4.1 Zones urbanisées Espaces structurés par des bâtiments à vocation principalement résidentielle, le plus souvent associés à des fonctions de commerce et de service</p>
	<p>4.2 Zones industrielles ou commerciales Bâtiments et espaces associés à la production industrielle ou commerciale</p>

Exemple BDOrtho@ (IGN, 2000)	Description de la classe d'occupation du sol
	<p>4.4 Extraction de matériaux Emprises liées à l'activité d'extraction industrielle (carrières)</p>
	<p>5.1 Cours d'eau Cours d'eau permanent d'une largeur minimum de 10 m (chenal d'écoulement naturel)</p>
	<p>5.2 Lac, étangs Etendues d'eau naturelles ou artificielles, généralement affectées à des activités de loisirs (pêche, baignade...)</p>
	<p>5.3 Alluvions Dépôt meuble laissé les cours d'eau formé de galets, de sable et de limon (de couleur gris clair)</p>

ANNEXE 6. PRINCIPES DES LOGIQUES FLOUES (BONHAM-CARTER, 1994)

Les logiques floues suscitent actuellement un intérêt général de la part de toutes les sciences qui éprouvent le besoin de formaliser les méthodes empiriques ou expertes de généraliser les modes de raisonnement sur des phénomènes naturels complexes (Zadeh, 1965). Elles sont donc nées de la constatation que la plupart des phénomènes ont une connaissance imparfaite et des limites imprécises pouvant être difficilement être représentées à l'aide de variables booléennes aux valeurs de 0 ou 1. C'est une méthode de pondération basée sur des règles subjectives et expertes dont le mode de calcul est contraint par des opérateurs spécifiques permettant de 'formaliser' ces règles. Ce type d'approche connaît depuis quelques temps un certain engouement dans la cartographie de la susceptibilité des 'mouvements de versant'.

1.1. Concept général

Zadeh en 1965 a introduit la notion d'ensemble(s) flou(s) ou 'Fuzzy set' sur la base de l'idée d'appartenance partielle à une classe, de catégories aux limites mal définies, admettant des situations intermédiaires entre le maximum et le minimum, entre le tout et le rien. Pour être plus clair, il est possible de résumer le concept de logique floue par cet exemple : peut-on considérer une eau à 18°C comme chaude ou froide ? Ne serait-elle pas tiède ? Pour répondre à ce type de question, les logiques floues considèrent la notion d'appartenance d'un objet à un ensemble comme une fonction qui peut prendre toutes les valeurs de 0 à 1. On ne fonctionne plus en certitude mais en peu, moyennement, très, hautement probable.

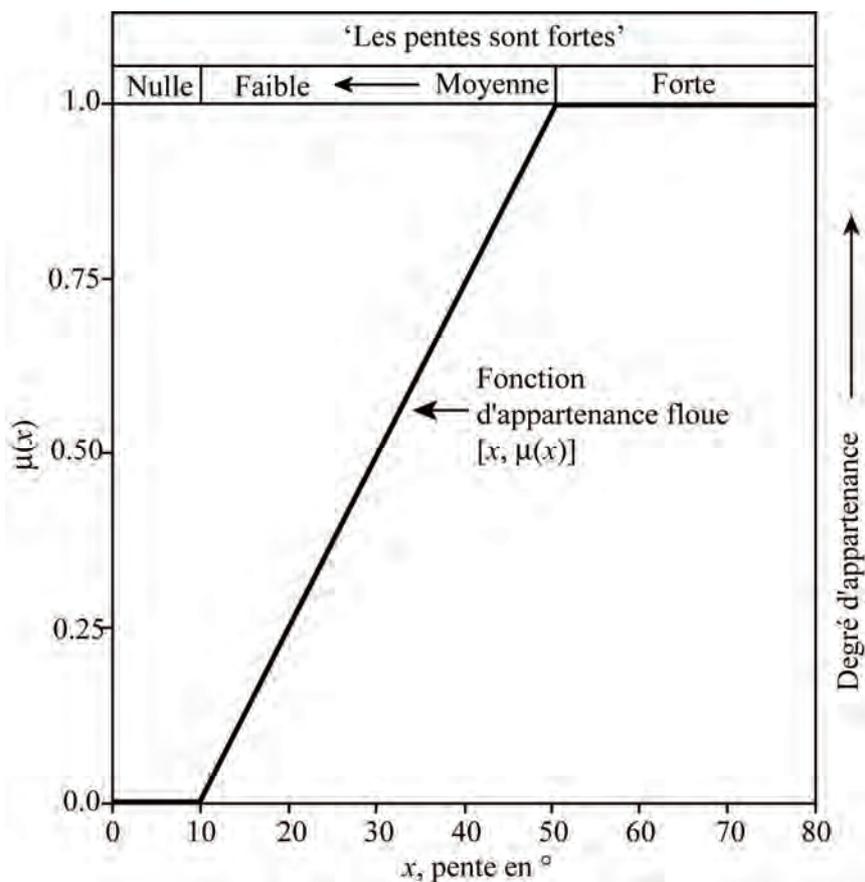


Fig. A6.1. Graphique représentant le concept des valeurs d'appartenance pour les logiques floues (d'après Bonham-Carter, 1994)

Les logiques floues mettent en place un cadre qui traite les incertitudes et les imprécisions qui ne peuvent pas l'être par les modèles statistiques. D'un point de vue purement informatique c'est le seul cadre qui permet de transcrire les connaissances à fort contenu sémantique, exprimées symboliquement par le langage, de manière numérique. Les logiques floues proposent de formaliser l'usage des ces termes vagues et de les rendre manipulable par les ordinateurs. Actuellement le terme de logiques floues connaît deux acceptations :

- (i) Premièrement, elles correspondent à tous les développements concernant la théorie de la possibilité ;
- (ii) Deuxièmement, c'est une extension de la logique classique, dans le but de raisonner sur des connaissances imparfaites par l'utilisation des α -coupes et des règles de raisonnement de type flou.

1.2. Principes de fonctionnement

Les logiques floues reposent sur deux notions fondamentales qui sont :

- (i) La gradation entre 0 et 1 des variables ;
- (ii) La définition d'un moteur d'inférence reliant les variables 'floues' d'entrée du modèle aux variables 'floues' de sortie. Ces règles, gérant le modèle, se présentent sous la forme de (i) *si* = condition1 ; (ii) *et/ou* = condition 2 ; (iii) *alors* = action sur les sorties.

Ces règles reflètent l'expérience de l'expert et sa vision, elles permettent de formaliser ce que l'expert ferait de manière intuitive habituellement et de répondre à une hypothèse H donnée..

1.2.1. Les variables floues

Dans les modèles statistiques les valeurs de pondération sont obtenues par divers calcul de probabilités liés à la théorie des ensembles. En logique floue on peut agir de deux manières : soit on se base sur des statistiques descriptives soit on pondère de manière experte.

1.2.2. Les règles d'inférence⁵

Ces notions permettent de justifier et de démontrer les éléments principaux se décompose en 4 grandes phases : (i) la fuzzyfication ; (ii) l'élaboration des règles d'inférence ; (iii) le calcul ; (iv) la defuzzyfication

1.2.2.1. Quantification floue ou 'fuzzyfication'

Cette première étape consiste à déterminer le degré d'appartenance de chaque variable d'entrée à chaque état. Celui-ci peut être déterminé à l'aide fonctions d'appartenance définies auparavant dans le système, par statistique suivant le nombre de variable à modéliser qui sont dans telles ou telles classes. Ces fonctions d'appartenance utilisent en général trois à sept états

⁵ Dans sa définition classique, l'inférence est une opération logique portant sur des propositions tenues pour vraies (les prémisses) et concluant à la vérité d'une nouvelle proposition en vertu de sa liaison avec les premières. C'est pourquoi l'inférence est souvent réduite à la déduction nécessaire dans lequel la vérité des prémisses assure totalement la vérité de la conclusion. Cependant la pensée n'opère pas sur des propositions mais sur des signes. On est donc conduits, pour rendre compte de la sémosis, à élargir la notion d'inférence à des opérations portant sur des symboles dicents (des quasi-propositions) et à remplacer la notion de vérité d'une proposition par celle de réalité d'une représentation pour un interprète particulier. Cette conception de l'inférence ouvre le champ à la description des opérations réellement effectuées dans la vie quotidienne et libère des contraintes imposées par le point de vue qui s'en tient uniquement à la production de vérités universelles, c'est à dire aux arguments valides. C'est ainsi que l'acte de poser une hypothèse qui consiste à tenir pour vraie, au moins provisoirement, une proposition n'entretenant aucun lien logique nécessaire avec les prémisses aura droit de cité dans cette perspective. On l'observe en effet dans toute activité de recherche dont elle constitue la part d'invention possible.

flous pour chaque variable. Leur formes varient du triangle, en cloche ou en trapèzes voir des formes plus complexes. Il n'y a pas de formes générales pour le choix des formes de représentations. Mais les formes triangulaires ou trapézoïdales sont faciles à construire, à manipuler et évite toute ambiguïté quant à la représentation de la densité de probabilités de distribution statistique.

Les degrés d'appartenance de chaque variable à chaque état permettent d'appliquer les règles floues qui ont été préalablement définies. Le degré d'appartenance des variables de sorties à chaque état est alors obtenu. Cinq grandes fonctions d'appartenance existe (Zimmermann, 1985 ; An *et al.*, 1991).

1.2.2.2. Opération "ET" (AND)

Cet opération (ou fonction) est équivalente à l'opération booléenne ET (intersection logique). Elle se traduit mathématiquement par :

$$\mu_{\text{combinaison}} = \text{MIN} (\mu_A, \mu_B, \mu_C, \mu_D, \dots) \quad [\text{Eq. A6.1}]$$

où μ_A est la valeur floue pour la donnée d'entrée A pour une cellule donnée, μ_B , est la valeur floue pour la donnée B pour une cellule donnée, etc.... Cette opération ne garde que la valeur minimum pour la combinaison. Si deux cartes sont combinées et que pour la même localisation la valeur de la carte A est 0.75 et la valeur de la cellule de la carte B est de 0.5, la combinaison 'floue' sera alors de 0.5. Les résultats sont donc contrôlés par la valeur floue la plus petite. Cette règle a tendance à produire des valeurs réduites. Ce type d'opération est appropriée lorsque deux ou plusieurs principes d'évidences sont présents ensemble pour que l'hypothèse soit vraie (Bonham-Carter, 1994).

1.2.2.3. Opérateur OU (OR)

Cet opérateur(ou fonction) est l'équivalent de la fonction booléenne OR (union logique). Le résultat final pour une localisation (une cellule) équivaut à la valeur maximum rencontrée pour toutes les données d'entrée incorporées au modèle. Contrairement à la fonction ET si la carte A a pour valeur 0.75 pour une cellule et la carte B une valeur de 0.5 pour la même cellule alors seule la valeur 0.75 est gardé pour le résultat final.

La fonction se traduit alors par :

$$\mu_{\text{combinaison}} = \text{MAX} (\mu_A, \mu_B, \mu_C, \mu_D, \dots) \quad [\text{Eq. A6.2}]$$

Ce type d'opération est utilisée largement pour la prospection minière surtout lorsque les indicateurs de minéralisation sont rares.

Les deux opérations ET et OR ont un inconvénient majeur : une seule valeur floue est retenue pour le résultat final, ce qui masque les effets d'une ou plusieurs valeurs floues qui sont plus faible ou plus grande pour une même cellule Le résultat final s'en trouve donc biaisé surtout si naturellement les VP combinées .

1.2.2.4. Opérateur algébrique PRODUIT

L'opérateur se traduit par :

$$\mu_{\text{combinaison}} = \prod_{i=1}^n \mu_i \quad [\text{Eq. A6.3}]$$

Où μ_i est la fonction de valeurs floues pour la $i^{\text{ème}}$ carte et $i = 1, 2, 3, \dots, n$ cartes seront combinées. Les valeurs finales tendent à être faible avec cet opérateur du fait de la multiplication de valeur < 1 . les valeurs finales ont tendance à être inférieures à celles obtenues avec l'opérateur OU, l'effet est donc 'diminuant'. Par exemple le produit algébrique de (0.75, 0.5) est 0.375. En

revanche par rapport aux opérateurs ET et OU chaque valeur pour chaque cellule a un effet sur les valeurs finales.

1.2.2.5. Opérateur algébrique SOMME

Cet opérateur algébrique est complémentaire du produit algébrique PRODUIT

$$\mu_{\text{combinaison}} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - \mu_i) \quad [\text{Eq. A6.4}]$$

Les résultats issus de cette opération sont toujours au-dessus de la valeur la plus élevée introduite dans le processus de calcul. L'effet est donc 'amplifiant'. Ainsi deux valeurs fortes, reflétant des évidences élevées, se renforcent l'une et l'autre provoquant un effet supérieur que si elles étaient utilisées seules. Par exemple, l'opérateur algébrique SOMME de (0.75, 0.5) équivaut à $1 - (1 - 0.75) \times (1 - 0.5)$ soit 0.875. la valeur finale ne peut jamais excéder la valeur de 1.

1.2.2.6. Opérateur Gamma

Cet opérateur est défini par les opérateurs algébriques PRODUIT et SOMME.

$$\mu_{\text{combinaison}} = (\text{SOMME})^\gamma \times (\text{PRODUIT})^{1-\gamma} \quad [\text{Eq. A6.4}]$$

Où γ est une variable comprise entre 0 et 1 (Zimmermann et Zysno, 1980). Lorsque γ égal à 1 la combinaison est la même que pour SOMME. Lorsque γ égal à 0 la combinaison équivaut à l'opération effectuée avec PRODUIT. La variable γ , lorsqu'elle est bien choisi permet donc d'augmenter ou de diminuer la tendance de ces deux opérations. Par exemple An *et al.* (1991) utilisent la valeur 0.975 pour combiner des données géophysiques et géologiques dans une étude sur les dépôts d'argent. Cette valeur semble correspondre le plus à la réflexion subjective et experte des scientifiques. Comme le souligne Bonham-Carter (1994) c'est une manière 'flexible' de modérer ces deux opérateurs. La figure A6.2 montre les effets de la variable γ sur les différentes combinaisons.

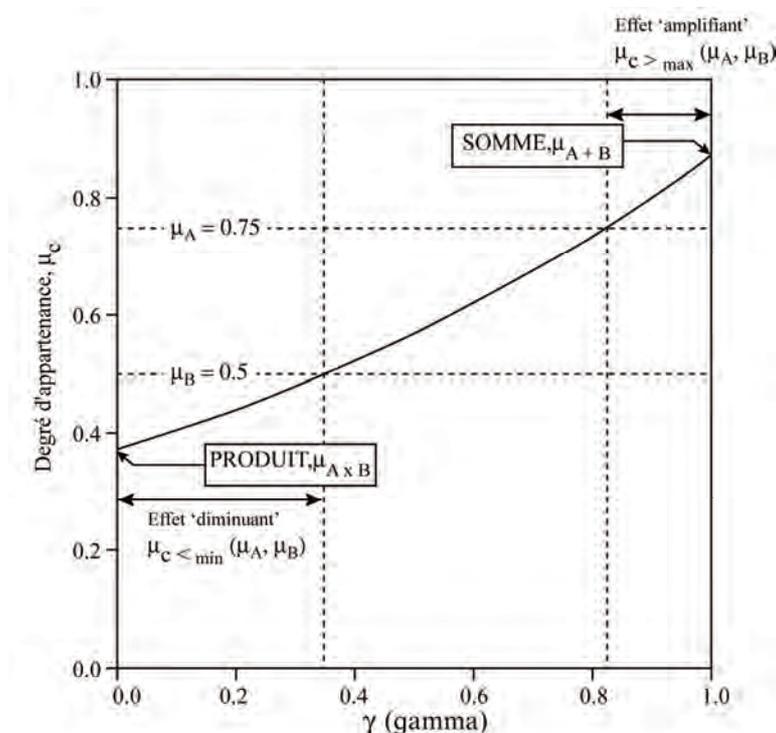


Fig. A6.2. Graphique représentant l'influence du coefficient γ pour l'opérateur GAMMA (d'après Bonham-Carter, 1994).

1.2.3. Defuzzification

Les valeurs obtenues définissent une fonction d'appartenance. Afin de procéder à des comparaisons avec d'autres modèles il faut transformer ces valeurs en, grandeur physique soit procéder à une defuzzification. Cette dernière s'effectue par plusieurs méthodes :

- (i) Méthode du Centre de gravité ;
- (ii) Méthode du maximum ;
- (iii) Méthode du minium du plateau '*à gauche*' ;
- (iv) Méthode du maximum du plateau '*à droite*' ;

En pratique les méthodes (i) et la (ii) sont utilisées majoritairement.

ANNEXE. 7.1. ANALYSE BIVARIEE PAR THEORIE DE L'EVIDENCE : PRINCIPES (VAN WESTEN, 1993 ; BONHAM-CARTER, 1994)

Cette méthode a été mise au point par le bureau canadien de recherches géologiques (Agterberg *et al.*, 1990 ; Bonham-Carter *et al.*, 1990) et a été utilisée pour cartographier les potentialités de ressources minières. Sabto (1991) a appliqué cette méthode pour l'analyse de l'aléa '*mouvements de versant*'. La méthode basée sur les théories de Bayes, consiste à réduire chacun des groupes de facteurs relatifs aux '*mouvements de versant*' d'une carte quelconque en un modèle de discrétisation. Dans sa forme la plus simple, ce modèle de discrétisation est binaire, se traduisant par la présence (1) ou l'absence (0) d'un phénomène à l'intérieur d'une cellule. Selon Bonham-Carter *et al.* (1990), la première étape de la démarche est de déterminer la probabilité *a priori* d'occurrence d'une variable à modéliser (VM, *i.e.* les '*mouvements de versant*'), en dénombrant dans la zone d'étude le nombre de cellules où un '*mouvement de versant*' est observé :

$$P_{prior} = \frac{Ncel(mvts)}{Ncel(total)} = P\{S\} \quad [\text{Eq. A7.1}]$$

avec : P_{prior} = la probabilité réellement observée ; $Ncel(mvts)$ = le nombre de cellules caractérisés par la présence d'un '*mouvements de versant*' ; $Ncel(total)$ = le nombre total de cellules sur la carte.

Pour des raisons mathématiques, il est plus aisé d'utiliser la forme probabiliste (O) qui représente les côtes (*odds*, une côte représentant la probabilité de présence sur la probabilité d'absence d'un phénomène), soit :

$$O_{prior} = \frac{P_{prior}}{1 - P_{prior}} = \frac{Ncel(mvts)}{Ncel(total) - Ncel(mvts)} \quad [\text{Eq. A7.2}]$$

$$P\{B_i\} = Ncel(B_i)/Ncel(total) \quad [\text{Eq. A7.3}]$$

$$P\{\bar{B}_i\} = Ncel(total) - Ncel(B_i)/Ncel(total) \quad [\text{Eq. A7.4}]$$

En considérant la relation entre une carte de variables binaires (B_i) et une carte représentant les '*mouvements de versant*' (S), quatre combinaisons de B_i et S sont possibles sur la carte :

$$B_i \cap S ; \bar{B}_i \cap S ; B_i \cap \bar{S} \text{ et } \bar{B}_i \cap \bar{S}.$$

La figure A.7.1 illustre le concept de croisement des VM et VP.

La probabilité conditionnelle qu' un pixel contienne un '*mouvement de versant*', considérant que cette cellule contient une variable B_i , est :

$$P\{S|B_i\} = \frac{B_i \cap S}{B_i} \quad [\text{Eq. A7.5}]$$

et les trois autres probabilités conditionnelles sont :

$$P\{\bar{S}|B_i\} = \frac{B_i \cap \bar{S}}{B_i} \quad [\text{Eq. A7.6}]$$

$$P\{S|\overline{B}_i\} = \frac{\overline{B}_i \cap S}{B_i} \quad [\text{Eq. A7.7}]$$

$$P\{\overline{S}|\overline{B}_i\} = \frac{\overline{B}_i \cap \overline{S}}{B_i} \quad [\text{Eq. A7.8}]$$

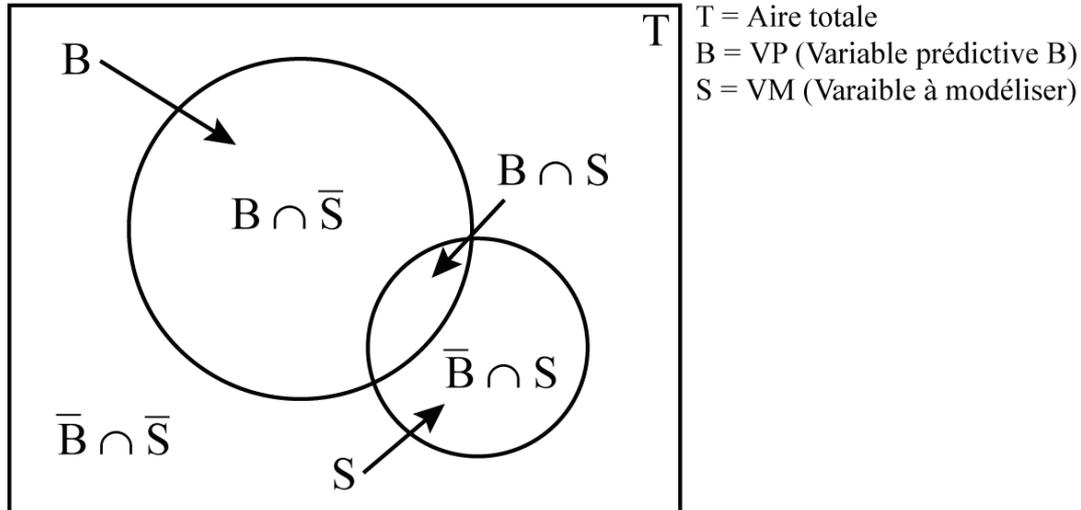


Fig. A7.1. Diagramme de Venn illustrant l'approche bivariable par Théorie de l'évidence (Bonham-Carter, 1994).

En considérant les règles des théories bayésiennes, on peut alors écrire :

$$P\{S|B_i\} = \frac{P\{B_i|S\}P\{S\}}{P\{B_i\}}, \quad P\{S|\overline{B}_i\} = \frac{P\{\overline{B}_i|S\}P\{S\}}{P\{\overline{B}_i\}} \quad [\text{Eq. A7.9}]$$

Bonham-Carter *et al.* (1990) ont défini les poids positifs et négatifs (W_i^+ et W_i^-), tenant compte du ratio des logarithmes naturels des côtes (odds) ou logit. Ainsi, W_i^+ et W_i^- qui combinent ces probabilités conditionnelles, sont retranscrites comme suit:

$$W_i^+ = \log_e \frac{P\{B_i|S\}}{P\{B_i|\overline{S}\}} \quad [\text{Eq. A7.10}]$$

$$W_i^- = \log_e \frac{P\{\overline{B}_i|S\}}{P\{\overline{B}_i|\overline{S}\}} \quad [\text{Eq. A7.11}]$$

Cette méthode peut être utilisée dans un SIG relativement aisément, en croisant simplement la carte binaire des 'mouvements de versant' et la carte binaire des variables prédictives (VP). Les quatre combinaisons résultantes sont données dans le tableau A.7.1.

Tab. A7.1. Exemple d'un croisement entre une carte binaire des 'mouvements de versant' et une carte de variables binaires. Ncel₁₋₄ est le nombre de cellules pour chacune des combinaisons.

'Mouvements de versant'	Classes de variables représentatives d'un modèle binaire	
	1 (présence)	0 (absence)
Présence	Ncel ₁	Ncel ₂
Absence	Ncel ₃	Ncel ₄

La Théorie de l'évidence peut être alors exprimée selon le nombre de cellules comme suit :

$$W_i^+ = \log_e \frac{\frac{Ncel_1}{Ncel_1 + Ncel_2}}{\frac{Ncel_3}{Ncel_3 + Ncel_4}} \quad [\text{Eq. A7.12}]$$

$$W_i^- = \log_e \frac{\frac{Ncel_1 + Ncel_2}{Ncel_3 + Ncel_4}}{\frac{Ncel_3 + Ncel_4}{Ncel_3 + Ncel_4}} \quad [\text{Eq. A7.13}]$$

Si plus de deux cartes binaires sont utilisées, les pondérations peuvent être ajoutées pour actualiser la probabilité *a priori*. En considérant que les cartes de variables sont statistiquement indépendantes par rapport aux VM introduites (*i.e.* les 'mouvement de versant') la probabilité *a priori* peut ainsi être calculée comme suit :

$$\log_e O\{S|B_1^k \cap B_2^k \cap B_3^k \dots B_n^k\} = \sum_{i=1}^n W_i^k + \log_e O_{\text{prior}}\{S\} \quad [\text{Eq. A7.14}]$$

Et la probabilité *a posteriori* est exprimée ainsi :

$$P\{S\} = \frac{O}{(I+O)} \quad [\text{Eq. A7.15}]$$

Le **contraste C** : $C = W_i^+ - W_i^-$ mesure la corrélation entre la carte des VM et des VP. Lorsque C tend vers 0 la distribution est spatialement indépendante des VM, il n'y a pas de relation entre les VM et les VP.

Le principe fondamental de l'utilisation des approches bivariées de ce type est que les VP doivent être **conditionnellement indépendante**. Pour tester cette indépendance un test statistique basé sur un tableau de contingence peut être effectué (Bonham-Carter *et al.*, 1990). Toutes les paires possibles de variables sur la carte sont alors évaluées séparément. Le test inclut le calcul des fréquences observées et supposées des VM. Ainsi les VP sont croisées deux par deux, et le résultat de ces croisements est alors croisé une nouvelle fois avec la carte des VM. La combinaison obtenue de ce croisement des deux cartes binaires et de la carte des glissements de terrain est donné dans le tableau ci-dessous (Tab. A7.2).

Tableau A7.2. Exemple d'un croisement entre une carte binaire des 'mouvements de versant' et une carte de variables binaires. $Ncel_{1-4}$ est le nombre de cellules pour chacune des combinaisons.

'Mouvements de versant'	Combinaisons possibles entre les deux cartes binaires			
	$B_1 \cap B_2$	$B_1 \cap \overline{B_2}$	$\overline{B_1} \cap B_2$	$\overline{B_1} \cap \overline{B_2}$
Présence	Ncel1	Ncel2	Ncel3	Ncel4
Absence	Ncel5	Ncel6	Ncel7	Ncel8

La **dépendance conditionnelle** est alors évaluée selon un test de χ^2 qui consiste à comparer l'écart entre le χ^2 réel, qui est fonction du nombre d'unité de terrain occupé par les VM, à un χ^2 théorique. Le test d'indépendance repose alors sur l'acceptation ou le rejet de l'hypothèse nulle H_0 , selon un degré de liberté (qui est fonction du nombre de classes croisées) et un seuil de signification généralement donné à $\alpha = 0.05$; Bonham-Carter, 1994 ; Davis, 2002). Si l'écart entre les deux χ^2 est grand alors H_0 est rejetée et il y a dépendance conditionnelle entre les deux VP. D'autres méthodes sont utilisées, elles sont évoquées dans le chapitre 7.

En utilisant la *Théorie de l'évidence*, chacun des croisements de deux classes de variables est calculé selon :

$$\log_e O(S|B_1 B_2) = W_1^+ + W_2^+ + \log_e O(S) \quad [\text{Eq. A7.16}]$$

$$\log_e O(S|B_1 \overline{B_2}) = W_1^+ + W_2^- + \log_e O(S) \quad [\text{Eq. A7.17}]$$

$$\log_e O(S|\overline{B_1} B_2) = W_1^- + W_2^+ + \log_e O(S) \quad [\text{Eq. A7.18}]$$

$$\log_e O(S|\overline{B_1} \overline{B_2}) = W_1^- + W_2^- + \log_e O(S) \quad [\text{Eq. A7.19}]$$

Le nombre de cellules prédits par la méthode pour un croisement donné peut être calculé comme suit :

$$m_i = P_i Ncel_i \quad [\text{Eq. A7.20}]$$

Avec m = le nombre de '*mouvements de versant*' calculés par le croisement de deux classes, P_i = la probabilité calculée pour le croisement de deux classes, $Ncel_i$ = le nombre de cellules pour chaque croisement (pour $B_1 \cap B_2$ cela correspondra à $Ncel_1 + Ncel_5$).

ANNEXE 7.2. LE MODELE DE REGRESSION LOGISTIQUE (D'APRES HOSMER ET LOMESHOW, 1989 ET RUSH, 2001)

Pour paramétrer le modèle de régression logistique, il faut dans un premier temps définir le modèle fondamental pour toutes les analyses de régression multiple. Il est établi que la variable de sortie est une combinaison linéaire d'un jeu de variables prédictives. Pour une variable de sortie Y et un jeu de n variables prédictives, X_1, X_2, \dots, X_n , nous avons la relation suivante :

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n + \varepsilon = \beta_0 + \sum_{j=1}^n \beta_j X_j + \varepsilon \quad [\text{Eq.7.21}]$$

Où β_0 est la valeur que Y doit prendre quand les variables prédictives sont égales à 0, β_j est le coefficient de régression pour chacune des variables prédictives, X_j et ε est l'erreur sur la prédiction. A noter que $Y - \varepsilon = Y'$ représente la valeur attendue de Y , $E(Y|X_1, X_2, \dots, X_n)$. Cette relation peut également être trouvée comme la moyenne conditionnelle.

Ce modèle multivarié est particulièrement utile quand la variable est continue, mais non appropriée quand la variable présente des dichotomies, comme dans le cas où Y représente la présence (1) ou l'absence (0) d'un '*mouvement de versant*'. Ainsi, ce modèle ne produirait pas des valeurs comprises entre 1 et 0. De nombreux résultats ne seraient pas interprétables, comme par exemple dans le cas où la valeur de Y serait comprise entre 1 et 0 ou supérieure à 1.

Le modèle de régression logistique modélise indirectement les variables basées sur les probabilités associées aux valeurs de Y . Dans ce cas, la fonction $\pi(\mathbf{x})$ est utilisée pour représenter la probabilité que $Y=1$, dans le cas où il y'a la présence d'un '*mouvement de versant*'. Inversement, la fonction $1 - \pi(\mathbf{x})$ est utilisée quand $Y=0$, dans le cas où il y'a absence d'un '*mouvement de versant*'. Ces probabilités sont écrites sous la forme suivante :

$$\pi(\mathbf{x}) = P(Y = 1 | X_1, X_2, \dots, X_n) \quad [\text{Eq.7.22}]$$

$$1 - \pi(\mathbf{x}) = P(Y = 0 | X_1, X_2, \dots, X_n) \quad [\text{Eq.7.23}]$$

Dans l'équation (Eq. 7.4), le modèle de logarithmes naturels des côtes est utilisé pour favoriser le fait que Y soit égale à 1.

$$\ln \frac{P(Y = 1 | X_1, X_2, \dots, X_n)}{1 - P(Y = 1 | X_1, X_2, \dots, X_n)} = \ln \frac{\pi(\mathbf{x})}{1 - \pi(\mathbf{x})} = \beta_0 + \sum_{j=1}^n \beta_j X_j \quad [\text{Eq.7.24}]$$

En utilisant l'inverse de la transformation logarithmique de l'équation (Eq. 7.4), on obtient :

$$P(Y = 1 | X_1, X_2, \dots, X_n) = \frac{e^{\beta_0 + \sum_{j=1}^n \beta_j X_j}}{1 + e^{\beta_0 + \sum_{j=1}^n \beta_j X_j}} = \frac{1}{1 + e^{-(\beta_0 + \sum_{j=1}^n \beta_j X_j)}} \quad [\text{Eq.7.25}]$$

Ainsi, la construction de ce modèle de régression logistique satisfait la condition que la moyenne conditionnelle est toujours comprise entre 0 et 1.

La prochaine étape consiste à ajuster ce modèle de régression logistique aux données. En premier lieu, il est nécessaire de définir une technique pour estimer les différents paramètres. La

technique utilisée pour les estimer est la vraisemblance maximale. On construit une fonction de vraisemblance, qui exprime la probabilité des données observées comme une fonction des paramètres inconnus. Puis on obtient les estimateurs de vraisemblance de ces paramètres qui maximise la fonction de vraisemblance. Au cours du processus, les estimateurs qui prévoient le mieux les données observées sont sélectionnés.

Pour un jeu de données observées (x_i, y_i) , la contribution à la fonction de vraisemblance est $\pi(x_i)$, pour $y_i=1$, et $1 - \pi(x_i)$, pour $y_i=0$. L'équation suivante résout pour la contribution (appelée $\zeta(x_i)$) la fonction de vraisemblance pour les observations, (x_i, y_i) :

$$\zeta(x_i) = \pi(x_i)^{y_i} [1 - \pi(x_i)^{1-y_i}]. \quad [\text{Eq.7.26}]$$

Cette équation est utilisable pour un seul et unique jeu de données. Les observations sont considérées comme indépendantes l'une de l'autre permettant de multiplier leur vraisemblance pour obtenir la fonction de vraisemblance complète. Les résultats sont donnés dans l'équation (Eq. 7.27) :

$$l(B) = \prod_{i=1}^n \zeta(x_i) \quad [\text{Eq.7.27}]$$

où B est l'ensemble des paramètres $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_j$ et $l(B)$ est la fonction de vraisemblance de B .

L'estimation de la vraisemblance maximale (*MLE's*) peut être obtenue en calculant la valeur de B qui maximise la fonction $l(B)$. Cependant, pour simplifier la résolution mathématique, le logarithme de l'équation (Eq. 7.27) est défini avant de trouver la valeur de B qui maximise la fonction de vraisemblance. Comme cela est démontré dans l'équation (3), $L(B)$ dénote l'expression du logarithme de la vraisemblance.

$$L(B) = \ln[l(B)] = \sum_{i=1}^n y_i \ln[\pi(x_i)] + (1 - y_i) \ln[1 - \pi(x_i)] \quad [\text{Eq.7.28}]$$

Une technique de calcul permet de déterminer la valeur de B qui maximise $L(B)$, elle consiste à utiliser une équation différentielle (Eq 7.28) associée aux paramètres $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_j$ où la dérivé est égale à zéro. Ces équations sont appelées équations de vraisemblance, elles sont au nombre de $j+1$. Elles prennent la forme suivante :

$$\sum_{i=1}^n [y_i - \pi(x_i)] = 0 \quad [\text{Eq.7.29}]$$

pour β_0 , et $\sum_{i=1}^n x_{ik} [y_i - \pi(x_i)] = 0$, pour $k = 1, 2, \dots, j$

Pour les variables prédictives $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_j$.

La solution à ces équations est la vraisemblance maximale estimée (\hat{B}). La solution peut être trouvée avec l'aide de l'outil informatique.

ANNEXE 7.3. NOMBRE DE VM RETENUES ET NOMBRE DE CELLULES REPRESENTATIVES POUR LA RECHERCHE DU JEU DE CELLULES OPTIMUM POUR LES MODELES D'ANALYSE SPATIAL PROBABILISTES.

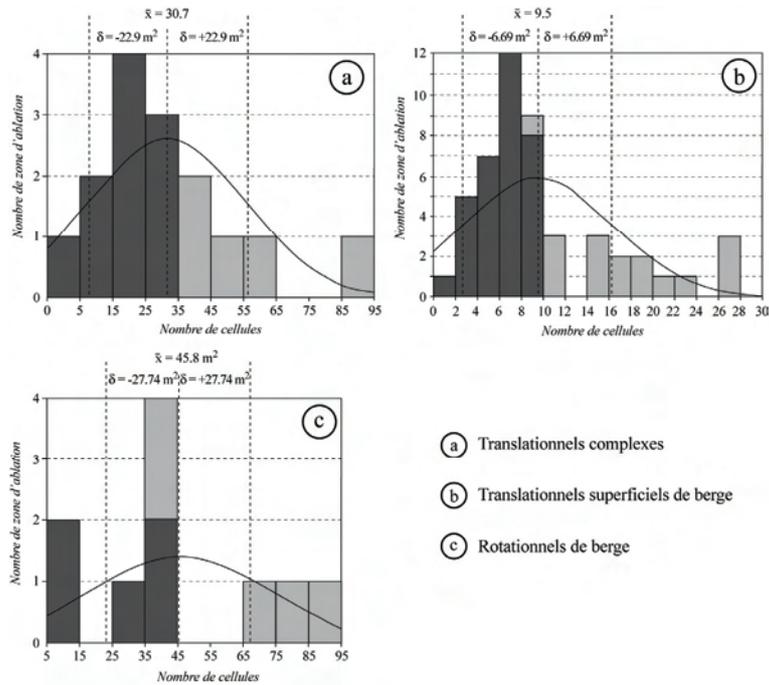


Fig. A7.3.1. Taille minimum retenue.

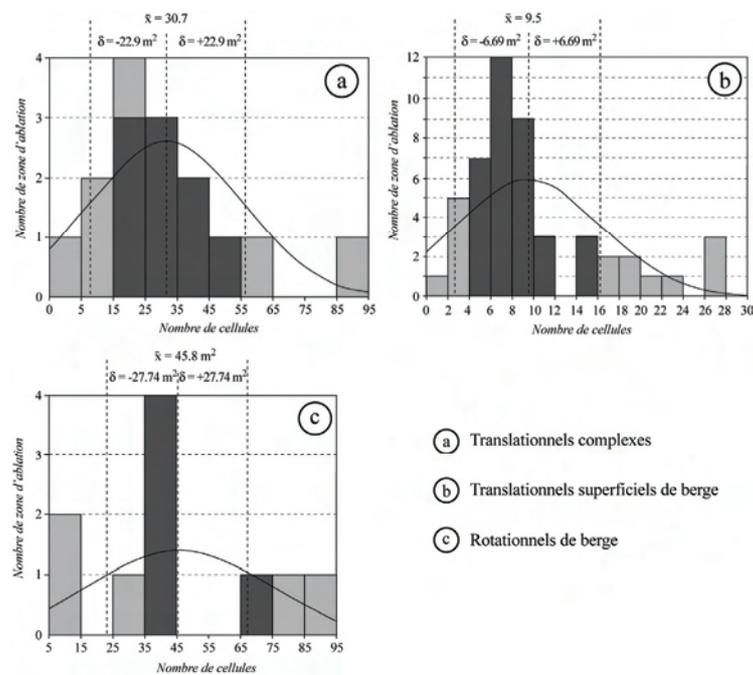


Fig. A7.3.2. Taille moyenne retenue.

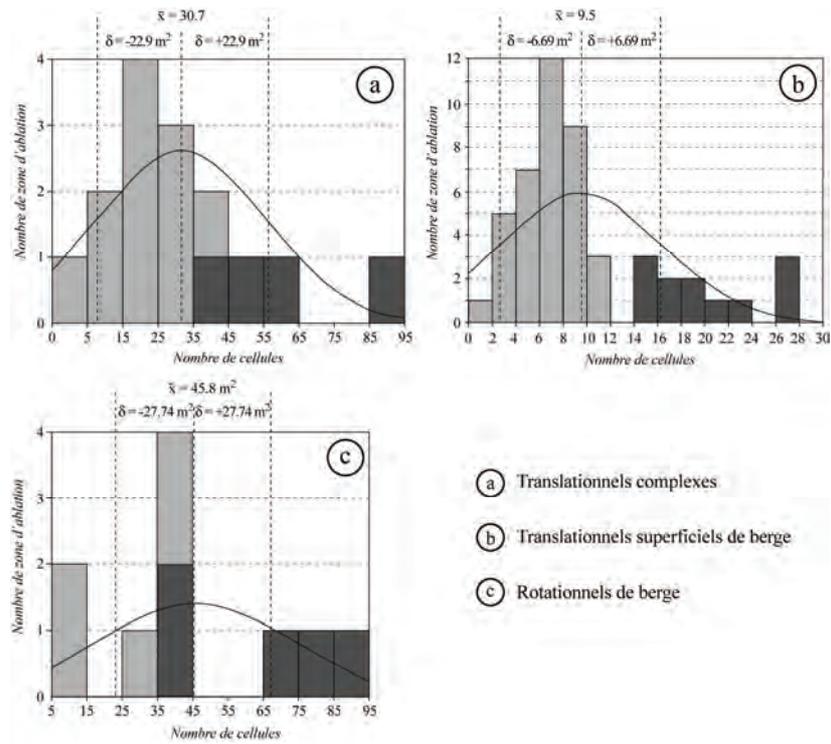


Fig. A7.3.3. Plus grande taille retenue.

ANNEXE 7.4. ANALYSE DES CORRESPONDANCES MULTIPLES (ACM) : PRINCIPES

L'analyse des correspondances multiples (ACM) est une méthode descriptive de l'analyse multivariée (Benzécri, 1973), qui comprend également des méthodes explicatives. Outre l'ACM, les méthodes descriptives comportent la CAH (classification ascendante hiérarchique), l'analyse en composante principale (ACP) et l'analyse factorielle des correspondances (AFC) ; les méthodes explicatives se composent de la régression multiple, de l'analyse discriminante et de la segmentation.

L'analyse multivariée est utilisée pour synthétiser et expliquer l'information donnée par plusieurs variables, à les résumer en minimisant la déperdition d'information. Le but des différentes méthodes qui la composent est de mettre en lumière des dimensions cachées contenues dans les réponses aux variables sélectionnées.

L'Analyse des Correspondances Multiples est une extension de l'analyse factorielle des correspondances (AFC) pour l'étude simultanée de plusieurs variables. Elle peut être considérée comme une AFC sur un tableau de Burt – ce dernier étant un tableau de contingence symétrique qui croise en un seul tableau toutes les modalités de chaque caractère les unes avec les autres.

L'objectif des méthodes factorielles, dont fait partie l'ACM, est de déterminer un sous-espace de dimension réduite, 'compréhensible' par simple observation, de un ou plusieurs nuages de variables sur un graphique. Ces méthodes constituent donc l'extension de la statistique descriptive au cas multidimensionnel et autorisent une analyse simultanée de plusieurs variables. Pour obtenir un tel sous-espace, la méthode consiste à chercher, dans un premier temps, l'axe sur lequel le nuage se déforme le moins en projection c'est-à-dire qui restitue la part la plus importante de l'inertie totale du nuage ou autrement dit de l'information qu'il contient. Une fois ce premier axe déterminé, il s'agit alors de chercher le second axe sur lequel le nuage se déforme le moins, tout en étant orthogonal au premier. Il suffira ensuite de répéter le processus jusqu'à restituer l'intégralité de l'inertie du nuage. L'analyse des correspondances multiples permet d'observer les combinaisons et les liens entre les variables actives, c'est un outil visuellement puissant et très intuitif. La visualisation de plans factoriels dans l'espace des variables permet d'analyser l'information contenue sur deux axes factoriels.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES - ANNEXES

- Ackermann, F., 1999. Airborne laser scanning. Present status and future expectations. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 54, 64–67.
- Agterberg F.P., Bonham-Carter, G.F., Wright, D.F., 1990. *Statistical pattern integration for mineral exploration*. In Gaal, G., Merriam, D.F., (Eds), Computer applications in resource estimation prediction and assessment of metals and petroleum. Oxford, UK: Pergamon Press, 1–12.
- An, P., Moon, W. M., Rencz, A., 1991. Application of fuzzy set theory for integration of geological, geophysical and remote sensing data. *Canadian Journal of Exploration Geophysics*, 27, 1-11.
- Baillargeon, S., 2005. *Le krigeage : revue de la théorie et application à l'interpolation spatiale de données de précipitations*. Mémoire de Maîtrise es Sciences de la Faculté des Etudes Supérieures de l'Université de Laval, 137 p. <http://www.theses.ulaval.ca/2005/22636/22636.pdf>
- Baltsavias, E.P., 1999. Airborne laser scanning: existing systems and firms and other resources. *ISPRS Journal of Remote Sensing and Photogrammetry*, Vol. 54 (2-3), 164-198.
- Baltsavias, E.P., 1999. A comparison between photogrammetry and laser scanning. *ISPRS Journal of Remote Sensing and Photogrammetry*, Vol. 54 (2-3), 83-94.
- Benzecri, J.P., 1973. *L'analyse des données*. Tome 2 : L'analyse des correspondances. Dunod.
- Bisci, C., Dramis, F., 1993. *Earthquake related mass movements in Italy*. Proceedings of the Hokkaido Earth Science Forum '92, Sapporo, 40-55.
- Bonham-Carter, G.F., 1994. *Geographic Information System for Geoscientists: Modelling with GIS*. Pergamon Press, Oxford, 398 p.
- Bonham-Carter, G.F., Agterberg, F.P., Wright, D.F., 1990. *Statistical pattern integration for mineral exploration*. In: Gaal, G., Merriam, D.F. (Eds.), Computer Applications in Resource Estimation: Prediction and Assessment for Metals and Petroleum. Pergamon Press, Oxford, 1–21.
- Bonin O., Rousseaux F., 2005, Digital Terrain Model Computation from Contour Lines: How to Derive Quality Information from Artefact Analysis. *GeoInformatica*, Vol. 9 (3), 253-268.
- Borgefors, G., 1986. Distance transformations in digital images. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 34 (3), 344–371.
- Brimicombe, A.J., 2003. *GIS, environmental modelling and engineering*, Taylor & Francis, London, 312 p.
- Burrough, P.A., Mc Donnel, 1996. *Principles of Geographical Information Systems*, Oxford University Press, 333 p.
- Carrara, A., Bitelli, G., Carla' R. 1997. Comparison of techniques for generating digital terrain models from contour lines. *International Journal of Geographical Information Science*, 11, 451-473.
- Casas, A., Benito, G., Thorndycraft, V.R., Rico, M., 2006. The topographic data source of digital terrain models as a key element in the accuracy of hydraulic flood modelling. *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 31 (4), 444-456.
- Cendrero, A., Dramis, F., 1996. The contribution of landslides to landscape evolution in Europe. *Geomorphology*, Vol. 15 (3–4), 191–211.
- Corominas J., Moya J. 1999. Reconstructing recent landslide activity in relation to rainfall in the Llobregat River basin, Eastern Pyrenees, Spain. *Geomorphology*, 30, 73-93.
- Corsini, A., Pasuto, A., Soldati, M., 1999. Geomorphological investigation and management of the Corvara landslide (Dolomites, Italy). *JGU Transactions*, Vol. 20 (3), 169-186.

- Crozier M.J., 1984. *Field assessment of slope instability*. In Brunsten D., and Prior, D.B., (Eds), *Slope Instability*. Wiley, New York, 103-142.
- Cruden D.M., Varnes D.J. 1996. *Landslide types and processes*. In Turner,A.K., Shuster, R.L., (Eds), *Landslides: Investigation and Mitigation*. Transportation Research Board, Special Report 247, 36-75.
- Cruden, D.M., 1991. A simple definition of a landslide. *Bulletin International Association for Engineering Geology*, 43, 27-29.

Davis, J.C., 2002. *Statistics and Data Analysis in Geology*, Third Edition. John Wiley & Sons, New York, 638 p.

- Dikau, R., Brunsten, D., Schrott, L., Ibsen, M.-L., 1996. *Landslides Recognition, Identification, Movement and Causes*. John Wiley & Sons, New York, 251 p.
- Dikau, R., Schrott, L., 1999. The temporal stability and activity of landslides in Europe with respect to climatic change (TESLEC): main objectives and results. *Geomorphology*, Vol. 30 (1-2), 1-12.

Einstein, H.H., 1988. *Special lecture: Landslide risk assessment procedure*. Proc. 5th Int. Symp. on Landslides, Lausanne, Switzerland, Vol. 2, Balkema, Rotterdam , 1075-1090.

Flageollet, J.C., 1989. *Les mouvements de terrain et leur prévention*. Masson, Paris. 218 p.

- Flageollet, J.C., 1996. The time dimension in the study of mass movements. *Geomorphology*, 15, 185-190.
- Florinsky, I.V., 1998. Accuracy of local topographic variables derived from digital elevation models. *International Journal of Geographical Information Science*, 12, 47-61.

Gomes Pereira LM, Wicherson RJ. 1999. Suitability of laser data for deriving geographical information: a case study in the context of management of fluvial zones. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 54 (2-3): 105-114.

- González Díez, A., Salas, L., Díaz de Terán, J.R., Cendrero, A. 1996. Late quaternary climate changes and mass movement frequency and magnitude in the Cantabrian region. *Geomorphology*, 15, 291-309.
- González Díez, A., Remondo, J., Díaz de Terán, J.R., Cendrero, A. 1999. A methodological approach for the analysis of the temporal occurrence and triggering factors of landslides. *Geomorphology*, Vol. 30 (1), 95-113.
- Gueremy, P., 1987. Principes de cartographie des risques inhérents à la dynamique des versants. *Travaux de l'Institut Géographique de Reims*, 69-72, 5-41.
- Gueremy, P., Marre, A., 1996. Une nouvelle méthode de cartographie géomorphologique applicable aux aléas naturels. *Travaux de l'Institut Géographique de Reims*, 94-96, 5-45.

Hengl, T., 2006. Finding the right pixel size. *Computers and Geosciences*, Vol. 32 (9), 1283-1298.

- Hengl, T., Gruber, S., Shrestha, D., 2003. *Digital Terrain Analysis in ILWIS*. Lecture Notes. International Institute for Geo-Information Science & Earth Observation (ITC), Enschede, 56 p.
- Hengl, T., Heuvelink, G.,B.,M., Stein, A., 2004, A generic framework for spatial prediction of soil variables based on regression-kriging, *Geoderma*, 120, 75-93.
- Henry, J.-B., Malet, J.-P., Maquaire, O., Grussenmeyer, P., 2002. The use of small format and low-altitude aerial photos for the realization of high-resolution DEMs in mountainous areas. Application to the Super-Sauze earthflow (Alpes-de-Haute-Provence, France). *Earth Surface Processes and Landforms*, 27, 1339-1350.
- Horn, B.K.P., 1981. *Hill shading and the reflectance map*. Proceedings IEEE, 69 (1), 14-47.
- Hosmer, D.W., Lomeshow, S. 1989. Applied logistic regression. 2nd Ed. Wiley, New York, p. 373.
- Huaxing, B., Xiaoyin, L., Mengxia, G., Xin, L., Jun, L., 2006. Digital terrain analysis based on DEM. *Frontiers of Forestry in China*, Vol. 1 (1), 54-58.

Keaton, J.R., Degraaf, J.V. 1996. *Surface observation and geological mapping*. In Turner, A.K., Schuster, R.L. (Eds.), *Landslides Investigation and Mitigation*, Transportation Research Board, Special Report 247. National Research Council, Washington, 178 -230.

- Kidner D, Dorey M, Smith D. 1999. What's the point? *Interpolation and extrapolation with a regular grid DEM*. Fourth International Conference on GeoComputation, Fredericksburg, VA. http://www.geocomputation.org/1999/082/gc_082.htm
- Kienzle, S.W., 2004. The effect of DEM raster resolution on first order, second order and compound terrain derivatives. *Transactions in GIS*, Vol. 8 (1), 83-111.
- Kraus, K., Pfeifer, N., 1998. Determination of Terrain Models in Wooded Areas with Airborne Laser Scanner Data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 53, 192-203.

- Lang, A., Moya, J., Corominas, J., Schrott, L., Dikau, R. 1999. Classic and new dating methods for assessing the temporal occurrence of mass movements. *Geomorphology*, 30, 33–52.
- Lateltin, O., Haemmig, C., Raetzo, H., Bonnard, C., 2005. Landslide risk management in Switzerland. *Landslides*, Vol. 2(4), 313-320.
- Leroueil, S., Vaunat, J., Picarelli, L., Locat, J., Lee, H., and Faure, R., 1996, *Geotechnical characterization of slope movements*, Proceedings of the International Symposium on Landslides, Trondheim, 22 pp.
- Maquaire, O., 2002, *Aléas géomorphologiques (mouvements de terrain) : processus, fonctionnement, cartographie*. Mémoire d'habilitation à Diriger des Recherches. Université Louis Pasteur, Strasbourg, 219 p. + 1 volume d'annexes.
- Maquaire, O., Malet J.-P., 2006. *Shallow landsliding*. In Boardman, J. Poesen, J., (Eds), *Soil Erosion in Europe*, Wiley, Chapter 2.8, 583-598
- MATE/MATL, 1999. *Plan de Prévention des Risques (PPR): Risques de Mouvements de terrain*. Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement (MATE), Ministère de l'Équipement des Transports et du Logement (METL). La Documentation Française, Paris. 74 p.
- M^c Calpin, J., 1984. *Preliminary age classification of landslides for inventory mapping*. 21st Annual Symposium on Engineering Geology and Soils Engineering, Proceedings, University of Idaho, Moscow, ID, 99-111.
- Meunier, M., 1991. *Éléments d'Hydraulique Torrentielle*. Études Montagne, N°1, Editions Cemagref, Antony, 278 p.
- Nolin, M.C., Cambouris, A.N., Simard, R., 1997. *La variabilité des sols : son origine et sa gestion*. Actes du Colloque : Nouvelle technologie en agriculture, Campus du fort St-Jean, 35-77.
- Noverraz, F., 1999. *Identification des phénomènes, cartographie*. In SHGN.
- Palmquist, R.C., Bible, G., 1980. Conceptual modelling of landslide distribution in time and space. *Bulletin of International Association of Engineering Geologists*, 21, 178–186.
- Panizza, M., Pasuto, A., Silvano, S., Soldati, M., 1996. Temporal occurrence and activity of landslides in the area of Cortina d'Ampezzo (Dolomites, Italy). *Geomorphology*, 15, 311–326.
- Petzold, B., Reiss, P., Stössel, W., 1999. Laser scanning - surveying and mapping agencies are using a new technique for the derivation of digital terrain models. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 54 (2-3), 95–104.
- Peucker, T.K., Fowler, R.J., Little, J.J., Mark, D.M., 1978. *The triangulated irregular network*. In Proceedings of the DTM Symposium. American Society of Photogrammetry - American Congress on Survey and Mapping, St. Louis, Missouri, 24–31.
- Quintlé, L., 1995. Repérage d'anciens glissements de terrain dans le bassin de Barcelonnette d'après la photo-interprétation, l'étude de cartes et vérifications sur le terrain : secteur Sud (Jausiers/Enchastrayes). Mémoire de Maîtrise de Géographie Physique, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 95 p.
- Rousseaux, F., 2004. *Caractérisation d'erreurs sur un modèle numérique de terrain en fonction de zones morphologiques*. Géomatique Expert.
- Rush, S., 2001. *Logistic regression: the standard method of analysis in medical research*. 10 p. <http://ramanujan.math.trinity.edu/tumath/research/studpapers/s3.pdf>
- Sabto, M., 1991. *Probabilistic Modelling Applied to Landslides in Central Colombia using GIS*. Procedures, Unpublished MSc thesis, ITC, Enschede, The Netherlands.
- Sassa, K., 1985. *Geotechnical classification of landslides*. In Proceedings of 4th International Conference and Field Workshop on Landslides, Tokyo, Japanese Landslide Society, p. 31–40.
- Shepard, D., 1968. *A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data*. Proceedings of the 1968 ACM National Conference, 5 17–524.
- Smith, J.F., Halvorson, J.J., Robert, I.P. 1993. Using multiple variable indicator kriging for evaluating soil quality. *Soil Science Society of America*, 57, 743-749.
- Thiery, Y., Puissant, A., Malet, J.-P., Remaître, A., Beck, E., Sterlacchini, S., Maquaire, O., 2003. *Towards the construction of a spatial database to manage landslides with GIS in mountainous environment*. Proceedings of AGILE 2003: The Science behind the Infrastructure, 6th AGILE Conference on Geographic Information Science. 24th-26th, April 2003, Lyon, France, 37–44.

Tripet, J.-P., Bollinger, D., Noverraz, F., 1993. *Cartes des mouvements de terrain : Proposition de légende*. In Schoeneich, P., Reynard, E. (Eds), *Cartographie géomorphologique - cartographie des risques*. Actes de la Réunion annuelle de la Société Suisse de Géomorphologie, 19 au 21 juin 1992 aux Diablerets et à Randa. Lausanne : Institut de Géographie, coll. Travaux et Recherches, 9, 67-73.

Van Westen, C.J., 1993. *Application of Geographic Information Systems to Landslide Hazard Zonation*. Ph-D Dissertation, Technical University Delft. ITC-Publication Number 15, ITC, Enschede, The Netherlands, 245 p.

Van Westen, C.J., van Asch, T.W.J., Soeters, R., 2006. Landslide hazard and risk zonation: why is it still so difficult? *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 65, 167-184.

Varnes D.J., 1978. *Slope Movement Types and Processes*. In Special Report 176: Landslides: Analysis and Control. In: Schuster, R.L., Krizek, R.J., (Eds), Transport Research Board, National Research, 11-33.

Varnes, D.J., 1984. *Landslide Hazard Zonation, a review of principles and practice*. IAEG Commission on Landslides. UNESCO, Paris, 63 p.

Vaunat, J., Leroeuil, S., 2002. Analysis of post-failure slope movements within the framework of hazard and risk analysis. *Natural Hazards*, 26, 83-109.

Wehr, A., Lohr, U., 1999. Airborne laser scanning—an introduction and overview. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 54 (2-3), pp. 68-82.

Wieczorek, G.F., 1984. Preparing a detailed landslide-inventory map for hazard evaluation and reduction. *Bulletin of the Association of Engineering Geologist*, Vol. 21 (3), 337-342.

Wise, S.M., 2000. Data modelling in GIS – lessons from the analysis of DEM. *International Journal of Geographical Information Science*, Vol. 14 (4), 313-318.

Wise, S.M., 2002. *GIS Basics*. Taylor and Francis, New York, 218 p.

Wood, J.D., 1996. *The geomorphological characterisation of digital elevation models*. PhD Thesis, University of Leicester, UK. <http://www soi.city.ac.uk/~jwo/phd>

WP/WLI (International Geotechnical Society's UNESCO Working Party on World Landslide Inventory), 1990. A suggested method for reporting a landslide. *Bulletin International Association of Engineering Geology*, 41, 5-12.

WP/WLI (International Geotechnical Society's UNESCO Working Party on World Landslide Inventory), 1991. A suggested method for a landslide summary. *Bulletin International Association of Engineering Geology*, 43, 101-110.

WP/WLI (International Geotechnical Society's UNESCO Working Party on World Landslide Inventory), 1993a. A suggested method for describing the activity of a landslide. *Bulletin International Association of Engineering Geology*, 47, 53-57.

WP/WLI (International Geotechnical Society's UNESCO Working Party on World Landslide Inventory), 1993b. *Multilingual Landslide Glossary*, Bitech, Richmond, British Columbia, 59p.

WP/WLI (International Geotechnical Society's UNESCO Working Party on World Landslide Inventory), 1994. A suggested method for describing the causes of a landslide. *Bulletin International Association of Engineering Geology*, 50, 71-74.

Yanal, L. Uhui, G., 1987. *The evaluation of slopes stability by tephrochronology in Central Hokkaido, Japan*. In *Landslide 1987*, 5th I.C.F.L., Conference Proceedings, 165-169.

Zadeh, L.A., *Fuzzy set theory and its applications*. Dordrecht, Kluwer Acad. Publ., 1965.

Ziadat, F.M., 2007. Effect of contour intervals and grid cell size on the accuracy of DEMs and slope derivatives. *Transactions in GIS*, Vol. 11(1), 67-81.

Zimmerman, H.-J., Zysno, P., 1980. Latent connectivities in human decision making. *Fuzzy sets and Systems*, 4, 37-51.

Zimmermann, H.J., 1985. *Fuzzy sets theory and applications*. Kluwer-Nijhoff, Boston, USA.

TABLES DES MATIERES

SOMMAIRE	- 3 -
REMERCIEMENTS	- 5 -
INTRODUCTION	- 9 -
1. Problématique	- 9 -
2. Objectifs de la recherche	- 13 -
3. Contexte de la recherche	- 14 -
4. Structure de la thèse	- 15 -
PARTIE I : EVALUATION DE LA SUSCEPTIBILITE ET DE L'ALEA STRATEGIE POUR UNE ECHELLE DU 1/10 000^{EME}	- 21 -
CHAPITRE 1 : EVALUATION DE L'ALEA 'MOUVEMENTS DE VERSANT' AU 1/10 000^{EME} : CONSTAT, BESOINS, ENJEUX	- 23 -
1. Evaluation et cartographie de l'aléa 'mouvements de versant'	- 23 -
1.1. Concept de base de l'évaluation et du zonage de l'aléa à l'échelle du bassin versant	- 25 -
1.2. L'approche qualitative : les méthodes 'expertes'	- 26 -
1.2.1. La cartographie d'inventaire et ses dérivées	- 26 -
1.2.2. L'analyse géomorphologique	- 28 -
1.2.3. Méthode par combinaison de carte d'index	- 29 -
1.3. L'approche semi-quantitative	- 30 -
1.4. L'approche quantitative ou probabiliste	- 31 -
1.4.1. Méthodes bivariées	- 33 -
1.4.1.1. 'Méthode de susceptibilité' (Landslide susceptibility method)	- 34 -
1.4.1.2. L'approche par pondération de l'information (Information value method)	- 35 -
1.4.1.3. Les méthodes bayésiennes (Bayesian combination rules)	- 35 -
1.4.1.4. Concept de fonctions favorables (Favourability functions)	- 36 -
1.4.2. L'approche multivariée	- 36 -
1.4.2.1. L'analyse discriminante	- 38 -
1.4.2.2. Les régressions multiples	- 39 -
1.4.2.3. L'approche par régression logistique	- 41 -
1.5. Le zonage par approche hybride	- 41 -

1.5.1.	L'approche par système de décision multicritères	- 42 -
1.5.1.1.	Définition	- 42 -
1.5.1.2.	Le processus analytique hiérarchique (AHP) et la cartographie de l'aléa	- 42 -
1.5.2.	Méthode par Logiques floues combinées à une autre méthode	- 43 -
1.5.3.	Méthode par intelligence artificielle (réseaux de neurones artificiels)	- 43 -
1.6.	Approche 'temporelle' pour le zonage de l'aléa	- 45 -
1.6.1.	Approche par analyse de fréquence des précipitations	- 46 -
1.6.2.	Approche par analyse de fréquence des précipitations couplées aux approches statistiques	- 46 -
1.6.3.	Méthode par analyse en retour des phénomènes	- 47 -
1.7.	Le zonage déterministe ou physique	- 48 -
1.7.1.	L'approche géotechnique	- 49 -
1.7.2.	Méthode par précipitations critiques	- 50 -
1.7.3.	L'approche par zonage dynamique	- 51 -
1.8.	Synthèse et discussion	- 51 -
1.8.1.	Avantages et inconvénients des différentes approches d'évaluation de la susceptibilité puis de l'aléa.	- 52 -
1.8.2.	Echelle de travail et approches pour l'évaluation de l'aléa : quelle échelle pour quelle approche?	- 53 -
1.8.3.	Apports des SIG pour l'évaluation de l'aléa et de la susceptibilité	- 57 -
2.	Les données d'entrée pour l'évaluation de la susceptibilité et de l'aléa	- 60 -
2.1.	Les données d'entrée nécessaires pour l'évaluation de la susceptibilité et l'aléa 'mouvements de versant'	- 61 -
2.2.	Les données d'entrée en fonction de l'échelle de travail	- 63 -
2.3.	Gestion des données : collecte, stockage et sélection	- 64 -
2.4.	Synthèse	- 65 -
3.	Conclusion : stratégie d'évaluation de la susceptibilité et de l'aléa à l'échelle du 1/10 000^{ème}	- 65 -

CHAPITRE 2 : CADRE MORPHOLOGIQUE DES SITES D'ETUDE ET CARTOGRAPHIE MORPHODYNAMIQUE - 69 -

4.	Caractéristiques physio-géographiques des sites d'étude	- 70 -
4.1.	Le bassin de Barcelonnette : site d'étude principal	- 70 -
4.1.1.	Un contexte morphostructural particulier	- 70 -
4.1.2.	Une dissymétrie générale de la vallée	- 74 -
4.1.3.	Une vallée marquée par l'héritage glaciaire et post-glaciaire	- 77 -
4.1.4.	La torrentialité : un phénomène majeur du bassin.	- 79 -
4.1.5.	Un contexte climatique particulier	- 80 -
4.1.6.	Une occupation du sol marquée par l'empreinte de l'homme	- 81 -
4.1.7.	Les instabilités de versant	- 82 -
4.2.	Le bassin versant du Moulin (Draix) : site d'étude secondaire	- 85 -
4.2.1.	Contexte général	- 85 -
4.2.2.	Le bassin versant du Moulin	- 87 -
4.2.3.	Les instabilités de versants du Moulin	- 89 -
4.3.	Conclusion	- 90 -

5. Cartographie morphodynamique : élaboration et mise sous SIG	- 90 -
5.1. De nombreuses méthodes de cartographie	- 91 -
5.1.1. Les systèmes 'officiels nationaux'	- 91 -
5.1.1.1. Le système suisse	- 91 -
5.1.1.2. Le système français (RCP 77)	- 91 -
5.1.1.3. Le système allemand (GMK 25)	- 92 -
5.1.2. Les systèmes 'universitaires'	- 92 -
5.1.2.1. Le système 'IGUL'	- 92 -
5.1.2.2. Le système 'champenois'	- 93 -
5.1.2.3. Le système 'TESLEC'	- 93 -
5.1.2.4. Le système 'strasbourgeois'	- 94 -
5.1.3. Les méthodes 'semi- automatiques' ou 'automatiques'	- 95 -
5.1.3.1. Le système d'unités homogènes	- 95 -
5.1.3.2. Les systèmes d'extraction	- 96 -
5.2. Une cartographie morphodynamique adaptée pour la recherche	- 96 -
5.2.1. Processus morphogénétiques	- 97 -
5.2.1.1. Les indicateurs d'activité des 'mouvements de versant'	- 98 -
5.2.1.2. Les degrés d'activité des 'mouvements de versant'	- 101 -
5.2.2. Formes et formations associées	- 102 -
5.2.3. Du document papier au format numérique	- 102 -
5.3. Application aux sites de recherches	- 103 -
5.3.1. Le bassin de Barcelonnette (site principal)	- 103 -
5.3.2. Adaptation pour le BVRE du Moulin (site de transposition)	- 106 -
5.3.3. Digitalisation et codification des 'mouvements de versant'	- 106 -
5.4. Bases de données spatiales et attributaires 'mouvements de versant'	- 107 -
6. Conclusion du chapitre 2	- 110 -

PARTIE II : TYPOLOGIE DES PHENOMENES ET VARIABLES RETENUES - 113 -

CHAPITRE 3 : LES 'MOUVEMENTS DE VERSANT' : DESCRIPTION, TYPOLOGIE ET ANALYSE - 115 -

1. Le versant ubac : site de calage	- 115 -
1.1. Un versant, des versants ?	- 115 -
1.1.1. La vallée de l'Abriès	- 118 -
1.1.1.1. Grands glissements translationnels rocheux de Serre-Boureou et de Grand Bois	- 121 -
1.1.1.2. Glissement translationnel complexe de Lans	- 122 -
1.1.1.3. Glissements translationnels superficiels le long du torrent de l'Abriès	- 122 -
1.1.2. Le secteur intermédiaire	- 123 -
1.1.2.1. La zone de Lans	- 123 -
1.1.2.2. La zone du versant de Bois Noir	- 123 -
1.1.2.3. La zone de La Frache	- 125 -
1.1.2.4. Le versant de 'Poche-Riou des Ribes'	- 126 -
1.1.2.5. La zone de Villard de Faucon	- 128 -
1.1.3. Le bassin d'Enchastrayes	- 129 -
1.1.3.1. Les formes et les formations périglaciaires	- 129 -
1.1.3.2. Les formes et les formations glaciaires héritées	- 129 -

1.1.3.3.	Les formes et formations issues du ruissellement	- 131 -
1.1.3.4.	Les 'mouvements de versant' du bassin d'Enchastrayes	- 131 -
1.2.	En conclusion	- 133 -
2.	Le versant adret : site de validation local	- 134 -
2.1.	Le bassin versant du Faucon	- 134 -
2.2.	Le bassin versant du Bourget	- 138 -
2.3.	Le bassin versant de Sanières	- 139 -
2.4.	En conclusion : les 'mouvements de versant' de l'Adret	- 140 -
3.	Typologie des 'mouvements de versant'	- 141 -
3.1.	Les écroulements	- 142 -
3.2.	Les glissements banc sur banc	- 143 -
3.3.	Les grands glissements translationnels rocheux	- 144 -
3.4.	Les glissements-coulées	- 145 -
3.5.	Les glissements translationnels	- 146 -
3.5.1.	Les glissements translationnels superficiels	- 146 -
3.5.2.	Les glissements translationnels complexes	- 147 -
3.6.	Les glissements rotationnels	- 148 -
3.6.1.	Les glissements rotationnels de berge	- 148 -
3.6.2.	Les glissements rotationnels d'interfluve	- 149 -
3.7.	La solifluxion	- 149 -
4.	Analyse de la variable à modéliser	- 149 -
4.1.	Analyse spatiale des phénomènes	- 149 -
4.1.1.	Analyse des données sur l'ensemble du bassin de Barcelonnette	- 149 -
4.1.2.	Analyse des 'mouvements de versant' du versant Ubac (site de calage)	- 152 -
4.1.2.1.	Généralités	- 152 -
4.1.2.2.	Analyse des 'mouvements de versant' des trois secteurs de l'Ubac	- 155 -
4.2.	Pertinence des attributs : analyse statistique multidimensionnelle (ASM)	- 156 -
4.2.1.	Indice de confiance cartographique (ICC)	- 156 -
4.2.2.	Choix de la méthode ASM	- 157 -
4.2.3.	Analyse de l'information qualitative : l'activité des phénomènes et relation avec les indices morphologiques	- 159 -
4.2.3.1.	Les variables	- 159 -
4.2.3.2.	Résultats	- 159 -
4.2.4.	Analyse de l'information quantitative : les types de phénomènes et relation avec les indices morphométriques	- 162 -
4.2.4.1.	Caractéristiques morphométriques des phénomènes	- 162 -
4.2.4.2.	ADL pour identifier les types de 'mouvements de versant'	- 164 -
4.2.4.3.	Discussion	- 167 -
5.	Conclusion du chapitre 3	- 168 -
CHAPITRE 4 : LES VARIABLES PREDICTIVES : ACQUISITION ET DESCRIPTION		- 171 -
1.	Les paramètres géométriques de terrain : bases de données altimétriques et MNT	- 171 -

1.1.	<i>La base de données disponible : la BD Alti ®</i>	- 172 -
1.2.	<i>La base de données altimétrique et le MNT spécifique</i>	- 172 -
1.2.1.	<i>Acquisition du semi de points</i>	- 173 -
1.2.2.	<i>Acquisition d'un MNT optimum</i>	- 173 -
1.2.2.1.	<i>Analyse de sensibilité</i>	- 174 -
1.2.2.2.	<i>Résultats de l'analyse de sensibilité</i>	- 176 -
1.2.2.3.	<i>Application à l'ensemble du bassin de Barcelonnette</i>	- 179 -
1.3.	<i>Discussion : la BD Alti ® peut-elle être utilisée à l'échelle du 1/10 000^{ème} ?</i>	- 180 -
1.3.1.	<i>RMSE et indice de qualité</i>	- 180 -
1.3.2.	<i>Les dérivées : analyse et comparaison</i>	- 180 -
1.4.	<i>Le MNT du Moulin</i>	- 183 -
2.	La variable 'occupation du sol'	- 184 -
2.1.	<i>La base de données CORINE Land Cover (CLC)</i>	- 185 -
2.2.	<i>La base de données du CRIGE-PACA</i>	- 185 -
2.3.	<i>Les bases de données ALARM et ALARM corrigée</i>	- 187 -
2.4.	<i>La BD 'occupation du sol' pour le Moulin</i>	- 188 -
2.5.	<i>Discussion/conclusion</i>	- 188 -
3.	Les variables géologiques	- 191 -
3.1.	<i>Les formations superficielles</i>	- 191 -
3.1.1.	<i>Les formations superficielles du bassin de Barcelonnette</i>	- 191 -
3.1.1.1.	<i>Les formations glaciaires</i>	- 192 -
3.1.1.2.	<i>Les formations du domaine périglaciaire</i>	- 192 -
3.1.1.3.	<i>Les formations liées à l'action de l'eau</i>	- 194 -
3.1.1.4.	<i>Conclusion</i>	- 194 -
3.1.2.	<i>Les formations superficielles de Draix</i>	- 194 -
3.1.3.	<i>Les épaisseurs des formations superficielles</i>	- 195 -
3.2.	<i>La variable lithologie</i>	- 196 -
3.3.	<i>La tectonique : failles majeures visibles et supposées</i>	- 198 -
3.4.	<i>Le pendage des strates</i>	- 199 -
4.	L'hydrographie	- 200 -
5.	Conclusion du chapitre 4	- 202 -
CHAPITRE 5 : ANALYSE ET IDENTIFICATION D'UN JEU DE VARIABLES DE BASE		- 205 -
1.	Quelles variables retenir pour une analyse de susceptibilité ? constats et besoins	- 206 -
1.1.	<i>VP utilisées et stratégie d'identification</i>	- 206 -
1.1.1.	<i>A chaque approche ses VP</i>	- 206 -
1.1.2.	<i>Stratégies d'identification d'un jeu de VP de base</i>	- 208 -
1.2.	<i>La VM : quelle zone retenir pour quel effet ?</i>	- 209 -
1.3.	<i>Conclusion</i>	- 210 -
2.	Détermination d'un jeu de VP de base : stratégie et résultats	- 211 -
2.1.	<i>Stratégie d'analyse</i>	- 211 -

2.2.	Comparaison entre VM, VP disponibles et VP produites spécifiquement pour une même information _____	- 214 -
2.2.1.	Les VP 'topographie' : confirmation de l'imprécision de la BD Alti ® _____	- 214 -
2.2.2.	La VP 'occupation du sol' _____	- 217 -
2.3.	Comparaison entre VM et VP produites spécifiquement pour une information _____	- 220 -
2.3.1.	Les VP 'géologie' _____	- 220 -
2.3.1.1.	La lithologie _____	- 220 -
2.3.1.2.	Les formations superficielles _____	- 220 -
2.3.1.3.	Les épaisseurs de formations superficielles _____	- 221 -
2.3.1.4.	Le pendage des strates _____	- 221 -
2.3.2.	La VP 'hydrologie' _____	- 222 -
2.4.	Synthèse et conclusion _____	- 223 -
3.	Conclusion du chapitre 5 _____	- 223 -

PARTIE III: ANALYSE DE LA SUSCEPTIBILITE ET DE L'ALEA PAR APPROCHES PROBABILISTES _____ - 225 -

CHAPITRE 6 : CARTOGRAPHIE 'EXPERT' ET SEMI-QUANTITATIVE _____ - 227 -

1.	Cartographie 'expert' : une démarche adaptée au bassin de Barcelonnette _____	- 227 -
1.1.	Démarche adoptée _____	- 228 -
1.1.1.	Les caractéristiques retenues _____	- 228 -
1.1.1.1.	Pour les VM 'mouvements de versant' _____	- 228 -
1.1.1.2.	Les facteurs explicatifs pris en compte _____	- 228 -
1.1.2.	Règles expertes et caractéristiques des classes de susceptibilité _____	- 232 -
1.2.	Résultats _____	- 233 -
1.2.1.	Exemples d'interprétation et base de données associée _____	- 234 -
1.2.2.	Les secteurs à fortes incertitudes : exemples d'interprétation(s) délicate(s) _____	- 236 -
1.3.	Conclusion _____	- 238 -
2.	Cartographie par approche semi-quantitative _____	- 239 -
2.1.	Stratégie de cartographie _____	- 239 -
2.1.1.	Analyse de sensibilité pour les valeurs d'appartenance _____	- 240 -
2.1.2.	Définition du moteur d'inférence _____	- 242 -
2.1.3.	Evaluation des cartes de susceptibilité _____	- 243 -
2.2.	Détermination des règles d'analyse : valeurs d'appartenance et moteur d'inférence optimum _____	- 244 -
2.2.1.	Analyse de sensibilité sur les valeurs d'appartenance _____	- 246 -
2.2.2.	Moteur d'inférence (combinaison des variables prédictives) et analyse de l'erreur relative _____	- 249 -
2.2.3.	Analyse visuelle des meilleures cartes _____	- 251 -
2.3.	Evaluation des règles de cartographie obtenues par Logiques floues sur le site de calage _____	- 254 -
2.3.1.	Evaluation statistique _____	- 254 -
2.3.2.	Evaluation experte ou critique des résultats _____	- 256 -
2.4.	Conclusion _____	- 258 -

3. Conclusion du chapitre 6 _____ - 259 -

CHAPITRE 7 : CARTOGRAPHIE PROBABILISTE DE LA SUSCEPTIBILITE ET REGLES DE TRANSPOSITION _____ - 263 -

1. Approche quantitative : rappels et principes des méthodes choisies __ - 264 -

- 1.1. L'approche bivariée par la Théorie de l'évidence _____ - 264 -
 - 1.1.1. Principes de la Théorie de l'évidence (Weight of evidence) _____ - 264 -
 - 1.1.2. La dépendance conditionnelle : un élément indispensable à évaluer _____ - 265 -
- 1.2. L'approche multivariée par Régressions logistiques _____ - 265 -
 - 1.2.1. Les principes de calcul _____ - 265 -
 - 1.2.2. Une approche souple mais conditionnée par le nombre de VM introduit _____ - 266 -
- 1.3. Conclusion _____ - 266 -

2. Stratégie de modélisation probabiliste _____ - 267 -

- 2.1. Stratégie d'analyse _____ - 267 -
 - 2.1.1. Evaluation et validation des approches quantitatives/probabilistes : constat, besoins. __ - 267 -
 - 2.1.1.1. L'évaluation : une faible certitude statistique _____ - 267 -
 - 2.1.1.2. La validation : des stratégies diverses parfois limitées _____ - 268 -
 - 2.1.1.3. Synthèse _____ - 268 -
 - 2.1.2. Stratégie adoptée : proposition pour un calage et une évaluation cohérente fondés sur la Théorie de l'évidence _____ - 269 -
 - 2.1.2.1. Optimisation des VM _____ - 271 -
 - 2.1.2.2. Identification des VP les plus influentes _____ - 272 -
 - 2.1.2.3. Evaluation du pouvoir prédictif et de la certitude statistique _____ - 273 -
 - 2.1.2.4. Application aux Régressions logistiques _____ - 273 -
 - 2.1.2.5. Une validation originale : évaluation experte, validation 'locale' et transposition _ - 273 -

3. Sensibilité des approches probabilistes _____ - 274 -

- 3.1. Sensibilité de l'approche bivariée (Théorie de l'évidence) aux variables _____ - 274 -
 - 3.1.1. Optimisation des cellules des VM3 _____ - 274 -
 - 3.1.2. Indépendance conditionnelle et Analyse Multiple des Correspondances (AMC) : détermination des classes les plus influentes _____ - 275 -
 - 3.1.2.1. Analyse de la dépendance conditionnelle _____ - 275 -
 - 3.1.2.2. Analyse de la structure des différentes associations à travers une Analyse Multiple des Correspondances (AMC) _____ - 276 -
 - 3.1.3. Sensibilité des modèles aux différentes VP _____ - 280 -
 - 3.1.4. Evaluation de la confiance statistique _____ - 283 -
- 3.2. Modélisation par Régressions logistiques _____ - 283 -
 - 3.2.1. Analyse visuelle des simulations et comparaison par courbes de prédiction _____ - 283 -
 - 3.2.2. Comparaisons des erreurs relatives et synthèse _____ - 285 -
- 3.3. Synthèse : limites des approches probabilistes pour une échelle du 1/10 000^{ème} _____ - 287 -

4. Comparaison, validation et transposition : comment retenir la meilleure approche cartographique ? _____ - 288 -

- 4.1. Approche semi-quantitative et approche probabiliste : quelle approche retenir ? _____ - 288 -
 - 4.1.1. Comparaisons statistiques _____ - 288 -
 - 4.1.2. Evaluation experte _____ - 290 -

4.1.2.1.	Tests de qualité	- 290 -
4.1.2.2.	Analyse experte	- 292 -
4.1.3.	Synthèse des résultats obtenus par les approches semi-quantitatives et probabilistes	- 297 -
4.2.	Validation locale et transposition	- 298 -
4.2.1.	La validation : vers un premier essai de transposition 'local'	- 298 -
4.2.1.1.	Validation sur le versant Ubac	- 298 -
4.2.1.2.	Transposition locale sur le versant Adret	- 301 -
4.2.1.3.	La transposition à un site externe	- 303 -
4.2.2.	Synthèse et discussion	- 305 -
5.	Conclusion-synthèse du chapitre 7	- 305 -
CHAPITRE 8 : TENTATIVE D'ÉVALUATION DE L'ALÉA : APPORT DES MODELES A BASE PHYSIQUE		- 309 -
1.	Objectifs et stratégie d'utilisation d'un modèle à base physique pour l'évaluation de l'aléa	- 310 -
1.1.	Stratégie d'analyse et de modélisation	- 311 -
1.1.1.	Stratégie 1 : quantification de l'aléa à l'échelle d'un sous bassin représentatif	- 311 -
1.1.2.	Stratégie 2 : quantification de l'aléa par types de mouvements de versant et identification de seuils de déclenchement	- 312 -
1.2.	Modélisation distribuée à base physique : objectifs et description	- 312 -
1.2.1.	Objectifs de la modélisation	- 312 -
1.2.2.	Description du modèle hydrologique	- 313 -
1.2.3.	Description du modèle géotechnique pour le calcul du facteur de sécurité	- 316 -
2.	Evaluation de l'aléa à l'échelle d'un site instable	- 317 -
2.1.	Le site local : Bois Noir	- 317 -
2.1.1.	La géomorphologie du site	- 317 -
2.1.2.	Les 'mouvements de versant' observés	- 318 -
2.1.3.	Un secteur reconnu comme très susceptible	- 319 -
2.2.	Analyse de sensibilité du modèle hydrologique et géomécanique et résultats	- 319 -
2.2.1.	Méthodologie de l'analyse de sensibilité	- 319 -
2.2.2.	Résultats de l'analyse de sensibilité	- 321 -
2.2.2.1.	Les paramètres les plus influents	- 321 -
2.3.	Application du modèle	- 322 -
2.3.1.	Simulations : au pas de temps journalier	- 323 -
2.3.2.	Mise en relation du coefficient de sécurité et des événements recensés	- 323 -
2.4.	Conclusion	- 326 -
3.	Identification de seuils de déclenchement et evaluation de l'aléa sur l'ensemble du bassin	- 326 -
3.1.	Stratégie d'analyse	- 327 -
3.2.	Variables de contrôle, conditions initiales et aux limites	- 328 -
3.2.1.	Les 'mouvements de versant'	- 328 -
3.2.2.	Conditions aux limites et conditions initiales des simulations	- 328 -
3.3.	Simulations de probabilités de rupture – Approche de Monte-Carlo	- 329 -

3.4.	<i>Régionalisation des probabilités de rupture - Carte d'aléa à l'échelle du bassin versant</i>	- 331 -
3.4.1.	<i>Probabilités de rupture par type de' mouvements de versant' : application sur l'ensemble du bassin</i>	- 331 -
3.4.2.	<i>Résultats</i>	- 332 -
3.5.	<i>Conclusion</i>	- 333 -
4.	Conclusion du chapitre 8	- 334 -
	CONCLUSION GENERALE	- 335 -
	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	- 343 -
	TABLE DES FIGURES	- 365 -
	TABLE DES TABLEAUX	- 371 -
	ANNEXES	- 375 -
	TABLES DES MATIERES	- 435 -

Susceptibilité du bassin de Barcelonnette (Alpes du sud, France) aux 'mouvements de versant' : cartographie morphodynamique, analyse spatiale et modélisation probabiliste.

Des méthodologies d'analyse spatiale probabiliste fondées sur les SIG ont été développées pour cartographier la susceptibilité et l'aléa aux 'mouvements de versant' à méso-échelle (1/50 000^{ème}-1/25 000^{ème}), mais peu ou pas à l'échelle du 1/10 000^{ème}, échelle de la cartographie réglementaire des risques. En France, le zonage des PPR est basé sur une approche 'expert' jugée assez subjective en raison des erreurs d'appréciation de l'expert. Ainsi, cette recherche a pour objectif de tester la validité de méthodes d'analyse spatiale et de modélisations probabilistes à cette échelle du 1/10 000^{ème}. La démarche repose, en complément d'un zonage de type 'expert', sur la sélection de trois méthodes d'analyse spatiale par SIG fondées sur les Logiques floues, la Théorie de l'évidence et les Régressions logistiques. Ces trois méthodes étant sensibles aux variables à introduire (variables à modéliser et variables prédictives), la procédure comporte trois étapes : acquisition des variables à partir d'une cartographie morphodynamique, choix des variables par une analyse de sensibilité, comparaison des résultats pour déterminer la méthode la plus adaptée. Une néo-variable prédictive ayant un sens 'géomorphologique' et combinant plusieurs variables augmente la performance de chaque approche. Les meilleurs résultats acquis dans le bassin de Barcelonnette sont transposés sur un site secondaire pour tester leur validité. Un passage vers l'aléa est tenté par des modèles numériques à base physique. Cette thèse montre qu'il est possible d'obtenir des résultats performants à condition d'avoir une procédure de calage rigoureuse et d'introduire une vision experte dans le processus de calcul.

Mots clés : mouvements de terrain, susceptibilité, aléa, cartographie, géomorphologie, expert, analyse spatiale, SIG, modélisation probabiliste, Logiques floues, Théorie de l'évidence, Régressions logistiques, échelle du 1/10 000^{ème}, Alpes.

Landslide susceptibility in the Barcelonnette basin (French South Alps): morphodynamic cartography, spatial analysis and probabilistic modelling.

Some spatial analysis approaches based on GIS and probabilistic models have been developed to map landslide susceptibility and hazard at meso-scale (1: 50 000 – 1: 25 000). These approaches are not adapted for the French legal procedure 1: 10 000. This 'expert' methodology used for the PPR knows some drawbacks especially due to the subjectivity of the scientific. Then, in addition of an 'expert' cartography, the methodology used in this work is based on a selection of three probabilistic approaches by GIS used Fuzzy logic rules, the Weight of evidence and the Weighted logistic regression. Because the three approaches are very sensitive to the variables(response variables and predictive variables), the procedure is divided in three steps with: the collection of the variables based on a detailed morphodynamic map, the choice of the variables by a sensitivity analysis, the comparison of the results in order to define the best approach. A neo-predictive variable, with a geomorphological meaning and combining several variables, increases the predictive power of each approach. The results obtained in the Barcelonnette basin are then transposed in a secondary test site in order to test their validity. Finally, an attempt to obtain some real hazard map with physically based models is performed. This thesis shows that is possible to obtain good results if the calibration strategy is adapted and rigorous. It brings further information for the development of landslide hazard map taking into account physical processes.

Keywords : landslide, susceptibility, hazard, cartography, geomorphology, expert, spatial analysis, GIS, probabilistic modelling, Fuzzy logic, Weight of evidence, Weighted logistic regression, 1/10 000 scale, Alps.

Discipline : Géographie physique, spécialité : géomorphologie quantitative.

Laboratoire d'accueil : Laboratoire 'Géographie Physique et Environnement' (GEOPHEN) - LETG-UMR 6554 CNRS, Université de Caen Basse-Normandie BP 8156, F-14032 Caen Cedex.
