



**Université Louis Pasteur – Strasbourg I**

**Mémoire de recherche**

présenté par

**Olivier MAQUAIRE**

Maître de Conférences  
Faculté de Géographie

pour obtenir le

**Diplôme d'Habilitation à Diriger des Recherches**

**Aléas géomorphologiques (mouvements de terrain)  
- processus, fonctionnement, cartographie –**

Date de soutenance : 13 décembre 2002

Composition du jury :

**Jordi Corominas**  
**Monique Fort**  
**Michel Granet**  
**Bruno Ambroise**  
**Jean-Louis Ballais**  
**Theo van Asch**  
**Jean-Claude Flageollet**

*Professeur, Université de Catalogne, Barcelone*  
*Professeur, Université Denis Diderot, Paris*  
*Professeur, Université Louis Pasteur, IPG, Strasbourg*  
*Directeur de Recherches CNRS, IMFS, Strasbourg*  
*Professeur, Université de Provence, Aix-en-Provence*  
*Professeur, Université Utrecht*  
*Professeur Émérite, Université Louis Pasteur, Strasbourg*

*Rapporteur externe*  
*Rapporteur externe*  
*Rapporteur interne*  
*Garant d'habilitation*  
*Examineur*  
*Examineur*  
*Invité*

Mémoire préparé au sein de :

**Institut de Physique du Globe de Strasbourg (IPGS)**  
**UMR 7516 ULP-CNRS**

5, rue René Descartes, F-67084 Strasbourg cedex







# Sommaire

|  |     |
|--|-----|
| <b>Avant-Propos</b> .....  | 3   |
| <b>Introduction générale</b> .....   | 5   |
| <b>Première Partie : Les mouvements de terrain : position du problème et état de l'art</b> ..... | 11  |
| Chapitre 1 : Contexte et cadre général des recherches sur les mouvements de terrain .....        | 13  |
| Chapitre 2 : Classification des mouvements de terrain : variété et activités .....               | 31  |
| Chapitre 3 : De la modélisation du mouvement de terrain à la cartographie de l'aléa .....        | 49  |
| Chapitre 4 : Etat de l'art des outils et méthodes de collecte des données d'entrée .....         | 67  |
| Conclusion : Position de recherche .....   | 83  |
| <b>Seconde partie : Mes propres recherches : applications et résultats</b> .....                 | 85  |
| Chapitre 5 : Zones et sites de recherches : description et équipement .....                      | 87  |
| Chapitre 6 : Les développements méthodologiques .....  | 109 |
| Chapitre 7 : Caractérisation des formations superficielles marneuses au laboratoire .....        | 133 |
| Chapitre 8 : La structure 3D de la coulée de Super-Sauze .....                                   | 147 |
| Chapitre 9 : Déclenchement et évolution des mouvements de terrain .....                          | 157 |
| <b>Troisième partie : Perspectives et programmes de recherche</b> .....                          | 175 |
| <b>En guise de conclusion générale</b> .....   | 183 |
| Références bibliographiques .....  | 185 |
| Tables : .....   | 205 |
| Table des figures .....  | 207 |
| Table des tableaux .....   | 211 |
| Table des photographies .....  | 213 |
| Table des matières .....   | 215 |
| <b>Annexes</b> .....   | 217 |
| Annexe I : Titres et travaux .....   | 219 |
| Annexe II : Publications jointes .....   | 235 |



## **Avant-propos**

Ce mémoire est l'aboutissement de sept années de recherches menées sur la dynamique des versants de montagne. Pour aborder les différents aspects de l'évolution plus ou moins complexe des mouvements de terrain, j'ai choisi de mener une recherche multidisciplinaire couplant des investigations multiples sur le terrain à l'aide de moyens techniques très diversifiés, des analyses et des essais au laboratoire, des traitements de données et des modélisations. De nombreuses collaborations ont apporté les compétences indispensables pour mener à bien cette démarche. Ce mémoire reflète un travail d'équipe.

Je tiens tout d'abord à remercier le Professeur Jean Claude Flageollet, pour sa confiance et son soutien. Il a favorisé mon recrutement à l'Université, m'a fourni les conditions idéales pour développer les recherches dans la continuation de ses travaux engagés, entre autres, dans le cadre de programmes de recherches européens. Il m'a légué, d'une certaine façon, un bel héritage que j'espère avoir fait correctement fructifier. Il a favorisé et encouragé mon insertion dans la communauté scientifique européenne : d'une part, en 1995 en me proposant comme membre du conseil exécutif du CERG (Centre Européen sur les Risques Géomorphologiques), et d'autre part, en proposant mon nom pour lui succéder comme secrétaire général du CERG en septembre 2000. Je tiens à lui renouveler ma respectueuse et profonde gratitude.

Je remercie Bruno Ambroise, Directeur de recherches au CNRS, au CEREG puis à l'IMF pour avoir accepté d'être le garant de ce mémoire pour l'Université Louis Pasteur. La pertinence de ses remarques, la rigueur de son analyse ont permis d'en améliorer grandement la qualité. J'espère que les collaborations engagées se poursuivront.

Je remercie Michel Granet, Directeur de l'IPGS d'une part pour m'avoir accueilli avec mon équipe au sein de l'IPGS à la fermeture du CEREG fin 2001, et d'autre part pour avoir accepté, malgré sa lourde tâche de Vice-Président « Recherche et Etudes Doctorales » de l'ULP, d'être le rapporteur interne de ce mémoire d'habilitation. Je lui suis très reconnaissant de l'intérêt qu'il porte à nos travaux sur les risques géomorphologiques.

Je voudrais ensuite remercier les autres membres du jury. Les Professeurs Jordi Corominas et Théo Van Asch auprès desquels j'ai toujours trouvé la compétence scientifique et la rigueur. Ils ont toujours manifesté leur intérêt pour les recherches engagées dans le bassin de Barcelonnette à travers, entre autres, le CERG et le programme européen *NEWTECH*. J'espère que nous aurons l'occasion de travailler ensemble dans le cadre du projet de réseau d'excellence « *MOVIDIS* » proposé dans le cadre du 6<sup>ème</sup> PCRDT. Dans la communauté des géomorphologues français, les Professeurs Monique Fort et Jean-Louis Ballais ont également toujours manifesté de l'intérêt pour ces recherches engagées sur la dynamique des versants. Les Professeur Jordi Corominas et Monique Fort ont accepté d'être les deux rapporteurs externes. Je les en remercie tous les quatre très sincèrement et je suis très honoré de leur participation à mon jury.

Ensuite, mes remerciements vont à « mes » doctorants et étudiants dont le rôle est essentiel dans l'orientation et la mise en œuvre des programmes de recherches. Je voudrais tout particulièrement remercier Jean-Philippe Malet. Il est le véritable « homme orchestre » de l'équipe. Par sa motivation, son dynamisme, sa disponibilité, sa gentillesse, il contribue au développement de notre axe de recherche. Il est évident que sans sa présence, le travail accompli aurait été beaucoup moins important. J'espère qu'au delà de sa thèse, qu'il soutiendra dans les prochains mois, nos collaborations se maintiendront. Je voudrais également remercier son épouse Anne Puissant, doctorante au Laboratoire Image et Ville, qui nous a souvent aidée tant sur le terrain que pour le traitement d'images.

Je remercie les autres doctorants et étudiants par ordre alphabétique pour ne froisser personne. Chacun connaît sa contribution à notre recherche et l'estime que je lui porte. Un grand merci à : Sébastien Klotz, Alexandre Remaître, Arnaud Ritzenthaler, Myriam Schmutz, Yannick Thiery, Emmanuel Truchet, et tous les autres ... les très nombreux étudiants de licence, maîtrise et DEA qui pendant les stages ont souvent « donné un coup de main » pour transporter du matériel sur les lieux d'investigation.

Je n'oublie pas les collègues du Cemagref de Grenoble de la division ETNA « Erosion Torrentielle, Neige et Avalanche » qui nous ont beaucoup apporté en jouant un rôle très important dans les programmes de recherches *MOTE* et *ECLAT* engagés dans le bassin de Barcelonnette. Ils ont favorisé et encouragé notre implication dans les BVRE de Draix à travers les programmes *PNRH* et *RIO2*. Un grand merci à : Christophe Ancey, Dominique Laigle, Nicolle Mathys, Maurice Meunier, Didier Richard, et également Jean-Manuel Ollivier à Draix.

Je rends également hommage à l'ensemble de mes collègues des programmes européens *TESLEC*, *NEWTECH*, *ALARM* et *RETINA*, et des projets nationaux concrétisés au sein du GIS : Draix : étude de l'érosion en montagne et du programme SAMOA de l'ACI « Prévention des Catastrophes Naturelles ».

Parmi les collègues géophysiciens, je remercie Jean-Jacques Schott de l'Institut de Physique du Globe (IPGS) de Strasbourg, Roger Guérin du Département de Géophysique Appliquée de l'Université Pierre et Marie Curie à Paris, Yves Albouy, Marc Descloîtres et Pierre Vassal du Laboratoire de Géophysique Interne de l'IRD à Bondy et Michel Dietrich du Laboratoire de Géophysique Interne et Tectonophysique (LGIT) de Grenoble, ainsi que plusieurs de leurs stagiaires.

Parmi les collègues géologues et géotechniciens, je voudrais remercier Denis Fabre et Jacques Monet du Laboratoire Interdisciplinaire de Recherches Impliquant la Géologie et la Mécanique (LIRIGM) à Grenoble, Yves Géraud du Centre de Géochimie de la Surface (CGS) de Strasbourg, Roger Cojean du Centre de Géologie de l'Ingénieur (CGI) de l'Ecole des Mines de Paris, Jacques Locat du Département de Géologie et de Génie Géologique de l'Université Laval au Québec, Christophe Bonnard, Lyesse Laloui et Laurent Vulliet du Laboratoire de Mécanique des Sols (LMS) de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.

Dans le domaine de la mesure des déformations, nous avons bénéficié de l'aide et du soutien scientifique de plusieurs collègues. Je voudrais remercier Eric Calais de *Géosciences Azur de Nice* aujourd'hui à *Purdue University* pour sa compétence reconnue en GPS et sa grande gentillesse. A *l'Ecole Nationale Supérieure des Arts et Industrie de Strasbourg (ENSAIS)*, Pierre Grussenmeyer, équipe Photogrammétrie et Géomatique a rendu possible la génération de MNT par photogrammétrie numérique en mettant à notre disposition le matériel de traitement et ses compétences. Dans le cadre de leur stage de fin de seconde année de *l'ENSAIS*, Loïc Gallisson, Quentin Gross et Jean-Baptiste Henry ont mis en œuvre et pris en charge les différentes opérations de terrain et de traitement des données. Enfin, nous avons bénéficié du soutien logistique du Parc de l'INSU pour le prêt de plusieurs GPS. Qu'ils en soient tous remerciés.

Je n'oublie pas les collègues du LTHE de Grenoble qui ont apporté leurs compétences dans les domaines de la caractérisation hydrodynamique des formations au laboratoire ou sur le terrain. Ils ont permis la réalisation de plusieurs campagnes de simulations de pluie : Luc Descroix, Michel Estèves, Michel Laurent, Jean-Marc Lapetite et Jean-Pierre Vandervaere. Merci à leur directeur Michel Vauclin pour l'intérêt porté à mes recherches.

Je voudrais remercier également mes anciens collègues du *CEREG*, et en particulier Véronique Auzet pour ses nombreux conseils et services, et pour avoir accepté de quitter pour quelques missions ses champs cultivés de la plaine pour venir « crapahuter » sur les versants marneux et nous apporter son savoir sur les états de surface. Merci également à Martine Trautmann du laboratoire d'analyses des sols.

Enfin, je voudrais remercier Catherine pour son soutien, sa patience et sa compréhension compte tenu de mes absences répétées de la maison ou de ma présence mais isolé dans mon bureau devant l'ordinateur. Merci à mes enfants Justine et Emilien pour leur compréhension.

# Introduction générale

De nombreuses régions du monde sont confrontées à des phénomènes naturels susceptibles de provoquer des catastrophes. Ces phénomènes sont d'origines très variées : géophysique avec les séismes et les éruptions volcaniques, hydro-météorologique avec les cyclones et tempêtes, les inondations et les avalanches, ou bien encore géomorphologique avec les mouvements de terrain. Ces phénomènes naturels se répartissent un peu partout. En Europe, leur fréquence et leur intensité sont relativement faibles par rapport à certaines régions du monde particulièrement touchées : par exemple, un tremblement de terre en France ou en Belgique n'aura pas la même violence qu'au Japon. Certains pays sont confrontés à presque tous les aléas naturels mentionnés ci-dessus, telle l'Italie, la France et l'Allemagne ; a contrario, le Danemark ou les Pays-Bas sont peu exposés aux séismes, et évidemment pas du tout aux avalanches, mais sont très exposés aux inondations. L'Italie est l'un des pays les plus touchés par ces phénomènes naturels avec, par rapport à ses pays voisins, la présence de plusieurs volcans actifs.

Si pour certains phénomènes, comme les séismes, l'homme n'est pas responsable de leur déclenchement, pour d'autres, et particulièrement pour les mouvements de terrain, il peut prendre une part notable à la fois dans leur déclenchement comme dans leur aggravation. D'autre part, l'homme a parfois une large part de responsabilité dans l'importance des conséquences directes ou indirectes de ces phénomènes dans la mesure où il a maintenu et développé des implantations et activités dans des secteurs réputés "à risque". Les « *risques naturels majeurs* » sont la combinaison d'un *aléa* (le phénomène naturel) et d'une *vulnérabilité* liée à la présence humaine (personnes, habitations, activités économiques, infrastructures, etc.). Ainsi, le nombre de victimes et le coût des dommages peuvent être élevés selon les circonstances, et en fonction de l'intensité, de la soudaineté et de la durée du phénomène.

Si l'on s'en tient aux pays de l'Europe, ces derniers ont connu par le passé, de véritables catastrophes naturelles. Au Pays-Bas, en 1953, lors du déferlement d'une onde de tempête, les inondations induites ont été responsables d'environ 2 000 morts et de plus de 3 Milliards d'Euro de dégâts. En France, en 1930 dans le Tarn, la crue historique la plus meurtrière a provoqué la mort de 200 personnes et 20 000 sinistrés (Ledoux, 1995). Les mouvements de terrain, plus particulièrement dans les régions alpines et les zones méditerranéennes, font généralement moins de victimes et de dégâts que les inondations ou les séismes, mais quelques événements « catastrophiques » ont tout de même marqué les esprits dans un passé plus ou moins proche : par exemple, en 1248, l'éboulement d'un flanc du Mont Granier en Savoie (France) a entraîné la destruction de cinq villages et la mort de 2 000 à 5 000 personnes. Plus récemment, en mai 1998 à Sarno (Italie), 161 personnes ont péri sous des coulées de boue, etc.

De tels phénomènes naturels peuvent se reproduire et les dégâts seraient alors beaucoup plus élevés en raison de l'augmentation de l'occupation humaine dans les secteurs concernés : les inondations submergent des zones beaucoup plus urbanisées qu'au 19<sup>ème</sup> siècle, des zones urbaines ont progressé au pied ou sur les flancs de versants de stabilité précaire. Il n'y a pas de fatalité, une prévention peut être engagée. Cette prévention dépend du niveau de risque accepté par chacune des populations concernées. Associée à une prévision spatiale et temporelle, cette prévention doit être précédée par une analyse des processus de manière à comprendre correctement les phénomènes.

Il existe ainsi une forte demande sociale pour la définition de ces risques naturels, pour leur prévision spatiale et temporelle, pour la prise en compte de mesures préventives et pour la gestion de ces risques dans l'aménagement du territoire. Cela s'est traduit concrètement :

- à l'échelon international, d'abord par l'Assemblée Générale des Nations Unies qui a jugé indispensable de soutenir la Décennie Internationale pour la Prévention des Catastrophes Naturelles (DICPN, 1990-2000), puis par l'UNESCO qui lançait pour la période 1990-1995, le « *Natural Hazards Program* », articulé sur les causes des désastres d'origine naturelle et les moyens de les prévoir, afin d'en limiter les effets. Ces initiatives ont été soutenues par la Banque Mondiale, l'Union Européenne, les Programmes des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE) et le Développement (PNUD) ;
- à l'échelon national, par le gouvernement français qui a engagé depuis une vingtaine d'années une cartographie préventive : cartes ZERMOS (Zones Exposées aux Risques de MOuvements du Sol et du sous-sol), puis les PER (Plans d'Exposition aux Risques) et enfin à partir de février 1995, les PPR (Plans de Prévention des Risques naturels) (Collectif, 1997).

De par ces enjeux, les scientifiques ont à fournir des réponses adaptées à la diversité des situations rencontrées, à la fois pour la connaissance des phénomènes (processus, fonctionnement) et pour leur cartographie préventive. C'est dans ce contexte que mes recherches sur les mouvements de terrain ont été menées.

D'une grande diversité, les mouvements de terrain se rencontrent principalement en zones de montagne (instabilité de versants et de falaises) mais aussi en plaines ou plateaux (en liaison avec l'exploitation ou l'évolution naturelle du sous-sol). S'il s'agit souvent de phénomènes ponctuels, de faible ampleur et d'effets limités, certains présentent parfois un danger pour la vie des personnes. Des mouvements de terrain sont responsables de dommages et de préjudices importants et coûteux. Ils peuvent être à l'origine d'enjeux socio-économiques et humains qui dépassent largement les possibilités de prévention des collectivités concernées par leurs effets directs mais surtout indirects (conséquences en chaîne).

Les investigations engagées visent à mieux comprendre les processus qui sont à l'origine du déclenchement ou de la réactivation des mouvements de versants, en tentant de cerner le rôle respectif des facteurs *prédisposants* (ou de *prédisposition*) et des facteurs *déclenchants* (Almeida-Teixeira *et al.*, 1991 ; Casale et Margottini, 1999 ; Dikau, 1999 ; Dikau *et al.*, 1996a ; Dikau *et al.*, 1996b ; Flageollet, 1988, 1995, 1996 et 1999). Ceci revient à caractériser le fonctionnement général d'un site potentiellement instable, en tentant de répondre à la question : quels sont la nature et le niveau d'aléa redoutés dans tel ou tel secteur ? Formulé autrement, la prévention des aléas « mouvements de terrain » implique que ces phénomènes soient caractérisés par une *intensité*, une *occurrence spatiale* et une *occurrence temporelle*, en répondant à ces quatre questions : où, quand, comment et pourquoi le phénomène se produira ?

Il convient de déterminer les phénomènes dominants responsables de l'instabilité et ceci, nécessairement, à des pas de temps d'analyse et d'investigation donnés. En effet, si la connaissance des événements du passé nous renseigne sur le fonctionnement actuel, il convient dans une démarche prospective de tenter de tenir compte du changement climatique global et de son incidence sur les modifications de l'occupation du sol et des pratiques humaines. Dans le cadre du futur 6<sup>ème</sup> PCRDT de la Communauté Européenne, il constitue l'un des sept thèmes prioritaires retenus « Changement global et écosystèmes », et particulièrement le thème de recherches prioritaires « Désertification et désastres naturels ». Ainsi, est-il indispensable de faire varier les échelles d'analyse, dans le domaine aussi bien temporel que spatial, pour tenir compte de la variété des mouvements de terrain, de leur âge, de leur morphologie, de leur activité (en terme de rythme, durée, mode et période de retour), des variations climatiques pluriannuelles et saisonnières, de l'ampleur ou de l'extension des phénomènes (zone de départ, de propagation, etc.), ...

Pour la compréhension des différents processus d'évolution, le développement et la validation de modélisations prédictives et la cartographie de l'aléa, plusieurs points clés sont à résoudre pour apporter des réponses efficaces et pertinentes. Ainsi, je pense qu'il faut :

- mettre en œuvre une véritable démarche globale multidisciplinaire et, de préférence, pluri-aléas pour tenir compte des interactions avec les autres phénomènes naturels ou non (aléas hydrologiques, hydrauliques, ... par exemple) ;

- disposer de longues séries de mesures, acquises de préférence en continu sur des sites de recherche bien choisis et bien instrumentés ;
- poursuivre les recherches à différentes échelles spatiales (versant, zone ou bassin à « risque », ...) et temporelles emboîtées dans le but de cartographier la susceptibilité des terrains à un type d'événement donné et d'évaluer la probabilité pour que celui-ci se produise pour certaines conditions ;
- vérifier les conditions de transposition des résultats obtenus sur site de recherche (Soldati, 1996 ; Matthews *et al.*, 1997 ; Schrott et Pasuto, 1999).

En raison de la complexité des phénomènes, une large communauté scientifique (géomorphologues, géologues, géotechniciens, etc.) aux compétences complémentaires doit s'intéresser à la qualification et à la quantification de l'aléa, par la mise en œuvre d'outils d'investigation et d'analyse très divers. Toutefois, les réponses apportées aux questions posées ci-dessus sont souvent trop partielles, car dans bon nombre de cas, les investigations sont conduites sans véritable coordination par différents spécialistes ; certes, chacun apporte sa compétence et son savoir, mais reste dans son domaine expérimental particulier.

C'est pourquoi, depuis mon recrutement à l'Université Louis Pasteur en 1995 au sein de l'équipe « Risques Géomorphologiques » du CEREG (Centre d'Études et de Recherches Eco-Géographiques) alors animée par le Professeur Jean-Claude Flageollet qui avait développé une méthodologie de cartographie morpho-dynamique reconnue :

- j'ai apporté en complément les compétences en géotechnique, acquises lors de mon expérience d'Ingénieur géotechnicien au CEBTP (Centre Expérimental de Recherches et d'Études du Bâtiment et des Travaux Publics) pendant près de sept années ;
- j'ai cherché systématiquement à rapprocher la communauté des géomorphologues de celle des géologues, géophysiciens, géotechniciens, ... en mettant en œuvre des programmes de recherches multidisciplinaires dans lesquels les différentes approches tentent de se nourrir mutuellement pendant le déroulement de la recherche.

Basée en particulier sur des sites de recherches instrumentés et suivis par nos soins, cette recherche a été menée principalement en collaboration et en équipe avec trois doctorants et de nombreux étudiants dans le cadre de programmes de recherches multidisciplinaires européens (Teslec, Newtech) ou nationaux (PNRN, PNRH, ACI Cat Nat) dans le bassin marneux de Barcelonnette (Alpes-de-Haute-Provence) en région de montagne.

Ce bassin, dans lequel le Professeur Flageollet avait entrepris de nombreuses recherches depuis 1989, est développé dans les marnes callovo-oxfordiennes. Il offre de nombreux acquis, avantages, intérêts et enjeux qui ont naturellement orienté les grandes étapes de ma démarche et leurs imbrications :

1.) *une variété de mouvements de terrain complexes de toutes dimensions* (Super Sauze, Poche, La Valette, ...). Certains donnent progressivement naissance à des coulées de débris qui évoluent au rythme des conditions hydro-climatiques. Dans certaines conditions, des laves torrentielles peuvent aussi s'initier à partir de ces accumulations.

2.) *des formations marneuses évolutives au comportement très variable* : leur grande hétérogénéité en fonction de leur degré d'évolution rend nécessaire de préciser :

- les mécanismes de rupture de massifs rocheux par glissements structuraux ;
- les évolutions progressives du matériau sous l'effet de la météorisation et de la cinématique ;
- les conditions de progression des coulées de débris dans un chenal d'écoulement ;
- les conditions de déclenchement de laves torrentielles cohésives.

3.) *des enjeux importants* : en raison des volumes mobilisés et des vitesses parfois élevées qui représentent un véritable danger pour les populations et aménagements situés à l'aval, et par le fait que ces glissement-coulées sont très répandus dans le monde (Keefer et Johnson, 1983 ; Flageollet, 1988 ; Zhang *et al.*, 1992 ; Dikau *et al.*, 1996a) ; les résultats obtenus pourront donc être utiles hors du

site étudié pour des matériaux similaires (schistes argileux, argiles, etc.) et pour des glissements de taille ou de volume similaires, sous réserve de vérifier les conditions de transposabilité.

Si je continue à assurer le suivi des glissements de Villerville-Cricqueboeuf sur la côte du Calvados (étudiés durant ma thèse) pour confirmer, grâce à une longue série d'observation de près de quinze années, la rythmicité des déplacements en relation avec les conditions climatiques, mes recherches actuelles sont conduites à deux échelles spatiales :

- à l'échelle locale du glissement-coulée de Super Sauze (17 ha), développé dans un bassin torrentiel de bad-lands, dont la dynamique fait l'objet d'investigations fines. Il s'agit d'évaluer son degré de susceptibilité à une transformation en lave torrentielle ;
- à l'échelle régionale du « bassin à risque » de Barcelonnette (200km<sup>2</sup>), pour le développement à terme d'une méthodologie de cartographie des aléas puis des risques « mouvements de terrain » et « laves torrentielles » en s'appuyant sur l'apport de l'analyse géomorphologique.

En raison du spectre large de comportement observé des matériaux et des phénomènes à l'interface mécanique des roches - mécanique des sols - mécanique des fluides (transition élasto-plastique - fluide), une approche multidisciplinaire a été engagée en s'appuyant sur des sites instrumentés. Grâce à ma double formation, j'ai privilégié le couplage de la **géomorphologie** et de la **géotechnique** pour conduire mes recherches. Les étapes de ces recherches concernent :

- *la structure des formations* : mise en œuvre et développement d'investigations spécifiques compte tenu des hétérogénéités et du milieu 3D ;
- *le fonctionnement des phénomènes* : comportement évolutif et effets de seuil, caractérisation des matériaux, modélisation (recherches des réponses avec les spécialistes des autres disciplines) ;
- *la spatialisation et la cartographie de l'aléa* : conditions de transposition régionale (à d'autres sites du bassin, à tout un bassin, ...) de la structure et du fonctionnement.

Les méthodes de terrain et de laboratoire sont associées en tirant parti des apports de plusieurs autres disciplines (hydrologie, mécanique des fluides, géodésie, géophysique) dans la compréhension des processus en vue de leur modélisation. Cette démarche bénéficie également des résultats acquis dans d'autres milieux et bassins versants de recherches : bassins versants de bad-lands de Draix (Alpes-de-Haute-Provence), par exemple.

**La première partie de ce mémoire** est consacrée à une réflexion générale, à un état de l'art et à une mise en perspective des recherches engagées sur les mouvements de terrain. Dans le **chapitre 1**, la répartition zonale des catastrophes et des risques, les réponses apportées par les sociétés face aux risques ainsi que certains concepts de base, comme risque naturel, catastrophe naturelle, vulnérabilité, aléa, susceptibilité, ... sont présentés brièvement pour mieux replacer mes recherches engagées et les résultats obtenus dans un large contexte théorique, géographique et législatif. Le **chapitre 2** décrit la diversité des mouvements de terrain en s'appuyant sur les différentes classifications couramment admises et il définit et discute de l'activité des mouvements de terrain. Dans le **chapitre 3**, les méthodes de modélisation et de cartographie sont présentées ainsi que les données d'entrée nécessaires pour nourrir les différents modèles en vue d'appréhender la structure, le fonctionnement et la répartition des phénomènes étudiés. Enfin, le **chapitre 4** présente succinctement les méthodes (couplage géomorphologie-géotechnique) utilisés pour collecter les données d'entrée. La conclusion présente et justifie ma position de recherche, mon créneau, les hypothèses de travail et les échelles spatio-temporelles retenues pour mener ces recherches.

**La seconde partie** essaie de présenter une vision cohérente de mon travail de recherche engagé principalement depuis mon recrutement à l'ULP en septembre 1995 et reconstitue mon itinéraire scientifique et le cheminement de mes travaux. Le **chapitre 5** détaille **le cadre morphologique de mes zones d'études** et en particulier les sites de recherches instrumentés et suivis par nos soins. Il souligne également le besoin de développer et adapter à des milieux montagneux difficiles d'accès et très hétérogènes, des méthodes et des techniques de mesure des déplacements et de cartographie et de prospection géophysique. Ensuite, les principaux acquis récents seront présentés de manière thématique. Le **chapitre 6** fournit **les développements méthodologiques**, réalisés pour favoriser l'acquisition de bonnes données de base : pour le suivi des déplacements en continu par GPS ou par extensomètre ; pour la génération de MNT à partir de photographies aériennes prises à basse altitude ; pour l'investigation des coulées par prospection géophysique multi-méthodes ou encore pour la caractérisation des formations superficielles hétérogènes marneuses *in situ* par prospection pénétrométrique. Ensuite, les résultats obtenus **pour la compréhension des processus** sont détaillés. Le **chapitre 7** présente les résultats sur les caractéristiques physiques, mécaniques et rhéologiques des formations marneuses. La structure 3D de la coulée de Super Sauze est présentée dans le **chapitre 8**. Les conditions de déclenchement et de fonctionnement des mouvements de terrain en liaison avec les conditions structurales et climatiques sont données dans le **chapitre 9**.

**La troisième partie** donne les perspectives et programmes de recherche. J'indiquerai comment j'envisage dans les prochaines années de tenter la transposition géographique et régionale des résultats obtenus pour la cartographie des aléas et des risques à des échelles de l'ordre du 1/10 000.

**Des annexes** complètent ce mémoire : l'annexe I présente dans un curriculum vitae le bilan de ma carrière et la liste de mes travaux. Les publications les plus significatives seront trouvées dans l'annexe II.



*Première partie : Les mouvements de terrain :  
position du problème et état de l'art*

La première partie de ce mémoire est consacrée à une réflexion générale, à un état de l'art et à une mise en perspective des recherches engagées sur les mouvements de terrain.

Le chapitre 1 est destiné à replacer mes recherches dans un large contexte théorique, géographique et législatif. Je montrerai d'abord quelle est la répartition zonale des mouvements de terrain, en France et en Europe de l'Ouest. Puis, j'évoquerai les deux types de réponse proposés par les différentes sociétés face aux risques, à savoir l'indemnisation et/ou la prévention. Enfin certains concepts de base, tels que -risque naturel, catastrophe naturelle, vulnérabilité, aléa, susceptibilité- seront précisés pour lever quelques ambiguïtés et abus de langage trop souvent observés. De même, je préciserai quelles sont les échelles spatiales généralement retenues pour chaque type d'analyse.

Dans le chapitre 2, je décrirai la grande variété de mouvements de terrain, en particulier les mouvements de versants, selon les classifications couramment admises, en insistant sur le cas des glissements évoluant en coulée, sur leurs principales caractéristiques et dimensions. L'activité sera détaillée en distinguant le stade, le type et mode d'activité indispensable à définir pour la prévision spatiale et temporelle. La répartition, la morphologie et les vitesses des mouvements seront données.

Dans le chapitre 3, les méthodes de modélisation et de cartographie sont présentées ainsi que les données d'entrée nécessaires pour nourrir les différents modèles en vue d'appréhender la structure, le fonctionnement et la répartition des phénomènes étudiés.

Enfin, dans le chapitre 4, sont présentées succinctement les méthodes utilisées pour collecter les données d'entrée.

La conclusion de cette première partie résume ma position de recherche, mon créneau, les hypothèses de travail, ma démarche basés sur les enjeux et besoins de la société, mon apport personnel et l'originalité de ma démarche dans la discipline. Je montrerai ce que le géomorphologue peut apporter à la résolution ou au moins à une meilleure compréhension des problèmes. Cela me permettra de justifier le choix des échelles spatio-temporelles d'analyse retenues pour mener ces recherches.

Il est bien évident que cette seule partie ne peut suffire à appréhender correctement la complexité du thème abordé. Pour compléter les informations sur les mouvements de terrain, le lecteur est invité à consulter les ouvrages généraux, comme par exemple ceux de Bolt et al, 1975 ; Flageollet, 1988 ; Horlick-Jones *et al.*, 1995 ; Besson, 1996 ; Casale, 1996 ; Blaikie *et al.*, 1997 ; Casale and Margottini, 1999, ... en complément des références bibliographiques données au fur et mesure dans le texte.

# Chapitre 1 : Contexte et cadre général des recherches sur les mouvements de terrain

## 1.1. La répartition géographique des catastrophes et des zones à risques « mouvements de terrain »

Les mouvements de terrain se rencontrent sous toutes les latitudes. De très nombreux pays sont concernés à des degrés divers et plus particulièrement dans certaines régions. Comme les mouvements de terrain sont souvent induits par les séismes, ou déclenchés par de fortes précipitations, comme celles apportées par les cyclones ou la mousson, les zones d'aléas « mouvements de terrain » peuvent, en première approximation, se caler sur celles des aléas sismiques, cycloniques et volcaniques localisées sur les cartes proposées par Ledoux (1995) ou Veyret-Mekdjian (2001). Les pays qui sont les plus touchés et dans lesquels on relève le plus de victimes sont la Chine, les pays andins, le Tadjikistan, le Japon, l'Inde, l'Italie, les Etats-Unis, les pays Alpains. Puis, viennent l'Indonésie, l'ex-Union Soviétique, le Népal, etc.

Comme le souligne Ledoux (1995), malgré quelques événements très graves, les catastrophes provoquées par les mouvements de terrain n'atteignent pas l'ampleur des inondations, des cyclones ou des séismes, dans la mesure où les mouvements de terrain sont très localisés. Le nombre de victimes est ainsi beaucoup plus faible que pour les autres aléas. Ceci étant dit, les bilans les plus couramment avancés font tout de même état de *800 à 1000 morts par an dans le monde*. En 1979, la commission sur les mouvements de terrain de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur estimait que 14 % des pertes de vies humaines lors de catastrophes naturelles pouvaient être attribués aux mouvements de terrain. Varnes (1981) estimait qu'entre 1971 et 1974 quelques 600 personnes avaient été tuées chaque année par des mouvements de terrain. Approximativement 90 % de ces victimes étaient localisés dans les régions circum pacifiques.

Selon Tianchi (1989), les mouvements induits par les séismes dans les loëss en Chine ont provoqué la mort de centaines de milliers de personnes aux 19<sup>ème</sup> et 20<sup>ème</sup> siècle. En 1920, le séisme de Ningxia a provoqué des glissements massifs dans les loëss entraînant la mort d'au moins 100 000 personnes. Guzzetti (2000) cite plusieurs mouvements de terrain catastrophiques induits par les séismes, volcans ou inondations. Pour ces raisons, malgré l'impact significatif des mouvements de terrain, leur importance est souvent sous-estimé car leurs dommages sont inclus dans ceux des phénomènes initiateurs ou déclencheurs, comme les séismes ou les inondations (Schuster, 1996).

Les coûts des mouvements de terrain aux Etats-Unis, au Japon, dans les régions alpines (Autriche, France, Italie et Suisse) et en Inde sont sensiblement similaires (1 à 5 Milliards d'Euro par an) bien qu'il soit probable que les coûts actuels soient plus élevés au Japon. D'après Aleotti et Chowdhury (1999), en Italie, dans les 45 dernières années, les catastrophes naturelles provoquent des dommages dont les coûts sont estimés à 1,8 Milliards d'Euro chaque année et même à 4 Milliards d'Euro durant la décennie 1980 (Catenacci, 1992).

L'objectif de ce paragraphe n'est pas de faire un inventaire complet de l'ensemble des aléas mouvements de terrain survenu dans les pays de l'Europe de l'ouest (un ouvrage entier ne suffirait pas !!), mais de montrer, par un tour d'horizon assez rapide et donc forcément incomplet, quels sont les pays ou régions les plus souvent touchés par ce phénomène, et de montrer, par la même occasion l'importance des enjeux dans les pays « riches » à forte densité de population. Même si le découpage peut sembler arbitraire, je m'en tiendrai seulement aux pays de l'Europe de l'Ouest, car il correspond à la zone que j'ai plus particulièrement étudiée à l'occasion de la rédaction du chapitre n°21 intitulé « *Geomorphic Hazards and Natural Risk* » qu'il m'a été demandé de rédiger pour l'ouvrage « *The Physical Geography of Western Europe* » d'Oxford University Press, à paraître fin 2002 ou début 2003 et édité par Eduard Koster (Annexe II.1). J'y rajouterai une rapide présentation de la situation en Suisse et surtout en Italie, pays européen le plus touché par des aléas de toutes natures. Les ouvrages de J. C. Flageollet (1988) ou celui de C. et C. Embleton (1997) sur les « *Geomorphological Hazards of Europe* » ont été très largement utilisés pour la rédaction de ce paragraphe.

### 1.1.1. Distribution des mouvements de terrain en Europe de l'Ouest

Au **Danemark**, quelques glissements boueux engendrent des problèmes d'aménagement le long des falaises.

Au **Luxembourg**, quelques affaissements se produisent en relation avec la dissolution naturelle et l'exploitation du gypse dans le secteur de Walfendigen. On note également quelques glissements de terrain sur les versants.

**Les Pays-Bas** ont connu des subsidences à la suite des activités minières d'extraction du charbon, des années 1900 au milieu des années 1970, ou d'extraction de la marne depuis le 17<sup>ème</sup> siècle près de Maastricht à St Pietersberg. Ils en connaissent encore actuellement dans les régions d'extraction de pétrole et de gaz, sous et à l'avant du littoral, notamment dans le bassin de Groningen. Dans les polders récents recouverts artificiellement d'une couche de sable d'un mètre d'épaisseur destinée à améliorer l'état du sol qui supporte les constructions, la compaction des sédiments holocènes entraîne des tassements différentiels et des désordres dans les constructions (Flageollet, 1988).

La **Belgique** est affectée par de très nombreux affaissements, effondrements, écroulements, glissements de terrain, coulées de boue et laves torrentielles. Les affaissements et effondrements sont en relation avec :

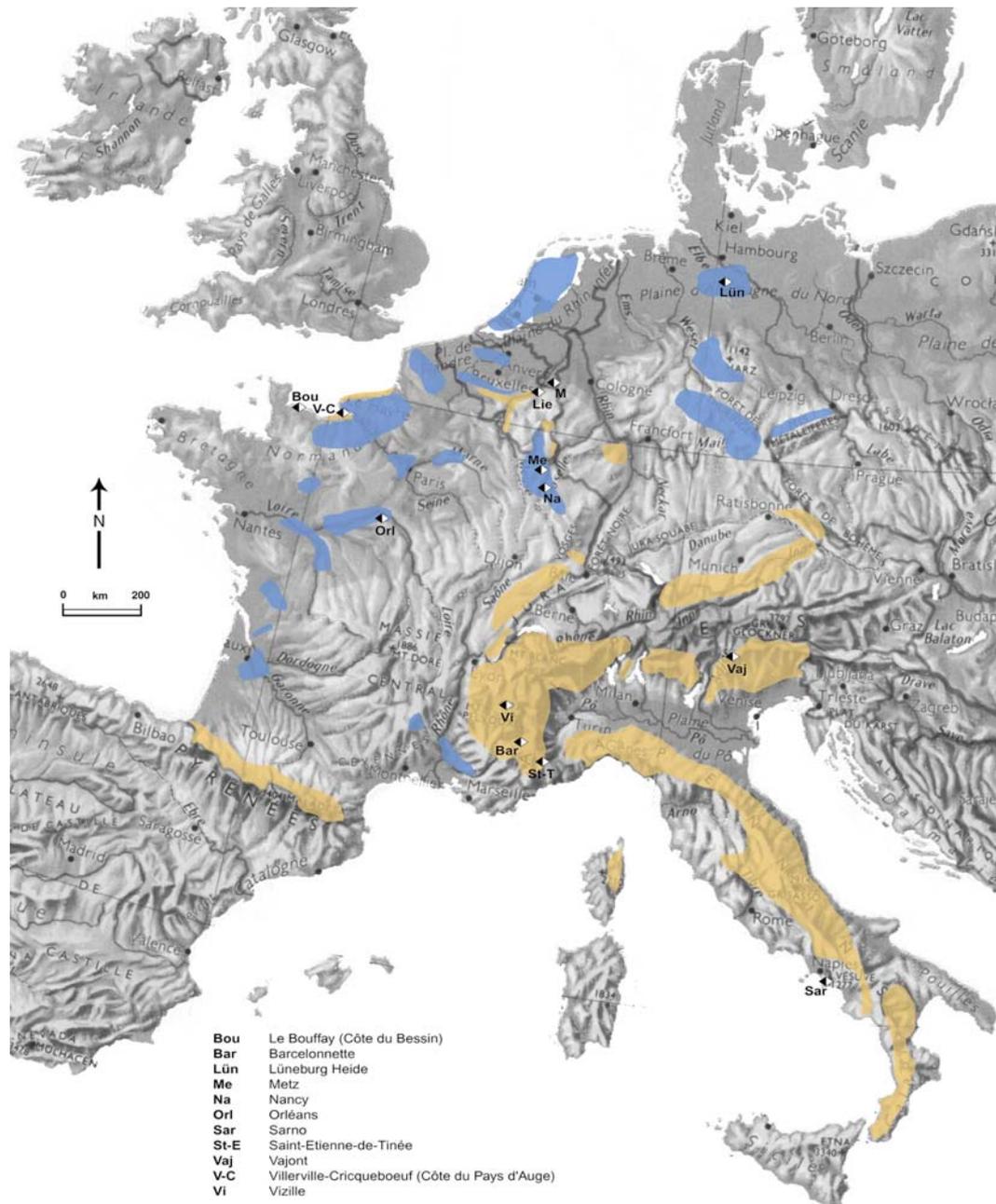
- *la dissolution du calcaire* dans la bordure calcaire du nord des Ardennes, dans la région de Condroz et également près de Doornik et dans la région du " Pays de Herve " (Heyse, 1997) ;
- *l'excavation de la marne* dans différentes régions de Belgique depuis le 17<sup>ème</sup> siècle : Zichen-Zussen-Bolder, Riemst, Kanne, Hoegaarden et Muizenberg. En 1958, à Roosburg, l'effondrement d'une galerie d'ancienne carrière souterraine a tué 18 personnes ;
- *l'extraction du charbon*, dans la région de La Campine et en Wallonie dans le Borinage et dans le bassin de Liège où de nombreux bâtiments, routes et autres infrastructures ont été endommagés.

Les écroulements et les glissements de terrain sont assez communs dans les régions escarpées. Des écroulements se produisent dans la vallée de la Meuse et ses affluents. Heyse (1997) cite l'écroulement de Flémalle et de Huy, du 1<sup>er</sup> décembre 1946 où un bloc de 7 000 tonnes a obstrué le chemin de fer pendant six semaines. Des glissements et des laves torrentielles se sont produits le plus généralement dans les Ardennes flamandes. Une coulée de boue, en 1961, a tué 11 personnes et détruit 17 maisons, à Jupille, près de Liège.

**L'Allemagne** présente plusieurs types de mouvements de masse comprenant des éboulements, des écroulements, des glissements et des laves torrentielles. Ils sont très fréquents et importants dans les Alpes, moins fréquents et de tailles modestes dans les montagnes centrales et les régions escarpées (Mittelgebirge), et rares dans les terres basses et les côtes du nord. Il existe au moins trois bases de données régionales sur les mouvements de terrain (Dikau *et al.*, 1996b) : dans la région Rheinhessen, au sud de Mayence, deux bases de données comportent respectivement 1500 et 240 références ; celle des Alpes bavaroises en répertorie 900. L'une des bases de données de Rheinhessen (240 enregistrements) enregistre 100 % des glissements survenus en 1981/82 sur une zone de 1000 km<sup>2</sup>. Au sud de Bonn, dans la région instable du nord du Rhin (couvrant environ 100 km<sup>2</sup>), plus de 100 glissements ont été cartographiés jusqu'à aujourd'hui. Dans de nombreux cas, il existe une relation étroite entre les instabilités de pente et les aménagements (constructions, routes, etc.) ou les activités humaines (Grunert et Hardenbicker, 1997). On observe des glissements sur les fronts de cuesta des calcaires secondaires dans le nord de la Bavière, des glissements importants le long de la vallée de l'Isar, au sud de Munich, dans les marnes miocènes, des éboulements et des glissements dans la région de Sarre-Nahe, etc.

Dans les Alpes bavaroises, des éboulements historiques et récents ont été enregistrés (Garleff *et al.*, 1997) : par exemple, en 1920 un éboulement a déplacé une masse de 50 000 m<sup>3</sup> dans la vallée de Reintal près de Garmisch-Partenkirchen. Des glissements rotationnels et des coulées se sont produits dans les versants des Pré-Alpes : par exemple au printemps 1991, une énorme coulée de boue a mis en danger presque tous les nouveaux chalets de vacances d'un village près d'Inzell.

En relation avec des processus de karstification, des effondrements de cavités souterraines se produisent dans les formations solubles dans les montagnes de Hartz et le long des franges d'autres montagnes centrales (Mittelgebirge) de l'Hessen, Niedersachsen et Thüringen, et également à quelques endroits dans les terres basses du nord. Les processus de karst, qui semblent avoir été plus importants au Tertiaire et à la fin Pléistocène, sont actuellement seulement d'effets limités, mais les effets de l'exploitation du cuivre et du sel et le pompage de l'eau ont dû intensifier et modifier ces processus normaux et entraîner parfois des dommages locaux (Garleff *et al.*, 1997). A Lünebourg (Basse-Saxe), 169 immeubles ont été démolis entre 1949 et 1973 en raison des subsidences provoqués par l'extraction du sel et de la karstification du gypse (Flageollet, 1988).



Bleu : Plateaux ou plaines avec affaissements et/ou effondrements.  
 Jaune : Hautes montagnes et zones escarpées avec mouvements de nature et d'ampleur variées.  
 Nota : les régions de glissements de peu d'ampleur, peu nombreux et dispersés ne sont pas indiquées.

Figure 1.1 : Localisation des principales régions soumises aux mouvements de terrain en Europe de l'Ouest

En **Italie**, toutes les régions montagneuses sont soumises à des mouvements de terrain, en raison de conditions géologiques et géomorphologiques favorables à l'instabilité des versants. Les mouvements de terrain représentent près de 37 % du nombre total de victimes par les phénomènes naturels (Catenacci, 1992). Sur ce pourcentage, 63 % sont liés à deux principaux événements : le glissement du Val di Stava en 1992 a fait 285 victimes et le glissement du Vajont le 9 octobre 1963 plus de 2 000. Ce dernier est d'ailleurs l'événement le plus catastrophique qui se soit produit en Europe dans les cent dernières années. D'autres exemples peuvent encore être donnés comme le glissement de Tresenda de juillet 1983 et celui de ValPola en juillet 1987 (Photo 1.1 et 1.2) qui ont fait respectivement 17 et 38 victimes (Alexander, 1988).



Photo 1.1 : Ecoulement et lac de barrage ainsi créé, Valpola, juillet 1987 (Italie).



Photo 1.2 : Ecoulement (rock avalanche), Valpola, juillet 1987 (Italie). Vue de dessus.

Plus récemment, en novembre 1994, une inondation dans la région du Piémont a causé 70 victimes dont 20 pouvaient être attribuées aux glissements de terrain induits par cette inondation (Aleotti *et al.*, 1998). Sans oublier, la catastrophe de Sarno, déjà mentionnée dans l'introduction générale, qui a fait 161 victimes. Le lecteur trouvera dans un article de Guzzetti (2000) un inventaire assez complet et une analyse des mouvements de terrain recensés sur près d'un millénaire avec un tableau qui indique les mouvements catastrophiques depuis 1400 qui ont occasionnés au moins 50 morts.

En **Suisse**, plus de 6 % du territoire est soumis à des phénomènes d'instabilité de terrain dans les Alpes et les Pré-Alpes dont certains sont de très grande ampleur : comme l'écroulement ou l'avalanche de débris (*rock avalanches*) de Randa en 1991 (Photo 1.3) où 30 millions de m<sup>3</sup> de débris rocheux ont coupé les voies de communication de vallée (route, voie ferrée) et isolé pendant plus de deux semaines les villages de Zermatt, Täsch et Randa (Raetzo, 2002). En 1994, un glissement « préhistorique » s'est réactivé et a entraîné la destruction des 41 maisons du village de Falli-Höllli. D'autres nombreuses références seront trouvées dans les travaux de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne menés dans le cadre du projet « DUTI : Détection et Utilisation des Terrains en Montagne » (EPFL, 1985) et du rapport d'étude « VERSINCLIM : Comportement passé, présent et futur des grands versants instables en fonction de l'évolution climatique » (Bonnard, 2001).



Photo 1.3 : Ecroulement de grande ampleur (*rock avalanche*) de Randa en avril et mai 1991 (Suisse). (Cliché : B. Holl, 1995).

Ce tour d'horizon permet de bien percevoir la multitude et la diversité des mouvements de terrain qui touchent régulièrement les régions escarpées mais aussi les plateaux en liaison avec l'exploitation ou l'évolution naturelle du sous-sol. Les victimes ont été nombreuses et les dégâts souvent importants. Dans ces pays à forte densité de population, les enjeux humains sont généralement assez élevés mais inégalement répartis, ce que nous allons voir maintenant en détail pour le cas de la France.

### **1.1.2. Mouvements de terrain en France : inventaire et enjeux humains**

En France, depuis l'année 2000, la banque de données sur les mouvements de terrain (BDMvt) rassemble plus de 5900 références. BDMvt est gérée par le BRGM (*Bureau de recherches Géologiques et Minières*) et développée en partenariat avec le LCPC (*Laboratoire central des Ponts et Chaussées*) depuis 1994 avec le soutien du MENRT (*Ministère de l'Education Nationale, de la recherche et Technologie*) et du MATE (*Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement, actuellement Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable*). Une collaboration a récemment démarrée avec les services RTM (*Restauration des Terrains en Montagne*). Les mouvements sont surtout concentrés dans les Alpes et, dans une moindre mesure dans les Pyrénées et la Corse.

*Dans les Alpes*, tous les types et toutes les tailles de mouvements de terrain se retrouvent (Flageollet, 1988 ; Ledoux, 1995). Citons :

- *écroulements* : Tondon (Alpes-Maritimes), 1644, 140 victimes ;
- *glissements et coulées de boue* : Roquebilière (Alpes-Maritimes), 1926, 28 victimes ; Praz Coutant, Le Chatelard (Savoie), 1931 ; Pontamafrey (Maurienne), 1965 ; plateau d'Assy (Hte-Savoie) 1970, destruction d'un sanatorium, 72 victimes ; Salle-en-Beaumont (Isère), 1994, 4 victimes, etc. ;
- *laves torrentielles* : Saint-Gervais (Haute-savoie), 1892, 100 victimes ; Saint-Jean-de-Maurienne (Savoie), 1962, 75 victimes ; Bellevaux, 1943 ; la Ravoire de Bourg-Saint-Maurice, 1981, etc.



*Photo 1.4 : Le versant de la Clapière à Saint-Etienne-de-Tinée (Alpes-Maritimes) en 1976.*



*Photo 1.5 : Le versant de la Clapière à Saint-Etienne-de-Tinée (Alpes-Maritimes) en 1994.*

Le versant de la Clapière à Saint-Etienne-de-Tinée (Alpes-de-Haute-Provence) présente d'importants déplacements depuis une trentaine d'années (Photo 1.4 et 1.5). En raison des énormes volumes mobilisés et du risque d'un écroulement catastrophique qui pourrait barrer la vallée, son évolution est suivie par un système de surveillance et d'alerte (Follaci, 1999). Il en est de même du versant dit des Ruines de Séchilienne près de Grenoble.

Pour être complet sur ce « *tour de France* », citons le *bassin de Barcelonnette* (Alpes-de-Haute-Provence), où je reviendrai en détail dans la seconde partie. Dans les marnes noires surmontées par les flyschs des nappes de charriage, plusieurs dizaines de mouvements de terrain ont été répertoriés. Les plus anciens sont *fossilisés ou dormants*. Trois principaux glissements évoluant en coulées ont recouvert une paléotopographie de bad-lands (Maquaire *et al.*, 2001) et les torrents sont soumis à de fréquentes laves torrentielles, telle celle du torrent de Faucon de 1996 malgré les travaux de reboisement et de correction torrentielle entrepris depuis la fin du 19<sup>ème</sup> siècle (Remaître *et al.*, 2002).

Dans les Pyrénées, la variété de mouvements de terrain est presque aussi grande que dans les Alpes mais leur nombre est plus réduit : glissements, écroulements rocheux et coulées de boue se localisent à l'Est des Pyrénées occidentales (secteur du Pic du Midi d'Ossau) et dans les Pyrénées centrales. Dans les Pyrénées andorranes, des coulées de boue se sont produites lors des pluies de novembre 1982. Des laves torrentielles à Verdun (Ariège) en 1874 ont provoqué 71 morts.

Si le Massif Armoricaïn et les Vosges sont a peu près épargnés par les mouvements de masse, les régions Nord-Est et Sud du Massif Central connaissent des glissements, d'ampleur réduite, sur des versants de vallées encaissées. Dans le Jura, des glissements se produisent sur les versants des vallées et rebords de plateau dans les marnes du Lias. Les chutes de blocs et écroulements se localisent dans les falaises calcaires de la vallée de l'Ain, du Doubs et de la haute chaîne. En Lorraine, les glissements se retrouvent essentiellement dans les marnes du Toarcien sur les versants de rive droite de la Moselle entre Nancy et Metz (glissement de Corny). En Champagne, d'importants glissements sont apparus ou ont été réactivés sur le front de la cuesta de l'Île de France, dont en 1986, celui de Villers-Allerand dans la Montagne de Reims, et en janvier 1988, celui de Grauves au sud d'Épernay. En Normandie, les mouvements sont répartis de la manière suivante : chutes de blocs, écroulements et glissements dans les falaises littorales du Pays-de-Caux ; glissements importants sur la côte du Bessin, en particulier le glissement du Bouffay en août 1981 (Maquaire, 1990) ; glissements du Pays d'Auge dans les versants des vallées et surtout sur le littoral entre Trouville et Honfleur.

Les affaissements et effondrements sont observés en liaison avec l'activité humaine dans les bassins charbonniers, le plateau lorrain avec les mines de fer et l'extraction du sel, au droit des carrières souterraines (marnes, gypses, calcaires, craies, ...) dans la Région Parisienne, le Bassin du Nord Pas-de-Calais, le Val de Loire (Photo 1.6 et 1.7), le Bordelais, la ville de Caen, le Pays d'Auge et les plateaux en Seine-Maritime et dans l'Eure, etc. En 1961, l'effondrement d'une ancienne carrière souterraine à Clamart et Issy-les-Moulineaux a entraîné la mort de 21 personnes. La dissolution karstique entraîne également des subsidences, en région parisienne dans les gypses, dans la région d'Orléans dans les calcaires, dans les Causses du Quercy, en Périgord, etc.



Photo 1.6 : Carrière dans le tuffeau (Tours). Risque d'effondrement en raison de la dégradation du pilier (1989).



*Photo 1.7 : Carrière dans le tuffeau (Tours). Risque d'effondrement en raison du foudroyage du pilier (1989).*

Depuis 1989, plusieurs milliers de maisons individuelles ont été endommagées par le retrait puis le gonflement des sols argileux en relation avec le déficit pluviométrique qui a sévit pendant près de dix années. Les régions les plus touchées ont été *le Nord, la Région Parisienne, le Centre, le sud-ouest, l'Aquitaine*, etc. (Collectif, 1993)

A partir des Dossiers Départementaux des Risques Majeurs (DDRM) et des connaissances des services de l'État, le *Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement* établit le recueil national des communes à risques. Il est mis à jour deux fois par an à partir des sources préfectorales.

Ainsi, près d'une commune sur deux (17 693 communes) est menacée par un aléa naturel. Si les inondations représentent l'aléa le plus répandu, soit 11 604 communes, *les mouvements de terrain concernent 5 932 communes dont près de 10% sont considérées comme prioritaires pour la mise en œuvre de mesures conservatoires ou préventives*, les séismes 5 100, les incendies forestiers 5 100 et les avalanches 355.

Pour Dubois-Maury (2001) ce nombre important « *de communes ainsi concernées trouve une triple explication. Il y a d'abord une prise de conscience collective de la prégnance du risque. Celle-ci est renforcée lors de chaque épisode catastrophique et met en cause l'intense urbanisation des dernières décennies, avec ses nombreuses constructions sur des territoires à risques, tant par négligence que sous la pression de motivations locales et d'intérêts divers. Mais il y a aussi la montée en puissance, relayée par des organismes internationaux, de nouvelles idées-forces, d'impératifs catégoriques qui s'imposent dans les domaines de l'aménagement et de la gestion de l'urbain tels le développement durable et son prolongement, le principe de précaution. On doit enfin faire état des dispositions du nouveau Code pénal, relatives à la responsabilité des élus et des représentants de l'Etat, lorsqu'un lien direct de causalité peut être établi entre la faute et le dommage, ...* ».

La figure 1.2 montre la répartition de ces communes soumises à l'aléa mouvements de terrain avec ou sans enjeux humains (à jour le 24 mai 2002) et illustre parfaitement la description donnée précédemment des zones principalement touchées par ce phénomène. Les communes avec enjeux humains sont très nombreuses ainsi que celles pour lesquelles l'enjeu humain n'est pas encore défini. Elles sont présentes un peu partout, mais elles sont surtout nombreuses dans le Sud-Est (les Alpes, le Couloir Rhodanien, ...), le Nord-Ouest et la Région Parisienne.

Ainsi, il apparaît que pour une forte proportion de communes, le niveau de risque doit être clairement défini. Ce qui laisse présumer de l'important travail à mener et donc présager des besoins des collectivités pour apprécier le mieux possible ce niveau de risque.

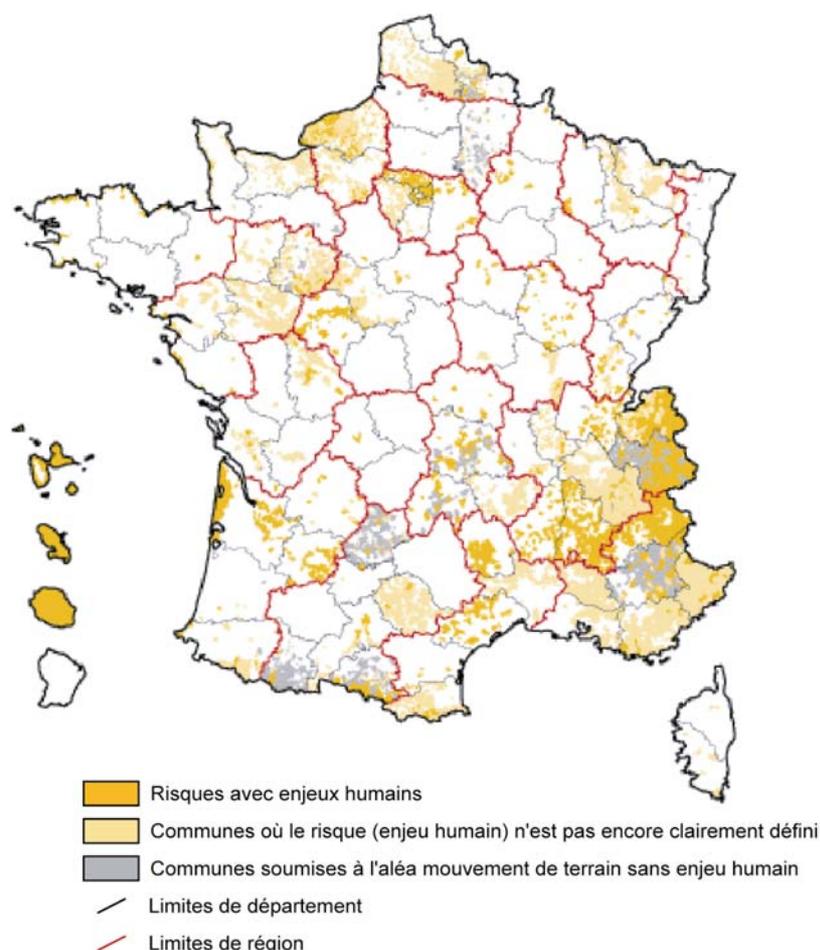


Figure 1.2 : Répartition des communes soumises à l'aléa « mouvements de terrain » avec enjeux humains définis ou non en France (d'après Prim.net, le 4 octobre 2002).

## 1.2. Indemnisation et prévention : deux réponses opposées des sociétés face aux risques naturels

Face à la multitude de phénomènes plus ou moins dramatiques se produisant régulièrement, les gouvernements doivent arriver à un consensus sur le niveau de risque accepté qui correspond finalement à un choix politique. Cela doit être compatible avec le maintien du développement économique local et national et avec la demande sociale de protection face à chacun des risques. Le risque « zéro » n'existant pas, les gouvernements peuvent choisir *soit le secours et l'indemnisation soit la prévention* dans le traitement des risques. Mais, ils s'appuient parfois sur les deux. Pour l'indemnisation comme pour la prévention, il existe de grandes différences de choix et de prise en charge dans les différents pays de l'Europe de l'Ouest comme de l'Union Européenne, en général. Le degré de centralisation et les dépenses engagées sont très différents. Certains pays privilégient les actions publiques via les différentes administrations, d'autres ont plutôt recours au secteur privé par les compagnies d'assurances.

### 1.2.1. Indemnisation

C'est l'État qui déclare l'état dit de « *Catastrophes Naturelles* » après consultation de rapports techniques montrant le caractère exceptionnel du phénomène concerné. A partir de la reconnaissance de la situation de catastrophes naturelles, l'indemnisation des victimes est automatiquement assurée :

- en France, par les assurances, depuis la loi du 13 Juillet 1981 qui, selon un principe de solidarité, rend obligatoire pour tous l'assurance « *Catastrophes Naturelles* » même dans les zones où le risque est très faible ou « nul ». A compter du 1<sup>er</sup> septembre 1999, le taux de la surprime obligatoire

appliquée aux contrats « dommages » et « pertes d'exploitation » est passé de 9 à 12% pour tous les biens, à l'exception des véhicules terrestres à moteur pour lesquels le taux reste à 6%. Ainsi, en cas d'événement jugé « exceptionnel », la liste des communes déclarées sinistrées est publiée au Journal Officiel. Le rôle des pouvoirs publics s'arrête là. Les victimes des dommages doivent faire la déclaration à leur assurance dans les 10 jours. L'instruction des dossiers de sinistre, les expertises et les indemnisations sont ensuite réglées entre les victimes des dommages et leur compagnie d'assurances en toute autonomie.

- *en Belgique, par l'état*, depuis la loi du 12 juillet 1976, grâce au « *Fond des calamités* » géré et financé sur fonds publics (avec possibilité d'assurance complémentaire facultative auprès d'une compagnie d'assurance). Depuis quelques années, la Belgique étudie la possibilité d'un système d'assurance privée obligatoire « *à la française* » en raison des handicaps du « *Fond des calamités* » : son alimentation par le budget de l'État contribue au déficit des finances publiques. Mais surtout, il s'est révélé être un outil d'une piètre efficacité. Dépourvu de moyens humains et techniques adaptés, il est dans l'impossibilité de traiter de manière acceptable l'indemnisation des victimes. Le système prévoit que les contrats d'assurance contre l'incendie couvriront désormais les dégâts occasionnés par une inondation, un tremblement de terre, un raz de marée et un mouvement de terrain. La loi ne rend pas obligatoire l'assurance incendie, mais 95 % des ménages y souscrivent, souvent par obligation contractuelle. Les assurés devront payer cette extension de la couverture offerte par l'assurance incendie. Le montant de cette "surprime" sera réglementé par le gouvernement, qui évoque une hausse moyenne de 9 %.

- *en Allemagne, l'assurance est facultative*. Il n'y a pas de loi, mais des actions au coup par coup en fonction de la gravité des situations. Les financements publics sont versés soit par le Land pour des phénomènes locaux, soit par la fédération pour les catastrophes naturelles graves qui concernent plusieurs länder, par exemple lors des inondations de l'Oder en 1997 ou en août 2002.

### 1.2.2. Prévention

Elle peut être engagée à partir des réglementations et en particulier à travers une cartographie des zones à risque (Pissart et Closson, 1999). La prévention peut être implicitement incluse dans les règlements locaux de construction et faire l'objet de cartographie, en fonction des informations historiques collectées sur les aléas.

*L'État français* fait figure de pionnier dans la mesure où il a engagé depuis maintenant près de 20 ans une *cartographie préventive*. Ainsi, il peut délimiter les terrains exposés à certains risques afin d'y interdire les constructions ou de ne les autoriser que sous certaines conditions. Depuis 1995, les Plans de Prévention des Risques naturels prévisibles (PPR) unifient et remplacent les nombreux documents plus anciens (Collectif, 1997). La procédure détaillée pour la réalisation de ces PPR sera trouvée dans le guide (Collectif, 1999). Par rapport aux précédents documents, le *PPR privilégie une évaluation qualitative* des risques, les simulations quantitatives ne sont effectuées que lorsqu'elles sont nécessaires. Sa réalisation est donc plus rapide que par le passé : sa prescription et son approbation ne dépendent que du Préfet qui peut même l'appliquer partiellement par anticipation si l'urgence et les enjeux le justifient. Le PPR est annexé au POS (*Plan d'Occupation des Sols*) remplacé depuis peu par le PLU (*Plan Local d'Urbanisme*).

Les PPR sont réalisés dans les communes exposées prioritaires. Ces priorités sont établies en s'appuyant sur la connaissance d'événements récents ou historiques, le « *Dossier Départemental des Risques Majeurs* » (DDRM) et les informations fournies par les arrêtés interministériels de constat de l'état de catastrophes naturelles. La hiérarchisation des communes tient compte également d'une approche globale par bassin de risque, en fonction de l'importance présumée du risque et des moyens techniques et financiers mobilisables. Le PPR comprend :

- *des documents graphiques*, à l'échelle du 1/10 000 ou 1/5 000, en particulier la carte informative des phénomènes naturels, la carte des aléas, la carte des enjeux et le plan de zonage du PPR (en trois zones : zone d'interdiction, zone de contrainte faible et zone sans contrainte spécifique) ;
- *un règlement* précisant les mesures d'interdiction, de protection et de sauvegarde et les mesures relatives à l'aménagement, l'utilisation ou l'exploitation des constructions, des

ouvrages, des espaces mis en cultures ou plantés existant à la date de l'approbation du plan, etc.

Mais cette cartographie est « *lente* » : sur les 17 000 communes françaises affectées (en partie ou en totalité) par un ou plusieurs risques naturels, seules 1 700 étaient couvertes en 1999 par un PPR. La raison principale est liée au peu d'entrain de certains maires, compte tenu de l'aspect jugé contraignant de cette cartographie qui peut interdire les constructions ou bloquer les aménagements dans les zones à risque fort (zone rouge). Mais la cartographie reste tout de même un exercice délicat où le réalisme doit l'emporter. Il faut être capable de cartographier, raisonnablement et objectivement, avec les connaissances du moment, sans être tenté :

- dans un souci de sur-sécurité, d'étendre inutilement une zone contraignante reposant sur un aléa peu probable voire improbable ;
- ou au contraire, par laxisme ou bien sous la pression sociale et économique, de trop la réduire et ainsi faire prendre des risques aux populations concernées.

Mais c'est un exercice délicat soumis à des erreurs d'appréciation. Ces erreurs peuvent être facilement corrigées après la survenance d'un événement qui aurait dépassé les limites prévues tant par son intensité que par son extension. Par exemple, dans le cas de l'avalanche de Montroc près de Chamonix, sur 20 chalets touchés (17 détruits) par l'avalanche, 12 étaient en zone blanche (constructible) et 8 en zone bleue (constructible sous conditions). La cartographie préventive devra donc être révisée, la zone touchée sera transformée en zone rouge (non constructible).

*En Belgique*, cette prévention est maintenant inscrite dans les différents documents d'urbanisme pour la Région Wallonne, depuis le décret du 27 novembre 1997 modifiant le Code wallon de l'Aménagement du Territoire, de l'Urbanisme et du Patrimoine.

Ailleurs, comme en *Allemagne*, la cartographie préventive n'est pas systématique, mais indirectement incluse dans les règles de construction. Par exemple, pour les mouvements de terrain dans les Alpes allemandes depuis 1987 la cartographie et l'inventaire sont réalisés par le service géologique avec un système d'information géographique (SIG) à l'échelle du 1/10 000. Les avalanches et les laves torrentielles ont été inventoriées et décrites respectivement pour les dix et quarante dernières années.

*En Suisse*, en 1991, à la suite à plusieurs événements catastrophiques, dont des inondations en 1987, une nouvelle législation renforce la protection de l'environnement, des vies humaines et des biens face aux dommages causés par l'eau, les mouvements de terrain, les avalanches et les feux de forêts. Ainsi, une évaluation des aléas et une identification de mesures de protection objectives sont engagées dans l'intention d'une planification de mesures préventives et la limitation des risques résiduels. Les cantons sont maintenant obligés d'établir des registres et des cartes délimitant les zones d'aléas qui doivent être prises en compte dans les plans d'aménagement (Raetzo *et al.*, 2002)

### **1.2.3. Le recours à l'expropriation**

A ces deux réponses classiques des sociétés face aux risques s'ajoute l'expropriation qui peut être vue comme une réponse juridique préventive aux risques naturels prévisibles. En effet, il s'agit d'une réponse préventive à des mouvements de terrain ou des coulées de boue, dont l'occurrence est indéterminée et peut être soudaine sans que l'on puisse prévenir les personnes, par un système d'alerte efficace comme dans le cas de certaines inondations.

En France, la loi dite Barnier du 2 février 1995 retient l'expropriation pour répondre à certaines *situations d'extrême dangerosité* (Dubois-Maury, 2001). Les articles 11 et 13 de cette loi exposent les modalités d'utilisation de la procédure d'expropriation. Ces dispositions résultent, d'une part, du *principe de précaution*, nouveau standard de gestion des risques et d'autre part, des *obligations classiques qui imposent aux pouvoirs publics* d'intervenir d'urgence en cas de danger grave ou imminent, pour prévenir ou faire cesser « *des accidents naturels graves, fléaux ou pollutions* ». Comme le précise Dubois-Maury (2001), la loi encadre strictement le recours à cette expropriation pour cause d'utilité publique. Elle ne peut être engagée que si les indemnités d'expropriation sont moins onéreuses pour la collectivité que les travaux et autres moyens de protection. L'initiative de la

demande peut venir de toutes personnes (propriétaire, maire), mais il appartient au représentant de l'Etat d'engager la procédure en délimitant le périmètre menacé.

Cette procédure est lourde et coûteuse, aussi elle ne peut s'appliquer qu'à des cas majeurs. En 2001, on dénombrait 40 dossiers présentés, dont 28 étaient en cours d'instruction et 10 en phase de déclaration d'utilité publique (DUP). Le cas de Séchilienne dans la vallée de la Romanche, à l'est de Grenoble est bien connue : 90 maisons étaient menacées par l'écroulement brutal du Massif des Ruines. La procédure a été engagée en 1997 et a donné lieu à des oppositions farouches de quelques personnes. C'est seulement après plus de deux années de contentieux que le litige a été réglé par la confirmation de l'expropriation par le Conseil d'Etat. Il semble que ce cas de contentieux demeure isolé, car dans tous les cas les plus récents, l'expropriation n'a soulevé aucune difficulté.

### **1.3. Concepts de base pour l'évaluation et la cartographie des risques**

Pour permettre de faire face et de répondre à la forte demande sociale, il faut faire appel à des concepts de base qu'il me semble important de préciser. L'ambition de ce paragraphe n'est pas d'être exhaustif, le lecteur curieux trouvera, par exemple, des informations et définitions intéressantes dans l'ouvrage de Dauphiné (2001) ou dans celui plus synthétique de Dubois-Maury (2001). La terminologie utilisée sera conforme aux définitions proposées par Varnes (1984) ou à celles du glossaire multilingue international sur la gestion des catastrophes naturelles élaboré lors de la décennie internationale pour la réduction des catastrophes naturelles (IDNDR), (Horlick-Jones *et al.*, 1995 ; Leroi, 1996 ; Finlay et Fell, 1997).

#### **1.3.1. Catastrophe naturelle et risque naturel**

Je voudrais clarifier en tout premier lieu les termes « catastrophe naturelle » et « risque naturel », très souvent employés improprement. Le mot « catastrophe » peut apparaître souvent assez galvaudé, car il est très relatif. En effet, il dépend de la perception que peut avoir un individu ou une société d'un événement. Il pourra apparaître catastrophique pour les uns et sembler assez banal et presque anodin pour les autres. Il est donc important de se mettre d'accord sur ce que ces termes signifient réellement. Cela peut facilement se résumer en reprenant l'un des titres d'un paragraphe de l'ouvrage de Dauphiné (2001) : « *les risques sont potentiels mais les catastrophes sont réelles* ».

Le terme catastrophe a de nombreux synonymes comme désastre (*disaster*), calamité publique, sinistre, cataclysme, etc. qui sont plus ou moins souvent employés. Ainsi, une *catastrophe naturelle* est un événement qui, lorsqu'il se manifeste, prend en défaut la capacité de réaction et d'intervention de la communauté concernée. On définit un événement naturel comme une catastrophe **a posteriori**, après qu'il se soit manifesté sur un territoire donné. En fonction de la capacité des sociétés à réagir et à se protéger, l'événement devient ou non une catastrophe puisque la gestion de l'événement dépend aussi et surtout du niveau de développement de la communauté touchée (Manche, 1996, 1997). Ce terme catastrophe décrit une réalité, c'est-à-dire un phénomène qui s'est produit.

Par contre, *le risque n'est que potentiel*. Il mesure l'événement possible *a priori*. Ne pouvant pas tout empêcher, les chercheurs ont beaucoup travaillé sur la prévision des risques pour anticiper les catastrophes, même si pour certains (Ledoux, 1995) « *il est souvent plus facile de secourir et d'indemniser que de prévenir* ».

Comme le souligne Dubois-Maury (2001), les phénomènes naturels se sont toujours produits selon des intensités et des fréquences variables. Mais, c'est véritablement à partir de la révolution industrielle, par la concentration des hommes et de leurs activités sur des territoires urbanisés relativement restreints, que les risques naturels deviennent de véritables dangers pour les sociétés. En France, en 1982, le terme traditionnel de « *calamité publique* » a été remplacé par celui de « *risque naturel majeur* » caractérisé par une faible fréquence et une énorme gravité (nombreuses victimes, dommages importants aux biens et à l'environnement).

Le concept de risque est un modèle théorique qui est la combinaison de deux autres concepts :

- *l'aléa* qui représente la « menace potentielle » d'un phénomène naturel qui aura une certaine intensité, concernera un certain territoire, en un certain temps ;
- la *vulnérabilité* qui caractérise concerne l'importance des conséquences prévisibles de l'aléa, dans tous les domaines anthropiques qui peuvent être affectés (personnes, biens, habitations, activités économiques, infrastructures, patrimoines, milieux).

Un risque existe lorsqu'il y a une probabilité de déclenchement inopiné d'un phénomène naturel destructeur et qu'il y a existence de biens, de personnes et d'activités pouvant subir des préjudices du fait de celui-ci. *Le risque évolue en fonction du temps et des lieux et sera plus ou moins accepté selon la culture et la perception de la société.*

Le niveau de risque doit être établi pour chacun des aléas concernés. Dans certains cas, on tiendra compte des interactions entre les différents aléas dans une démarche multirisque. Ces valeurs pourront être qualitatives ou quantitatives (Leroi, 1996). Cela dépendra pour une large part de la connaissance acquise sur le phénomène en fonction de sa complexité et des moyens techniques et financiers engagés.

Pour Dauphiné (2001), « *il n'y a jamais de concordance, ni temporelle, ni spatiale, ni en intensité, entre le risque et la catastrophe. Le décalage dans le temps, évident, a déjà été souligné par de nombreux auteurs : « Le risque se situe lors de la période d'incubation avant que la catastrophe se déclare » (Turner, 1978). Il peut cependant persister au-delà d'une catastrophe. C'est d'ailleurs ce déphasage qui explique en partie les difficultés de toute prévision et la mise en place de politiques de prévention. La catastrophe survient parfois à une date non prévue, malgré une anticipation relativement satisfaisante du risque* ». Ce décalage concerne aussi la dimension spatiale. Les aires reconnues à risque sont relativement vastes, « *les véritables catastrophes sont généralement plus localisées. Elles sont ponctuelles et normalement situées à l'intérieur des zones à risque, même si leur effets peuvent déborder largement les limites de ces aires à risques, notamment dans le cadre des catastrophes faisant intervenir la circulation atmosphérique. Il est cependant exceptionnel qu'une catastrophe s'étende au-delà de la zone de risque* ».

Un niveau de risque donné peut correspondre selon le principe d'un tableau à double entrées (Tableau 1.1) à un aléa fort et une vulnérabilité faible, un aléa moyen et une vulnérabilité moyenne, ou bien au contraire d'un aléa faible et une vulnérabilité élevée.

|      |        | Vulnérabilité |        |       |
|------|--------|---------------|--------|-------|
|      |        | Faible        | Moyen  | Fort  |
| Aléa | Faible | Faible        | Faible | Moyen |
|      | Moyen  | Faible        | Moyen  | Fort  |
|      | Fort   | Moyen         | Fort   | Fort  |

Tableau 1.1 : Evaluation du niveau de risque par combinaison d'un niveau d'aléa et d'un niveau de vulnérabilité.

L'évolution du risque et de sa prise en compte par les différents groupes sociaux est essentiellement due à la vulnérabilité. A l'échelle humaine, l'aléa varie peu, alors que les espaces vulnérables sont en constante transformation avec les changements d'occupation de l'espace par les hommes. C'est donc principalement la vulnérabilité qui modifie le risque, ou plutôt la prise en compte et la gestion de celui-ci. C'est sur elle que l'on peut véritablement travailler pour avoir une influence sur le niveau de risque. Cela est particulièrement vrai pour le risque sismique, sur lequel l'homme n'a aucune influence sur l'aléa, a contrario des autres aléas comme les mouvements de terrain, par exemple où l'homme peut avoir une part de responsabilité dans le déclenchement ou l'aggravation, mais peut aussi réduire le niveau d'aléa par la prise en compte de mesures appropriées (drainage des sols, renforcement, murs de soutènement, digues de protection, murs déflecteurs, etc.).

### 1.3.2. Vulnérabilité

La *vulnérabilité* est assez difficile à définir, puisqu'il n'existe pas une vulnérabilité intrinsèque, mais une vulnérabilité pour chacun des aléas concernés. Si une démarche générale peut être adoptée pour

l'analyse de cette vulnérabilité, elle doit être adaptée à chacun des phénomènes concernés. Pour l'heure, il me semble tout de même intéressant d'en donner les définitions les plus couramment admises par la communauté travaillant sur le risque en général et sur le risque « géomorphologique » en particulier. Quelques travaux intéressants sur la vulnérabilité appliquée à l'aléa « mouvements de terrain » ont été engagés (Leone, 1996 ; Leone *et al.*, 1996), mais la plupart concerne les risques sismiques ou hydrologiques (inondation), ou bien ont été surtout engagés pour évaluer le risque ou les impacts économiques et financiers d'origine technologique, industrielle, sociale, politique ou du vivant (Arnal et Masure, 1999 ; Dauphiné, 2001 ; De Vanssay, 1996 ; DRM, 1990 ; Hubert et Ledoux, 1999 ; etc.).

De très nombreuses méthodes d'évaluation de la vulnérabilité existent. Elles peuvent être regroupées, comme le suggère Dauphiné (2001) en deux grandes catégories : *vulnérabilité analytique et comptable* et *vulnérabilité synthétique* qui correspondent, finalement, à des analyses menées à des échelles très différentes.

### 1.3.2.1. vulnérabilité analytique et comptable

Une définition est donnée par le guide général des Plans de Prévention des Risques (Collectif, 1997) : « *la vulnérabilité, au sens le plus large, exprime le niveau de conséquences prévisibles d'un phénomène naturel sur les enjeux* ». Cela amène à définir les **enjeux** qui sont considérés comme les domaines affectés par le risque : les hommes, leurs biens et les milieux dans lesquels ils vivent. Ces enjeux varient bien sûr en fonction de la nature de l'aléa. Ainsi, pour chaque enjeu reconnu est établie une évaluation des dommages en fonction du niveau d'aléa. Cette démarche est dite analytique car les enjeux peuvent être décomposés plus ou moins finement.

Pour d'autres auteurs, la vulnérabilité est définie comme le niveau s'étendant de 0 (dommage nul) à 1 (destruction totale), des dommages potentiels d'un **élément exposé** donné soumis à l'action d'un phénomène pressenti ou déclaré d'intensité donnée (Varnes, 1984 ; Einstein, 1988, Flageollet, 1999 ; Leone, 1996 ; Leone *et al.*, 1996 ; Leroi, 1996).

L'évaluation de la vulnérabilité pose ainsi le problème de la compréhension de l'interaction entre le phénomène et *l'élément exposé*. Cette interaction peut être exprimée par des fonctions de dommages ou, par extension, des fonctions de vulnérabilité. Celles-ci permettent de structurer divers composants du concept de vulnérabilité. D'après Leone *et al.*, (1996), trois groupes principaux d'éléments exposés susceptibles de dommages sont définis chacun étant associé à une fonction de dommages. Ce sont :

- les propriétés ou terrains, y compris toutes les structures construites dessus, mais y compris également les zones ou tous moyens d'utilisation de la terre (fonction de dommages structurels) ;
- les personnes (fonction de dommages corporels) ;
- les diverses activités (fonction dommages opérationnels).

Parfois, on parlera de *vulnérabilité humaine* (préjudices potentiels aux personnes, dans leur intégrité physique et morale), de *vulnérabilité économique* (degré de perte ou d'endommagement de biens et activités exposés), de *vulnérabilité des biens sociaux*, etc. (DRM, 1990).

### 1.3.2.2. vulnérabilité synthétique

Depuis une dizaine d'années la définition donnée précédemment est considérée comme trop restrictive. Ainsi d'Ercole (1994) écrit « *A l'approche classique de la vulnérabilité qui mesure un endommagement potentiel des biens et des personnes et ses répercussions sur l'environnement économique, semble s'opposer celle qui considère la vulnérabilité des sociétés à travers leur capacité de réponse à des crises potentielles* ». Cette approche est appelée vulnérabilité synthétique. Comme le précise Dauphiné (2001), ceci « *traduit la fragilité d'un système dans son ensemble, et de manière indirecte sa capacité à surmonter la crise provoquée par un aléa. Plus un système est apte à se rétablir après une catastrophe, moins il est vulnérable. Pour surmonter une crise, deux solutions existent. La première est une forme de résistance, tandis que la seconde est qualifiée de résilience. Cette notion de résilience, empruntée à la physique, est employée en écologie depuis une trentaine d'années. Elle mesure la capacité d'un écosystème à absorber le changement, à persister au-delà d'une perturbation. La somme des deux réponses apportées pour assurer la survie du système, la*

*résistance et la résilience, est égale à l'inverse de la vulnérabilité. Quand un système social possède une bonne résilience, sa vulnérabilité est faible. ».*

### 1.3.2.3. mesure de la vulnérabilité

Il s'agit de trouver des méthodes efficaces et pertinentes pour mesurer ces vulnérabilités, analytique et synthétique. Tous les auteurs s'accordent pour dire que cela n'est pas une chose simple. En effet, il existe plusieurs façons de mesurer ou d'apprécier la vulnérabilité, de manière absolue ou relative. Pour la première, par exemple pour la vulnérabilité humaine : nombre de victimes potentiels lors d'une coulée de boue ; valeur qui pourra être traduite en fréquence relative ou en pourcentage de la population totale sur un secteur donné. En raison du grand nombre de formes de vulnérabilité, la *vulnérabilité totale* est difficile à établir car elle conduit à des décès potentiels et des pertes économiques par exemple, ce qui encourage à plutôt faire l'addition de vulnérabilités partielles avec une interprétation qui sera fonction du nombre de vulnérabilités sectorielles reconnues. Cela est possible par un jeu plus ou moins complexe de coefficients, pondérations appliquées à différents facteurs jugés représentatifs et pertinents dans chacune des vulnérabilités retenues (par exemple physique et socio-économique). Cette démarche reste empirique car très sujette aux facteurs de pondération retenus mais offre l'avantage d'une classification par points qui peut être spatialisée pour les différents secteurs identifiés (Dauphiné, 2001). Pour cet auteur, une solution consisterait à transformer toutes les vulnérabilités en une même unité. Ainsi, plusieurs solutions sont disponibles et consistent :

- à tout évaluer en termes financiers, à procéder à une analyse coût-avantage, ce qui revient à donner un coût à la vie ;
- à établir une comptabilité énergétique de la vulnérabilité. Toutes les pertes et tous les dommages sont alors traduits en énergie, en calories ;
- à mesurer la vulnérabilité par une durée de retour, comme pour l'aléa inondation, selon la méthode « inondabilité » développée par le Cemagref. Cette méthode offre l'avantage de pouvoir représenter l'aléa et la vulnérabilité sur une même carte en fonction de deux durées de retour ;
- à utiliser des techniques multicritères qui permettent de combiner des informations variées, mesurées dans des échelles différentes, pour le plus souvent produire un indice d'évaluation unique. Dans ce cas, chaque critère est standardisé puis pondéré en fonction de son importance supposée.

Il en ressort que l'analyse de la vulnérabilité peut conduire à un simple recensement des éléments exposés et des enjeux dans un secteur donné et une appréciation qualitative de la vulnérabilité, ou bien au contraire, pour une quantification de cette vulnérabilité, l'analyse peut aboutir à l'élaboration de méthodes très complexes et sophistiquées, modélisations multicritères et multi-paramètres qui demandent la constitution de banques de données diverses bien informées et donc relativement coûteuses. Cette vulnérabilité constitue un vaste champ de recherche où participent économistes, sociologues, géographes humains et physiciens. Cela nécessite d'y consacrer un temps important en se spécialisant pleinement dans ce domaine.

### 1.3.3. Aléa et susceptibilité

L'aléa est une notion complexe qui est fonction de la diversité des phénomènes naturels. D'un caractère aléatoire, il répond à des critères de brièveté et de soudaineté. L'aléa est fonction de l'intensité du phénomène naturel, de son occurrence, de la durée considérée et de l'espace pris en compte. Un aléa sera défini par une *intensité*, une *probabilité d'occurrence spatiale* et *temporelle* qui dépendent de *facteurs prédisposants* (appelés aussi *facteurs de prédisposition*) et des *facteurs déclenchants*. Ces facteurs ont souvent été listés et décrits dans la littérature : Brabb, 1984 ; Carrara et Merenda, 1976 ; Cruden et Varnes, 1996 ; Hansen, 1984 ; Hutchinson, 1995 ; Terzaghi, 1950 ; Varnes *et al.*, 1984 ; Wieczoreck, 1996 ; etc.).

Avant d'évaluer l'aléa, il faut d'abord évaluer la *susceptibilité* des terrains à un type de mouvements donné dans une zone d'étude donnée, c'est à dire la possibilité qu'un mouvement se produise dans une zone particulière sur la base de conditions environnementales locales. Cela revient à répondre aux trois questions ci-dessous :

- quel type de mouvement de terrain est susceptible de se produire ?
- quels sont les facteurs de prédisposition ?
- où ces facteurs sont-ils spatialement réunis ?

Une *probabilité d'occurrence spatiale* (extension spatiale ou localisation) est ainsi définie. Elle est conditionnée par des *facteurs "permanents" de prédisposition ou de susceptibilité* comme par exemple la pente, la géologie (lithologie et structure), dans certains cas l'occupation des sols, etc. L'extension spatiale sera plus ou moins précise avec, comme pour les avalanches ou certains mouvements de terrain, une zone de départ, une zone de transfert et une zone d'épandage (courant, exceptionnel, etc.).

Pour caractériser véritablement l'aléa, il faut ensuite préciser les conditions nécessaires pour déclencher un type de mouvement de terrain donné. Une *probabilité de survenance* (appelée aussi *probabilité d'occurrence temporelle*), c'est-à-dire une période de retour doit être ainsi définie. Elle dépend de la combinaison plus ou moins complexe de facteurs déclenchants naturels ou anthropiques comme : les conditions climatiques (précipitations, gel, dégel, ensoleillement, etc.), les secousses sismiques, l'action de l'homme (déboisement, travaux, etc.). *L'existence de seuils de déclenchement oblige à tenir compte des conditions initiales de stabilité du versant.*

La probabilité d'occurrence de l'aléa est le plus souvent évaluée par *la probabilité de survenance* d'un facteur déclenchant, tel un événement pluvieux intense ou un tremblement de terre sur le principe d'une simple relation de cause à effet. Mais, ces relations de causes-effets ne sont pas toujours facilement identifiables, dans la mesure où un mouvement de terrain est rarement lié à une cause unique. Il est souvent difficile d'identifier tous les facteurs impliqués et dans bien des cas, il est difficile de définir les relations entre les différents facteurs.

Dans le cas de mouvements induits par les précipitations (*rainfall-induced landslides*), les analyses statistiques des données pluviométriques peuvent permettre, à la fois, la *définition de seuils de déclenchement* (généralement en terme d'intensité, de volume et de durée) et le calcul de période de retour d'épisodes de pluies critiques, fonction des *conditions initiales* et des caractéristiques locales (épaisseur des couches superficielles, état de saturation, conductivité hydraulique, etc.) (Aleotti *et al.*, 1996 ; Cancelli et Nova, 1985 ; Corominas, 2000 ; Maquaire, 1990, 1997, 2000 ; Polloni *et al.*, 1996 ; etc.).

Parfois, il faut aller chercher beaucoup plus loin, dans les conditions climatiques antécédentes lointaines : succession de plusieurs années très pluvieuses qui entraîne une élévation pluriannuelle d'une nappe phréatique et des surpressions interstitielles néfastes à la stabilité du versant (Flageollet *et al.*, 1999 ; Maquaire, 1990, 1997). Cette probabilité est exprimée quantitativement (période de retour de 10 ans, 30 ans, 100 ans, etc.) ou qualitativement (négligeable, faible, forte, etc.).

Il est tout de même important de noter ici que le calcul de la probabilité de survenance d'un mouvement de terrain est plus difficile à définir que pour d'autres aléas comme les inondations pour lesquelles il y a souvent une relation directe et immédiate entre une crue et une période de fonte de neige et de fortes pluies de printemps.

*L'intensité* traduit l'importance du phénomène. Elle est soit *mesurée* (magnitude d'un séisme sur l'échelle de Richter, hauteur d'eau pour une inondation, ...) soit *estimée* (intensité d'un séisme sur l'échelle MSK, volume et vitesse d'un mouvement de terrain, ...).

*In fine*, le niveau d'aléa (ou degré d'aléa) peut être évalué par combinaison des causes élémentaires. Par exemple, pour un mouvement de terrain, combinaison de l'intensité et de l'occurrence temporelle. Pour une inondation et en fonction de son type, on pourra combiner deux à deux, les paramètres les plus pénalisants : par exemple, la hauteur ou la durée de submersion et la vitesse des eaux.

### 1.3.4. Des échelles adaptées aux objectifs des études envisagées

La plupart des articles et ouvrages font référence à quatre échelles d'analyse définies en 1976 par l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur (Tableau 1.2). A ces quatre niveaux, je souhaite rajouter le niveau *local* qui est celui du site instrumenté. Il s'étend généralement sur des superficies assez réduites qui nécessitent l'élaboration de documents d'analyse à des échelles largement inférieures au 1/5 000 proposé dans l'échelle dite *large*. Pour l'échelle « large », Van Westen (2000) donne une fourchette de 1/2 000 à 1/10 000 et pour lui l'échelle régionale est appelée aussi synoptique (*synoptic scale*) :

| Echelles                            |                       | Type d'application                    |
|-------------------------------------|-----------------------|---------------------------------------|
| Nationale ( <i>National scale</i> ) | 1/1 000 000           | Inventaire national                   |
| Régionale ( <i>Regional scale</i> ) | 1/100 000 à 1/500 000 | Inventaire régional                   |
| Moyenne ( <i>Medium scale</i> )     | 1/25 000 à 1/50 000   | Etude de faisabilité                  |
| Large ( <i>Large scale</i> )        | 1/5 000 à 1/15 000    | Etude détaillée d'une zone            |
| Locale ( <i>Local scale</i> )       | 1 000 ou 2 000        | Etude détaillée d'un site instrumenté |

Tableau 1.2 : Les différentes échelles d'analyse retenues dans l'étude de l'aléa mouvements de terrain.

Le choix de l'échelle de travail à adopter pour l'investigation, l'évaluation, la modélisation et la cartographie du niveau d'aléa peut être basé sur les *trois points* suivants (Aleotti *et al.*, 1996) :

- *l'extension de la zone d'étude* ;
- *le but de l'étude* : Il fixe l'extension de la zone à étudier et l'échelle à adopter. Pour un inventaire et une vue d'ensemble, une division du territoire en zones homogènes à une échelle régionale peut être adaptée. Mais pour prendre en compte l'aléa dans l'aménagement, pour des problèmes plus spécifiques comme l'implantation de structures d'aménagement ou la définition de plans de mesures prioritaires, l'échelle doit être plus détaillée (moyenne échelle, par exemple) pour faire des études de faisabilité. Fréquemment, ces analyses sont préliminaires et des études spécifiques sont conduites à des échelles larges ou locales pour prendre en compte un versant seul ou une zone d'extension réduite. Le PPR, en France, doit être réalisé à l'échelle du 1/10 000 ou 1/5 000 dans les zones urbanisées ;
- *les données disponibles ou nécessaires* : cet aspect est souvent directement en relation avec l'extension de la zone d'étude, et par conséquent, avec la possibilité de collecter facilement les données pour une évaluation en fonction d'une analyse coûts/performance appropriée. Pour des zones larges (*large areas*), l'évaluation de l'aléa peut être basée sur l'analyse et l'interprétation des données disponibles, alors que pour une zone plus réduite (locale) l'évaluation de la stabilité et de l'aléa ne pourra être entreprise qu'à partir d'une investigation géomorphologique ou géotechnique spécifique incluant des procédures d'observation qui requièrent des systèmes de suivi de la sub-surface comme des inclinomètres et des piézomètres, etc.

Le choix de l'échelle de travail résulte finalement d'un compromis et affecte directement la sélection des approches d'analyse que je présenterai dans un prochain chapitre.

## 1.4. Conclusion

Les pays riches à technologies avancées de l'Europe de l'Ouest sont confrontés à de nombreux risques naturels, de fréquence et d'intensité relativement modérées par rapport à d'autres régions du globe. Chacune des sociétés concernées doit définir le seuil de risque qu'elle veut et peut accepter. Il existe de grandes différences entre les pays dans la manière de traiter et de vivre avec ces phénomènes naturels : pour l'indemnisation, adoption d'un principe de solidarité avec assurance obligatoire pour tous ou intervention au coup par coup, et pour la prévention, mise en œuvre d'une cartographie (réglementaire ou non). Les enjeux sont nombreux d'autant plus que les aléas majeurs touchent des populations de plus en plus nombreuses. Cette cartographie préventive doit permettre d'assurer la pérennité des personnes et des biens, et de prendre en compte le risque dans les projets d'aménagement pour éviter les erreurs du passé en laissant s'installer et se développer des activités dans des zones exposées. Cette prévention passe par une prévision spatiale et une prédiction temporelle des aléas.

Il existe donc une forte demande pour mener cette cartographie. En France où l'aléa mouvements de terrain est bien représenté, plusieurs milliers de PPR sont à réaliser dans les prochaines années. Les besoins d'expertises et de recherches scientifiques sont réels : des progrès scientifiques doivent encore être accomplis pour surmonter les nombreux obstacles et définir correctement l'aléa. Ces difficultés sont liées à la nature discontinue dans le temps et l'espace des mouvements de terrain, à la difficulté d'identifier les causes, les interactions et les relations de cause à effet, et au manque de données historiques fiables et complètes sur ces processus géomorphologiques. Selon le principe de l'actualisme, un événement du passé a toute les chances de se reproduire, ce qui permet de proposer des modèles réalistes de fonctionnement du milieu. D'ailleurs, ce dernier aspect distingue les mouvements de terrain des autres aléas comme les inondations ou les tremblements de terre pour lesquels il existe généralement des banques de données bien informées sur l'intensité et la fréquence des événements du passé.

Selon les avis convergents des différents auteurs, la carte d'aléa idéale supposerait de fournir des informations sur la distribution spatiale et temporelle, le type, le volume, la vitesse, la distance parcourue et les limites d'extension latérales et amont du mouvement de terrain prédit dans une certaine zone et pour une période de retour donnée. Cependant, à cause des difficultés données ci-dessus, les exemples de ce type de carte sont extrêmement rare dans la littérature. L'évaluation de l'aléa demande de comprendre ou d'évaluer un certain nombre d'incertitudes sur les différents paramètres ou facteurs. Le problème réside souvent dans la difficulté de quantifier les différents facteurs en jeu. Il est ainsi souvent difficile de bien évaluer un niveau d'aléa précis. En conséquence, plutôt que l'aléa, c'est fréquemment seulement la *susceptibilité* qui est évaluée.

C'est dans ce domaine de la définition de l'aléa que je positionne mes recherches. A mon avis, ces progrès ne peuvent être accomplis que grâce à la collecte et à la comparaison de données historiques, mais aussi et surtout grâce à l'analyse de données acquises sur des échelles réduites, de temps et d'espace. Mon objectif est de combiner tous les efforts possibles pour développer des banques de données bien informées et correctement illustrées basées sur l'équipement de sites de recherches de manière à estimer ou au mieux quantifier le poids respectif des différents facteurs d'instabilité.

Mes recherches sont menées sur l'aléa, je ne m'intéresserai à la vulnérabilité que dans les perspectives futures au moment d'analyser et d'estimer le risque. Cela sera permis grâce au programme de recherches européen *ALARM (Assessment of Landslide Risk and Mitigation in Mountain Areas)* qui a débuté en décembre 2001 pour trois années autour d'un travail en pluridisciplinarité avec des économistes et des géographes humains.

# Chapitre 2 : Classification des mouvements de terrain : variété et activités

## 2.1. Introduction

Les formes et l'ampleur des mouvements de terrain sont très diverses en raison de la multiplicité des mécanismes d'initiation et d'évolution (érosion, dissolution, déformation et rupture sous charge statique ou dynamique, etc.) liés à la topographie (pente du versant, dénivelée, etc.), à la lithologie (caractéristiques physiques et mécaniques et la sensibilité des matériaux -solide, plastique, visqueux, liquide-), à la structure géologique (pendage, fracturation, superposition des couches, etc.), aux nappes aquifères, à la teneur en eau, etc. Les mouvements de terrain sont liés à un déplacement gravitaire de masses de terrain déstabilisées sous l'effet de sollicitations naturelles (fonte de neige, pluviométrie anormalement forte, secousses sismiques, diminution de butée par érosion de la mer, etc.) ou anthropiques (terrassement, vibration, déboisement, exploitation de matériaux ou de nappes aquifères, etc.).

La figure 2.1 indique comment peuvent se répartir les différents phénomènes en fonction de la proportion relative entre les matériaux solides et l'eau. Elle montre également les transitions entre les différents domaines de la mécanique des roches, des sols et des fluides et l'hydraulique torrentielle.

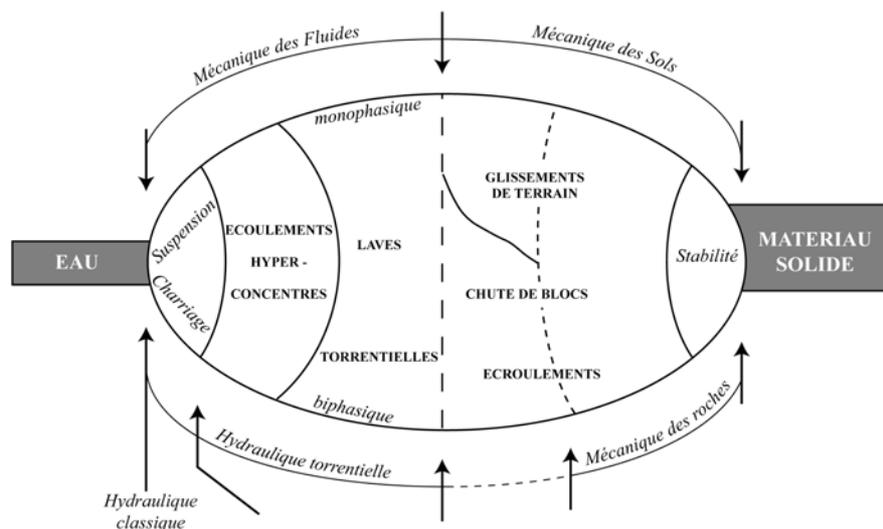


Figure 2.1 : Répartition des phénomènes hydro-gravitaires et domaines de comportement (in Meunier, 1991).

Mais l'eau intervient de plusieurs manières. Elle agit d'une part dans le changement d'état ou de consistance des matériaux (passage d'un état solide à un état plastique, puis liquide). Elle agit d'autre part, et surtout, en relation avec les nappes phréatiques par la poussée d'Archimède (loi de Terzaghi) qui déjauge (allège) les terrains (Terzaghi, 1950). La conséquence sur les versants est une diminution des forces de frottement le long des surfaces de rupture qui favorise les déplacements. Enfin, l'eau intervient comme vecteur dans le transport des matériaux (partie gauche du schéma ci-dessus).

Dans ce chapitre, je présenterai et discuterai les principes de classification des différents mouvements de terrain dont les termes ont déjà été largement utilisés dans le 1<sup>er</sup> chapitre lors de la présentation de leur distribution. Il me semble très important de présenter les différents termes, paramètres et principes proposés pour décrire et qualifier un mouvement de terrain. Cela m'apparaît d'autant plus nécessaire que l'on trouve encore trop souvent des abus de langage ou des qualifications erronées et que les fondements de ces descriptions et classifications sont en langue anglo-saxonne et n'ont pas toujours de traduction française satisfaisante.

Puis, je détaillerai les différents types d'activité des mouvements pour montrer le caractère fondamental d'une qualification correcte de l'activité, c'est à dire des rythmes d'évolution au cours du temps, pour envisager une bonne prévision des aléas. Cela permettra de poser le problème des échelles spatio-temporelles d'études à adapter selon les différents types de mouvements de terrain et mettre en évidence quels sont les préoccupations et besoins, à la fois pour l'analyse des processus ou bien pour la cartographie des aléas à des échelles de l'ordre du 1/10 000. Ainsi, mon apport personnel et l'originalité de ma démarche dans la discipline pourra se justifier, tout en montrant ce que le géomorphologue peut apporter à la résolution ou au moins à une meilleure compréhension de ces différents problèmes. Cela permettra aussi et surtout de justifier le choix des échelles spatio-temporelles d'analyse retenues dans mes recherches.

## **2.2. Classifications des mouvements de terrain**

Même si, mes recherches portent sur les mouvements de versants (*Landslides*), à composante latérale, pour être complet je voudrais tout d'abord rappeler l'existence des mouvements à composante verticale, qui se produisent à la surface de certains plateaux. Tels les *affaissements et les effondrements*, au-dessus de cavités naturelles ou anthropiques (*Subsidence*) ou les *retrait-gonflement* de formations argileuses (*Shrinking-swelling*) (Flageollet, 1988) ou bien encore *les tassements de formations compressibles* (*Sinking*) (Maquaire, à paraître). Comme le souligne Flageollet (1988), l'ensemble de ces mouvements de terrain se retrouve dans l'expression « *Ground failures* » qui apparaît comme le meilleur équivalent anglo-saxon.

Bien évidemment, si chaque mouvement de terrain est « unique » en liaison avec les conditions morpho-structurales locales, on cherchera à le décrire et à le nommer le plus précisément possible en jouant sur le vocabulaire et les possibilités d'association de mots. En effet, sur le terrain, sur la base de ce qui peut être utilement et facilement observé, il faut faire en sorte que ces observations puissent être succinctement décrites sans ambiguïté. L'essentiel est de pouvoir utiliser les mots « justes » pour être compris du plus grand nombre.

La première classification proposée par Varnes en 1978 pour les mouvements de versants est largement adoptée, avec parfois un certain nombre de modifications, compléments ou nuances. La littérature technique décrivant les mouvements de terrain a considérablement augmenté depuis cette date en particulier grâce aux actes des « *International Symposium on Landslides* » qui se déroulent tous les quatre ans : New Delhi, Inde (Swaminathan, 1980) ; Toronto, Canada (Canadian Geotechnical Society, 1984) ; Lausanne, Suisse (Bonnard, 1988) ; Christchurch, Nouvelle-Zélande (Bell, 1992) ; Trondheim, Norvège (Senneset, 1996) ; Cardiff, Pays de Galles, (Bromhead *et al.*, 2000). Pour être plus complet, citons quelques autres articles ou ouvrages décrivant les mouvements de terrain : Almeida-Teixeira *et al.* (1991), Brunnsden et Prior (1984), Casale et Margottini (1999), Costa et Wieczorek (1987), Crozier (1986), Delahaye *et al.* (2002), Dikau *et al.* (1996a), Flageollet (1988, 1995, 1999), Keaton et Degraaf (1996), Schrott et Pasuto (1999), Soldati (1996), Matthews *et al.* (1997), Zaruba et Mencil (1982), etc.

Par la suite, je m'appuierai d'une part sur l'ouvrage collectif de Dikau *et al.* (1996a) qui reprend les propositions de classifications données dans le cadre du projet « *The Temporal Occurrence and Forecasting of Landslides in the European Community* » du programme de recherches européen *Epoch* (Casale *et al.*, 1994), et d'autre part sur les articles de Cruden et Varnes (1996) et de Hungr *et al.* (2001) pour les écoulements.

Comme l'avait proposé Varnes (1978), la plupart des classifications reposent sur l'association de plusieurs informations : *types de mouvement* et *type de matériel* auxquels s'ajoutent des informations sur *l'activité* et la *vitesse* des déplacements (Varnes, 1984 ; WP/WLI, 1990, 1991, 1993 a et b).

### **2.2.1. Types de mouvement (mécanismes)**

Cinq *types de mouvement* sont distingués (chute, basculement, glissement, extension latérale, écoulement / *fall, topple, slide, spread, flow*). Ces cinq types de mouvements peuvent parfois se combiner ou se succéder pour former un 6<sup>ème</sup> type : les mouvements dit « complexes et composites » qui présentent des formes et des matériaux plus ou moins évolués dans l'espace et le temps.

Le type de mouvement est souvent suivi du **type de matériel** (roche, débris (prédominance d'éléments grossiers), sol (prédominance d'éléments fins) / *rock, debris, earth*). Pour la roche, cela correspond simplement au faciès du matériel en place intact avant le déclenchement du mouvement (par exemple une roche calcaire, gréseuse, etc.). Les débris contiennent une grande proportion d'éléments grossiers. 20 à 80 % des particules sont supérieures à 2 mm tandis que dans les sols (au sens non pédologique) 80 % ou plus des particules sont inférieures à 2 mm, c'est à dire la limite de la taille des sables.

Les terminologies et nomenclatures proposées pour décrire les différentes formes particulières, géométries et dimensions d'un mouvement de terrain sont détaillées dans les ouvrages cités précédemment et dans celui de Flageollet (1988). La richesse de vocabulaire de la langue anglaise avec les nuances apportées, qui si elles sont souvent justifiées pour la justesse de la description du phénomène, ne facilitent pas toujours la comparaison avec des auteurs d'autres langues.

L'ouvrage collectif de Dikau *et al.* (1996a) propose une classification basée sur les mécanismes de rupture et d'évolution et une description très détaillée et très illustrée de ces six grands types de mouvements de versants. Il donne également les sous-types en fonction de la nature des formations concernées, de leurs épaisseurs respectives, de l'ampleur du phénomène, etc. Il offre également l'avantage de traduire aussi les termes utilisés dans plusieurs langues comme l'avait également proposé Flageollet en 1988. Pour chacun des six types, les termes utilisés accompagnés de leurs équivalents (*alternative terms*) les plus couramment usités en anglais et leur traduction proposée en français sont donnés par la tableau 2.1. La plupart des types de mouvements est illustré par la figure 2.7 et par les photographies ci-après. Le tableau 2.1 a été établi à partir de la classification proposée par Dikau *et al.* (1996a) à laquelle j'ai apporté les modifications ou précisions suivantes :

- Pour le type 3b, glissement translationnel ou glissement par translation, le sous-type « glissement de bloc » ne faisait pas apparaître « glissement banc sur banc » qui correspond à *rock block slide*. Dans les massifs rocheux stratifiés, ce type de glissement est pourtant très fréquent et sa terminologie « banc sur banc » correspond bien au processus de rupture guidé par la structure (joints de stratification, fractures, etc.).

- Pour le type 4, la traduction « extension latérale » pour « *lateral spreading* » ne me semblait pas très heureuse, je lui préfère le terme « déplacement latéral » proposé par Flageollet (1988) qui traduit bien un mécanisme de déplacement comme pour les autres types.

- Pour le type 6, j'ai préféré regrouper les mouvements complexes et composites. En effet, sur la base des définitions données plus haut, pour les glissements-coulées, dans la mesure où il s'agit d'un mot composé qui traduit bien la succession temporelle et spatiale des deux phénomènes : le glissement suivi de la coulée. De plus, il est préférable de distinguer deux sous types de « glissement-coulée » :

- les « *flow slide* » qui sont des mouvements caractérisés par des vitesses de déplacement élevées et qui en font des phénomènes destructeurs lorsqu'ils se produisent sur des versants anthropisés, comme à d'Aberfan, au Pays de Galles, en octobre 1966, où 144 personnes ont péri (Flageollet, 1988) ;
- les « *earthflow* » qui sont des glissements évoluant en coulée qui progresse assez lentement (cf. ci-dessous).

Sur la base de l'article de Hungr *et al.* (1996), je voudrais maintenant décrire plus en détail les principales caractéristiques des principaux phénomènes sur lesquels porteront mes recherches. C'est-à-dire les glissements-coulées (*earthflow*), les coulées de débris (*debris avalanche*) et des laves torrentielles (*debris-flow*). Ils peuvent se retrouver en un même lieu, les deux derniers pouvant se produire à partir de tout ou partie du volume du premier.

Ces mouvements se différencient par la morphologie des dépôts, la granulométrie, les paramètres mécaniques et rhéologiques, et les vitesses d'écoulement. Les mouvements sont lents avec des déplacements courts pour les glissements évoluant en coulées alors qu'ils sont rapides avec des déplacements longs pour les coulées de débris et les laves torrentielles. Ils se déclenchent tous après une phase de fragmentation et de perte de cohésion des matériaux.

| N° | FRANÇAIS   | English  |
|----|--|--|
| 1  | <b>Chute</b> (de bloc, de pierre, de débris, de sol)<br>Écroulement rocheux  | <b>Fall</b> (stone, pebble, boulder, debris, soil)   |
| 2  | <b>Basculement</b> (de roche, de débris, de sol)   | <b>Topple</b> (rock, soil, tilting)  |
| 3a | <b>Glissement rotationnel :</b><br><ul style="list-style-type: none"> <li>- Glissement simple (rotationnel),</li> <li>- Glissements emboîtés,</li> <li>- Glissements successifs</li> </ul>   | <b>Slide (rotational):</b><br><ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>Single slide:</b> slump (popular), rotational slip, rotational slide,</li> <li>- <b>Multiple slide:</b> multiple rotational landslide, multiple slump,</li> <li>- <b>Successive slide:</b> successive rotational landslide, successive slumping.</li> </ul>  |
|    | <b>Glissement translationnel :</b><br><ul style="list-style-type: none"> <li>- Glissement de bloc, <i>glissement banc sur banc</i></li> <li>- Glissement de sol,</li> <li>- Glissement rocheux,</li> <li>- Glissement de débris,</li> <li>- Glissement évoluant en coulée boueuse (foirage)</li> </ul> | <b>Slide (translational):</b><br><ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>Block slide:</b> planar rock slide (rock block slide), slab slide (for soil/earth),</li> <li>- <b>Slab slide:</b> debris block slide, soil block slide, earth block slide, sheet slide, flake slide,</li> <li>- <b>Rock slide,</b></li> <li>- <b>Debris slide:</b> shallow translational slides, sheet slides, soil slips,</li> <li>- <b>Mudslide:</b></li> </ul> |
| 4  | <b>Déplacement latéral :</b><br><ul style="list-style-type: none"> <li>- Déplacement latéral de roches,</li> <li>- Déplacement latéral de sol</li> </ul>   | <b>Lateral spreading:</b><br><ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>Rock spreading:</b> lateral spreading, gravitational spreading, gravity faulting, block-type slope movement, cambering and valley bulging,</li> <li>- <b>Soil (Debris) spreading:</b> sudden spreading failure, lateral soil spreading, quick clay sliding, bottle-necked flow (Canadian usage), quick clay flow, soil liquefaction sliding.</li> </ul>               |
| 5  | <b>Écoulement :</b><br><ul style="list-style-type: none"> <li>- Déformation lente de versant rocheux, fauchage,</li> <li>- Coulées boueuses, coulées de sable</li> <li>- <i>Laves torrentielles</i></li> <li>- <i>Coulées de débris</i></li> </ul>   | <b>Flow:</b><br><ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>Rock flow (sacking):</b> sagging, rock creep, deep seated gravitational creep,</li> <li>- <b>Soil flow (mudflow):</b> mudflow, alpine mudflow, sandflow.</li> <li>- <b>Debris flow:</b> mudflow (old usage), lahar (volcanic mudflow),</li> <li>- <b>Debris avalanche</b></li> </ul>   |
| 6  | <b>Phénomène complexe et composite :</b><br><ul style="list-style-type: none"> <li>- Eboulement, écroulement de grande ampleur (d'extension catastrophique),</li> <li>- Glissement-coulée très rapide</li> <li>- <i>Glissement-coulée lent</i></li> </ul>  | <b>Complex and compound:</b><br><ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>Rock avalanche:</b> rockfall avalanche, rock-slide avalanche, rockfall-debris avalanche,</li> <li>- Flow slide</li> <li>- <i>Earthflow</i></li> </ul>  |

Tableau 2.1 : Classification des mouvements de versants (adaptée de Dikau et al., 1996a).

Les coulées (des glissements-coulées) acquièrent un comportement essentiellement plastique, une gamme de vitesse large (1–40 cm.j<sup>-1</sup>) et variable dans le temps (Malet et al., à paraître). L'écoulement, chenalisé, fossilise une topographie complexe, en épousant les formes du relief et en créant des lobes d'accumulations, dont l'épaisseur est variable. Le mouvement peut être maintenu sur de longues distances et de longues périodes par des déformations plastiques intermittentes en

relation avec les fluctuations des pressions interstitielles. Des accélérations soudaines de la partie supérieure des coulées sont fréquentes au-delà d'un certain seuil de pression interstitielle.

*Les coulées de débris* sont des écoulements superficiels peu épais sur un versant, rapides à très rapides ( $1,8 \text{ m.h}^{-1}$  à  $3 \text{ m.min}^{-1}$ ), partiellement ou totalement saturés sans confinement dans un chenal établi.

*Les laves torrentielles*, par rapport aux coulées de débris, se localisent dans des chenaux torrentiels et sont des écoulements très rapides à extrêmement rapides ( $1,8 \text{ m.h}^{-1}$  à  $5 \text{ m.s}^{-1}$ ). Malgré des vitesses d'écoulement et des concentrations volumiques différentes, les coulées de débris et les laves torrentielles présentent de nombreuses similitudes, notamment dans leur mode de déclenchement (initiation). Une classification rhéologique de ces écoulements naturels saturés sur forte pente est proposée par Coussot (1993). La description précise de ces phénomènes sera trouvée entre autre dans les publications ci-après : Ancey, 2001 ; Coussot et Piau, 1993 ; Coussot, 1994 ; Coussot, 1996 ; Coussot et Meunier, 1996 ; etc. C'est bien évidemment ces termes qui seront utilisés par la suite.



*Photo 2.1 : Glissement-coulée de la Valette dans le bassin de Barcelonnette (France), déclenché en 1982 (Cliché : Malet, 2000).*



*Photo 2.2 : Glissement-coulée de Poche dans le bassin de Barcelonnette (France) déclenché au cours du 19<sup>ème</sup> siècle. (Cliché : Gross, 1998)*



*Photo 2.3 : Eroulement de surplomb d'une corniche calcaire dans le Bessin, Calvados, France (1989).*



*Photo 2.4 : Glissement de blocs (Block slide) près d'Alba Piemonte, Italie (Cliché : L. Schrott, 1995).*



*Photo 2.5 : Eroulement rocheux d'un volume de 5 000 m<sup>3</sup> sur une voie ferrée près de Kreuzberg, Rheinland-Pfalz, Allemagne (Cliché : E. Krauter).*



*Photo 2.6 : Basculement corniche calcaire lié au fluage des marnes sous-jacentes, falaises du Bessin, Calvados (1983).*



*Photo 2.7 : Basculement d'un campanile lié au tassement par consolidation de terrains compressibles, Bologne, Italie (1997).*



*Photo 2.8 : Lézardes d'un pavillon liées au retrait du sol argileux en période de sécheresse, Orléans, France (1993).*

## 2.2.2. Types d'activité

Les aspects généraux de l'activité d'un mouvement de versants devraient être étudiés et décrits durant la reconnaissance initiale des déplacements du mouvement de terrain et avant que soit entrepris un examen détaillé des matériaux mobilisés. Les termes relatifs à l'âge et à l'état d'activité du mouvement de terrain ont été définis par Varnes (1978) et quelques-uns de ces termes définissant les séquences du mouvement ont été regroupés sous **trois aspects** principaux :

- **l'état d'activité** (*state of activity*) dans lequel se trouve le mouvement de terrain ;
- **la répartition de l'activité** (*distribution of activity*) qui décrit la direction et le sens du déplacement ;
- **la morphologie** (*style of activity*) qui précise toute éventuelle combinaison ou succession de mouvement élémentaire dans la zone instable.

| Activités  |  |                                |
|--|--|--------------------------------|
| Etat   | Répartition                                  | Morphologie                    |
| Actif ( <i>active</i> )                            | Progressif ( <i>advancing</i> )              | Simple ( <i>single</i> )       |
| En suspens ( <i>suspended</i> )                    | Rétrogressif ( <i>retrogressive</i> )        | Complexe ( <i>complex</i> )    |
| Réactivé ( <i>reactivated</i> )                    | Bidirectionnel ( <i>enlarging</i> )          | Composite ( <i>composite</i> ) |
| Inactif ( <i>inactive</i> ) :                      | Régressif ( <i>diminishing</i> )             | Emboîté ( <i>successive</i> )  |
| - Latent ( <i>dormant</i> )                        | Limité ( <i>confined</i> )                   | Multiple ( <i>multiple</i> )   |
| - Naturellement stabilisé ( <i>abandoned</i> )     | En mouvement ( <i>moving</i> )               |                                |
| - Artificiellement stabilisé ( <i>stabilised</i> ) | En élargissement latéral ( <i>Widening</i> ) |                                |
| - Ancien, fossile ( <i>relict</i> )                |  |                                |

Tableau 2.2 : Définition de l'activité d'un mouvement de versant (in Cruden et Varnes, 1996 ; Dikau et al., 1996)

Il est très important de bien décrire cette activité dans l'étude des mouvements de versants, pour définir les rythmes, les potentialités d'évolution, etc. en particulier dans l'objectif d'une prévision spatiale et temporelle de ces phénomènes.

### 2.2.2.1. L'état d'activité (*state of activity*)

Les états d'évolution se traduisent par des formes topographiques ou par une morphologie particulières qu'il est possible de retrouver et de cartographier sur le terrain. *Huit états* différents d'activité ont été retenus (Figure 2.2).

Ces différents états d'activité peuvent être également illustrés sur un graphe donnant les déplacements selon le temps (Figure 2.3) en distinguant successivement les états : actif, en suspens, latent avant une réactivation, puis à nouveau les états en suspens, etc.

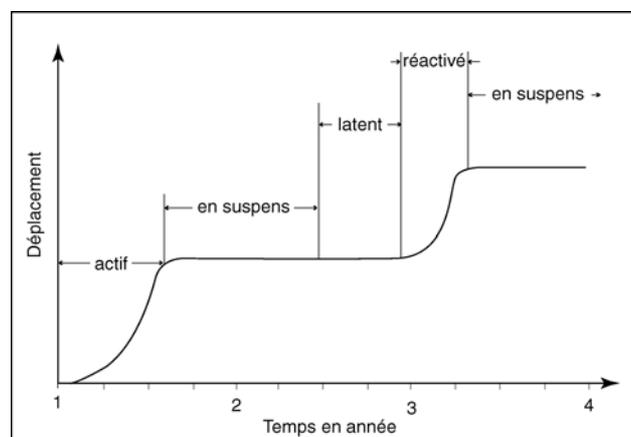


Figure 2.2 : Déplacement au cours du temps d'un mouvement de terrain pour différents stades d'activité (in Cruden et Varnes, 1996)

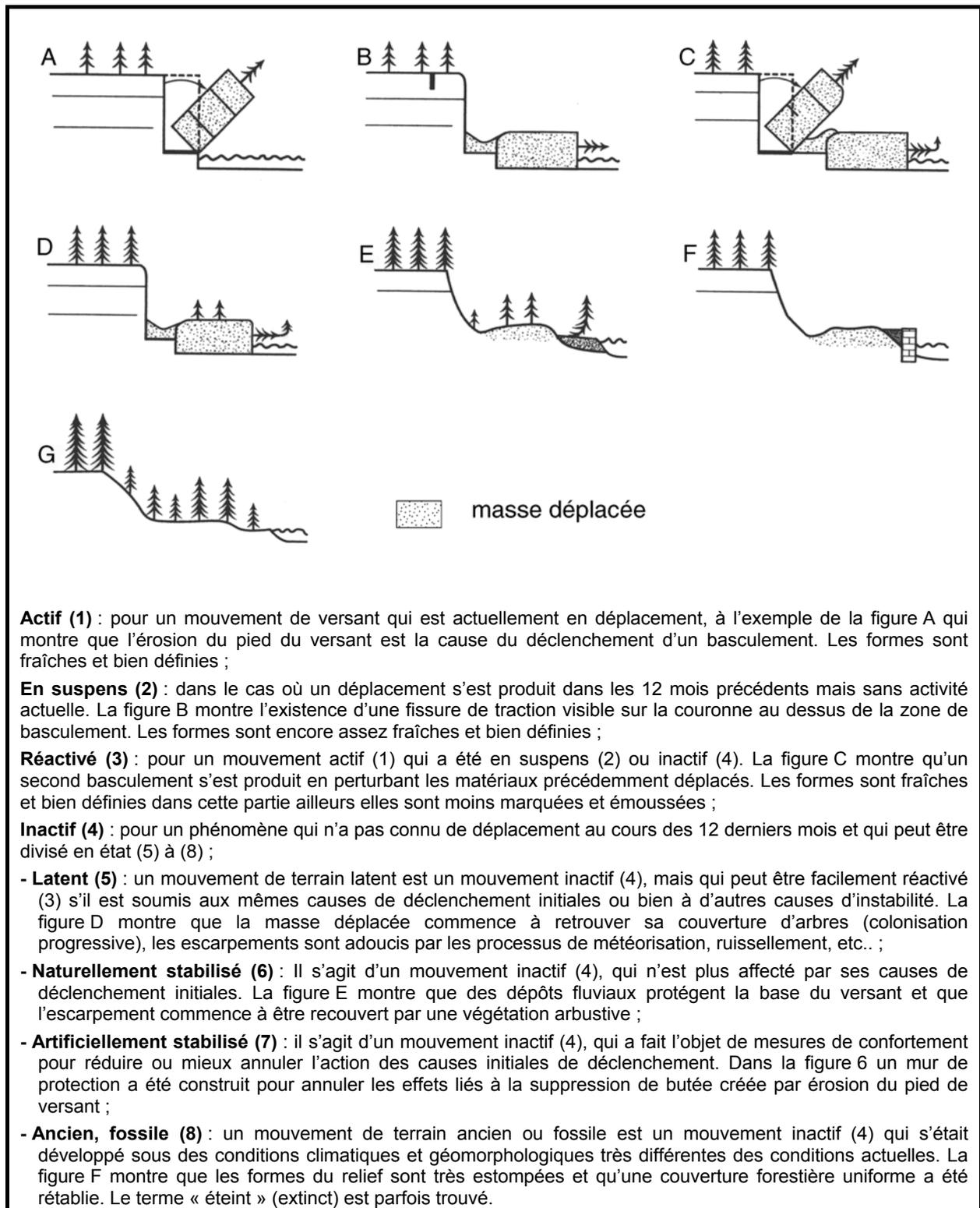


Figure 2.3 : Les différents stades d'activité des mouvements de versants (in Dikau et al., 1996a)

### 2.2.2.2. Répartition de l'activité (distribution of activity)

Sept cas différents de répartition ont été retenus (Figure 2.4).

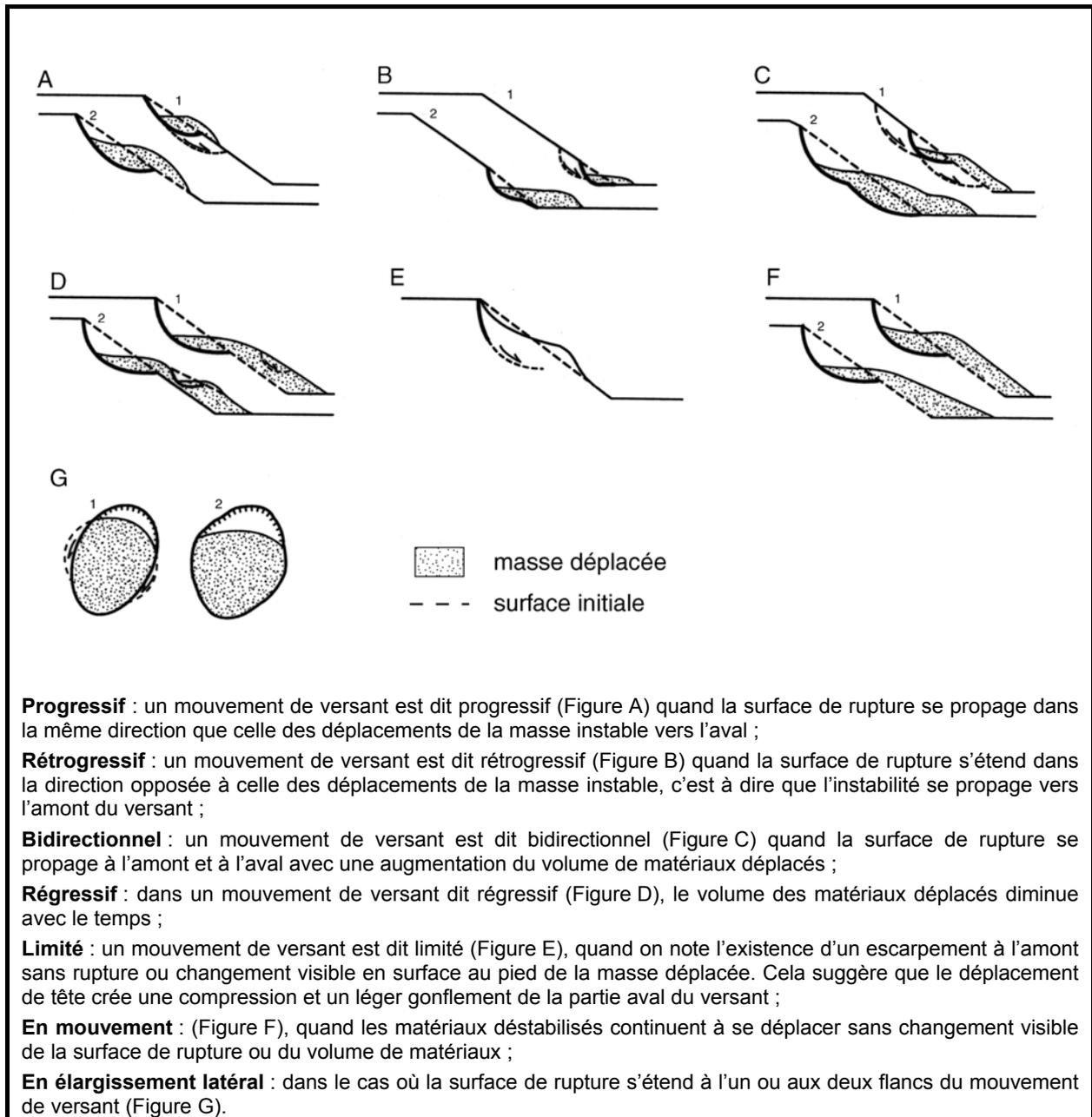


Figure 2.4 : Répartition de l'activité d'un mouvement de versant (in Dikau et al., 1996a).

Comme le soulignent Cruden et Varnes (1996), plusieurs types de mouvements de versants peuvent montrer une variation de leur comportement au cours du temps. Le mouvement peut stopper en partie pour les glissements rotationnels ou les basculements après un déplacement substantiel qui a pour conséquence une réduction des forces de gravité de la masse déplacée.

Similairement, les déformations d'une masse rocheuse peuvent dilater les fissures présentes dans cette masse et entraîner une diminution des pressions interstitielles à l'intérieur de ces fissures et en conséquence réduire la vitesse des déplacements. Cependant, il peut être prématuré de conclure que les matériaux déplacés sont « en voie de stabilisation » parce que le volume déplacé décroît avec le temps. Ces mêmes auteurs rappellent également que l'activité des glissements rotationnels causés par érosion du pied de versant est souvent *cyclique*.

### 2.2.2.3. Morphologie (style of activity)

La morphologie des mouvements de versants peut être définie par cinq termes établis par Varnes (1978). La figure 2.5 montre des profils en travers de mouvements de versant exposés à plusieurs types d'activité.

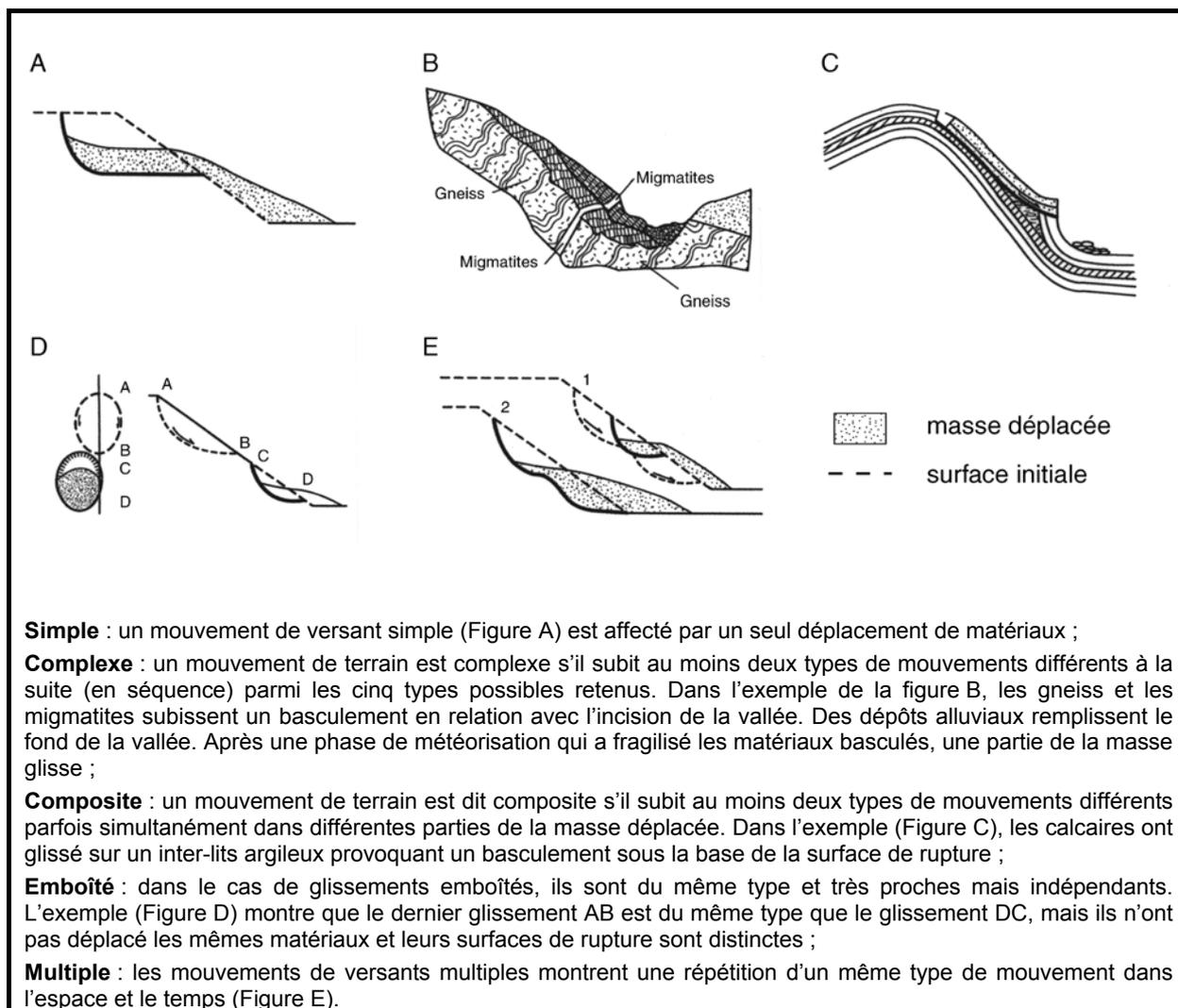


Figure 2.5 : Morphologie d'un mouvement de versant (in Dikau et al., 1996a).

### 2.2.3. Vitesse des déplacements

Les vitesses de déplacement peuvent être estimées ou mesurées de différentes manières et plus ou moins précisément. A partir des classes de vitesses définies par Varnes (1978), les bornes de ces classes ont été redéfinies en 1994. Pour chacune de ces sept classes de vitesse, des types de réaction et des impacts significatifs en terme de vies humaines ou de dégâts aux constructions ont été proposés (Figure 2.6).

| Classe | Description                                   | Vitesse                 |
|--------|---|-------------------------|
| 1      | Extrêmement lente ( <i>extremely slow</i> )   | moins de 16 mm/an       |
| 2      | Très lente ( <i>very slow</i> )               | de 1,6 m/an à 16 mm/an  |
| 3      | Lente ( <i>slow</i> )                         | de 13 m/mois à 1,6 m/an |
| 4      | Modérée ( <i>moderate</i> )                   | de 1,8 m/h à 13 m/mois  |
| 5      | Rapide ( <i>rapid</i> )                       | de 3 m/min à 1,8 m/h    |
| 6      | Très rapide ( <i>very rapid</i> )             | de 5 m/s à 3 m/min      |
| 7      | Extrêmement rapide ( <i>extremely rapid</i> ) | plus de 5 m/sec         |

**Classe 1** : les mouvements sont imperceptibles sans recours à des instruments de mesures très précis, pas de dommages aux structures construites avec précautions ;

**Classe 2** : quelques structures permanentes sont sans dommages ou si elles sont fissurées elles peuvent être réparées ;

**Classe 3** : routes et structures insensibles peuvent être conservées avec de fréquents et lourds travaux de maintenance, si les mouvements totaux ne sont pas trop grands particulièrement pendant la phase d'accélération et les mouvements différentiels sur les marges du glissement sont distribués dans une large zone ;

**Classe 4** : les structures résistantes peuvent être maintenues en état si elles sont localisées à une courte distance du pied de la masse déplacée ; les structures localisées sur la masse déplacée sont extrêmement endommagées ;

**Classe 5** : la fuite et l'évacuation sont possibles ; structures, constructions et aménagements sont détruits par les masses déplacées ;

**Classe 6** : quelques personnes sont tuées en raison des trop grandes vitesses qui ne permettent pas à toutes les personnes de s'échapper ; destruction majeure ;

**Classe 7** : catastrophe majeure ; les constructions exposées sont totalement détruites et de nombreuses personnes sont tuées par l'impact des matériaux déplacés ou par dislocation des masses déplacées.

Figure 2.6 : Définition de la vitesse d'un mouvement de versant et des types de réaction et des impacts significatifs en terme de vies humaines ou de dégâts aux constructions (in Cruden et Varnes, 1996)

## 2.2.4. Discussion

Après la présentation de ces différents critères de description et de classification des mouvements de versants, je voudrais maintenant en faire une analyse et apporter quelques commentaires et précisions principalement sur l'état d'activité des mouvements de terrain. Plusieurs points importants doivent être discutés et des informations complémentaires doivent être apportées pour qualifier correctement l'activité d'un mouvement de versants. Pour cela, je me baserai en particulier sur un article de Flageollet (1996).

Pour ce qui concerne la *répartition de l'activité*, je voudrais seulement préciser que les sept classes sont intéressantes mais que certaines ne sont pas toujours facilement utilisables et donc assez rarement utilisées dans les différentes descriptions lues dans les articles et ouvrages. Moi même, j'utilise très rarement les termes limité (*confined*) et en mouvement (*moving*) parce qu'il n'est pas évident de pouvoir les distinguer sans avoir recours à des mesures précises des déplacements.

Pour la morphologie (*style of activity*), je n'ai pas de commentaire particulier sauf à dire que l'utilisation de cette terminologie est très importante à respecter pour bien décrire un mouvement de versant.

### a) signification différente des termes utilisés

Beaucoup d'auteurs utilisent les mêmes termes mais sous des sens parfois différents. Les termes comme « actif » ou « latent » peuvent avoir des significations très différentes selon les auteurs et sont interprétés comme étroits ou larges, selon la durée d'activité ou d'inactivité. Dans la terminologie anglaise, le terme « latent » est appliqué pour les « vieux » mouvements de versant qui sont encore instable, et selon Varnes (1978, 1984), un versant est actif s'il y a eu au moins un mouvement au cours d'un cycle saisonnier. D'autres auteurs basent leur distinction entre latent et actif sur l'âge

respectif des mouvements. Selon Yanai et Usui (1987) au Japon, ils sont considérés comme actifs s'ils se produisent à plusieurs reprises dans la même zone dans les 300 dernières années, et ils sont considérés comme latents s'il n'y a pas eu d'activité pendant mille ans. Dans la classification de Crozier (1984), le terme latent est utilisé en fonction de la période de dernière activité (*period of last activity*) pour quatre périodes distinctes qui remontent au-delà de 10 000 ans pour les mouvements latents vieux (*dormant-old landslides*).

Ces exemples posent le problème de la période de référence pour faire la distinction entre les différents mouvements. Ils incitent finalement à préciser cette *période de référence* pendant laquelle le versant est considéré comme actif ou latent : par exemple, le mouvement de versant est considéré comme latent au cours des x dernières ou x prochaines années ou bien sur la période de référence de x années. Si un mouvement se produit durant la période d'observation retenue, il est considéré comme actif. Toutes les zones sans mouvement durant la période sont considérées comme inactives. *Quelle est la durée optimale de cette période de référence ?* Cette durée dépendra du type de phénomène et des moyens mis à disposition pour qualifier le phénomène.

#### *b) rythme d'évolution*

Pour préciser correctement le type d'activité, il faut y joindre une information complémentaire sur le rythme d'évolution des déplacements au cours du temps et sur la fréquence (période de retour). Généralement, deux sous-types d'activités sont distingués pour chacun des deux types actif et latent (Bisci et Dramis, 1993 ; Flageollet, 1996 ; Panizza *et al.*, 1996) : continu, intermittent, épisodique et singulier.

- mouvement actif continu (*active continuously*), dans le cas de mouvements qui se produisent à des fréquences pluri-journalières ;
- mouvement actif par intermittence (*intermittently active*) dans le cas de mouvements saisonniers ou non pour une fréquence infra-annuelle ;
- mouvement latent épisodique (*dormant episodic*) dans le cas d'une évolution irrégulière ;
- mouvement latent singulier (*dormant singular*) en l'absence d'information complémentaire.

Parfois, pour les mouvements actifs, des expressions comme « *actif* » ou « *rarement actif* » (*infrequently active*) sont parfois trouvées sur certaines cartes ou documents à la place des expressions « *actif continu* » et « *actif intermittent* ». D'autres définissent les mouvements qui sont très actifs, fortement actifs, modérément actifs et rarement actifs (EPFL, 1985a).

*Pour ma part, je préférerais m'en tenir à deux types d'activité pour les mouvements latents sans forcément les accompagner d'une période de retour et utiliser les expressions « actif continu » et « actif intermittent ». Car cela pose le problème de la façon dont le mouvement est évalué, mesuré et enregistré et de la difficulté à réussir à collecter des informations pertinentes pour définir ces différentes classes.*

#### *c) déroulement au cours du temps*

Dans un objectif de prévention ou de prévision à court terme, il est important de rapidement savoir si un mouvement est sur le point de se déclencher ou de se réactiver, de manière temporaire ou bien durable.

La réponse est évidente pour les chutes de blocs, par exemple ; quand un bloc se détache soudainement de la paroi, il tombe instantanément et son immobilisation est soudaine plutôt que progressive. Mais c'est moins évident dans le cas de glissement par exemple. La phase de rupture généralisée et de glissement soudain est précédée, durant une plus ou moins longue période, par une *phase de déformations* du versant, plus ou moins localisées avec affaissements éventuels qui peuvent être mesurés et enregistrés durant une *phase de surveillance*.

*Le seul moyen de le savoir réside dans la mise en place d'un réseau de surveillance et de détection des indices précurseurs (fissuration, bruits sismiques, etc.) à une échelle locale et selon des pas de temps courts (horaires ou journaliers).*

De même, des glissements ou chutes de blocs ont parfois été plus actifs et plus fréquents à certaines périodes, juste après la dernière glaciation ou pendant la période du petit âge glaciaire, et ont diminué soit progressivement soit soudainement, selon la progressivité ou la soudaineté des changements des conditions climatiques, ou encore, avec les changements d'occupation du sol et d'activités humaines.

*Pour essayer de le savoir, la question doit être considérée à l'échelle au moins régionale et sur une longue période de temps (plusieurs centaines ou milliers d'années).*

#### d) moyens d'observation et de mesures

L'attribution d'un des types d'activité à un versant nécessite d'avoir en sa possession des éléments objectifs d'observation ou de mesures de déplacement, ou des informations issues d'archives ou du traitement de différents documents cartographiques ou photographiques, par exemple. Cela nécessitera pour certains cas la mise en place d'un réseau de surveillance (Chapitre 4).

Pour des mouvements « actuels » d'activité déclarée, les déplacements peuvent être mesurés selon des pas de temps adaptés et avec une précision suffisante selon les valeurs de déplacement attendues et significatives. Selon les pas de mesure, des vitesses moyennes de déplacement peuvent être calculées, pour chacun des différents états d'activité.

Et il pourra y avoir de très grandes différences dans la précision, pertinence et qualité de ces observations en fonction des méthodes et des moyens mis en œuvre qui peuvent aller de la *simple observation visuelle à la mise en œuvre d'une instrumentation très sophistiquée*. La qualité dans la réponse à la question dépendra donc directement des moyens financiers et humains engagés et du temps disponible pour mettre en œuvre ces observations.

Si ces observations sont simplement visuelles, en se basant sur les changements « récents » des formes caractéristiques du terrain et de la couverture végétale, les mouvements seront identifiés avec une certaine largeur ou vitesse approximative, ou bien des zones seront qualifiées de manière relative les unes par rapport aux autres. Si on s'appuie seulement sur des observations visuelles directes, le mouvement de versant pourrait apparaître *latent* ou même *actif par intermittence* (Bisci et Dramis, 1993). Cependant, si les observations sont basées sur des méthodes et instruments de mesure relativement sophistiqués, la précision de la mesure du déplacement peut montrer que ce n'est pas le cas et qu'en fait, il y a une activité continue qui consiste en une succession de phases d'accélération saisonnières suivies d'une décélération.

Pour des mouvements « anciens » d'activité non déclarée (latent, inactif), la date de déclenchement (calculée à partir du moment où les premiers désordres ont été enregistrés) peut être donnée de manière relative ou absolue. Des datations relatives sont données par l'analyse géomorphologique en observant les successions des formes et des formations qui se rapportent souvent à de très longues périodes de temps. Une datation absolue au C-14 sur un morceau de bois fossile retrouvé enfoui dans le matériau glissé peut indiquer quand le mouvement a débuté, mais pas nécessairement quand il s'est terminé (Flageollet, 1996). De toute manière, la méthode ou la technique avec lequel l'âge a été obtenu doit être précisée.

Il est donc important que les documents scientifiques ou les légendes des cartes précisent comment le mouvement a été évalué, qu'il soit simplement estimé ou actuellement mesuré (Flageollet, 1996).

*Ces constats montrent qu'il y a des besoins de recherche pour qualifier l'activité d'un mouvement de terrain, cela m'incite et m'encourage à développer une recherche qui permette d'apporter des éléments de réponse pertinents. Pour les mouvements « actifs », c'est d'abord les moyens de cartographier et d'analyser les indicateurs morphologiques et de mesurer les déplacements selon des échelles spatio-temporelles adaptées aux phénomènes présents ou attendus.*

#### e) synthèse

J'ai donné au fur et à mesure les commentaires qui incitent à orienter ma recherche vers une meilleure définition de l'état d'activité d'un mouvement, c'est à dire ses rythmes d'évolution temporelle.

Je n'y reviendrai pas ici. Je voudrais maintenant évoquer comment l'état d'activité peut être prise en compte dans les différentes cartographies (morphologiques, morphodynamiques, etc.). Pour des documents cartographiques à l'échelle du 1/10 000 par exemple l'état d'activité est très important à considérer pour la cartographie prévisionnelle et préventive, ou réglementaire comme celle des PPR. Mais souvent faute de moyens en temps et en argent, cet aspect sera rarement pris en compte, sauf dans le cas de documents élaborés à des échelles locales.

L'état d'activité peut être représenté à partir de la définition d'une période de retour calculée ou simplement estimée (Tableau 3). A Cortina d'Ampezzo (Italie), c'est à peu près sur ce même principe que Panizza et al. (1996) ont distingué la trentaine de mouvements de terrain identifiés : actif continu, actif intermittent, latent épisodique, latent singulier (*singular*), inactif.

| Période de retour | Activité                              | Age                                      |
|-------------------|---------------------------------------|--|
| < 1 jour          | actif continu                         |  |
| < 1 an            | actif intermittent                    | histoire récente                         |
| 1 à 10 ans        | latent épisodique fréquent            | histoire récente                         |
| 10 à 100 ans      | latent épisodique modérément fréquent | histoire récente                         |
| 100 à 1 000 ans   | latent épisodique peu fréquent        | histoire récente ou ancienne             |
| > 1 000 ans       | stabilisé / inactif                   | Holocène, Pléistocène ou Pré-Quaternaire |

Tableau 2.3 : Prise en compte de l'état d'activité dans la cartographie des mouvements de terrain (in Flageollet, 1996).

Dans le cas de cartes à des échelles régionales, ou si la période de retour est mal définie ou incertaine, la légende pourra être considérablement simplifiée en ne distinguant seulement qu'un état d'activité ou d'inactivité.

Le choix du découpage sera bien évidemment fonction de l'échelle de l'étude, des données disponibles et des moyens consentis. Pour l'heure, je retiens que l'analyse ne peut être menée qu'à partir de banques de données bien documentées qui demandent la mise en œuvre de moyens de surveillance.

## 2.2.5. Classification pour l'aléa et le risque

Dés que l'on s'intéresse à l'aléa ou au risque, il est préférable de considérer la vitesse de déplacement comme critère de classification. La vitesse des mouvements de terrain intervient directement dans l'appréciation du niveau de vulnérabilité. Elle augmente avec la vitesse car un mouvement extrêmement rapide, quelque soit son volume, entraîne un plus grand nombre de morts ou de dégâts qu'un mouvement lent. Cette vitesse de déplacement traduit donc bien, à mon avis, l'ampleur ou la gravité d'un phénomène et donc, indirectement le niveau d'aléa et de risque, car elle offre ou non la possibilité à l'homme de s'en échapper lorsque le phénomène se déclenche et se propage (Flageollet, 1988). C'est d'ailleurs selon ce critère que les mouvements de terrain sont distingués dans le guide « PPR mouvements de terrain » dont je suis l'un des co-auteurs (Collectif, 1999).

Ainsi, selon la vitesse de déplacement, deux ensembles peuvent être distingués (Figure 2.7). Les *mouvements lents*, pour lesquels la déformation est progressive 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. Les *mouvements rapides* peuvent comporter des accélérations brutales. Ils sont scindés en deux groupes, selon le mode de propagation des matériaux, en masse ou à l'état remanié.

Pour les *mouvements lents*, on peut distinguer :

- le tassement (*sinking*) par consolidation de terrains compressibles (vases, tourbes, ...),
- le retrait-gonflement (*shrinking-swelling*) de formations argileuses en fonction de la teneur en eau,
- la solifluxion (*creeping*) de matériaux plastiques sur faible pente,

- l'affaissement (*subsidence*), déformation lente en surface avec ou sans fractures due à l'évolution de cavités naturelles ou artificielles (carrières souterraines ou mines –fer, sel, charbon, etc.-), des dépressions circulaires ou ovales apparaissent en surface,
- les glissements rotationnels, translationnels, etc. (*rotationnal slide, translationnal slide, etc.*) qui correspondent au déplacement en masse, le long d'une surface de rupture circulaire, curviligne, plane ou complexe, de sols cohérents (marnes ou argiles).

Il faut tout de même préciser que certains glissements peuvent parfois connaître des accélérations brutales et être meurtriers comme à La Salle-en-Beaumont (Isère) en janvier 1994 où en pleine nuit un glissement a fait 4 victimes et a détruit plusieurs habitations.

Pour les *mouvements rapides et brutaux*, on peut distinguer deux sous-groupes, selon le mode de propagation des matériaux, *en masse* ou à *l'état remanié*.

Le premier groupe comprend :

- les effondrements (*brutal subsidence*) qui résultent de la rupture brutale de voûtes de cavités souterraines naturelles ou artificielles ;
- les chutes de pierres ou de blocs (*fall*) provenant de l'évolution mécanique de falaises ou d'escarpements rocheux très fracturés ;
- les éboulements et écroulements (*rockfall*) de pans de falaises ou d'escarpements rocheux selon des plans de discontinuité préexistants ;
- *certaines glissements rocheux*.

Le second groupe comprend :

- les laves torrentielles (*channelized debris-flow*) qui résultent du transport de matériaux en coulées visqueuses ou fluides dans le lit de torrents de montagne ;
- les coulées boueuses (*mudslide*), qui proviennent généralement de l'évolution du front des glissements. Leur mode de propagation est intermédiaire entre le déplacement en masse et le transport fluide ou visqueux ;

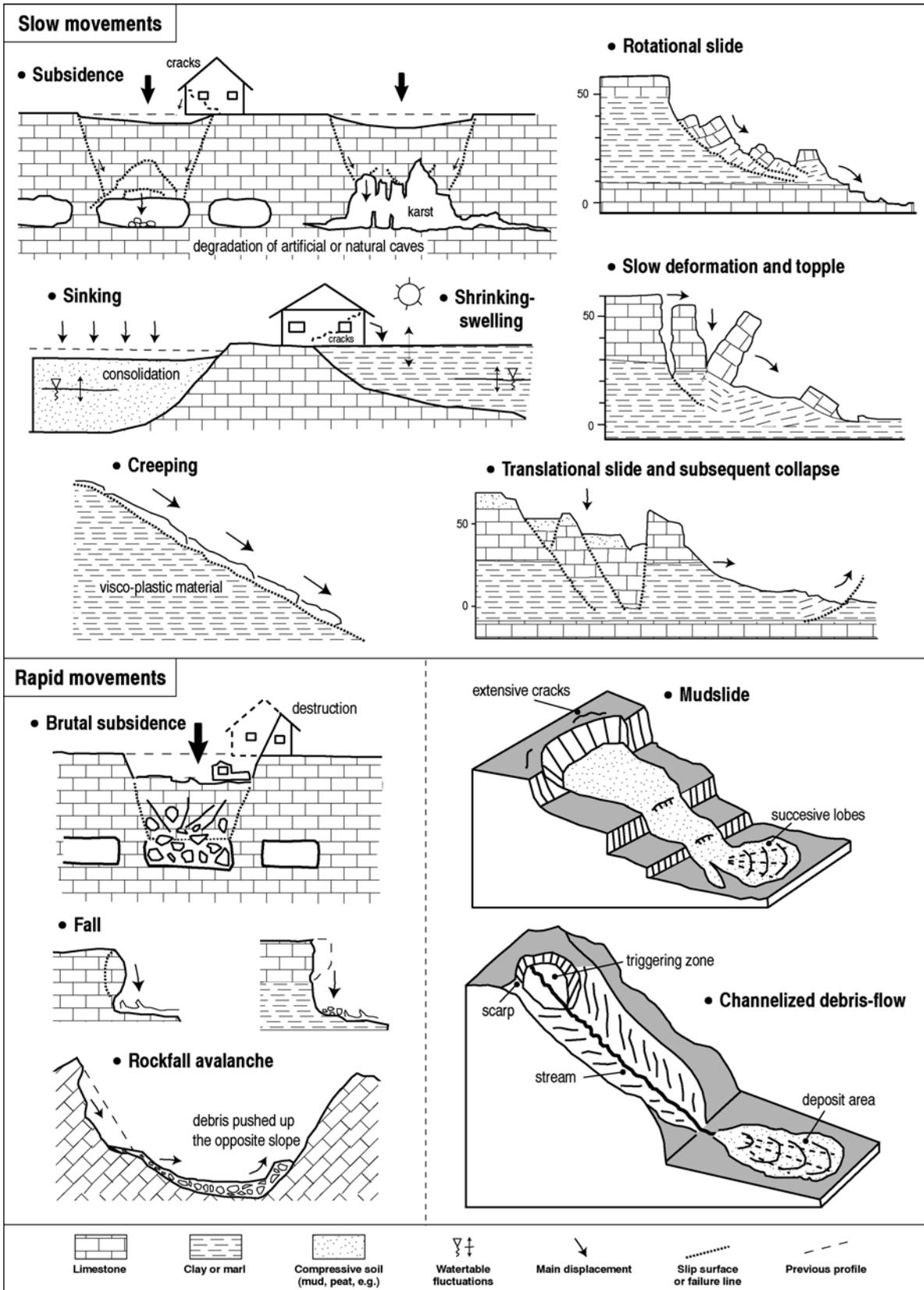


Figure 2.7 : Quelques types de mouvements de terrain (in Maquaire, à paraître).

## 2.3. Conclusion

Dans l'objectif de l'analyse des aléas et des risques, la grande diversité de mouvements de terrain peut être classée en fonction de leurs vitesses. Les *mouvements lents* peuvent s'accélérer et aboutir à une rupture brutale, après une phase de signes annonciateurs (fissures, déformations, affaissement, etc.) ; c'est le cas par exemple des glissements. Par leur amplitude et par leur soudaineté, les *mouvements rapides* peuvent être meurtriers. A noter que la localisation et la composante du mouvement (verticale ou latérale) peuvent être prises en compte pour différencier ces divers phénomènes. Il peut s'agir de phénomènes ponctuels, limités dans le temps et dans l'espace, mais aussi de mouvements de grande ampleur. Ainsi, certains se produisent sur place, à la verticale d'un point ou d'une zone, à la surface d'un plateau ou d'une plaine : les effets sont localisés à la périphérie et environs immédiats. Par contre, d'autres mouvements qui affectent les versants sont susceptibles de parcourir des distances plus ou moins longues et d'aller ensevelir et détruire constructions et personnes (Flageollet, 1988).

De nombreux mouvements de terrain sont aussi complexes et composites, ils peuvent passer au cours du temps d'un type à un autre (par exemple, un glissement évoluant en coulée). Ils peuvent être aussi superficiels (quelques mètres d'épaisseur) ou profonds (quelques dizaines ou centaines de mètres d'épaisseur) et mobiliser des volumes très variables et parfois considérables. J'ai montré que leurs états d'activité (et en corollaire leur âge), c'est à dire leurs rythmes d'évolution temporelle étaient très importants à considérer pour définir un niveau d'aléa, mais que cela n'était pas facile à faire en raison de la complexité des mécanismes des différents processus, du manque de données fiables recueillies sur des périodes de temps suffisamment longues pour être représentatives des phénomènes étudiés.

Ces constats m'incitent et m'encouragent à développer une recherche qui puisse permettre de correctement évaluer et cartographier le niveau d'aléa. Pour les mouvements « actifs », pour définir l'état d'activité, des moyens de cartographie et d'analyse des indicateurs morphologiques doivent être développés. Mais si la simple observation est nécessaire elle n'est pas suffisante, il faut donc faire des mesures des déplacements et des différents facteurs selon des échelles spatio-temporelles adaptées aux phénomènes présents ou attendus. Cela peut être fait par la mise en place d'un réseau de surveillance et de détection les indices précurseurs (fissuration, bruits sismiques, etc.) à une échelle locale et selon des pas de temps courts (horaires ou journaliers). Pour définir l'état d'activité des mouvements « anciens », la recherche doit être menée à une échelle spatiale au moins régionale et sur une longue période de temps (plusieurs centaines ou milliers d'années).



# Chapitre 3 : De la modélisation du mouvement de terrain à la cartographie de l'aléa

La démarche consiste à d'abord s'intéresser au fonctionnement d'un versant ou d'un site d'instabilité déclarée afin de définir le poids respectif des différents facteurs d'instabilité. Il est nécessaire de modéliser les relations entre précipitations, pressions interstitielles et déplacements à l'échelle d'un versant en les intégrant à des modèles géomécaniques de stabilité ou de déformation. On en déduit des seuils et des modes de comportement pour le test de différents scénarii, qui vont ensuite servir à la spatialisation de l'aléa à l'échelle d'un bassin-versant pour la cartographie prévisionnelle et préventive.

Après avoir rappelé quelques concepts de base sur la stabilité d'un versant et les principes retenus pour l'évaluation et la cartographie de l'aléa, je présenterai les principales approches et méthodes utilisées pour la modélisation du fonctionnement d'un processus à l'échelle d'un versant, et pour l'évaluation et la cartographie de l'aléa à l'échelle d'un bassin-versant.

Puis, j'insisterai sur les données d'entrée nécessaires en fonction du type d'approche envisagée, des objectifs de la recherche, des enjeux, des échelles adoptées et en corollaire des moyens financiers à disposition. Après avoir décrit les cinq grands groupes de données nécessaires à la modélisation des mouvements de terrain et à l'évaluation de l'aléa, les problèmes de gestion des données (collecte, stockage et sélection), leur degré de précision et leur fiabilité seront discutés.

## 3.1. Concepts de base

Le choix d'un modèle dépend des objectifs de la recherche (Figure 3.1) :

- à l'échelle du versant ou du site instable pour définir le fonctionnement d'un glissement de terrain, simuler différents scénarii d'évolution ou envisager la mise en place d'un système d'alerte ;
- à l'échelle d'un bassin versant pour l'évaluation ou la cartographie d'un aléa.

L'instabilité d'un versant est gouvernée par des inter-relations complexes entre les différents paramètres du terrain, comme les conditions lithologiques et structurales des roches, les propriétés géomécaniques des formations, la pente et la forme du versant, les conditions climato-hydrologiques, la végétation, l'occupation du sol et les activités humaines, etc.

A l'échelle d'un versant, le poids respectif de chacun de ces facteurs peut être apprécié à travers le calcul d'un coefficient de sécurité. Ce coefficient de sécurité  $F_s$  est défini par le rapport :

$$F_s = \frac{\text{Somme des moments résistants maximaux}}{\text{Somme des moments moteurs}}$$

- le moment moteur (poids des terres et des surcharges éventuelles tendant à provoquer le glissement) ;
- les moments résistants (les réactions qui s'opposent au glissement).

A l'échelle d'un versant, la démarche est sensiblement identique pour la définition des mécanismes de rupture (recherche *a posteriori* les causes du déclenchement ou de la poursuite du glissement) que pour l'étude de la stabilité d'un versant en l'absence de désordre apparent, dans le cadre de projets ou de la prévention des risques. Dans le premier cas, seule la recherche de la géométrie de la ou des surfaces de glissement est également requise.

Le zonage de l'aléa mouvements de terrain comporte deux phases successives (Varnes, 1984) :

- l'évaluation de la susceptibilité des terrains à la rupture. La susceptibilité exprime la possibilité qu'un phénomène donné se produise pour certaines conditions de terrain ;

- *la détermination de la probabilité de rupture*. La probabilité exprime la possibilité qu'un événement (forçage externe ou interne) en fonction des conditions initiales et de seuils devienne un facteur déclenchant (*triggering event*).

Une zone est déclarée susceptible aux mouvements quand les conditions du terrain de ce site sont comparables à celles d'une zone dans laquelle un mouvement s'est déjà produit. L'évaluation et la cartographie de l'aléa mouvements de terrain sont généralement basées sur *quatre principes fondamentaux* (Varnes, 1984 ; Hutchinson, 1995) :

- tous les types de mouvements peuvent être identifiés et classés ;
- les mouvements se reproduiront si les mêmes conditions géologiques, géomorphologiques, hydrogéologiques et climatiques qui ont déclenchées un mouvement se représentent ;
- les facteurs déclenchants et ceux contrôlant l'évolution ultérieure du mouvement sont connus et mesurables ;
- l'aléa peut être évalué en plusieurs niveaux (faible, moyen, fort, etc., cf. chapitre 1).

Les étapes essentielles dans le zonage de la susceptibilité aux mouvements de masse sont les suivantes (Van Westen, 2000) :

- *la cartographie des mouvements* (appelée carte de localisation des phénomènes naturels, carte d'inventaire, carte informative, etc.) en les distinguant selon le type d'activité (stabilisé, latent, actif, etc.), et en se basant sur des informations couvrant une période la plus large possible ;
- *la cartographie des paramètres de terrain* les plus significatifs pour l'occurrence des mouvements et leurs analyses ;
- *la définition des poids relatifs de chacun des facteurs en cause*, leurs relations et la définition de classes de susceptibilité.

La figure 3.1 synthétise les principales approches et méthodes disponibles pour la modélisation d'un versant et pour l'évaluation et la cartographie de l'aléa à l'échelle d'un bassin-versant (Malet, en cours). Les différentes approches sont présentées succinctement des plus simples et éprouvées aux plus compliquées qui demandent encore pour certaines des développements scientifiques. Le tableau 3.1 synthétise les avantages et les inconvénients de certaines approches en précisant à quelles échelles elles peuvent être utilisées et quel peut être le rôle joué par un Systèmes d'Information Géographiques (SIG), outil qui se révèle être idéal pour l'analyse des paramètres qui ont une forte variabilité spatiale.

## **3.2. Modélisation à l'échelle d'un versant**

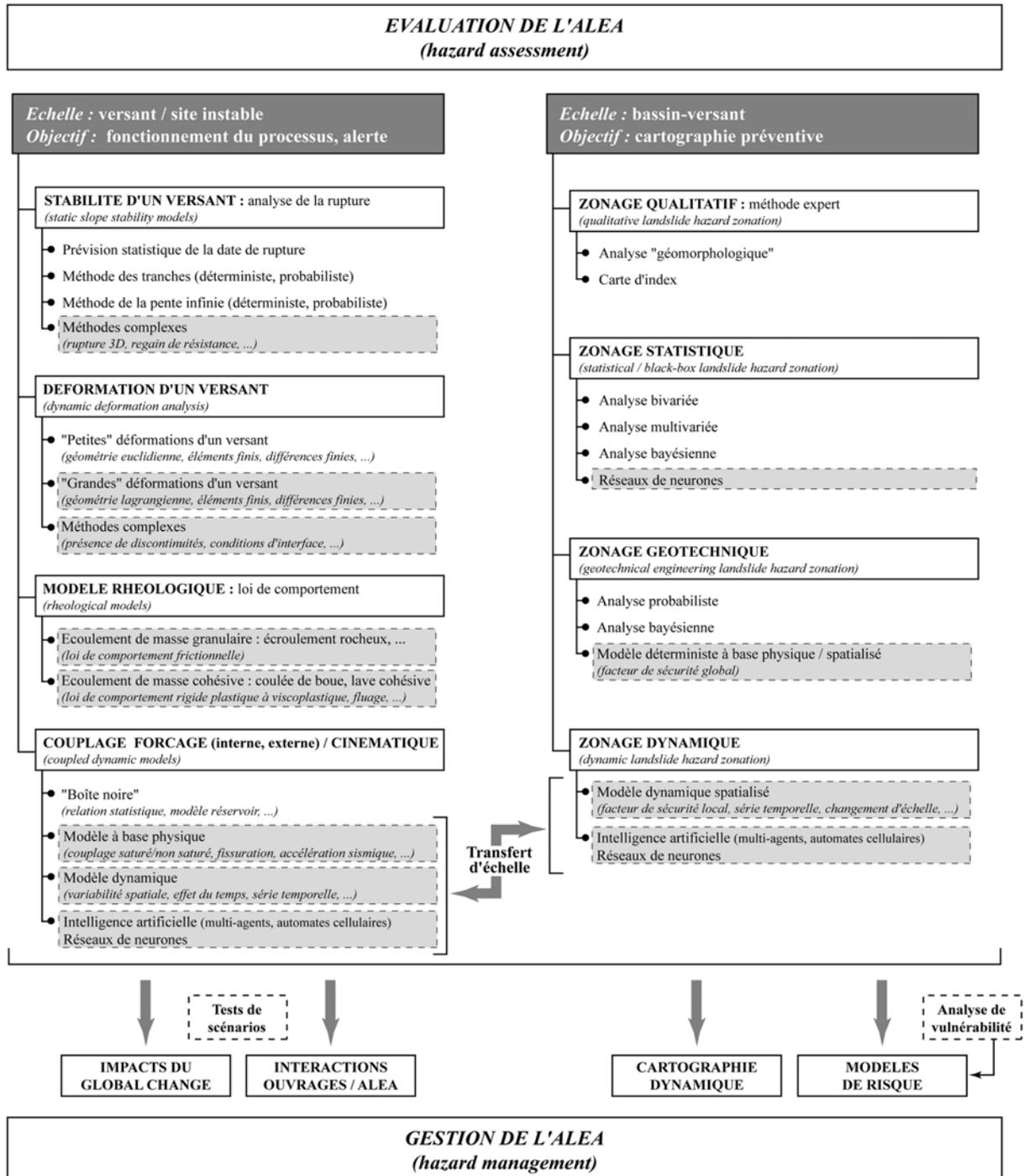
Ce paragraphe sera consacré à la seule modélisation des glissements de terrain (rotationnel, translationnel), des glissements-coulées, des coulées, des laves torrentielles. La modélisation des écroulements rocheux, chutes de blocs, etc. ne sera pas abordée.

Les modèles peuvent être déterministes ou probabilistes. Ils sont généralement couplés à des modèles hydrauliques et/ou hydrodynamiques (Malet, 1998). Différentes approches tiennent compte de la complexité des phénomènes, des différentes lois de comportement des matériaux en fonction de leur évolution dans le temps (rigide-plastique frottant, viscoélastique, viscoplastique, fluide). Ces comportements sont décrits par des lois de la mécanique des roches, des sols et des fluides. Dans le cas de mouvements de terrain complexes ou composites dont les vitesses déplacement évoluent dans le temps, il est parfois difficile de choisir la loi de comportement la mieux adaptée au matériau, en particulier dans le cas de transition de la loi de comportement (par exemple, comportement aux très faibles vitesses de cisaillement (viscoélastique à viscoplastique) et comportement aux vitesses de cisaillement faibles à fortes (Vulliet et Hutter, 1988a)).

### **3.2.1. Stabilité d'un versant : analyse à la rupture**

Pour l'étude de la stabilité d'un versant et de l'influence des différents « facteurs déstabilisants », il est nécessaire de calculer un coefficient de sécurité  $F_s$ , c'est-à-dire effectuer une analyse à la rupture pour laquelle plusieurs méthodes sont disponibles.

Dans les modèles déterministes, les propriétés physiques et mécaniques des formations sont quantifiées et appliquées à des méthodes mathématiques spécifiques et un facteur de sécurité est calculé selon la *méthode des tranches* pour différentes hypothèses de calcul (Blondeau, 1976 ; Bromhead, 1986 ; Michalowski, 1995 ; Malet, 1998) ou selon la *méthode des perturbations* (Raulin *et al.*, 1974). Ces modèles « statiques » (mono-, bi- ou tri-dimensionnel) sont couramment utilisés en géotechnique dans le cas d'études de stabilité sur un site particulier (Berti *et al.*, 1996 ; Faure *et al.*, 1996). Cette approche est largement répandue en génie civil et en géologie de l'ingénieur.



Nota : les cartouches grises définissent les champs de développement scientifique.

Figure 3.1 : Principales approches disponibles pour la modélisation d'un versant et pour l'évaluation et la cartographie de l'aléa à l'échelle d'un bassin-versant (Malet, thèse en cours).

Le calcul du coefficient de sécurité  $F_s$  requiert des données géométriques, des données sur la résistance au cisaillement des formations (cohésion et angle de frottement interne) et des informations sur les pressions interstitielles. De plus, il faut choisir entre les résistances de pic ou résiduelles (ou bien des valeurs intermédiaires) à utiliser sur la surface de glissement ou sur une bande de glissement (Chowdhury, 1976 ; Al Hayari, 1989 ; Enoki *et al.*, 1993 ; Fredlund et Rahardjo, 1993).

En dehors des inconvénients donnés au tableau 3.1, ce type de modèle déterministe présente quelques limites : son application à des mouvements de terrain complexes est difficile voire impossible en raison de sa simplicité conceptuelle (Reizig *et al.*, 1996). Par ailleurs, dans la mesure où ces modèles intègrent des paramètres géotechniques d'une grande variabilité spatiale, des résultats satisfaisants sont obtenus dans le seul cas où ces données (comme celles relatives aux autres facteurs) sont précises et en nombre suffisant (Van Westen, 2000).

A l'opposé des méthodes précédentes, les *modèles probabilistes* vont tenter de tenir compte de la variabilité spatiale et temporelle des paramètres géotechniques, hydrodynamiques, de la progressivité de la rupture au sein du massif, et donc mieux tenir compte de la réalité : ce n'est plus un coefficient de sécurité ( $F_s$ ) qui est calculé mais une probabilité de rupture ( $pf$ ). Une description de ces méthodes assez récentes et leur application à la stabilité des versants peut être trouvée dans Chowdhury (1984) et Nguyen et Chowdhury (1984, 1985).

Dans beaucoup de cas pratiques, la stabilité des pentes soumises à un glissement translationnel peut aussi être évaluée en utilisant l'analyse sur un plan infini (*Infinite Slope Analysis*) (Skempton et DeLory, 1957), etc.

### 3.2.2. Déformation d'un versant

Alors que les modèles statiques analysent l'état d'équilibre d'une pente, des *modèles dynamiques*, vont étudier les accélérations d'une pente, en permettant l'évaluation des déplacements et des vitesses (Freeze, 1987). La déformation de la masse mobilisée et son comportement dans le temps sont pris en compte. Par exemple, dans le cas de mouvements induits par les séismes, des analyses en déformation sont toujours préférables à des analyses pseudo-statiques. Ces méthodes permettent de tenir compte de phénomènes complexes :

- phénomène de plastification progressive des matériaux pour la détermination des états de contrainte dans tout le massif, afin de localiser des zones de rupture (Lo et Lee, 1973 ; Guellec *et al.*, 1976 ; Barbas, 1981) ;
- étude de la localisation de la déformation sous forme de "bandes de cisaillement" lorsqu'on tend vers la rupture (Wang, 1993 ; Darve *et al.*, 1999). Le déclenchement de la localisation peut être prédit par un critère de bifurcation, qui fait jouer un rôle central à la loi de comportement du matériau.

Klubertanz *et al.* (1997, 2000) ont développé un code aux éléments finis qui permettra de prédire le lieu et les circonstances météorologiques ainsi que la masse et la composition de la matière qui commence à se mettre en mouvement. Le code *Diffpack-LMS*, basé sur la méthode des éléments finis, utilise les équations de la mécanique des milieux poreux. Celui-ci est apte à traiter des sols à la fois saturés et non saturés (couplage triphasique) présentant un comportement fortement non linéaire, et à tenir compte de leur état d'humidité et de l'histoire des déformations plastiques.

Les calculs s'effectuent essentiellement selon les méthodes des *éléments finis*, mais des codes en différences finies ou en éléments distincts sont en cours de développement. Ces calculs peuvent être appliqués, plus ou moins facilement, aux terrains très hétérogènes et aux géométries complexes (Al Hayari, 1989). Toutefois, si la gestion des « points de déformation » dans les modèles est assez bien maîtrisée, un problème se pose pour adapter les codes aux « grandes déformations » dans le cas de la modélisation des phénomènes à grandes distances de parcours (glissement translationnel, glissements-coulées).

Le code de calcul *FLAC (Fast Lagrangian Analysis of Continua)* est utilisé depuis peu de temps sur des glissements de terrain (Agiardi *et al.*, 2001 ; Jing et Hudson, 2002 ; etc.)

### 3.2.3. Modèle rhéologique

J'aborde ce point en l'illustrant par l'exemple des glissements-coulées (Chapitre 1) sur lesquels portent l'essentiel de mes recherches. Ces mouvements complexes, associant des glissements *stricto-sensu* à l'amont et une coulée de débris à l'aval, peuvent générer des laves torrentielles ou des écoulements hyper-concentrés. Sur un même site, des comportements et des fonctionnements différents sont donc observés au cours du temps dont la compréhension puis la modélisation demandent des approches adaptées.

Il existe une limite à l'application des principes de la *mécanique des sols* et des roches, quand la masse en mouvement devient rapide et présente un caractère d'écoulement (Yagi, 1988). Iverson (1997) indique un seuil, large, de 8 à 15 m/an. Dans de tels cas, le comportement est alors mieux décrit en terme de *mécanique des fluides* (Takahashi, 1991 ; Meunier, 1991). A une analyse classique prenant en compte un terme unique de friction, il faut préférer une approche dynamique, dans laquelle les processus (compaction, frottement et chocs entre grains, formation de bourrelets, ...) sont interconnectés (Suhayda et Prior, 1978 ; Craig, 1981).

Ces derniers auteurs ont suggéré que les glissements-coulées, les coulées de boue ou de débris pouvaient se comporter mécaniquement comme des laves torrentielles et adopteraient des caractéristiques d'écoulement. Elles se comporteraient, en première approximation, comme un fluide de Bingham (Coussot, 1996). Ces trois auteurs ont alors construit des modèles capables de reproduire la distribution des vitesses du fluide dans un profil en travers. Couplés au critère de Coulomb, leurs modèles sont dits « *viscoplastiques* » car ils intègrent un second paramètre de résistance, la viscosité. Cette approche a aussi été celle développée pour les coulées de boue rapides et les avalanches par Hungr (1995).

Ces modèles mécaniques offrent de bons résultats pour la prédiction de l'extension maximale de tels mouvements de terrain ; par contre, la prédiction du comportement à long terme et des vitesses atteintes par la coulée posent problème (Savage et Smith, 1986). Ceux-ci peuvent être approchés par l'utilisation des *lois de la mécanique des fluides*. Dans ce domaine, les travaux les plus nombreux concernent les laves torrentielles (Laigle et Coussot, 1997) et les avalanches (Hungr et Evans, 1996), alors que quelques articles récents font état de l'utilisation de cette approche pour la modélisation des glissements-coulées (Colas et Locat, 1993 ; Arrattano *et al.*, 1996 ; Irgens et Norem, 1996). C'est dans le domaine des fluides cohésifs qu'existent les meilleures modélisations d'écoulement (Laigle et Coussot, 1997).

La modélisation de telles coulées pose le délicat problème de la transition de la loi de comportement : comportement aux très faibles vitesses de cisaillement (viscoélastique à viscoplastique) et comportement aux vitesses de cisaillement faibles à fortes. Dans le développement de ces coulées, il convient d'identifier les facteurs (seuils de contrainte, degré de saturation du matériau, ...) qui déterminent la diminution de la résistance au cisaillement du matériau nécessaire à la mise en place d'un écoulement. Les conclusions tirées des mesures, essais et calculs pratiqués dans un glissement-coulée comme celui de la Valette (Colas et Locat, 1993 ; Van Asch et Nieuwenhuis, 1994 ; Van Beek et Van Asch, 1996 ; Van Asch *et al.*, 1997) sont intéressantes, mais les simulations établies à partir de différentes lois de comportement (fluide ou frottant) sont loin d'être calées avec les observations de terrain. Il reste donc beaucoup à faire.

Différents modèles existants mécaniques (rigide-plastique frottant, fluide, propagation de laves torrentielles) peuvent être testés à partir des conditions rhéologiques, de hauteurs de nappe et d'humidification de la masse. En fonction du type de propagation envisagée, les différents modèles applicables sont (thèse Jean-Philippe Malet, en cours) :

#### a) *propagation avec frottement*

Dans ce cas, il est possible d'appliquer l'approche "glissement-consolidation" développée par Hutchinson, testée sur la coulée d'Aberfan en Galles du Sud (Hutchinson, 1986), sur le glissement-coulée de La Valette (Colas et Locat, 1993) et sur des coulées rapides du delta du Mississippi (Locat *et al.*, 1996).

L'utilisation du logiciel FLAC 2D est assez aisée en élastoplasticité ou dans d'autres contextes (massifs rocheux), par contre, elle se complique en viscoélasticité et viscoplasticité et pour les grands déplacements. Malgré cela une modélisation avec Flac 2D peut apporter une contribution notable aux différentes approches. Cette modélisation doit être conduite, sur des profils longitudinaux, en viscoplasticité couplée aux caractérisations hydro-mécaniques.

Des progrès récents dans la formalisation de modèles rhéologiques complexes (comportement visqueux non linéaire, comportement visco-élastoplastique) ont été réalisés, notamment à l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, pour prédire le comportement de glissements de terrain en écoulement lent (mm à dm/j) (Vulliet, 1997). Les modèles visqueux (Vulliet et Hutter, 1988a, 1988b, 1988c, 1988d) permettent une analyse 3-D du comportement temporel de mouvements où l'épaisseur est faible par rapport à la largeur. Le calcul peut s'effectuer en contrainte totale « code VITAL-1 » ou en contrainte effective « code VITAL-2 ». Un exemple a été testé sur le glissement de Chloewena (Vulliet et Bonnard, 1996) et a donné des résultats intéressants (la vitesse de la masse atteignant jusqu'à 6m/jour, pour un plan de glissement à 36 m de profondeur).

Néanmoins, une des limitations majeures de ces modèles est liée à la loi de comportement introduite dans le code. Le fait de considérer le matériau comme un corps visqueux incompressible, exclut les potentialités de déformations élastiques et plastiques. C'est dans ce cadre qu'ont été développés par la suite des modèles élasto-viscoplastique (Vulliet et Desai, 1989 ; Vulliet *et al.*, 1991). Ces modèles permettent ainsi d'intégrer des profils de vitesses complexes (creep et déformation visqueuses en surface, glissement à la base) et peuvent gérer des interfaces. Les modèles ont été validés sur des essais de laboratoire (rupture dans des échantillons triaxiaux) et sur le glissement de Villarbeney.

#### *b) propagation fluide*

Il existe le modèle viscoplastique SKRED (Norem *et al.*, 1990) testé dans le golfe du Mexique (Locat *et al.*, 1996) et le modèle BING développé par Parker pour un fluide de type Hershel-Bulkley, et adapté par Locat aux écoulements bi-linéaires (Locat, 1997).

Les modèles de propagation de laves torrentielles utilisés par le Cemagref, en fournissant les volumes de matériaux susceptibles de contribuer à la genèse d'une lave (Coussot, 1993 ; Coussot et Piau, 1993), peuvent être utilisés pour simuler l'extension maximale des écoulements pour les rhéologies identifiées. Les modèles d'écoulement de laves torrentielles du Cemagref sont fondés sur un jeu d'équations de type Saint-Venant (moyennées sur la verticale) et une loi de comportement de fluide viscoplastique représentée par un modèle de Herschel-Bulkley. Un premier modèle, monodimensionnel, permet le calcul d'écoulements canalisés. Un second modèle, bidimensionnel, permet le calcul d'étalements. Ces deux modèles nécessitent la connaissance de conditions d'entrée dans les modèles (condition à la limite sous forme d'un hydrogramme : volume et évolution dans le temps du débit et de la hauteur aux points d'entrée dans le domaine d'étude).

### **3.2.4. Couplage Forçage (interne, externe) / Cinématique**

Parmi les forçages externes, c'est le forçage climatique qui est le plus souvent évoqué. Pour le prendre en compte, il est nécessaire de coupler un modèle hydrodynamique à un modèle géomécanique. D'autres forçages peuvent être pris en compte, comme l'accélération sismique, la contrainte tectonique, etc. Seuls les forçages climatiques seront évoqués ci-après.

Les fluctuations de la nappe, l'infiltration, la progression d'un front humide vers la profondeur et les écoulements préférentiels atteignant la surface de glissement sont les processus qui contrôlent le comportement d'un mouvement de terrain. Il s'agit de représenter numériquement le comportement de l'aquifère et les flux d'eau qui le traversent.

Le développement des moyens de calcul permet de modéliser en 2D un versant (parfois en 3D dans certains cas) pour tenir compte des chemins préférentiels de l'eau, du réseau de fissures et de macropores et du caractère dynamique de la nappe (Anderson et Lloyd, 1998). Schématiquement, tous les auteurs insistent sur cinq points essentiels :

- l'importance toute particulière à accorder à une bonne prédiction des niveaux d'eau ; en effet, la qualité du modèle hydrodynamique influence plus les résultats du modèle général de comportement que la modélisation géomécanique ;
- une définition précise du système hydrologique et hydrogéologique du glissement (conditions aux limites, nombre de couches et leur zonation, etc.) ;
- une clarification des processus ; le nombre de processus et leur imbrication détermineront le schéma conceptuel du modèle, ses éventuelles subdivisions en sous-modèles, etc. ;
- une très bonne connaissance des propriétés hydrodynamiques des matériaux et de leur variabilité spatiale et saisonnière (conductivité à saturation  $K_{sat}$ , rétention, porosité, etc.) ;
- la nécessité de coupler le domaine saturé et non saturé, pour tenir compte de l'évaporation, de l'évapotranspiration et de l'influence des macropores.

La modélisation hydrodynamique suit couramment trois approches (Van Asch, 1997) :

- les modèles type « boîte noire » qui permettent uniquement de relier les entrées aux sorties par une loi de transfert simple (le plus souvent une régression plus ou moins élaborée) ;
- les modèles conceptuels simples dits « réservoirs », adaptés aux glissements profonds, à la géométrie complexe, mais aux hétérogénéités spatiales limitées ;
- les modèles à bases semi-physiques ou physiques, conceptuels et spatialisés, plus adaptés aux glissements superficiels ou aux glissements marqués par une forte hétérogénéité spatiale.

Ces deux dernières approches sont aujourd'hui les plus couramment utilisées, et, comme le recommandent de nombreux auteurs (Anderson et Burt, 1985 ; Bromhead *et al.*, 1996 ; Kirkby, 1988 ; Van Asch, 1997), l'utilisation de *modèles à bases physiques ou semi-physiques, spatialisés*, apparaît comme la plus performante dans l'étude dynamique des mouvements de terrain. Ces modèles, s'appuient sur les progrès récents de l'hydrodynamique pour représenter et expliquer le fonctionnement du système étudié. Ces modèles apparaissent comme les seuls capables, par leur caractère modulable (Van Asch, 1997) de modéliser le régime hydrogéologique d'un mouvement de terrain complexe marqué par une forte hétérogénéité spatiale et divisé en plusieurs compartiments plus ou moins interconnectés. Il est donc logique de s'orienter vers une telle modélisation, à la fois (Ambroise, 1998) :

- à *bases physiques*, c'est-à-dire fondée explicitement sur les processus élémentaires dominants (évaporation, infiltration matricielle, infiltration dans les macropores, écoulement latéral saturé et non saturé, etc.), en tirant parti des acquis théoriques pour le choix des variables et paramètres ;
- *semi-spatialisée*, c'est-à-dire fondée sur un découpage de l'espace en unités relativement homogènes dans leur fonctionnement hydrodynamique (selon différents critères tels les états de surface, la perméabilité, le degré de fissuration, etc.), en tirant parti des méthodes naturalistes pour définir la structure du glissement de terrain et la variabilité interne de ses propriétés.

De tels modèles, uniquement hydrodynamiques ou directement couplés à des modèles géomécaniques, existent ou sont en développement, grâce à une meilleure identification des processus dominants et caractérisation des hétérogénéités. Ce type de modélisation est actuellement tenté de plusieurs façons : modèle *CHASM (Combined Hydrology And Stability Model)* (Anderson *et al.*, 1998 ; Desitter *et al.*, 2000 ; Wilkinson *et al.*, 2000), coffret *SEEP/SLOPE* (GeoSlope, 1994) combinant une analyse des écoulements en 2D par éléments finis à une analyse de stabilité.

D'autres modèles hydrodynamiques ne sont pas directement connectés à un modèle géomécanique :

- le modèle *MC* combinant des modules réservoirs et des modules plus physiques (Girard *et al.*, 1991) ;
- le modèle *MODFLOW*, développé par l'U.S. Geological Survey (MacDonald et Harbaugh, 1988) ;
- le modèle *TRANSIN* développé à l'Universitat Politècnica de Catalunya (Corominas *et al.*, 1997) ;
- le modèle *FLONET* développé à la Kingston Polytechnic School (Pugh et Bromhead, 1985).

Ces modèles s'appliquent à des échelles locales et à de petites unités hydrologiques où les limites de l'aquifère sont très bien définies (Collison *et al.*, 1996). Pour calibrer et valider ces modèles, il faut disposer de longues chroniques d'enregistrement en continu des conditions climatiques et des niveaux piézométriques.

Pour conclure, ces modèles sont optimaux pour engager des simulations d'évolution du versant en testant par exemple le rôle de la végétation sur la stabilité ou bien encore tester l'influence du changement climatique global, etc.

#### *Les nouvelles méthodes :*

Pour ne pas être trop « incomplet », il est possible de citer d'autres méthodes encore peu utilisées mais qui semblent fournir des résultats prometteurs.

Des méthodes utilisent *l'intelligence artificielle* (multi-agents, automates cellulaires). Le programme interprète « seul » les données comme pourrait le faire l'instigateur de la recherche ce qui semble diminuer la subjectivité de cette interprétation et faire gagner du temps (Lazzari et Salvaneschi, 1999).

Les *automates cellulaires* (*cellular automata*) constituent un exemple de calcul parallèle qui permet de décrire facilement la rhéologie des phénomènes naturels. Dans les automates cellulaires, l'espace physique est représenté par une matrice de cellules, caractérisées par une même forme et par une même dimension. A chacune, il faut associer des attributs qui décrivent les caractéristiques physiques « moyennes » de la portion d'espace. Toute cellule contient un automate élémentaire qui reçoit les données d'entrée des cellules environnantes qui appartiennent à un voisinage géométrique préétabli. Par des règles logiques, le phénomène naturel peut être idéalement décomposé en un ensemble de processus élémentaires, plus simplement descriptibles en des termes analytiques. A tout pas de calcul, il faut donc évaluer les variations des attributs de chaque cellule, comme une conséquence des processus élémentaires considérés. Selon les règles contenues dans la fonction de transition du modèle, la décomposition des effets élémentaires produits par ces processus, consiste à évaluer l'évolution du phénomène considéré (Iovine *et al.*, 2002) Cette méthode a été appliquée à la modélisation de la coulée de boue de Curti-Sarno (Iovine *et al.*, 2002) ou bien encore à celle de Tessina (Avolio *et al.*, 2000) et au glissement du Mt Ontake (Di Gregorio *et al.*, 1999).

De nouvelles méthodes de prédiction des déplacements ou autres utilisent les *réseaux de neurones* (*Neural Networks*). Par exemple, cette méthode a été appliquée par Mayoraz *et al.* (1996) sur deux glissements en Suisse (La Chenaula) et en France (Sallèdes) à partir des données d'entrée comme les déplacements, les pressions interstitielles et les précipitations. Cette méthode apparaît être plus facile à utiliser que les modèles de régressions statistiques et permet de prévoir des valeurs de déplacements ou de pressions interstitielles qui sont tout à fait conformes aux valeurs mesurées.

### **3.3. Evaluation et cartographie de l'aléa à l'échelle d'un bassin**

Ces dernières années l'intérêt pour l'évaluation de l'aléa puis du risque mouvements de terrain a conduit à la publication de très nombreux articles présentant différentes approches. Je donnerai, pour chacune des approches, les principes généraux, le lecteur trouvera les détails dans les références : Aleoti et Chowdhury (1999), Carrara et Guzzetti (1995), Leroi (1996), Soeters et Van Westen (1996), Van Westen (1997, 2000), etc.

#### **3.3.1. Le zonage qualitatif : méthodes « expert »**

En général les approches qualitatives appelées aussi *méthodes heuristiques* sont basées sur le jugement de la ou des personnes qui sont en charge de l'évaluation de la susceptibilité et de l'aléa. Les données d'entrée sont usuellement acquises lors de visites sur le terrain avec le support d'une photo-interprétation. Ces méthodologies sont aussi appelées « méthodes Expert » (Leroi, 1996). Ces méthodes peuvent être divisées en deux types principaux.

### 3.3.1.1. L'approche « géomorphologique »

C'est probablement la méthode qualitative la plus simple. L'évaluation et/ou la zonage est réalisé directement sur le terrain par l'expert (géologue, géotechnicien, géomorphologue, etc.), sur la base de son expérience d'autres situations similaires. Cette approche fournit une évaluation rapide de l'aléa dans une région donnée, tenant compte d'un très grand nombre de facteurs. Elle peut être utilisée avec succès à n'importe quelle échelle. Il s'agit d'une méthode dans laquelle la synthèse des données est directe. L'intégration est souvent implicite et la démarche est peu ou pas expliquée. Dans la forme, la carte géomorphologique fournit toutes les informations nécessaires pour définir les conditions de stabilité ou le degré d'instabilité dans une aire donnée. Le SIG est utilisé dans ce cas comme un simple outil de cartographie. C'est cette approche qui est recommandée en France pour la réalisation des PPR à l'échelle du 1/10 000 (Chapitre 1).

### 3.3.1.2. La synthèse basée sur la combinaison de cartes d'index

Dans cette approche décrite par Soeters et Van Westen (1996) ou par Parise (2001), l'expert sélectionne et cartographie les facteurs qui affectent la stabilité du versant et, sur la base de son expérience attribue à chaque facteur un « poids » qui est proportionnel à sa contribution attendue dans la génération de la rupture. Cette *méthode heuristique* simple permet d'obtenir des résultats satisfaisants (Wachal et Hudack, 2000). Dans cette approche aussi appelée « qualitative/indexée », les cartes de base (cartes de paramètres ou cartes d'index) sont superposées et convenablement « pondérées » (affectées d'un certain poids relatif) et l'aire est divisée en zones homogènes. Il s'agit d'une méthode très subjective. Cependant, Donati et Turrini (2002) proposent une méthode pour déterminer avec objectivité les poids à affecter à chaque facteur.

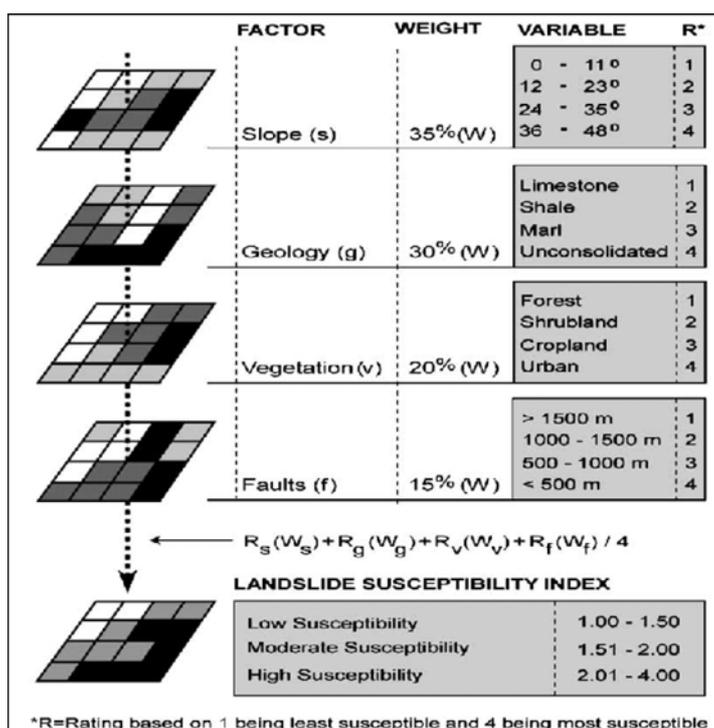


Figure 3.2 : Facteurs, classes de valeurs, pondération dans le cas d'un modèle heuristique (in Wachal et Hudack, 2000).

Chaque facteur correspond à une couche dans le modèle. Pour les variables discontinues comme la lithologie ou l'occupation du sol, un poids différent est affecté à chaque classe suivant sa prédisposition à être à l'origine de mouvements de terrain. Les données des variables continues sont elles aussi classées et pondérées. Chaque pixel est donc caractérisé par une valeur pour chaque facteur. La figure 3.2 décrit les quatre facteurs choisis (pente, lithologie, végétation et failles), les classes ainsi que les poids affectés (Wachal et Hudack, 2000). La détermination des pondérations appliquées n'est le résultat d'aucune analyse statistique, elle est complètement subjective. Avec une

résolution spatiale de 30 m, les cartes obtenues semblent être à échelle moyenne (1/25 000 à 1/50 000).

La carte de susceptibilité est obtenue par simple sommation des facteurs, donc des couches, pixel par pixel, les valeurs les plus élevées indiquant des zones instables potentielles. Les traditionnelles étapes de calage et de validation du modèle sont effectuées afin de trouver les pondérations les mieux adaptées à la région étudiée. La méthode heuristique reste assez empirique, puisqu'elle exige une succession de tâtonnements avant de déterminer la relation adéquate entre les variables.

### 3.3.2. Zonage statistique

Carrara (1988) introduit des approches statistiques (*statistical approach*) pour évaluer l'influence de chaque facteur contributif dans la production de l'instabilité. A partir des années 1980, les potentialités offertes par les outils informatiques (ordinateur personnel et SIG) favorisent le stockage et le calcul d'une grande quantité de données et donc l'utilisation de techniques complexes (statistiques bi-variées ou multivariées).

Les approches statistiques comparent la distribution spatiale des mouvements avec les différentes cartes de base (usuellement lithologie et angle de pente, occupation du sol). Les résultats peuvent être appliqués à une zone actuellement stable mais qui est susceptible de connaître une instabilité future. La difficulté majeure réside dans la définition des processus de rupture et dans l'identification et l'évaluation systématique des différents facteurs apparentés à l'instabilité (Carrara, 1988). L'un des principaux avantages est que l'opérateur peut valider le poids de chaque facteur et intervenir de manière interactive dans les données d'entrée finales de la carte. Plusieurs méthodes statistiques ont été appliquées pour calculer les poids des différents facteurs. Elles ont été appelées :

- méthode de susceptibilité (*landslide susceptibility method*) (Brabb, 1984 ; Van Westen, 1993) ;
- régressions multiples (Dai et Lee, 2002) ; analyses discriminantes (Carrara et Guzzetti., 1995) ; analyses multivariées de type variance/covariance (Rezig *et al.*, 1996) ; etc. ;
- méthodes Bayésiennes, notamment l'analyse conditionnelle (Clerici *et al.*, 2002 ; Chung et Fabbri, 1998), la « *certainty analysis* » (Kojima *et al.*, 1998 ; Chung et Fabbri, 1998), le modèle « *weight of evidence* » (Chung et Fabbri, 1998 ; Luzi *et al.*, 2000), etc.

Contrairement aux approches précédentes, les approches statistiques sont objectives avec une complète automatisation des différentes étapes de la gestion des données. L'inconvénient majeur réside dans le besoin d'une collecte systématique des données.

### 3.3.3. Zonage géotechnique

Les méthodes de calcul d'un coefficient de sécurité  $F_s$  présentées en 3.2.1., normalement appliquées à une petite zone à une échelle locale, sont maintenant et depuis, seulement quelques d'années, appliquées à la cartographie et à l'évaluation de l'aléa sur des aires étendues. Le coefficient de sécurité devait être calculé pour chaque pente individuelle ou zone avant de pouvoir préparer la carte d'aléa ce qui était très consommateur en temps énorme. Maintenant, les SIG facilitent la simulation de multiples scénarii basés sur des hypothèses de divers facteurs (usuellement les facteurs déclenchants) et permettent ainsi, assez rapidement la production d'une carte d'aléa.

Parmi les nombreux exemples d'application, citons celui extrait de Gökceoglu et Aksoy (1996) dont l'approche peut être définie comme *semi-quantitative*. Les figures 3.3 et 3.4 illustrent les différentes étapes nécessaires à la modélisation. Les facteurs utilisés sont : la pente, la lithologie, la distance au réseau de failles, la végétation, l'altitude relative, le relief relatif, la densité de routes et les paramètres géotechniques (cohésion, angle de frottement et poids spécifique).

La modélisation consiste en une sommation de plusieurs couches auxquelles le même poids a été attribué comme dans un modèle heuristique. Avec la différence que dans ce modèle déterministe les données géotechniques sont intégrées pour calculer les paramètres géométriques (notamment l'angle de pente critique) à l'aide de l'analyse de stabilité de pente bi-dimensionnelle pour aboutir à une carte de la résistance au cisaillement.

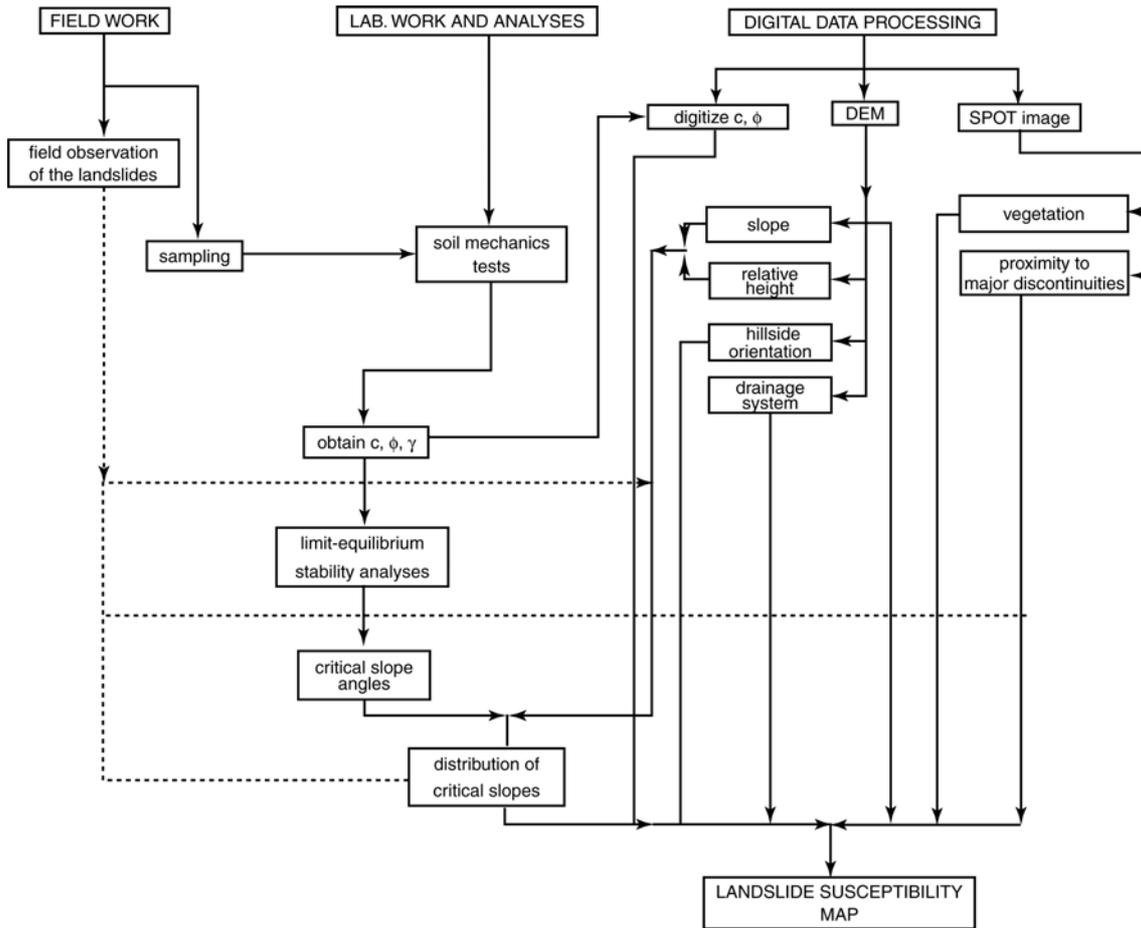


Figure 3.3 : Etapes d'un modèle déterministe d'évaluation de l'aléa (in Gökceoglu et Aksoy, 1996)

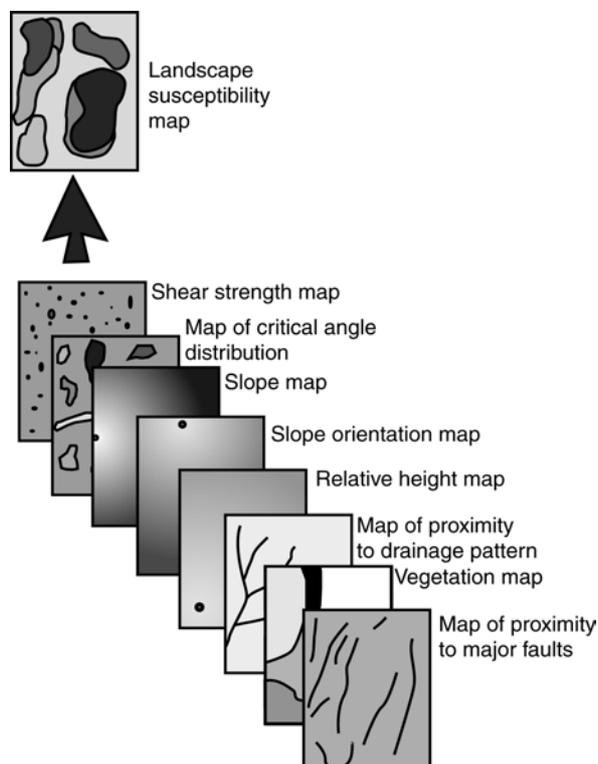


Figure 3.4 : Les différentes couches de données dans le modèle déterministe d'évaluation de l'aléa (in Gökceoglu et Aksoy, 1996)

La plupart des méthodes de calcul par *analyse probabiliste* ou par *analyse bayésienne* ne peuvent s'appliquer qu'à l'échelle locale en raison du besoin des nombreuses données d'entrée, mais des applications utilisant des modes de calcul particulier sont engagées par certains. Comme précédemment, grâce aux SIG, après subdivision de l'aire d'étude en unités élémentaires « homogènes » de petites tailles, la *probabilité de rupture* de chaque unité élémentaire peut être calculée et cartographiée. Cette information peut être utilisée seule ou combinée avec d'autres facteurs pour produire des cartes de susceptibilité ou d'aléas à des échelles larges.

### 3.3.4. Zonage dynamique

Si dans le zonage géotechnique, le calcul d'un  $F_s$  est réalisée à partir de plusieurs couches d'information de manière statique, c'est-à-dire à un instant  $t$ , dans le zonage dynamique, le calcul du  $F_s$  est effectué en tenant compte de séries données temporelles.

Le zonage dynamique demande encore de nombreux développements scientifiques. Des méthodes et modèles sont déjà appliqués qui semblent fournir des résultats très encourageants. Par exemple, Van Beck (2002) a utilisé un modèle dynamique, distribué et à base physique couplant en deux étapes distinctes :

- un modèle hydrologique *STARWARS* (*Storage And Redistribution of Water on Agricultural and Regetated Slopes*) ;
- un modèle de calcul de stabilité, *PROBSTAB*, en équilibre limite basé sur le critère de rupture de Mohr-Coulomb qui évalue des probabilités de rupture.

Le code *CHASM* qui calcule un coefficient de sécurité  $F_s$  à l'échelle du versant peut être facilement spatialisé par SIG à l'échelle du bassin versant (Anderson et Pope, 1984).

De nouvelles techniques utilisent les *réseaux de neurones* (*neural networks*) (Aleotti et Chowdhury, 1999 ; Mayoraz *et al.*, 1996). Ces techniques ne sont pas encore très courantes. Les caractéristiques distinctives de telles méthodes sont qu'elles ne dépendent pas des aspects physiques des problèmes et elles ne requièrent pas de connaissances conceptuelles basiques de ces problèmes.

## 3.4. Discussion

Les approches et méthodes disponibles pour la modélisation d'un versant et pour l'évaluation et la cartographie de l'aléa à l'échelle d'un bassin-versant sont nombreuses. Elles présentent toutes des avantages ou inconvénients (Tableau 3.1) mais fournissent, en fonction de l'échelle de travail choisie, des résultats dont la qualité dépendra de la justesse des choix du modèle utilisé, de la nature et de la qualité des données d'entrée. Comme le rappellent Aleotti et Chowdhury (1999), aucune de ces méthodes ne peut être *à priori* recommandée et peu d'études comparatives existent (Jennings *et al.*, 1991).

À l'échelle d'un versant, il est possible de calibrer et valider les modèles à partir de mesures sur le terrain : la plupart des méthodes sont ainsi éprouvées. Par contre, à l'échelle d'un bassin versant, on ne sait pas encore véritablement calibrer et valider les modèles sauf à utiliser les limites des phénomènes observés sur le terrain et leurs occurrences. Pour l'avenir, à cette échelle, un large champ de recherche est donc à considérer pour développer des méthodes de calage et de validation.

La sélection des approches à adopter pour un projet donné ou pour une recherche donnée, dépend parfois plus souvent de considérations économiques (coût de l'acquisition des données, de la disponibilité des données, analyses coûts/bénéfices, etc.) que de véritables problèmes techniques et scientifiques.

Cet état de l'art montre aussi entre autres quelles sont les données de base à acquérir pour envisager les différentes modélisations et pouvoir répondre aux questions sur le devenir d'un glissement de terrain. Ceci a guidé le choix des investigations et des dispositifs de surveillance que je présenterai par la suite.

Ces méthodes sont appliquées à partir d'un découpage spatial :

- grille (ou maillage) régulière de taille et de forme identiques (carrée, rectangulaire, hexagonale, etc.) qui délimitera des *pixels* (Carrara, 1983 ; Carrara et Guzzetti, 1995 ; Anbalagan et Singh, 1996). Ce type de découpage est très utilisé bien que le pixel soit peu représentatif des conditions morphologiques (Luzi *et al.*, 2000) ;
- *unité géomorphologique (morphological units)*, mieux adaptée, comme l'unité de versant (*slope unit*), par exemple (Kienholz, 1978 ; Carrara *et al.*, 1992 ; Rezig *et al.*, 1996), ou ;
- *unité générée automatiquement par superposition* de différentes couches de paramètres ou d'information (Ives et Bovis, 1978).

| Approches   | Avantages  | Inconvénients   | Echelle |    |    |     |
|---|--|---|---------|----|----|-----|
|   |  |   | R       | M  | L  | Loc |
| <b>Stabilité d'un versant et zonage géotechnique</b><br>approche déterministe –<br>Facteur de sécurité<br>( <i>Deterministic approaches – safety factor</i> ) | Méthodologie objective et quantitative<br>Demande des investigations et des mesures détaillées des paramètres géotechniques  | Besoin de connaissances très détaillées de la zone étudiée<br>L'utilisation des modèles géotechniques adaptés requiert une grande expérience<br>Ne prend pas en compte des incertitudes variables | Na      | Na | Re | Op  |
| <b>Stabilité d'un versant et zonage géotechnique</b><br>Approche probabiliste<br>( <i>probabilistic approaches</i> )  | Permet de prendre en considération différentes incertitudes. Méthodologie objective et quantitative<br>Fournit de nouveaux aperçus impossibles avec les méthodes déterministes | Requiert beaucoup de données<br>Les distributions des probabilités sont difficiles à analyser pour de faible niveau d'aléa  | Na      | Na | Re | Op  |
| <b>Déformation d'un versant, modèle rhéologique et couplage</b>   | Fournit les champs de pression et de déformations.<br>Permet les simulations et la prise en compte des interactions avec les ouvrages d'art, etc.                              | Requiert beaucoup de données, codes de calcul, paramétrisation, problème des interfaces, gestion des discontinuités, etc.   | Na      | Na | Na | Op  |
| <b>Zonage qualitatif</b><br>Analyse géomorphologique<br>( <i>field geomorphological analyse</i> )   | Permet une évaluation rapide tenant compte d'un grand nombre de facteurs   | Méthodologie totalement subjective utilisant des règles implicites qui empêchent une analyse critique des résultats   | Na      | Re | Op | Op  |
| <b>Zonage qualitatif</b><br>Combinaison de cartes d'index<br>( <i>combination of index maps</i> )   | Résout le problème des règles cachées<br>Totale automatisation des étapes<br>Standardisation de la gestion des données   | Subjectivité dans l'attribution des poids des valeurs des classes élémentaires de chaque paramètre  | Re      | re | Op | Op  |
| <b>Zonage statistique</b><br>Analyse statistique (bi-variée et multi-variée)<br>( <i>statistical analyse - bivariate and multivariate</i> )                   | Méthodologie objective<br>Totale automatisation des étapes<br>Standardisation de la gestion des données  | Collecte systématique et analyses des données des différents facteurs sont assez encombrants  | Op      | Op | re | Re  |
| <b>Zonage dynamique</b><br>Modèle dynamique spatialisé  | Fournit les champs de pression et de déformations.<br>Permet les simulations   | Requiert beaucoup de données, codes de calcul, paramétrisation, problème des interfaces, gestion des discontinuités, etc.   | Na      | Na | Op | Op  |
| <b>Zonage dynamique</b><br>Réseaux de neurones<br>( <i>neural network</i> )   | Méthodologie objective<br>Ne demande pas une connaissance théorique sur les aspects physiques des problèmes  | Difficulté dans la vérification des résultats quand des données instrumentales ne sont pas disponibles  | Na      | Na | Re | Op  |

Avec : Échelle : R (régional) ; M (moyenne) ; L (large) ; Loc (locale)  
Utilisation : Re (restrictive) ; Op (optimale) ; Na (non adaptée)

Tableau 3.1 : Avantages et inconvénients des différentes approches d'évaluation de l'aléa à différentes échelles (adapté d'Aleotti et Chowdhury, 1999).

Les problèmes de gestion des données (collecte, stockage et sélection) et leur degré de précision et de fiabilité sont maintenant abordés avant de présenter les moyens et méthodes d'acquisition des données d'entrée sur le terrain.

### **3.5. Données d'entrée pour les différents modèles**

Le nombre et la qualité des données dépendent du type d'approche envisagée et du problème considéré (type de mouvements), de l'extension de la zone d'étude, de l'échelle de travail adoptée, des objectifs de la recherche, des enjeux et des moyens financiers à disposition. Il faut savoir dès le départ si :

- la modélisation du mouvement de terrain ou l'évaluation de l'aléa est *qualitative* ou *quantitative* ;
- des données historiques sont disponibles ;
- des observations et investigations spécifiques doivent être envisagées.

Les données disponibles géologiques, hydrogéologiques, géomorphologiques, etc. seront trouvées dans des cartes, des rapports d'études ou de recherches, des investigations géologiques et géotechniques préliminaires, dans des bases d'informations historiques sur les mouvements, dans des bases de données climatiques ou bien encore de sismicité historique, etc. Des informations sur les aménagements passés se révéleront aussi utiles dans bien des cas.

Quelle que soit la méthodologie adoptée, les données d'entrée devront être sélectionnées seulement après avoir prudemment analysé les causes des instabilités passées et les causes probables d'une instabilité future potentielle.

#### **3.5.1. Les données d'entrée en fonction de l'échelle choisie**

Les données d'entrée nécessaires pour la modélisation des mouvements de terrain et l'évaluation de l'aléa aux différentes échelles définies au chapitre 1 (régionale, moyenne, large et locale) sont résumées dans le tableau 3.2 adapté de Soeters et Van Westen (1996). La liste est extensible, et seulement dans des cas idéaux toutes les données sont disponibles. Ces données d'entrée peuvent être subdivisées en cinq principaux groupes : *géomorphologie, topographie, géologie-géotechnique, occupation du sol et hydrologie*. Chaque groupe peut être subdivisé pour définir des couches de données (*data layers*). Chaque couche de données peut être représentée par une carte individuelle ne contenant qu'un *type de données*.

La seconde colonne indique les différents paramètres qui sont stockés dans les « tables d'attributs » (*attribute tables*) connectées avec chaque carte.

La troisième colonne donne la méthode utilisée pour collecter l'information de chacune des couches d'information en se référant aux *trois phases principales de collecte de données*, à savoir la *photo interprétation, le travail de terrain et les analyses de laboratoire*. Je reviendrai en détail dans le chapitre 4 sur ces différentes phases et les méthodes et techniques afférentes. Certaines couches de données, comme les accélérations sismiques et les cartes piézométriques, peuvent requérir l'utilisation de modèles spécifiques d'analyse et de traitement (comme des modèles hydrodynamiques ou hydrologiques) en complément des techniques d'acquisition conventionnelles. Des algorithmes spécifiques avec un SIG peuvent être utilisés pour convertir des MNT en classes de pente ou pour définir d'autres paramètres topographiques comme l'orientation ou l'exposition des pentes et le « local drainage direction, LDD » qui est la carte locale de direction d'écoulement (Van Westen, 1997).

Les trois dernières colonnes de ce tableau indiquent la relative faisabilité pour collecter certains types de données en fonction des quatre échelles considérées. Une carte utilisant des *unités cartographiques (terrain mapping units)* (Carrara et Guzzetti, 1995), par exemple, peut être préparée à une échelle du 1/10 000 mais sera d'une utilisation limitée en raison du caractère trop général des informations contenues.

Pour une approche à une échelle « régionale », la collecte de données détaillées pour les facteurs individuels (géomorphologie, lithologie, sols, etc.) n'est pas utile et en plus est très coûteuse. Les

données rassemblées pour cette échelle d'étude doivent être limitées à la délimitation des unités de terrain homogènes, par exemple à l'aide des cartes géologiques, des banques de données du sol et du sous-sol (Infoterre, par exemple en France), des inventaires et banques de données sur les séismes, etc., ou bien à l'aide d'imagerie satellite.

| Couche de données pour le zonage de l'aléa | Table de données  | Méthodes utilisées  | Echelle d'analyse |   |   |     |
|--|---|---|-------------------|---|---|-----|
|  |   |   | R                 | M | L | Loc |
| <b>Géomorphologie</b>                      |   |   |                   |   |   |     |
| 1. Zones cartographiées                    | Zones cartographiées  | IIS+observations (de terrain)   | 3                 | 3 | 3 | 3   |
| 2. Unités et sous unités                   | Description géomorphologique  | PIA+observations  | 2                 | 3 | 3 | 3   |
| 3. Mouvements de terrain (récents)         | Type, activité, épaisseur, dimensions, etc.   | PIA+ PIA diachronique + observations  | 1                 | 3 | 3 | 3   |
| 4. Mouvements de terrain (anciens)         | Type, activité, épaisseur, dimensions, date, etc.   | PIA+ PIA diachronique + Archives et documents   | 1                 | 3 | 3 | 3   |
| <b>Topographie</b>                         |   |   |                   |   |   |     |
| 5. Modèle numérique de terrain             | Classes d'altitude  | Sous SIG grâce à la carte topographique   | 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   |
| <b>Géologie et techniques associées</b>    |   |   |                   |   |   |     |
| 10. Lithologie                             | Lithologie, résistance de la roche, discontinuités, failles...  | Cartes géologique + PIA + observations, investigations terrain et laboratoire                                     | 2                 | 3 | 3 | 3   |
| 11. Séquences sédimentaires                | type de matériels, épaisseurs, classification USCS, granulométrie, densité, poids volumique, $C$ , $\phi$ | Modélisation grâce aux cartes : lithologiques, géomorphologiques, des pentes, observations terrain et laboratoire | 1                 | 2 | 3 | 3   |
| 12. Structure géologique                   | Failles, longueur, pendage, direction du pendage, axe des plis, etc.                                      | IIS+PIA+observations de terrain   | 3                 | 2 | 2 | 3   |
| 13. Données sismiques                      | Accélération sismique maximale  | Données sismiques + données géologiques+ modélisation   | 3                 | 3 | 3 | 3   |
| <b>Occupation du sol</b>                   |   |   |                   |   |   |     |
| 14. Infrastructure (récentes)              | Voies de communication (type de routes, chemin de fer...), extension urbaine                              | PIA+carte topographique + 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                              | PIA+carte topographique   | 3                 | 3 | 3 | 3   |
| 16. Occupation du sol (récente)            | Type d'occupation du sol, densité d'arbres, profondeur des racines  | PIA+classification par images satellites+observations de terrain  | 2                 | 3 | 3 | 3   |
| 17. Occupation du sol (ancienne)           | Type d'occupation du sol  | PIA   | 2                 | 3 | 3 | 3   |
| <b>Hydrologie</b>                          |   |   |                   |   |   |     |
| 18. Drainage                               | Type, ordre, longueur   | PIA+carte topographique   | 3                 | 3 | 3 | 3   |
| 19. Bassin versant                         | Ordre, taille   | PIA+carte topographique   | 2                 | 3 | 3 | 3   |
| 20. Précipitations                         | Précipitations au cours du temps  | Données issues de stations météorologiques  | 2                 | 3 | 3 | 3   |
| 21. Température                            | 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 | 2 | 3   |

Avec : Échelle R (régional); M (moyenne), L (large) et Loc (locale)

Note : la dernière colonne indique les possibilités de collecte des données, selon trois échelles d'analyse : 3 = bon, 2 = moyen, 1 = très moyen.

Abréviations utilisées : IIS = Interprétation par Image Satellite, PIA = Photo-Interprétation Aérienne, MNT = Modèle Numérique de Terrain, SIG = Système d'Information Géographique,  $K_{sat}$  = test conductivité à saturation.

Tableau 3.2 : Inventaire des données d'entrée nécessaires pour l'étude des mouvements de terrain : types de données, méthodes utilisées et possibilité de collecte en fonction des échelles analyse retenues (d'après Soeters et Van Westen, 1996)

Pour une échelle « moyenne » presque toutes les couches de données du tableau 3.2 peuvent être facilement rassemblées à l'exception d'informations précises sur les nappes d'eau et sur des informations géotechniques. Les données collectées à cette échelle devraient être focalisées pour la production de cartes de données multi-temporelles sur la distribution des mouvements de terrain et de divers paramètres nécessaires pour les analyses statistiques.

Pour les études menées à une échelle « large » (quelques dizaines de km<sup>2</sup>) et *a fortiori* à l'échelle « locale » du versant, toutes les données doivent être collectées. Des informations précises sur la géométrie 3D, la structure géologique, les paramètres géotechniques et les pressions interstitielles sont indispensables pour les études détaillées à l'échelle d'un site.

### 3.5.2. Gestion des données : collecte, stockage et sélection

Quelque soit l'échelle de travail, la première étape dans toute analyse consiste en la collecte de toutes les informations et données disponibles dans la zone d'étude. L'importance de la précision dans la collecte et le stockage des informations a été largement décrit dans de nombreuses publications (Carrara, 1983 ; Cruden et Brown, 1992 ; Chowdhury et Flentje, 1988 ; Maquaire, 1990 ; Wiczoreck, 1984) mais c'est sans aucun doute l'opération la plus « lourde » dans ce domaine de la modélisation des phénomènes et de l'évaluation de l'aléa, quelle que soit l'approche particulière adoptée ou l'étendue de la zone d'étude.

Des chercheurs estiment que le coût de la collecte et de la gestion des données s'élèvent à environ 70 à 80 % du coût total de la recherche, en incluant la révision et la remise à jour (*review and updating*) (Leroy, 1996). Opérations qui sont grandement facilitées maintenant par les Systèmes d'Information Géographiques (SIG) couplés à des Systèmes de Gestion des Bases de Données (SGBD). Deux règles fondamentales doivent être observées au moment de la création d'une banque de données (Leroy, 1996) :

- les informations doivent être homogènes, c'est à dire être à la même échelle de travail et dans le même système de projection cartographique ;
- la banque de données doit être organisée à partir de couches mono-thématiques (une couche par type d'information). Les données pourront être représentées par des points, lignes, ou des surfaces et polygones et être accompagnées d'une ou de plusieurs tables d'attributs qui définissent les caractéristiques de chacune des données de base.

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

- le recensement des mouvements existants (codification de référence pour chacun) incluant leur nature, leurs dimensions, leur localisation et leur historique (date de déclenchement, de réactivation, etc.) ;
- toutes informations disponibles et acquises lors de précédentes investigations (interprétation de photographies aériennes, essais de laboratoire, observations sur le terrain incluant les analyses en retour des ruptures ;
- les nouvelles données acquises à partir d'une observation, d'un suivi de surface, d'une investigation, d'une instrumentation (inclinomètres, piézomètres, etc.).

Une grande part de travail consiste en la *sélection puis la critique des données fiables* qui peuvent être « noyées » dans les données de qualités très diverses. Cette sélection s'opère en examinant la source de ces données, la forme et le mode de stockage. La qualité des données est généralement très variable, comme leur niveau de précision. Aussi, les données mal référencées, pour lesquelles un sérieux doute existe, seront systématiquement rejetées pour ne pas risquer d'introduire un biais dans l'analyse.

Des mises à jour doivent être également régulièrement réalisées. En effet, des informations additionnelles sont souvent disponibles par la découverte de nouvelles sources historiques ou par la fourniture de nouvelles données obtenues par des investigations complémentaires.

Il sera par conséquent nécessaire de développer des procédures et des méthodes de mise à jour des données concernant aussi bien les zones actuellement stables que les zones qui ont déjà été

soumises à un mouvement de terrain. L'objectif ou le niveau souhaité de détail et de fiabilité pour toutes ces informations sera déterminé pas seulement par le but et l'importance du projet mais aussi par les disponibilités financières et autres ressources.

### **3.6. Conclusion**

Cette partie a permis de bien distinguer les différentes méthodes de modélisation d'un versant et d'évaluation de la susceptibilité et de l'aléa à l'échelle d'un bassin-versant. Le transfert d'échelle peut être envisagé pour certaines approches sous réserve d'en vérifier les conditions de transposition. Des tests de scénario peuvent être entrepris en tenant compte des évolutions à court terme, mais également à long terme, comme par exemple l'évaluation des impacts du changement climatique global. Les résultats obtenus peuvent ensuite servir à la gestion de l'aléa par les différents services compétents.

L'application de ces différentes méthodes est généralement limitée par le manque de données d'entrée quantitatives fiables. Ces données d'entrée subdivisées en cinq principaux groupes (*géomorphologie, topographie, géologie-géotechnique, occupation du sol et hydrologie*) doivent être acquises selon un échantillonnage spatial, une fréquence et une durée propres à la diversité des types de mouvements considérés et à l'échelle de travail choisie.

L'acquisition et la construction de bases de données multi-paramètres, multi-échelles spatiales et temporelles dans une zone donnée ou sur un mouvement de masse actif, au comportement qui peut être changeant avec le temps et les conditions climatiques, est donc un pré-requis au développement et à la validation de modèles physiques de fonctionnement.

Dans ma démarche, je privilégierai dans un premier temps l'application à des échelles locales de modèles géotechniques (déterministes et probabilistes) couplés à des modèles hydrologiques et dans un second temps, l'utilisation, à des échelles larges, de méthodes d'évaluation et l'aléa qui ne sont pas encore choisies.

Le prochain chapitre est consacré à la présentation des différentes méthodes (couplage géomorphologie-géotechnique) pour acquérir les données de base de manière à appréhender la structure, le fonctionnement et la répartition des phénomènes étudiés et à nourrir les différents modèles.



## Chapitre 4 : Etat de l'art des outils et méthodes de collecte des données d'entrée

Le chapitre précédent a permis de définir l'ensemble des données nécessaires à la modélisation des mouvements de terrain et à l'évaluation des aléas. Ce chapitre présente les méthodes et techniques qui permettent de mesurer et de surveiller les déformations de surface, et d'ausculter la structure interne (géométrie 3D, interface des couches, etc.) des zones d'études. Ainsi, les méthodes d'investigation géophysiques et géotechniques complémentaires des investigations géomorphologiques seront développées.

Les techniques de collecte, d'inventaire et de recherche des données historiques ou récentes et les problèmes associés qui sont à mon avis bien connus des géomorphologues ne seront pas présentés (Ballais *et al.*, 1984 ; Flageollet, 1988 ; Maquaire, 1990). Il en est de même des techniques et méthodes permettant de collecter et enregistrer les données climatiques. Comme de celles qui permettent de préciser l'âge des mouvements anciens, de *manière relative*, par comparaison entre eux, ou par référence à d'autres manifestations morphologiques elles-mêmes datées (moraines, terrasses), ou de *manière absolue*, par datation d'objets ou de matériaux inclus dans les accumulations : arbres, datés par  $C^{14}$ , ou par dendrochronologie (Flageollet, 1988 ; Panizza *et al.*, 1996). Ou bien encore, la dendrogéomorphologie qui permet, par l'observation minutieuse des anneaux de croissances des arbres, de détecter les périodes et les secteurs d'activité sur de longues périodes (Fantucci et Sorriso-Valvo, 1999). Les essais et analyses au laboratoire ne font pas l'objet non plus d'une présentation. Ils seront abordés dans le chapitre 7 qui présente les résultats obtenus.

Les moyens et les méthodes d'auscultation (surface et profondeur) et de surveillance d'un mouvement de terrain qui ont connu d'énormes progrès techniques depuis une vingtaine d'années sont décrits exhaustivement dans de nombreux ouvrages et articles. En complément, des références citées dans le texte, je peux citer par exemple les références suivantes : Costet et Sanglerat, 1981 ; Filliat, 1981 ; EPFL, 1985a, 1985b ; Philipponnat, 1987 ; Flageollet, 1988 ; Schlosser, 1988 ; Maquaire, 1990 ; LCPC, 1994a ; Besson, 1996 ; Turner et Schuster, 1996 ; Gili *et al.*, 2000 ; etc.). Il s'agira ci-après de donner seulement les avantages, limites et inconvénients des différentes méthodes les plus couramment employées.

### 4.1. Méthodes de cartographie et de surveillance des mouvements de terrain

A travers le monde, plusieurs sites instables sont instrumentés par des techniques de surveillance choisies en fonction des précisions recherchées selon des dispositifs adaptés à l'intensité des phénomènes considérés (chute de blocs, écroulements de falaise, coulées de débris, glissements, ...) et aux risques induits. C'est par exemple, en France, le glissement de La Clapière (Follaci, 1999), Les Ruines de Séchilienne (Rochet, 1992), la coulée de La Valette (Colas et Locat, 1993), sur la côte Sud de l'Angleterre, le glissement de St Catherine Point (Bromhead *et al.*, 1988) ou bien encore en Italie la coulée d'Alvera (Gaspareto *et al.*, 1996 ; Angeli *et al.*, 1999) et le glissement de Tessina (Mantovani et Angeli, 1999).

La caractérisation cinématique des mouvements de terrain impose d'intégrer des mesures de déformation de surface et en profondeur, selon un *large spectre spatial et temporel*. Sur le plan temporel, (1) la géométrie du corps de la masse en mouvement peut évoluer sur plusieurs dizaines d'années, (2) les champs de vitesse (verticaux et latéraux) évoluent selon des rythmes climatiques saisonniers, et (3) les déformations ou ruptures paroxysmiques se produisent souvent instantanément, en fonction de conditions atmosphériques exceptionnelles et de l'évolution/préparation du matériau. Ces ruptures sont très souvent associées à des *indices précurseurs*.

Il est important d'insister sur le choix des techniques adaptées et leur complémentarité éventuelle. Pour simplifier, il est possible de distinguer les mesures au sol, celles établies à partir d'imagerie

optique aérienne et spatiale et enfin celles élaborées à partir du traitement de signaux radar. Il est préférable de les utiliser de manière combinée pour les valider mutuellement et ainsi améliorer la compréhension des mécanismes en jeu. On distingue également généralement les méthodes et techniques qui permettent l'acquisition de valeurs ponctuelles en des points particuliers (ou cibles) répartis dans et en dehors de la zone en mouvement et celles qui permettent de générer des cartes de déformations de surface.

De même, il est possible de distinguer les données qui seront purement *qualitatives* (généralement acquises pour une échelle spatiale (*moyenne ou large*) par un instrument de mesures rudimentaires, ou bien encore estimées par simple comparaison de documents établis eux-mêmes à des échelles variables) et les données *quantitatives* acquises avec des instruments perfectionnés mis en œuvre à l'échelle *locale* d'un site. Les résolutions spatiales des capteurs varient du centimètre à la dizaine de mètres permettant d'étudier les hétérogénéités spatiales de la déformation et ses relations avec le mouvement d'ensemble du massif. Chaque échelle de temps nécessite des capteurs spécifiques caractérisés par une répétitivité et une date de début d'acquisition variables.

Même si dans quelques cas les outils et les méthodes de mesures sont les mêmes pour la *cartographie* et la *surveillance*, je choisis de les présenter successivement l'une après l'autre pour éviter les confusions même si cela conduira parfois à quelques répétitions mineures.

#### **4.1.1. Cartographie morphologique et génération de MNT**

La cartographie morphologique est un préalable à toutes autres actions. Elle permet à partir d'un relevé précis et minutieux des différents indices de surface de détecter une zone instable, de mettre en évidence les différentes parties d'un mouvement de terrain et de tenter de le caractériser d'un point de vue typologique en distinguant par exemple, en particulier la zone d'ablation, la zone d'accumulation et de fournir des indications pertinentes sur son fonctionnement (Dikau *et al.*, 1996a). Sont relevés les escarpements (principaux, secondaires, ...), les zones bosselées, fracturées, humides, végétalisées, etc. Le port et la forme des arbres (Kirchhoffer, 1994) fournissent de précieuses informations sur la nature du mouvement (rotation, translation, ...). De même, l'existence ou l'absence de végétation apporte des indices quant à l'activité d'un mouvement et/ou à son âge. Elle permet ainsi une vérification « terrain » d'informations relevées par ailleurs lors d'une phase préliminaire de collecte des données existantes (archives, études spécifiques, recherches académiques, etc.) ou d'analyse comme la photo-interprétation et l'établissement de la carte d'inventaire des mouvements de terrain.

Par ailleurs, la présence de fractures et de fissures révèle l'activité d'une zone particulière et fournit des indices annonciateurs de rupture ou d'extension du mouvement, de fragilité d'une zone, qui pourrait être soumise sous peu à un mouvement (affaissement, glissement, ...). La forme des fissures est également indicatrice. Par exemple, les fissures dans le sens de la pente sont appelées fissures longitudinales (ou de cisaillement). Leur présence signifie que les compartiments situés de part et d'autre de la zone de fissures ont des cinématiques différentes. Les fissures perpendiculaires à la pente (ou fissures de traction) indiquent la présence d'une rupture de cohésion entre les compartiments amont et aval de la zone de fissures.

Cette cartographie morphologique peut être entreprise à différentes échelles :

- à l'échelle *moyenne* à partir d'une *stéréo-photo-interprétation* de photographies verticales, aux échelles généralement du 1/20 000 au 1/30 000, si possible orthorectifiées pour correctement localiser les phénomènes et formes caractéristiques qui seront vérifiés et complétés sur le terrain par un relevé morphologique. Le report est effectué le plus souvent sur des fonds de plans topographiques existants, généralement 1/25 000 agrandis au 1/10 000 voire au 1/5 000 si leur échelle est suffisante pour obtenir la précision recherchée et le report aisé des informations relevées sur le terrain. A noter que les photographies obliques (basse, plongeante) offrent des possibilités de détection élevée des indices micro-morphologiques, selon les conditions d'angle de prise de vue, de l'émulsion (infrarouge fausse couleur, par exemple), d'éclairage, d'occupation du sol (prairies, labours, couverture forestière), de la saison, etc. (Potherat *et al.*, 1999). Soeters et Van Westen (1996) fournissent pour chacun des différents types de mouvement de terrain les formes caractéristiques de la morphologie, de la végétation ou du drainage visibles par stéréo photo-interprétation. Plusieurs couples de

photographies aériennes permettent au lecteur de repérer par lui-même ces caractéristiques sur quelques exemples types.

- à l'échelle large et locale, par un levé topo-morphologique ou par la prise de photographies « verticales » spécifiques qui seront orthorectifiées et qui permettront par photogrammétrie numérique de générer des MNT.

Dans ce cas, les résolutions seront variables selon l'échelle des photographies (Girault, 1992 ; Chandler, 1999 ; Weber et Herrmann, 2000 ; Westaway *et al.*, 2001). La qualité des MNT générés dépendra de l'acquisition précise de points de contrôle au sol distribués de manière homogène sur toute la zone. Les MNT permettent de générer des informations dérivées (carte des courbes de niveaux, délimitation de zones hypsométriques, carte de pentes, d'ensoleillement, d'intervisibilité, limites de bassins-versants, etc.).

A noter que pour des études à l'échelle régionale (en climatologie et hydrologie notamment) ou bien pour servir de documents illustratifs, des MNT sont créés à partir des diverses bases de données altimétriques nationales. Par exemple, en France, l'Institut Géographique National (IGN) commercialise la *BDAIti*, issue de la numérisation de l'ensemble des courbes de niveau saisies sur des cartes au 1/30 000 ou 1/25 000. Elle offre une résolution de 75 m et une précision de 2.5 m environ en altitude. Mais, bien souvent, ces valeurs sont beaucoup moins bonnes, surtout en région de montagne et ne sont pas toujours disponibles pour l'ensemble du territoire, comme pour *BDTopo* disponibles seulement pour l'instant dans quelques zones urbanisées. Il est également possible d'acquérir des orthophotos (*BDOrtho*) à l'échelle du 1/25 000 à 1/30 000. Le coût est approximativement de 1800 € pour un département.

#### 4.1.1.1. Cartographies topo-morphologique

Le principe consiste sur le terrain, à dessiner les formes, limites remarquables et indices d'instabilité (berges des ravines et cours d'eau, talweg, concavité, convexité, escarpement, fissures, fractures, écoulement, etc. ...) et à les repérer par des points topographiques numérotés et levés par tachéométrie ou par *Global Positioning System* (GPS). Si le nombre de satellites reçu est suffisant, le GPS est particulièrement adapté en zone de relief marqué ou avec nombreux obstacles (Fix et Burt, 1995 ; Higgitt et Warbuton, 1999 ; Mendonça Santos *et al.*, 2000). Le nombre et la distance entre chaque point dépend de la complexité de la morphologie et du degré de détail recherché : en général, pour un levé au 1/500, un point est levé tous les 10-20 m<sup>2</sup>. Le report et la mise au net sont effectués à partir du canevas de points référencés en XYZ : toutes les indications relevées sur le terrain sont ainsi redessinées à l'échelle. Ce type de cartographie à partir de levés topo-morphologiques terrestres est très précis (résolution de 1 m et précision inférieure à 5 cm). Le relevé précis en plan accompagné de celui des pentes ou pendage des couches permet le plus souvent une reconstitution iso-volumique des différents compartiments de la zone instable et dans le meilleur des cas de reconstituer la forme et la position de la surface de rupture en profondeur (Van Asch, 1984 ; Malet *et al.*, 2000a). Les indications relevées guideront le choix de l'implantation des différents points et secteurs auscultés avec les autres méthodes.

#### 4.1.1.2. Photogrammétrie numérique

Les développements récents de la photogrammétrie numérique font de cette technique, un outil de plus en plus utilisé, notamment en géomorphologie fluviale (Pyle *et al.*, 1997), en modélisation hydrologique (Webb, 1995 ; Walker et Willgoose, 1999), pour la reconstitution du micro-relief et de la rugosité de surface dans les études de ruissellement et d'érosion (Chandler, 1999 ; Hancock et Willgoose, 2001), le suivi du ravinement (Palacio-Prieto et López-Blanco, 1994), pour la quantification des volumes déplacés lors d'avalanche de neige (Ammann, 1999), pour le suivi de l'évolution de mouvements de terrain (Powers *et al.*, 1996 ; Girault et Memier, 1997 ; Weber et Herrmann, 2000), pour le suivi de l'érosion cotière en Algarve (Portugal) (Catalao *et al.*, 2002).

Sur le glissement de la montagne Les Pinières dans la Drôme, Girault (1997) réalise un examen comparatif de MNT à maille fine et d'images ortho-rectifiées, numériques, issus d'une analyse photogramétrique des clichés aériens de l'IGN de 1972 (échelle 1/30 000), 1991 et 1993 (échelle 1/8 000). Les ortho-images ont une résolution planimétrique de 0,50 m x 0,50 m, les MNT de 1 m x 1 m et l'incertitude sur le calage altimétrique de points de référence au sol est de 3 m. La comparaison des images numériques de 1991 et 1993 fournit des informations à une résolution de 1 m.

Pour des études menées à l'échelle d'un bassin versant, différentes techniques de prise de photographies aériennes verticales permettent après éventuel mosaïquage et orthorectification de générer des MNT par photo restitution numérique ou bien de réaliser une photo-interprétation et dessiner des cartes morphologiques. D'après Henry *et al.* (2002), plusieurs solutions sont disponibles (Figure 4.1).

La première solution consiste en une reconstitution photogrammétrique à partir de couples de photographies (format 23 x 23 cm type IGN) à des échelles du 1/25000<sup>ème</sup> à 1/30000<sup>ème</sup>. Dans des zones à fort relief, la technique permet d'atteindre une précision d'environ 3 m en planimétrie et 10 m en altimétrie (Weber et Hermann, 2000). Ces missions sont réalisées à haute altitude et offre une faible répétitivité (une acquisition en moyenne tous les 5 ans environ sur l'ensemble du territoire depuis 1950) et une faible réactivité. La planification est prévue longtemps à l'avance suivant un programme rigide préétabli. Elles exigent le plus souvent des avions lourds présentant une bonne stabilité, un matériel de prise de vue spécifique et sophistiqué, des équipages expérimentés et une navigation très précise (Potherat *et al.*, 1999).

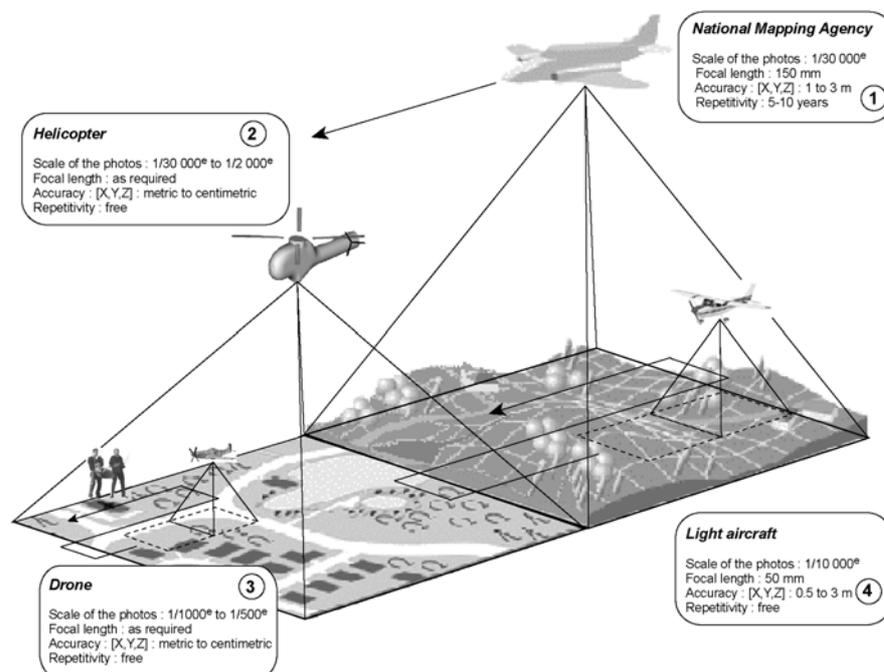


Figure 4.1 : les différents modes acquisitions de photographies et précision finale des MNT produits à partir de ces photographies (in Henry *et al.*, à paraître).

La seconde solution, qui améliore la résolution spatiale et la précision 3-D du modèle nécessite alors de disposer d'un couple de photographies aériennes verticales, grand ou moyen format, (50 mm x 60 mm, 24 mm x 36 mm...) prises à partir d'un hélicoptère, à une échelle du 1/500<sup>ème</sup> ou moins, dont le coût d'acquisition peut être rédhibitoire (1 heure de vol coûte près de 1000 €, surtout en région de montagne éloignée où il faut compter dans le prix, le trajet de l'appareil sur le site). Pour couvrir une zone large, et/ou parce que l'on utilise des appareils photographiques petit format (avec des objectifs de 35 ou 70 mm), une mosaïque d'images peut alors être réalisée.

La troisième solution, moins onéreuse que la photographie par hélicoptère, est de réaliser des prises de vue à partir de drones télécommandés (petits avions, hélicoptères ou ailes volantes type parapente) (Tapponnier *et al.*, 1999) qui permettent d'atteindre de petites parcelles inaccessibles ou dangereuses pour des pilotes, à des altitudes de vol en dessous de 200 m ; la restitution du relief, à partir d'une chambre grand ou moyen format, est très fine, de l'ordre du décimètre. Ces avions télécommandés ont néanmoins l'inconvénient de devoir être pilotés à vue, nécessitent de disposer d'une piste d'envol plate située également dans le champ de vision du "pilote", configuration pas forcément facile à trouver en zone de relief, et surtout n'offrent pas la possibilité de réaliser de mosaïquage sur plusieurs bandes. Les clichés ne peuvent pour l'instant qu'être pris avec

recouvrement sur une seule bande ; la juxtaposition de plusieurs bandes parallèles est difficile à mettre en œuvre et nécessite un GPS sur le drone et des moyens de téléguidage évolués.

Finalement, une quatrième solution, peu coûteuse et qui offre le grand avantage d'un temps de réponse court pour la prise de vue, consiste à utiliser des chambres de prises de vues de petit format (35 mm), et de réaliser des photographies quasi-verticales à partir d'un avion de tourisme à ailes hautes généralement disponibles dans les aéro-clubs locaux. Une solution intermédiaire consiste à faire prendre des photographies aériennes à un cabinet privé (Sintégra, par exemple dans le Sud Est) qui peut réaliser des clichés à des échelles du 1/8 000 voire 1/4 000 avec une chambre métrique (Girault, 1997). Selon la résolution et la précision recherchée, les différents clichés peuvent ensuite être mosaïqués. Au cours de la dernière décennie, plusieurs expériences de couverture aérienne ont été tentées, de manière expérimentale (Graham et Read, 1984) ou opérationnelle (Heimes *et al.*, 1993 ; Rowe *et al.*, 1999). Cette technique a été mise en œuvre à Barcelonnette, les résultats obtenus seront présentés en seconde partie, chapitre 6).

#### 4.1.1.3. Imagerie spatiale optique

A l'échelle locale, les données spatiales optiques offrent peu d'intérêt pour l'étude des mouvements gravitaires en raison de l'inadéquation entre la résolution spatiale des images (10-20 m) et la taille caractéristique des zones en mouvement (généralement quelques centaines de mètres). Le tableau 4.1) (Soeters et Van Westen, 1996) fournit la taille minimale d'un objet nécessaire pour être identifié et interprété pour des conditions de contraste faibles ou élevées par les différentes images optiques aérienne ou spatiale. Elles sont utilisées aux échelles régionale, moyenne ou large pour définir les différentes unités morphologiques et géologiques et élaborer des cartes d'occupation du sol, et mettre en évidence ou détecter des zones particulières caractéristiques de secteurs « instables » : forêts ivres, zones humides, bosselées, etc. qui vont présenter une radiométrie particulière dont l'évolution pourra être mise en évidence par le traitement d'images diachroniques prises à des intervalles répétés d'une vingtaine de jours.

|                               | Landsat     |                        | Spot           |                |
|-------------------------------|-------------|------------------------|----------------|----------------|
|                               | Landsat MSS | Landsat TM             | Multi-spectral | Penchromatique |
| Nb de bandes spectrales       | 4           | 7                      | 3              | 1              |
| Résolution spectrale (µm)     | 0.5-1.1     | 0.45-2.35<br>10.4-12.5 | 0.5-0.9        | 0.5-0.7        |
| Résolution spatiale (m)       | 80          | 30*                    | 20             | 10             |
| Largeur (km)                  | 185         | 185                    | 2 x 60         | 2 x 60         |
| Stéréo                        | non         | non                    | oui            | oui            |
| Résolution temporelle (jours) | 18          | 18                     | 26             | 26             |

\* : 120 m en infrarouge thermique      TM: Thematic mapper

Tableau 4.1 : Comparaison des spécifications des images spatiales (in Soeters et Van Westen, 1996).

A noter que le nouveau satellite *Envisat* fournira des images à des résolutions métriques. Pour être un peu plus complet, il est possible de citer d'autres techniques qui permettent de générer des MNT comme l'imagerie Radar avec la radargrammétrie, etc.

#### 4.1.2. Mesure et suivi des déplacements et déformations de surface

Le suivi des mouvements de surface s'effectue de deux manières, selon l'échelle considérée : cela aboutit soit à une estimation plus ou moins grossière soit à une véritable quantification, à des résolutions spatiales et temporelles et à des précisions variables selon les méthodes et moyens mis en œuvre.

La première manière donnera des données qualitatives à semi-quantitatives. Elle consiste à comparer différents types de documents (cartes topographiques, photographies aériennes verticales ou obliques ou photographies terrestres, gravures, croquis, cadastres, etc.) qui représentent un instantané d'un site à différentes dates et parfois pour des périodes de temps assez longues : par

exemple, en France, les premiers plans cadastraux datent du début du 19<sup>ème</sup> siècle, ou bien encore les images stéréoscopiques de l'IGN sur le territoire national sont disponibles environ tous les 5 ans depuis 1950. La simple comparaison permet de reconstituer le développement historique de la zone instable à des échelles allant du 1/10 000 au 1/1 000 (EPFL, 1985a ; Maquaire, 1990 ; Martin et Weber, 1996 ; Powers et Chiarle, 1996 ; Weber et Herrmann, 2001).

La seconde manière consiste à réaliser des mesures *in-situ* des déplacements de surface, à l'échelle locale, en combinant une résolution spatiale et temporelle, adaptée aux vitesses d'évolution des phénomènes. Dans ce cadre, une grande variété de techniques (Tableau 4.2) a été utilisée pour suivre les mouvements de versants instables (Krauter, 1988 ; LCPC, 1994a ; Mikkelsen, 1996) :

| Méthode  | Utilisation                   | Mesure     | Etendue de               | Précision         |
|--|-------------------------------|------------|--------------------------|-------------------|
| Nivelle à vis micrométrique  | déplacement angulaire du sol  | da         | 0,125 rad                | $4.10^{-4}$ rad   |
| Fissuromètre à pige centrale                                       | mouvement de compartiments    | dD         | < 20 mm                  | ± 0,1 mm          |
| Mire à vernier   | ouverture de petites fissures | dD         | < 200 mm                 | ± 0.5 mm          |
| Extensomètre à base courte   | ouverture de fissures         | dD         | 25 - 450 mm              | ± 0,1 mm          |
| Distance-mètre à fil d'invar                                       | déplacement de points mobiles | dD         | jusqu'à 40 m             | ± 0,1 mm          |
| Extensomètre à base longue en fil d'invar                          | déplacement de points mobiles | dD         | jusqu'à 100 m            | ± 0,5 mm          |
| Niveau de chantier   | variation d'altitude          | dZ         | variable                 | 2 cm              |
| Distance-mètre électro-optique                                     | déplacement de cibles mobiles | dD         | 1 - 10 km                | 7 mm<br>± 1-5 ppm |
| Théodolite et distance-mètre électro-optique                       | déplacement de cibles mobiles | dX, dY, dZ | 1 - 10 km                | 3 mm<br>± 1-5 ppm |
| GPS  | déplacement de cibles mobiles | dX, dY, dZ | Ligne de base < 20 km    | 2 mm              |
| Photogrammétrie terrestre  | déplacement de cibles mobiles | dX, dY, dZ | < 200 m                  | 40 mm             |
| Photogrammétrie aérienne   | déplacement de cibles mobiles | dX, dY, dZ | H <sub>vol</sub> < 500 m | 10 cm             |
| Interférométrie radar INSAR <sup>1</sup> .<br>DORIS <sup>2</sup> . | comparaison de MNT            | dX, dY, dZ | variable                 | 3-5 mm            |
|  | déplacement de cibles mobiles | dX, dY, dZ | variable                 | 2 mm              |

1. Interferometric Synthetic Aperture Radar

2. Détermination d'Orbites et Radio-Positionnement Intégrés par Satellite

da : angle ; dD : distance ; coordonnées planimétriques (dX, dY) et altimétriques (dZ) dans repère relatif ou absolu

Tableau 4.2 : Caractéristiques des principales méthodes de suivi des déplacements (in Malet et al., 2002a).

#### 4.1.2.1. Mesures au sol

Des fissuromètres ou des extensomètres à base courte ou longue sont utilisés pour mesurer les variations de distance entre des points mobiles et l'ouverture de fissures (Photo 4.1 et 4.2), sur des escarpements rocheux (Gulla et al., 1988 ; Evrard et al., 1990) ou sur des constructions (LCPC, 1994b). Il existe aussi des écartomètres de grande longueur 100 m à 1 km. Les déplacements sont mesurés ponctuellement ou en continu. "Pour la mesure en continu, la méthode consiste à relier par un fil d'invar un ou plusieurs points "mobiles" à quelques points "fixes" de référence, et d'enregistrer les variations de ces liaisons dans le temps (EPFL, 1985b ; Angeli et al., 2000 ; Malet et al., 2002a). Les déformations mesurées, qui correspondent au déroulement du fil, sont absolues ou relatives, suivant qu'un seul, ou les deux points d'attache du fil se déplacent. Ce principe a été appliqué, dès les années 1930 pour l'étude de mouvements le long de failles tectoniques ou au contrôle du fluage des glaciers (Röthlisberger et Aellen, 1970). Ce n'est que dans les années 1980 que cette technique est appliquée aux mouvements de terrain, avec des précisions n'excédant pas, au mieux 2 à 3 cm (Schlemmer, 1982 ; Sassa, 1984), puis moins d'un centimètre (Engel, 1986 ; Angeli et al., 1995). Les premiers dispositifs avaient un enregistrement graphique selon le principe de l'horloge limnigraphique, avec tous les problèmes inhérents (stylet, déroulement du papier, dépouillement). Les systèmes

modernes (roue potentiométrique reliée à une centrale d'acquisition) permettent de s'affranchir de ce type d'erreur et offrent un pas de scrutation plus fin.

*Les niveaux de chantier, les théodolites, les distance-mètres et les stations géodésiques totales* permettent de mesurer les déplacements d'un versant par le suivi de cibles "mobiles" répartis dans la zone instable (Maquaire, 1990). Les équipements modernes déterminent des angles horizontaux et verticaux au mieux à  $10^{-4}$  grades (soit un déplacement de 1,57 mm pour un point éloigné de 100 m) et des distances obliques millimétriques (écart-type 3-5 mm + 1 ppm, avec correction d'atmosphère). Ces cibles seront visées au moins à partir de deux stations de mesures par triangulation (angles et distances) pour obtenir un meilleur positionnement que par simple triangulation (angles) ou trilatération (distances). Théoriquement, en trilatération, les équipements permettent l'obtention de précisions inférieures à 5 mm, sous réserve de nombreuses précautions et vérifications (EPFL, 1985a ; Maquaire et Levoy, 1987).



*Photo 4.1 : Fissuromètre à fil Invar de part et d'autre de fractures ouvertes le long des falaises du Cap Blanc Nez, Pas-de-calais, France.*



*Photo 4.2 : Fissuromètre : système de mesure de précision à vis micrométrique de l'allongement de la base de mesure.*

Le GPS (Hofmann-Wellenhof *et al.*, 1997) est une technique de positionnement satellitaire largement utilisée pour la mesure des déformations actives de la croûte terrestre (Dixon, 1991). L'utilisation de données de phase permet de déterminer les positions relatives de points situés à plusieurs centaines de kilomètres de distance avec une précision de 2-3 mm en horizontal et 5-10 mm en vertical. Depuis 1994, le système GPS est complètement opérationnel. Les équipements sont moins chers, moins lourds et plus faciles à utiliser. De nouvelles procédures, méthodologies et logiciels ont été développés pour l'enregistrement et le post-traitement des données. Le GPS est ainsi de plus en plus utilisé dans une grande variété d'applications courantes (points de contrôle au sol, positionnement de forages, suivi du trait de côte ou de la morphologie des lits fluviaux, réalisation de MNT). Le choix d'un récepteur adapté, les stratégies d'acquisition des données dépendent des objectifs de l'étude. Les modes d'acquisition et de traitement adaptés seront trouvés dans Malet *et al.* (2002a).

Le GPS a été utilisé à partir du milieu des années 1980, avec des précisions de  $\pm 4$  mm pour positionner le Positron du Centre Européen pour la Recherche Nucléaire (Gervaise *et al.*, 1985) ou pour suivre les déformations crustales (Larson et Agnew, 1991). Dans le domaine de l'environnement, le GPS a été utilisé pour suivre les mouvements des terrils ou des carrières (Joass, 1993), surveiller des volcans (Pingue *et al.*, 1998 ; Sheperd *et al.*, 1998) ou des failles tectoniques majeures (Peler *et al.*, 1998), prévoir des tremblements de terre (Newmann *et al.*, 1999), contrôler l'écoulement et le fonctionnement des glaciers (Sjoberg *et al.*, 2000) ou mesurer des hauteurs de neige (Theakstone *et al.*, 1999). La technique s'applique également, avec une précision suffisante, au contrôle d'ouvrages, tels les barrages (Brown *et al.*, 1999 ; Hudnut et Behr, 1998) et aux mesures des variations de hauteurs d'eau liées aux marées (Bessero, 1993). Pour la surveillance des mouvements de terrain, le GPS n'est utilisé que lors de campagnes de mesures ponctuelles répétées (Hiura *et al.*, 1996 ; Barbarella, 1998 ; Gili *et al.*, 2000 ; Bogaard *et al.*, 2000), en complément des méthodes conventionnelles.

Les techniques d'auscultation géodésiques conventionnelles (triangulation, distancemétrie) et les techniques d'extensométrie (Angeli *et al.*, 2000) restent les plus couramment utilisées, car elles permettent d'atteindre des précisions de quelques millimètres sur des lignes de bases courtes, inférieures au kilomètre. Mais progressivement, le GPS offre des potentialités élevées en particulier dans le cas où la configuration du site n'est pas adaptée aux mesures optiques. En effet, par rapport à ces dernières, le GPS permet de s'affranchir de la nécessité d'un ou plusieurs sites stables situés en face du mouvement de terrain, et en outre le suivi par GPS ne nécessite pas une vision directe entre les sites de mesure. Le site GPS "fixe" peut par exemple être localisé dans une vallée voisine. De plus, les mesures peuvent être effectuées par tout type de temps (pluie, neige, brouillard, fort soleil) et de nuit. Le GPS offre une précision plus homogène dans les trois dimensions que les techniques optiques. Enfin, sous réserve d'automatiser les méthodes de dépouillement des données, le traitement peut être effectué par un non spécialiste (Malet *et al.*, 2002a).

#### **4.1.2.2. Photogrammétrie terrestre et aérienne : Imagerie optique**

Concernant *l'imagerie optique*, la *stéréo-photogrammétrie terrestre ou aérienne* fournit les coordonnées de points "mobiles". Elle offre la possibilité de réaliser une carte morphologique, de générer des MNT et des profils en travers de la zone instable et de quantifier en 3D les mouvements du sol. L'imagerie optique fixe par la prise d'images haute résolution face à la zone instable offre un fort potentiel. Cette technique permet, en acquisition permanente de suivre automatiquement les mouvements par corrélation d'images et en prise de vue rapprochée de suivre les mouvements de surface locaux (inférieurs au centimètre). Elle offre l'avantage de fournir directement une carte des déformations de surface et non plus des valeurs ponctuelles. Les précisions obtenues dépendent, bien évidemment de la qualité et de l'échelle des photographies et des techniques d'analyse. Les progrès récents accomplis avec une nouvelle technique d'orthorectification d'images (Casson *et al.*, 2002) et la mise au point d'un drone lent devraient permettre dans les années futures d'approcher des précisions centimétriques pour la mesure des champs de déplacements.

#### **4.1.2.3. Imagerie spatiale : Radar**

*L'interférométrie radar*, utilisant les données SAR (*synthetic-aperture radar*) de satellites comme ERS-1 et 2 ou bien encore RADARSAT-1, peut permettre de réaliser un suivi temporel grâce aux images prises à des intervalles répétés d'une vingtaine de jours et d'obtenir des champs de déplacements à des précisions de quelques millimètres (Fruneau *et al.*, 1996 ; Mantovani *et al.*, 1996 ; Mohr *et al.*, 1998 ; Kimura et Yamaguchi, 2000). Mais des contraintes majeures demeurent qui ne permettent pas toujours d'appliquer cette technique. Compte tenu de la configuration des capteurs spatiaux et de leur opération, la surveillance est assez difficile voire impossible avec InSar. En effet, les zones instables correspondent souvent à des zones assez fortement végétalisées, des conditions de sol humide et des terrains pentus qui brouillent les interférogrammes et rendent impossible l'exploitation. Ainsi, les analyses InSAR sont plus efficaces pour des sites relativement secs ou faiblement végétalisés, peu ou modérément pentus où les mouvements sont plutôt lents. Les déplacements ne peuvent être bien mesurés que s'ils sont orientés perpendiculairement au plan de vol (Bulmer *et al.*, 2002a). Sur le glissement de Black Ven (côte du Dorset), Bulmer *et al.*, (2002b) obtiennent tout de même des champs de déplacements à une précision de l'ordre de 10 mm malgré des conditions difficiles (végétation, humidité, terrains pentus, ...). A noter, la méthode DORIS qui a été appliquée avec succès par Bogaard *et al.* (2000) sur un versant instable dans la Drôme (France).

## 4.2. Méthodes d'auscultation et de suivi en profondeur

La géométrie tridimensionnelle, les propriétés physiques, mécaniques et rhéologiques de la masse en mouvement et de son encaissant peuvent être obtenues en couplant différentes *méthodes géophysiques et géotechniques*. Ces méthodes, permettant d'ausculter à des échelles spatiales et temporelles complémentaires, sont à des stades différents de développement instrumental et méthodologique. Les premières sont des méthodes d'investigation *indirectes* qui permettent d'obtenir des profils continus 2D des différentes couches ou bien parfois une image 3D. Les secondes sont des méthodes d'investigation *directes* par *forages ponctuels*. Ces deux familles de méthodes sont complémentaires et sont très souvent mises en œuvre conjointement ou successivement (les forages ponctuels seront implantés en fonction des résultats obtenus en géophysique pour servir de calage et/ou de validation).

### 4.2.1. Les méthodes géophysiques

Les fondements des méthodes géophysiques sont développés dans McGuffey *et al.* (1996) et Reynolds (1997), et plus particulièrement dans Kaufmann et Keller (1983) et Desclôîtres (1998) pour la méthode TDEM. Les principes de base théoriques, les domaines d'application des différentes méthodes retenues et les différents dispositifs utilisés ne seront pas développés ici. Les méthodes électriques et sismiques ont été massivement employées sur les mouvements de terrain depuis une trentaine d'années et de nombreux résultats ont été présentés (Cummings et Clark, 1988 ; Palmer et Weisgarber, 1988 ; MacCann et Forster, 1990 ; Frappa et Lebourg, 2001 ; etc.).

A la suite du symposium sur « *Geophysical Investigation of Landslides and Unstable Slopes* » qui s'est tenu à La Haye en avril 1999 lors de la 24<sup>ème</sup> assemblée de l'EGS (*European Geophysical Society*), un numéro spécial de la revue « *Surveys in Geophysics* » est consacré à ces méthodes de prospection géophysiques (Wasowski et Del Claudio, 2000). On y trouve en particulier un article de R. Hack qui présente les quelques méthodes les plus couramment utilisées et dont je reproduis ci-dessous un tableau synthétique des domaines et des performances respectives (Tableau 4.3).

Il est supposé que les conditions aux limites ont été remplies ; par exemple, pas de matériaux trop conducteurs en surface quand une prospection par géoradar est engagée.

| Méthode            |                  | Conduites, fondations, etc. | Détermination des propriétés géomécaniques | Structure         |            |                 |            |
|--------------------|------------------|-----------------------------|--|-------------------|------------|-----------------|------------|
|                    |                  |                             |  | Faible contraste* |            | Fort contraste* |            |
|                    |                  |                             |  | Simple**          | Complexe** | Simple**        | Complexe** |
| Sismique           | Réfraction       | --                          | +  | -                 | --         | ++              | -          |
|                    | Réflexion        | -                           | +  | +                 | +          | ++              | +          |
|                    | Tomographie      | -                           | +  | ++                | ++         | ++              | ++         |
| Electro-magnétique | F.F : EM 31/34   | ++                          | --   | -                 | --         | -               | --         |
|                    | Hte F : Géoradar | ++                          | --   | ++                | +          | ++              | ++         |
| Electrique         | Normal           | -                           | --   | -                 | --         | ++              |            |
|                    | Imagerie 2/3D    | -                           | --   | ++                | ++         | ++              | ++         |
| Micro-gravité      |                  | -                           | +  | -                 | --         | ++              | +          |

-- : pas approprié ; - : marginal ; + : bon ; ++ : très bon

\* : Faible et fort contraste font référence au contraste des valeurs des propriétés mesurées entre les différents matériaux qui constituent la structure ; \*\* : Structure simple et complexe se réfèrent à la complexité de la structure à mesurer, par exemple, simple peut être une structure à deux couches horizontales ou faiblement inclinées, etc., complexe peut être une structure composée d'une série de couches irrégulières, etc. par exemple des dépôts de laves torrentielles. F.F.: faible fréquence ; Hte F : haute fréquence.

Tableau 4.3 : Tentative d'indications des possibilités des méthodes géophysiques (in Hack, 2000).

Les méthodes géophysiques permettent de définir la géométrie tridimensionnelle et d'estimer les propriétés rhéologiques de la masse en mouvement et de son encaissant. La géométrie tridimensionnelle peut notamment être identifiée à partir de la résistivité électrique, de techniques électromagnétiques (TDEM, Géoradar...) et de mesures sismiques réfraction ou réflexion. Les méthodes électriques et électromagnétiques sont principalement sensibles aux variations de teneur en eau et les méthodes sismiques sont plus sensibles à la lithologie (densité, compaction). Ces méthodes nécessitent des processus d'inversion, conjointe ou non, de données devant se caler sur des informations de forages ponctuels.

Des informations sur la rhéologie du corps en mouvement peuvent être extraites de l'analyse spectrale des ondes de surface (SASW). Cette méthode permet de mesurer les caractéristiques rhéologiques sur des volumes de plusieurs dizaines de mètres cubes (Kim *et al.*, 2001). Elle est donc complémentaire des essais effectués en laboratoire, en intégrant l'hétérogénéité de la masse en mouvement.

Certaines déformations irréversibles localisées dans le temps et dans l'espace (fractures) induisent une sismicité mesurable. L'enregistrement de l'activité sismique permet donc de suivre avec un délai très bref, les mécanismes de déformation irréversible du matériau et de chercher les liens avec son comportement macroscopique. De plus dans la mesure où l'on est capable de localiser les sources sismiques, il est possible de déterminer les lieux de cette déformation irréversible.

#### 4.2.1.1. Méthodes sismiques

##### a) Sismique réfraction - Tomographie sismique - Ondes de surface - Mesure de bruit de fond

La méthode de *sismique réfraction* - basée sur l'inversion des temps d'arrivée des ondes les plus rapides - permet d'obtenir les vitesses de propagation des ondes P dans les différentes couches du sous-sol. Elle a été utilisée avec succès sur quelques mouvements de terrain (MacCann et Foster, 1990). Dans la version la plus simple de la méthode, les couches sont considérées comme homogènes et séparées par des interfaces planes. Si on met en œuvre un nombre suffisant de sources, on peut réaliser une *tomographie par sismique réfraction*, qui fournit une image en vitesse du milieu. Cette dernière technique a été utilisée sur le glissement de Séchillienne où on a tiré profit de la présence d'une galerie et elle a permis de représenter le massif cristallin jusqu'à une centaine de mètres de profondeur. Si lors de l'acquisition de longs profils de sismique réfraction, les *ondes de surface* sont également enregistrées, on peut inverser la courbe de dispersion des ondes de Rayleigh pour obtenir la vitesse de propagation des ondes S en fonction de la profondeur. En travaillant sur les vitesses de phase et en traitant les données par groupes de signaux, on peut mettre en évidence des variations latérales de vitesses dues par exemple à des zones fracturées. Une technique intéressante, en cours de développement à l'heure actuelle, est l'enregistrement du *bruit de fond* à partir d'un réseau de capteurs sismiques. Cette méthode permet également d'obtenir la courbe de dispersion des ondes de Rayleigh mais dans une gamme de fréquence plus basse que celle mesurée à partir de sources artificielles. La plus grande profondeur de pénétration obtenue pourrait s'avérer très utile dans le cas de glissements de terrain profonds. Enfin, le *bruit de fond* mesuré avec une seule station (méthode H/V) permet d'obtenir la fréquence propre du site. Cette méthode s'appliquerait dans le cas de glissements bien développés et déjà découplés de leur substratum.

##### b) Spectral Analysis of Surface Waves (SASW)

Les ondes sismiques de surface telles que les ondes de Rayleigh, se propagent parallèlement à la surface du sol, dans sa partie superficielle. Ce sont donc des ondes hétérogènes qui se propagent horizontalement et s'atténuent selon la profondeur. Chaque composante fréquentielle de l'onde se propage dans une épaisseur de terrain différente, les plus hautes fréquences se retrouvant dans les parties les plus superficielles. Dans les milieux stratifiés, où chaque couche est caractérisée par des propriétés mécaniques différentes, la vitesse de propagation varie avec la profondeur, et donc avec la fréquence. Cette caractéristique rend les ondes dispersives et c'est cette propriété qui est exploitée dans cette nouvelle méthode d'analyse (*Spectral Analysis of Surface Waves - SASW*). Le calcul de la vitesse de cisaillement en fonction de la profondeur est basé sur l'inversion de la courbe de dispersion, qui représente les variations de la vitesse de phase de l'onde de Rayleigh en fonction de la fréquence (Bitri *et al.*, 1998; Grandjean *et al.*, 2000). Sur le terrain, la mise en œuvre peut se réduire à un dispositif de 24 traces que l'on déplace en plusieurs bases qui servent autant à l'étude des ondes réfractées ou des ondes de surface. Si l'hypothèse d'un milieu stratifié horizontal n'est pas nécessaire en sismique réfraction, c'est une restriction nécessaire en SASW. Le milieu est donc inversé selon un modèle qui doit être 1D localement, c'est à dire à l'échelle du dispositif (cette obligation constitue une limite pour les milieux hétérogènes 3D). En déplaçant celui-ci sur plusieurs bases de tir, on tend à retrouver les hétérogénéités de plus grande échelle. L'application de cette technique dans un milieu fortement fracturé est plus délicate. A ma connaissance, cette méthode qui permettrait de mesurer les caractéristiques rhéologiques d'une masse en mouvement n'a pas encore été appliquée à une zone instable.

#### 4.2.1.2. Méthodes électriques et électromagnétiques

Les méthodes électriques à courant continu, électromagnétiques dans le domaine temporel et fréquentiel (EM 31, EM 34) mesurent le même paramètre physique, la résistivité électrique fortement corrélée à la teneur en eau et en argile. Ces méthodes sont complémentaires du point de vue de la sensibilité aux terrains conducteurs/résistants, mais également de celui de la profondeur d'investigation (Allen, 1997) : les profondeurs d'investigation atteignent couramment quelques dizaines de mètres. Le TDEM (*Time-Domain Electro-Magnetism*), permet d'atteindre des profondeurs de 30 à 40 m avec un dispositif restreint, et beaucoup plus avec un dispositif élargi (Descloîtres, 1998), mais est aveugle sur les 4-5 premiers mètres (Schmutz *et al.*, 2000a). Elles sont assez bien adaptées à la caractérisation géométrique et physique.

##### a) *Electrique*

Les méthodes utilisées permettent d'obtenir une imagerie 2D et 3D des structures du sous-sol dans des environnements géologiques de type tabulaire pour différents types de dispositif de mesures (Hack, 2000). La méthode de prospection électrique, permet à la fois de localiser les hétérogénéités verticales et latérales du massif et offre un potentiel intéressant pour localiser en profondeur les différents systèmes d'alimentation en eau des versants, en domaine rocheux (Lebourg, 2000). Des problèmes d'ordre méthodologique peuvent encore perturber les mesures (intégration de topographie complexe, fracturation importante de la zone sondée, difficultés d'accès et de mise en place des dispositifs de mesure, ...).

##### b) *Electromagnétisme en domaine temporel (TDEM)*

La limitation en terme de profondeur de sondage et de difficulté de mise en place de la méthode de la mesure par résistivimétrie peut être contournée en utilisant des techniques de sondage Electro-Magnétique en domaine temporel à source contrôlée (TDEM). Les principaux avantages de cette méthode sont sa profondeur de pénétration importante pour un dispositif géométrique relativement peu étendu en surface, et une grande sensibilité en présence de conducteurs. Cette technique a montré son efficacité sur le site de Super-Sauze dans une inversion couplée TDEM et électrique résistivimètre. (Schmutz *et al.*, 2000a ; Schmutz, 2000 ; Schmutz *et al.*, 2000ab ; Maquaire *et al.*, 2001).

##### c) *Georadar*

Les méthodes électromagnétiques de type Radar-sol ont montré un excellent potentiel pour la détermination des structures géologiques souterraines dans la gamme des 1 à 40 MHz. Ces méthodes permettent une investigation des 20 premiers mètres du sous sol avec une résolution inframétrique et une bonne détermination des discontinuités verticales et horizontales. Les performances de cet outil décroissent avec l'humidité du sol et ne sont pas applicables en milieu argileux. Les résultats sont donc parfois assez décevants sur un mouvement de terrain comme ceux obtenus avec cette méthode sur le glissement de Boup dans les Alpes Suisses (Bruno et Marillier, 2000). Par contre, les potentialités du géoradar doivent être évaluées sur les glissements rocheux. Cet appareil doit permettre d'obtenir une bonne cartographie 3D des discontinuités isolant les blocs.

#### 4.2.1.3. En guise de conclusion

Cette description sommaire ne constitue pas un état de l'art exhaustif, les progrès sont constants pour trouver de nouveaux modes de prospection ou de traitement des données. Il est possible encore de citer la microgravimétrie, technique développée à l'origine pour détecter en particulier les vides souterrains et qui a été récemment mise en œuvre sur un glissement rétrogressif des Apennins du sud en Italie. Elle a permis de mettre en évidence des hétérogénéités sur la couronne qui contrôlent la direction préférentielle des mouvements vers l'amont (Del Claudio *et al.*, 2000).

#### 4.2.2. Les méthodes géotechniques

Les méthodes géotechniques sont utilisées pour *l'investigation et les prélèvements d'échantillons*. Les forages sont généralement valorisés pour installer des équipements destinés à mesurer les déformations en profondeur et suivre les variations piézométriques. Des essais *in situ* y sont

également réalisés : pressiomètre, phycomètre, pompage, essais Lefranc, Lugeon, injection pour traçage naturel ou artificiel, etc.

#### 4.2.2.1. Investigation et prélèvements d'échantillons

L'investigation géotechnique permet de mettre en évidence la géométrie du sous-sol, de distinguer et caractériser, d'un point de vue physique et mécanique, les différents ensembles (couches) du sous-sol, et détecter les zones saturées. La reconnaissance est réalisée *ponctuellement* à partir d'engins mécaniques plus ou moins puissants qui permettent de pratiquer des forages de diamètres courants variant de 50 mm à plus de 300 mm jusqu'à des profondeurs de plusieurs dizaines voire plusieurs centaines de mètres. Ces forages peuvent aussi servir à faire des essais *in-situ* et à mettre en place un équipement particulier de mesures au cours du temps. Le nombre et la profondeur des sondages doivent être optimum pour investiguer correctement la zone d'étude sans se livrer à des interpolations fantaisistes et parfois hasardeuses entre deux forages successifs.

L'écartement ou le maillage de forages doit être réduit surtout en secteur très complexe et hétérogène. Généralement, en raison des coûts particulièrement élevés de ces différents forages, le nombre de points d'investigation est limité ; ces coûts sont souvent renforcés pour les sites d'accessibilité réduite imposant un hélicoptage très coûteux de matériels lourds absolument nécessaires pour pénétrer profondément dans le sol. Un matériel "léger" transportable à dos d'homme mais aux performances limitées ne peut permettre, dans ces environnements hétérogènes, d'atteindre une profondeur d'investigation suffisante. Pour ces raisons, les méthodes d'investigations de profilage indirectes, comme les méthodes géophysiques doivent être envisagées en complément indispensable. *Néanmoins, les informations apportées par les forages sont indispensables à toute étude*, ne serait-ce que comme point de calage et de validation des mesures géophysiques.

Il est possible de distinguer les différentes techniques qui permettent de relever des coupes et le prélèvement d'échantillons intacts ou remaniés pour des analyses et essais de laboratoire. Le matériel utilisé varie du plus simple (pelle et pioche, tracto-pelle ou pelle à chenille pour faire des fosses jusqu'à une profondeur maximale de 4 à 5 m) au plus élaboré et performant (appareillage sur remorque ou sondeuses auto-tractées). Les méthodes de forages les plus couramment utilisées permettent ou non le prélèvement d'échantillons intacts ou remaniés (McGuffey *et al.*, 1996) : forages à la tarière hélicoïdale (échantillon remanié), au vibro-percuteur avec gouges de prélèvement (échantillon très peu remanié mais parfois compacté), carotté par rotation (échantillon intact). Les forages destructifs par vibro-percussion ou rotation (eau ou air) permettent seulement de remonter des « cutting » (débris fins de matériels). Ils sont réalisés avec ou sans enregistrement des paramètres de forages (avancement instantané de l'outil en m/h, pression sur l'outil en MPa, etc.).

Des essais géotechniques *in situ* sont réalisés à partir de matériel spécifique parfois dans les forages précédemment décrits. Les matériels les plus couramment utilisés sont le pénétromètre dynamique lourd ou léger, le pénétromètre statique, le scissomètre, le pressiomètre, le phycomètre, etc. :

- le *pénétromètre* mesure la réaction qu'oppose le sol à l'enfoncement d'un cône. L'interprétation est délicate en particulier en milieu saturé (Waschkowski, 1983 ; Genêt et Malet, 1997) ;
- le scissomètre permet de mesurer la cohésion non drainée  $C_u$ . Il est bien adapté aux milieux saturés meubles ;
- les essais pressiométriques consistent à introduire dans un forage une sonde dilatable radialement sous l'effet de la pression d'un liquide incompressible. Une courbe pression-déformation-temps est obtenue qui permet de calculer la pression limite et le module de déformation du sol (Ménard, 1957 ; Gambin, 1979 ; Amar *et al.*, 1991).

*Des tubes inclinométriques* (PVC ou métalliques rainurés) permettent de déterminer des limites entre deux couches cinématiquement différentes. La méthode consiste à introduire dans un tubage une sonde inclinométrique et à mesurer l'angle qu'elle fait, à une profondeur donnée, avec la verticale (Dunncliff et Davidson, 1991). Les variations locales d'inclinaison du tube par rapport à la verticale et sa déformée dans le temps sont ainsi déterminées généralement tous les mètres et de manière ponctuelle dans le temps. La contrainte majeure réside dans le fait que ce tube n'admet que de faibles déformations totales, ainsi dans les zones à déplacement fort, sa durée de vie est très réduite. Pour

ces raisons, plusieurs auteurs ont développé des techniques de mesures avec fil extensométrique fixé au fond d'un forage dans le terrain stable (sous la surface de glissement) pour s'affranchir en partie de cette contrainte majeure en permettant une mesure en continu (Corominas *et al.*, 2000).

A noter également, que les forages peuvent servir à la réalisation des mesures géophysiques (Mikkelsen, 1996).

### **4.2.3. Mesures hydriques et hydrodynamiques**

Les méthodes géotechniques et géophysiques sont mises en œuvre pour localiser quantitativement les zones saturées en eau dans le versant et en suivre l'évolution spatiale et temporelle. L'eau qui est l'un des moteurs principaux de la dynamique des mouvements de terrain quelle que soit leur ampleur (Bromhead, 1987 ; Freeze, 1987 ; Haneberg, 1995 ; etc.) doit faire l'objet d'une attention particulière. Une autre méthode *indirecte* peut être appliquée pour caractériser l'état hydrique d'un massif et suivre son évolution temporelle (temps de résidence, chemins de l'eau, ...) : le *traçage naturel et artificiel des eaux*.

*Des tubes piézométriques* (PVC ou métalliques) crépinés permettent de suivre les variations du niveau d'une nappe libre ou captive, de manière ponctuelle ou continu à l'aide de capteurs limnigraphiques (sondes de pression, bulle à bulle, etc. reliés à une centrale d'acquisition). Il est possible encore de citer sans être complet, d'autres équipements comme : tubes et sonde TDR (*Time Domain Reflectometry*) pour la mesure de la teneur en eau le long de profils continus, cannes tensiométriques pour les mesures du potentiel capillaire du sol, infiltromètre à disques sous succion contrôlée (TRIMS) pour les mesures d'infiltration, capteurs de pression interstitielle, etc.

#### **4.2.3.1. Résonance Magnétique Protonique (RMP)**

La RMP est une méthode sélective, aucun signal autre que provenant de l'eau souterraine n'existe à la fréquence de résonance des protons (dite la fréquence de Larmor). L'inversion des données RMP fournit la *distribution verticale de la teneur en eau et du temps de relaxation de la résonance* (Legtchenko et Shushakov, 1998) jusqu'à une profondeur de plusieurs dizaines de mètres. En présence des couches très conductrices la profondeur d'investigation diminue, mais même dans des couches résistantes, elle peut atteindre de 20 à 40 mètres. Généralement, une valeur de teneur en eau élevée et un temps de relaxation de la résonance plus long correspondent à des aquifères; inversement une teneur en eau plus faible et un temps de relaxation plus court correspondent à des teneurs en eau plus élevées. Mais il demeure encore une grande difficulté pour relier les valeurs pondérales de teneurs en eau du sol et celles définies par la RMP. L'expérience acquise par les pétroliers qui utilisent couramment la RMP en forage permet de convertir les mesures des paramètres du signal RMP en perméabilité hydraulique des roches (Legtchenko *et al.*, 1998). Dans le cadre d'un accord de collaboration entre ICKC (Russie) et le BRGM, un équipement, nommé "NUMIS", fondé sur ce principe a été développé par IRIS Instruments et commercialisé début 1997 (Legtchenko *et al.*, 1997). Cette technique peut être appliquée afin d'estimer la profondeur des nappes phréatiques (les piézomètres servent de calage et/ou de validation). Ces mesures peuvent être également répétées afin de déterminer les variations temporelles du degré et de la profondeur de saturation des terrains.

#### **4.2.3.2. Traçage physico-chimique : naturel et artificiel**

Dans les grands versants en mouvement, l'investigation hydrogéologique directe par forages est souvent limitée principalement à cause des coûts de mise en œuvre et des problèmes d'accès des matériels. Ainsi, des méthodes indirectes de *traçage naturel et artificiel des eaux* peuvent être appliquées en complément de l'autre méthode indirecte décrite précédemment (Résonance Magnétique Protonique). Pour les mouvements de terrain, dans l'objectif de leur modélisation et la détermination d'éventuelles travaux de drainage, il est important de connaître l'origine des eaux, de localiser géographiquement les zones d'infiltration, de déterminer les temps de résidence des composantes et de caractériser le milieu encaissant l'écoulement. Toutes ces informations permettent de développer et/ou valider un schéma hydraulique conceptuel du versant.

#### a) *Traçage naturel*

Le traçage naturel des eaux fournit des indications intéressantes sur l'origine des eaux et leur temps de résidence. Des expériences basées sur l'analyse d'une part des éléments majeurs et oxygène-18 et d'autre part des isotopes lourds peuvent être entreprises. Éléments constitutifs de la molécule d'eau, les isotopes lourds de l'hydrogène et de l'oxygène (stables comme  $^{18}\text{O}$  et  $^2\text{H}$  ou radioactif comme  $^3\text{H}$ ) sont considérés comme des traceurs idéaux dans le cycle de l'eau et couramment utilisés dans la recherche hydrologique. En dépit de difficultés méthodologiques abondamment illustrées dans la littérature (variations temporelle et spatiale du traceur, ce traçage permet d'identifier les chemins préférentiels des eaux. Néanmoins, la connaissance détaillée des processus hydrologiques impliqués ne peut émerger sans une confrontation des résultats du traçage avec des mesures hydrométriques fines.

Par exemple, sur le glissement de la Clapière (Compagnon *et al.*, 2000 ; Guglielmi *et al.*, 2000 ; Guglielmi *et al.*, à paraître), des suivis chimiques sont réalisés depuis 1998 sur trois sources. Ce traçage naturel (éléments majeurs et oxygène-18) a permis de démontrer : (1) que les eaux issues du versant (haut vallon de Rabuons, Dailoutre et sources du pied du glissement) proviennent d'une zone d'altitude significativement plus élevée que la zone instable ; (2) que 90 % des eaux infiltrées sur l'impluvium avaient un exutoire occulte (alluvions de la Tinée) ; (3) que le temps de transfert de l'infiltration massive de la fonte de neige est aisément estimable par suivi des dilutions des traceurs naturels.

#### b) *Traçage artificiel*

L'intérêt du traçage artificiel est qu'il permet de localiser géographiquement les zones d'infiltration, de déterminer les temps de résidence des composantes et de caractériser le milieu encaissant l'écoulement. Le traçage naturel étant un traçage global, la validation d'un schéma hydraulique conceptuel d'un versant peut être tentée par multi-traçage à partir de plusieurs points stratégiques du versant : zone(s) amont plus ou moins fracturée(s), zone en mouvement proche des exutoires de la partie inférieure, ... Cette technique nécessite une surveillance très lourde, calquée sur le protocole utilisé en milieu karstique (plusieurs mois de suivi serré de toutes les sources du versant, avec échantillonneurs automatiques et campagnes de relevé manuel et adsorption sur charbon actif) qui peut être engagée sur une période plus ou moins longue en fonction de la conductivité des terrains (fracturation, zones d'écoulement préférentielles, ...).

### 4.3. Conclusion

Couplées aux méthodes d'investigation géomorphologiques, les méthodes de mesure et de surveillance des déformations de surface et les méthodes d'investigation géophysiques et géotechniques d'auscultation de la structure interne (géométrie 3D, interface des couches, etc.) des zones d'études peuvent fournir les données nécessaires à la modélisation des mouvements de terrain et à l'évaluation des aléas.

Ces techniques sont à des stades différents de développement instrumental et méthodologique. Des efforts doivent encore être entrepris pour développer une méthodologie permettant d'intégrer les données multi-échelles spatiales et temporelles afin de quantifier le champ de vitesse et de déformation des différents mouvements gravitaires. L'utilisation combinée de mesures au sol de validation (tachéométrie, extensométrie, GPS) avec des mesures de télédétection doit améliorer la compréhension des mécanismes en jeu. Les techniques de corrélation automatique d'images, issues de ces capteurs, permettent de quantifier l'évolution de certaines structures (champs de fissures, failles...). Les systèmes spatiaux existants offrent également des potentialités dans le domaine du suivi pré- et post-crise qui ne sont pas exploitées suffisamment à l'heure actuelle.

Les méthodes de mesure et de surveillance des déformations de surface et d'auscultation de la structure interne des mouvements de terrain sont nombreuses et très diverses dans leurs principes, leurs mises en œuvre et dans leur résolution spatiale et temporelle. Elles sont toutes plus ou moins bien adaptées aux différents sites et phénomènes à étudier : des choix doivent être faits, en fonction des moyens accordés et des précisions recherchées. Mais, dans bon nombre de cas, ces méthodes ont souvent été appliquées et validées de manière indépendante sur différents sites.

Il reste donc beaucoup à faire pour développer des méthodes et des protocoles d'auscultation (multi-méthodes et suivi multi-temporel) adaptés aux mouvements de terrain pour quantifier les hétérogénéités spatiales et temporelles (fracturation, comportement hydrologique, comportement mécanique, etc.) en fonction des caractéristiques des mouvements de terrain étudiés (dynamique, ampleur, comportements). La diversité des méthodes et la multitude de problèmes reflètent bien *le caractère multidisciplinaire des études* qu'il faut engager et encourager.



## Conclusion : Position de recherche

Les chapitres précédents ont montré que les mouvements de terrain touchaient les populations et aménagements et qu'ils étaient responsables de nombreux dégâts et pertes de vies humaines. Les enjeux sont réels pour une prévention de ces aléas géomorphologiques qui s'appuie sur une bonne connaissance des processus gouvernant l'évolution d'un versant, sur une prévision spatiale et sur une prédiction temporelle. Il existe une forte demande sociale pour mener cette cartographie préventive : en France, plusieurs milliers de PPR sont à réaliser dans les prochaines années.

Les besoins d'expertises et de recherches scientifiques sont également réels. Des progrès scientifiques sont encore à accomplir pour définir correctement l'aléa et tenter de résoudre les difficultés liées à la complexité des processus en jeux, à la nature discontinue dans le temps et l'espace des mouvements de terrain, à la difficulté d'identifier les causes et les relations de cause à effet, en raison du manque de données fiables.

Pour la définition de l'occurrence temporelle puis du niveau d'aléa, j'ai montré que les types d'activité (et en corollaire l'âge) des mouvements de terrain, c'est à dire leurs rythmes d'évolution temporelle étaient très importants à considérer et à étudier. Mais que cela ne pouvait être possible qu'à partir de données recueillies sur des périodes de temps suffisamment longues pour être représentatives des phénomènes étudiés.

Les méthodes d'évaluation et de modélisation de l'aléa sont nombreuses, mais leur application nécessite la collecte de données d'entrée fiables. Ces données peuvent être acquises par différentes méthodes et techniques mises en œuvre par des géologues, géophysiciens, géotechniciens, hydrogéologues, etc. Elles sont assez rarement utilisées par les géomorphologues pour leur permettre de valider ou de confronter leurs hypothèses basées dans beaucoup de cas sur l'observation et l'analyse des formes du relief, sur la reconstitution des différentes étapes de leur mise en place, sur sa connaissance des paléoenvironnements quaternaires, etc. A l'inverse, ce savoir-faire des géomorphologues n'est pas toujours reconnu à sa juste valeur par les autres disciplines.

Seule la pluridisciplinarité permet d'avancer plus efficacement dans la résolution des problèmes. Pour ces raisons, et comme géographe-géomorphologue possédant une solide formation en géotechnique, j'ai opté clairement pour une recherche pluridisciplinaire avec la prétention de rapprocher un peu plus que de coutume les différentes communautés.

Pour lever les verrous, une façon de faire est de se positionner sur des sites de référence bien caractérisés du point de vue de leur géométrie et de leurs propriétés, et bien suivis, à des pas de temps fins dans leurs variation et évolution spatio-temporelles, sur une durée suffisante pour mettre en évidence les rythmes d'évolution et pouvoir « nourrir » les modèles de prévision ou de spatialisation.

Deux sites en France portant sur des aspects écroulement rocheux soudain et de fort volume existent. Les versants de Séchilienne et de la Clapière ont été équipés avant tout dans une orientation alerte, et non recherche, pour apporter des réponses aux besoins des gestionnaires sur les mesures à prendre en cas d'évolution catastrophique (fermeture des voies de communication, évacuation des populations, etc.). Pour la Clapière, certaines données sont seulement depuis très récemment à la disposition des chercheurs.

Par contre, il n'en existait pas pour les mouvements complexes comme les glissements-coulées (*earthflow*) qui associent à l'amont des glissements structuraux banc sur banc (*rock block slide*) et à l'aval une coulée qui progresse à de faibles vitesses. Ces mouvements ont attiré mon attention et mon intérêt : ils sont nombreux dans le monde et leur évolution peut être brutale et dangereuse pour les populations et aménagements situés à l'aval. En effet, sous certaines conditions hydrodynamiques la coulée peut donner naissance à des coulées de débris superficielles (*debris avalanches*) ou à des laves torrentielles (*debrisflows*). Ils présentent un *continuum* entre la mécanique des roches – mécanique des sols – mécanique des fluides (transition élasto-plastique fluide) qui est fort intéressant

à étudier et qui renforce le besoin de pluridisciplinarité. A mon arrivée à Strasbourg, mon insertion dans l'équipe du Professeur Flageollet, qui avait engagé des recherches dans le bassin de Barcelonnette, me permettait d'étudier de tels mouvements complexes car plusieurs existaient dans le bassin développé dans les marnes noires Callovo-oxfordiennes et l'un d'entre eux pouvait servir de site expérimental.

A l'exemple des bassins versants de recherche mis en place en hydrologie, j'avais envie de me donner les moyens de l'acquisition de ces données de base. Mon expérience passée m'y encourageait :

- d'une part, les nombreuses études et expertises menées « à chaud » pendant les sept années passées au CEBTP comme Ingénieur Géotechnicien m'avaient montré qu'il était parfois difficile d'apporter des réponses pertinentes aux problèmes posés en l'absence de « recul » et de données suffisantes, et que dans bien des cas, après avoir défini les causes et les moyens de confortement, j'avais eu envie d'aller au delà de ma mission pour mieux comprendre les mécanismes en jeu ;
- et d'autre part, grâce à la poursuite du suivi (sur mon temps « libre » alors que j'étais au CEBTP) des glissements de Villerville-Cricqueboeuf que j'avais équipé et étudié pendant ma thèse, j'avais pu montrer que la réactivation majeure de février 1995 était liée à une remontée de la nappe phréatique en relation avec des pluies abondantes des années précédentes. Ce suivi apportait donc des éléments objectifs et déterminant pour l'explication de ces rythmes d'évolution « cyclique » de 5-6 ans.

De plus, l'actualité me donnait raison : les « nouveaux » PPR, institués par la loi de février 1995 doivent être élaborés à partir d'une approche « qualitative » basée sur les connaissances acquises sans investigation lourde sauf cas particulier. Donc qui va « fournir » ces données ? si on ne donne plus les moyens d'acquérir ces données par des recherches et études appliquées, il faut donc les acquérir soi même en mettant en place des programmes de recherche pluridisciplinaires.

Je suis parti des hypothèses :

- qu'il est possible de comprendre les processus et apporter des réponses sur le fonctionnement de ce type de mouvements complexes et d'envisager une modélisation des différents scénarii d'évolution ;
- qu'une approche menée à *l'échelle locale*, associant des méthodes de terrain et de laboratoire et couplant analyse morphologique et investigations géotechniques, géophysiques, géodésiques et suivi des paramètres à des pas de temps courts, pouvait permettre, même dans un site complexe 3D, d'acquérir les données de base suffisantes ;
- que les progrès accomplis dans la connaissance de ce type de mouvement pourraient permettre d'entreprendre la cartographie de la susceptibilité des terrains et d'évaluer la probabilité pour qu'un mouvement de terrain se produise sous certaines conditions, puis d'envisager le changement d'échelle et la transposabilité à l'ensemble d'un bassin, puis à d'autres milieux ;
- qu'il me fallait ainsi conduire des recherches à l'échelle large du bassin de Barcelonnette pour acquérir et analyser de longues chroniques de données historiques sur les événements du passé et les conditions hydroclimatiques par des recherches dans les archives, par des levés morphologiques, etc.
- que j'arriverai à trouver des moyens financiers et des collaborations nombreuses et efficaces et qu'il serait possible de développer des méthodologies spécifiques adaptées à des types de terrain complexe.

Cette démarche bénéficie également des résultats acquis dans les bassins versants de bad-lands de Draix (Alpes-de-Haute-Provence). Elle est illustrée concrètement dans la seconde partie qui présente mon travail de recherches engagé depuis mon recrutement à l'ULP en septembre 1995 et reconstitue mon itinéraire scientifique et le cheminement de mes travaux.

*Seconde partie : Mes propres recherches :  
applications et résultats*

**La seconde partie** essaie de présenter une vision cohérente de mon travail de recherches engagé principalement depuis mon recrutement à l'ULP en septembre 1995 et reconstitue mon itinéraire scientifique et le cheminement de mes travaux.

Le **chapitre 5** détaille **le cadre morphologique de mes zones d'études** et en particulier les sites de recherches instrumentés et suivis par nos soins. Il souligne également le besoin de développer et adapter à des milieux montagneux difficiles d'accès et très hétérogènes, des méthodes et des techniques de mesures des déplacements et de cartographie et de prospection géophysique. Ensuite, les principaux acquis récents seront présentés de manière thématique.

Le **chapitre 6** fournit **les développements techniques et méthodologiques**, réalisés pour favoriser l'acquisition de bonnes données de base : pour le suivi des déplacements en continu par GPS ou par extensomètre ; pour la génération de MNT à partir de photographies aériennes prises à basses altitudes ; pour l'investigation des coulées par prospection géophysique ou encore pour la caractérisation des formations superficielles hétérogènes marneuses in situ par prospection pénétrométrique. Ensuite, les résultats **d'ordre thématique pour la compréhension des processus** sont détaillés.

Le **chapitre 7** présente les résultats obtenus sur les caractéristiques physiques, mécaniques et rhéologiques des formations marneuses.

Le **chapitre 8** présente la structure 3D de la coulée de Super-Sauze.

Le **chapitre 9** donne les conditions de déclenchement et de fonctionnement des mouvements de terrain en liaison avec les conditions structurales et climatiques.

# Chapitre 5 : Zones et sites de recherches : description et équipement

## 5.1. Introduction

La recherche a d'abord débuté par l'étude des processus d'évolution à *l'échelle locale* d'un glissement-coulée, phénomène le plus complexe, puis a été progressivement élargie à l'échelle du bassin.

Le glissement-coulée de Super-Sauze a été choisi à deux autres (Poche et la Valette) comme site de recherche malgré son accessibilité difficile dans la mesure où il avait évolué naturellement depuis son déclenchement (vierge de toute trace d'aménagement hydraulique ou autres). Contrairement au glissement-coulée de la Valette (VAL) qui avait fait l'objet de nombreux travaux de drainage, de remodelage de surface et de revégétalisation ou, à celui de Poche, également très difficile d'accès et très arboré. La description précise de ces deux autres glissements-coulées sera trouvée dans Schmutz (2000), Weber (2001) ou Guillon (2001).

A *l'échelle locale* du glissement-coulée de Super-Sauze, les recherches ont porté en priorité sur l'auscultation de la structure 3-D de la masse accumulée et le développement d'un réseau de surveillance pour collecter les données de base. Dans le cadre de leur mémoire de maîtrise de géographie physique, en juin 1996, Julien Genet et Jean-Philippe Malet ont pris en charge la prospection géotechnique (Genêt et Malet, 1997), Serge Velcin s'est occupé des aspects hydrogéologique et hydrodynamique (Velcin, 1997) et David Herrmann des prélèvements d'échantillons et des essais de laboratoire (Herrmann, 1997). Dominique Weber s'est occupé des aspects déplacements de surface jusqu'en 1997, date à laquelle l'ensemble des opérations d'investigation complémentaire et de suivi a été géré, en collaboration, par Jean-Philippe Malet dans le cadre de son DEA (Malet, 1998) puis de sa thèse. Pour le suivi des déplacements de surface, une aide importante a été apportée par deux élèves ingénieurs dans le cadre de leur stage de fin de seconde année de *l'Ecole Nationale Supérieure des Arts et Industrie de Strasbourg* (ENSAIS) qui ont développé des programmes spécifiques de saisie, dépouillement et calcul des données tachéométriques (Hernandez, 1996 ; Gallisson, 1997).

A noter que les missions de terrain se sont toujours déroulées à plusieurs personnes en raison de l'éloignement du bassin de Barcelonnette par rapport à Strasbourg, des lourds moyens mis en œuvre, de l'accessibilité souvent limitée des sites, etc. Si les opérations sur le terrain ont été menées en équipe, chacun des étudiants a ensuite traité et analysé ses données pour rédiger son propre mémoire de recherche. Ce travail d'équipe « rendu nécessaire » a pour avantage d'une part de renforcer la cohésion du groupe et, d'autre part de développer la curiosité et d'augmenter les connaissances de chacun (même si cela est très consommateur en temps puisqu'il faut faire ses propres observations et investigations mais également aider à celles des autres). Ce principe d'aide mutuelle a depuis toujours été appliqué pour toutes les opérations menées dans le bassin ou ailleurs.

Ces recherches ont bénéficié de nombreuses collaborations outre celle de Jean-Claude Flageollet, mes collègues du CEREG, Bruno Ambroise et Anne-Véronique Auzet ont apporté leurs compétences dans le domaine de l'hydrologie et des états de surface. Ceux du LTHE de Grenoble, Luc Descroix, Michel Estèves, Michel Laurent, Jean-Marc Lapetite et Jean-Pierre Vandervaere ont apporté leur aide pour la caractérisation hydrodynamique des formations et les simulations de pluie. Sans oublier, les promotions d'étudiants de DEA qui se sont succédées sur le site et ont participé à de nombreuses opérations d'investigation ou de mesures.

Les soutiens financiers ont été apportés d'abord par le programme Newtech ensuite par les programmes du PNRN de 1997-1999 puis de 2001-2002 (projet ECLAT), et de l'ACI Catastrophes Naturelles 2000-2001 (projet MOTE).

## Principales publications

Flageollet J. C., **Maquaire O.**, Weber D., Martin B. (1999). Landslides and climatic conditions in Barcelonnette and Vars Basin (Southern Alps, France). *Geomorphology*, 30, pp. 65-78. (Annexe II.2)

**Maquaire, O.**, Flageollet, J.-C., Malet, J.-P., Schmutz, M., Weber, D., Klotz, S., Albouy, Y., Descloîtres, M., Dietrich, M., Guérin, R., et Schott, J.-J. (2001). Une approche multidisciplinaire pour la connaissance d'un glissement-coulée dans les marnes noires du Callovien-Oxfordien (Super-Sauze, Alpes-de-Haute-Provence, France). *Revue Française de Géotechnique*, 95/96, pp. 15-32. (Annexe II.5)

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*, n°1, pp. 71-84. (Annexe II.7)

## 5.2. Le bassin de Barcelonnette : zone d'études

Le bassin de Barcelonnette présente de nombreux mouvements de terrain de toutes natures et de toutes dimensions (chutes de blocs, écroulements, basculements, glissements, coulées, ravinement, etc.) et en particulier trois glissements-coulées. Il est donc bien adapté aux types de recherche à mener aux différentes échelles décrites précédemment.

### 5.2.1. Une morphologie variée

Dans les Pré-Alpes du sud, le bassin de Barcelonnette est situé entre les massifs cristallins de l'Argentera et du Mercantour au sud, le massif du Pelvoux au nord-ouest et le Queyras au nord-est. Il est drainé par le cours moyen de l'Ubaye (altitude moyenne de 1130 m). La cuvette d'environ 200 km<sup>2</sup> est longue de 22 km entre Jausiers à l'Est (altitude 1210 m) et les Thuiles à l'Ouest (altitude 1000 m) où un verrou glaciaire constitue sa terminaison aval. Il atteint 10 km dans sa plus grande largeur. Le bassin est limité par de hautes lignes de crêtes culminant à des altitudes comprises entre 3100 m et 2800 m environ et ses versants sont dissymétriques (Figure 5.1a). Les accès sont limités à d'étroites et profondes gorges ou bien à de hauts cols longtemps enneigés et fermés l'hiver.

Les sommets sont façonnés dans des formations très résistantes : le Grand Bérard au nord (3046m), la tête du Siguret à l'est (3031 m), le Chapeau de gendarme au sud (2682 m) et la Grande Séolane (2909 m) à l'ouest. Les crêtes sont majoritairement sur-creusées en cirques glaciaires, comme La Chalanche (2984 m), La Grande Epervière (2884 m), formant ainsi des bassins de réception pour les nombreux torrents qui dévalent les versants (Pierre et Remaître, 1999). Ces formations très résistantes se retrouvent jusqu'à des altitudes de 1800-2000 m et imposent des pentes supérieures à 45°.

Au dessous, les versants entaillés dans des marnes possèdent des profils adoucis (pente moyenne de 20-25°) et sont localement soumis à un ravinement intense responsable d'un paysage de badlands (les roubines). Les ravines et les échines ou interfluves présentent les caractéristiques topographiques suivantes : les crêtes d'échines ont des pentes supérieures à celles des versants non ravinés, soit 25-30°. Leurs flancs ont des pentes de 40-45°. Les crêtes de deux ravines voisines sont distantes d'environ 40 à 100 m. Leur longueur est très variable d'une centaine à plusieurs centaines de mètres.

Ces secteurs ravinés soumis à une intense érosion sont plus ou moins développés. Les principaux se rencontrent sur des croupes en pentes très fortes :

- sur l'adret (Faucon de Barcelonnette, Le Bourget, ...) entre des altitudes de 1200 m à 1500 m ;
- sur l'ubac (Le Villard de Faucon (Photo 5.1), Les Galamonds, ..., le long du versant du torrent de Boure (Photo 5.2) sur une longueur de près de deux kilomètres à des altitudes comprises entre 1200 m et 1600 m et dans le large bassin torrentiel de La Goutta (Super-Sauze) jusqu'à des altitudes de près de 2000 m (Photo 5.7).

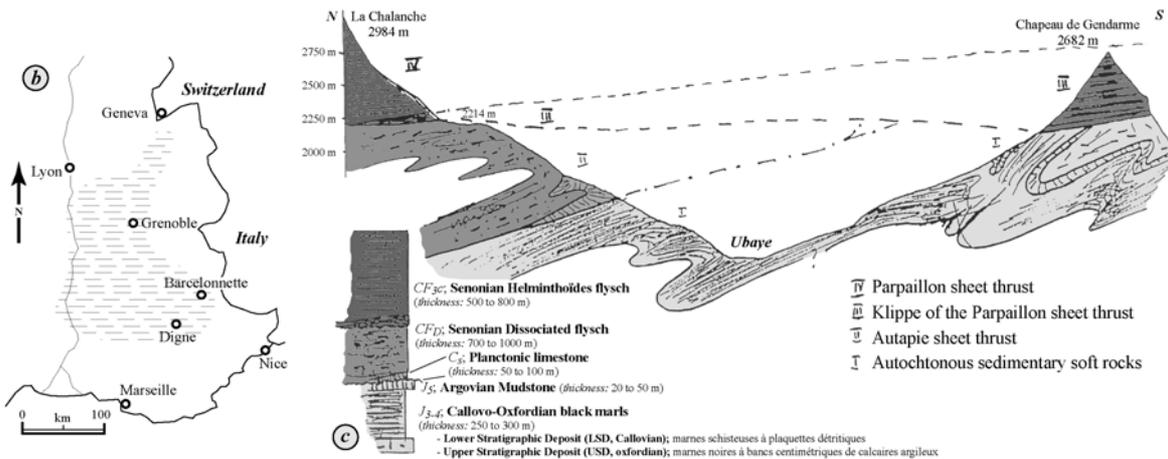
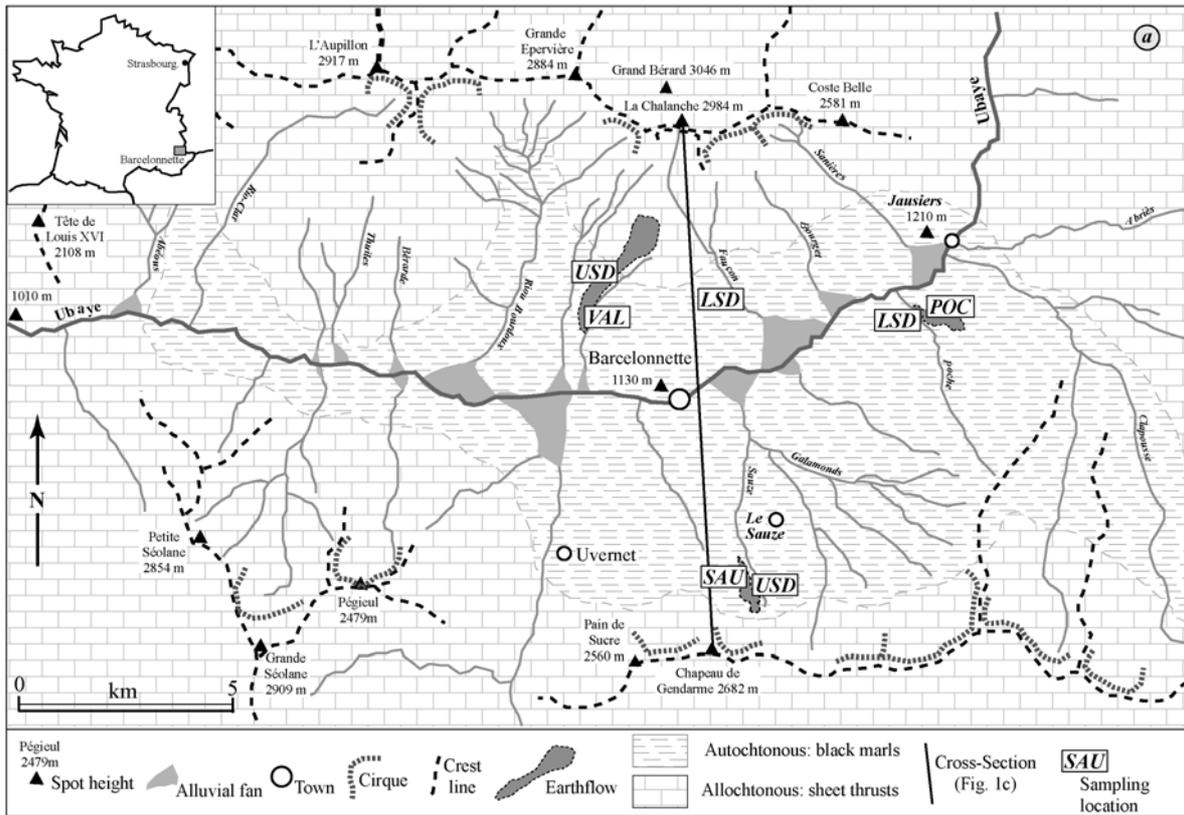


Figure 5.1 : Morpho-structure du bassin de Barcelonnette : (a) les principaux traits morphologiques ; (b) extension des marnes noires en France ; (c) coupe géologique d'après Flageollet, non publiée (in Maquaire et al., soumis).

En dehors de ces principaux secteurs, des ravines et échines sont visibles le long de la multitude de torrents qui incisent plus ou moins profondément les versants (Figure 5.1a). Plusieurs torrents puissants ont entaillés de profondes et étroites vallées (Riou Bourdoux, Bachelard, Sauze, Faucon, Bourget, Sanières, Galamonds,...) et ont développé de nombreux cônes de déjection dans le fond de la vallée large d'environ 1500 m (Miramont, 1998).



*Photo 5.1 : Secteur raviné entre Villard-de-Faucon et Pont Long. Vue vers le Sud depuis Bouzoulières, juillet 2002.*



*Photo 5.2 : Secteur raviné du torrent de Bourre face à Sauze. Vue vers l'Est depuis Gaudessart, juillet 2002.*

### **5.2.2. Un substrat géologique favorable à l'instabilité**

La nature des formations et la dissymétrie des versants sont en relation étroite avec l'histoire tectonique du bassin. En effet, le bassin de Barcelonnnette occupe une position géologique spécifique dans les Alpes méridionales, entre deux massifs cristallins (Argentera et Mercantour), et dans un vaste ensellement structural qui a permis le déplacement de deux nappes de charriage de l'Eocène (Autapie et Parpaillon) de la zone interne alpine vers le sud-est. Ces nappes aux faciès principalement de flyschs ont recouvert les formations sédimentaires autochtones constituées par les épaisses séries Callovo-Oxfordiennes des marnes noires de la série stratigraphique des Terres Noires.

Le bassin correspond à une « fenêtre géologique » dégagée dans les nappes de charriage et profondément creusée dans les marnes relativement peu résistantes (Figure 5.1a et 5.1c). La dissymétrie des versants s'explique par l'existence des terrains résistants de ces nappes : très développés à partir d'environ 1500 m d'altitude sur le versant adret avec une forte épaisseur des deux nappes et des écaillles intermédiaires ; et très réduits et limités sur le versant ubac, avec klippe ou écaillles qui arment des sommets à partir d'une altitude de 1800 m à 2000 m.

L'épaisseur des « Terres Noires » jurassiques atteint 250 à 300 m. Trois sous-étages peuvent être distingués :

- les marnes noires inférieures de Callovien (LSD, dépôt stratigraphique inférieur -*Lower Stratigraphic deposit*-) avec des couches détritiques (50 à 60 m) ;
- les marnes noires de Oxfordien moyen et supérieur (USD, dépôt stratigraphique supérieur -*Upper Stratigraphic deposit*-) avec des bancs argilo-calcaires centimétriques (150 à 250 m) ;
- quelques affleurements rares de marnes noires de l'Argovien.

Les limites vagues entre les dépôts du Callovien et de l'Oxfordien ne permettent pas de les tracer séparément sur la figure 5.1a (BRGM, 1974).

Les marnes noires du Callovien présentent un faciès argileux gris de schistes, très finement stratifiés, avec peu de lits argilo-calcaires, alors que les marnes noires de l'Oxfordien présentent un faciès noir plus calcaire, moins stratifié (Artru, 1972; Awongo, 1984; Phan, 1993). Des nodules calcaires, quartzeux ou pyriteux d'un diamètre de quelques centimètres à quelques dizaines de centimètres, sont aussi insérés dans les marnes noires. La microstructure des marnes explique en partie leur érodabilité et leur susceptibilité aux mouvements de masse. La microtectonique joue aussi un rôle essentiel, en constituant des surfaces de glissement potentielles et en guidant la météorisation et la fragmentation en clastes. La morphométrie de ce clastes dépend de l'orientation des joints, de la schistosité et de la teneur en carbonate des marnes (Coulmeau, 1987; Alexandre, 1995). La macrostructure joue également un rôle important : le substratum marneux faillé et diaclasé présente de fortes et brusques variations de pendage (Légier, 1977 ; Evin, 1997).

Ces formations marneuses sont très sensibles à la météorisation, sous l'action des alternances humidification – dessiccation et gel – dégel, elles libèrent des fragments et des clastes de tailles très variables. Elles présentent une couverture détritique de quelques centimètres d'épaisseurs (Maquaire *et al.*, 2002). Leur comportement physique et géomécanique est très changeant, elles peuvent passer d'un l'état solide à un état plastique, puis liquide pour des variations de teneurs en eau assez modérées (Antoine *et al.*, 1995).

### 5.2.3. Le remodelage glaciaire et les formations superficielles

La morphologie a été fortement remodelée par le glacier de l'Ubaye lors de la dernière glaciation du quaternaire au Pléniwurm (15 000 à 20 000 B.P). Le glacier de l'Ubaye a creusé de nombreux ombilics, comblés de nos jours par les alluvions. Il était alimenté latéralement par des langues glaciaires qui ont sur-creusé les crêtes en cirques glaciaires (en particulier aux Brechs). Nombreuses et variées, les formes glaciaires jalonnent l'ensemble de la vallée (terrasses glaciaires, glaciers rocheux, etc.). Lors des phases de crue ou de décrue, les glaciers ont abandonné une grande quantité de matériaux morainiques sur les versants ou dans le fond des vallées. Ces moraines recouvrent une grande partie des affleurements géologiques et masquent dans la plupart des cas les marnes sur des épaisseurs variables allant de un à une vingtaine de mètres. Ces dépôts glaciaires sont très riches en matrice fine et de teinte beige claire à gris foncé (Flageollet *et al.*, 1996). Des blocs morainiques hétérométriques (de quelques décimètres cubes à quelques dizaines de mètres cubes) jonchent, en longues langues étroites, les fonds de vallons ou les versants, en particulier sur l'adret.

Les autres formations superficielles périglaciaires, les colluvions et formations de pente et les dépôts morainiques sont souvent difficiles à différencier sur le terrain en raison de leurs faciès proches (Pierre et Remaître, 1999).

### 5.2.4. Un climat montagnard agressif

Le bassin de Barcelonnette connaît un climat méditerranéen sec et montagneux caractérisé par une variabilité de précipitations inter-annuelle forte ( $730 \pm 400$  mm au cours de la période 1928-1999). Le régime climatique présente un pic de précipitations centré sur les saisons d'automne-hiver (précipitations orageuses puis neigeuses) alors que le printemps et l'été s'avèrent plus secs, mais toutefois avec des orages violents et très localisés (intensités supérieures à  $50 \text{ mm.h}^{-1}$ ). Il y a 130 jours de gel par an (Sommen, 1995, 1997). Ces caractéristiques impliquent des amplitudes thermiques quotidiennes et nombreux cycles gel-dégel favorables à la météorisation (Flageollet *et al.*, 1999 ; Maquaire *et al.*, soumis).

### 5.2.5. Des aléas nombreux et divers

Le bassin est soumis à une grande variété d'aléas souvent dévastateurs (Amiot et Nexon, 1995). Les inondations et les laves torrentielles sont responsables de très nombreux dégâts principalement entre le 15<sup>ème</sup> et le 19<sup>ème</sup> siècle : le Riou Bourdoux qui a depuis lors été « dompté » par les travaux de correction (Photo 5.3) (Chondroyannis, 1992). Plus récemment en 1996, le torrent de Faucon a connu une lave torrentielle (Pierre et Remaître, 1999) malgré les nombreux barrages de correction (Photo 5.4). Outre l'activité torrentielle, il ne faut pas oublier les avalanches ou bien encore la forte sismicité (Schmutz, 2000). De très nombreux mouvements de terrain ont été recensés (Figure 5.2). Cette importante instabilité des versants est traduite par les nombreux travaux menés dans ce bassin (Awongo, 1984 ; Antoine *et al.*, 1988 ; Bufalo, 1989 ; Phan, 1993). A. Légier (1977) en a recensé près de 300 par photo-interprétation et en a observé 116 qu'il a décrit comme *mouvements actifs (une quarantaine) et latents* (Photo 5.5). Ils se concentrent dans quelques secteurs dans les " terres noires " mais aussi dans les flyschs dissociés (Weber, 2001). Plus de 150 événements historiques relatifs aux mouvements de terrain ont été référencés depuis 1850 (Amiot et Nexon, 1995).



*Photo 5.3 : Barrages de correction torrentielle dans le Riou Bourdoux, Barcelonnette, 1987.*



*Photo 5.4 : Deux barrages de correction dans le torrent de Faucon de Barcelonnette, juillet 2002.*

Parmi les mouvements de terrain actifs les plus spectaculaires, on trouve des glissements de versants *stricto sensu* (le glissement de Pra-Bellon dans le bassin versant du Riou Bourdoux ; celui de Bois Noir (Photo 5.6) sur l'adret au sud-est de Jausiers déclenché en avril 1993 ; et bien d'autres encore plus anciens et très étendus (Weber, 2001), etc.) mais aussi et surtout trois glissements-coulées. Ils sont une des particularité marquante du bassin même s'ils sont fréquents dans les "Terres-Noires" des Préalpes françaises et qu'ils se rencontrent dans bien d'autres régions du monde (Keefer et Johnson ; 1983; Flageollet ; 1988 ; Zhang *et al.*, 1992 ; Dikau, 1999).

Ces "Terres Noires" (Bathonien à Oxfordien), couvrent des surfaces considérables dans tout un secteur délimité à l'ouest par la vallée de Rhône, au nord par la latitude de Grenoble, à l'est par la frontière italienne et au sud par les Préalpes provençales (Figure 5.1b).



*Photo 5.5 : Morphologie bosselée caractéristique d'un glissement latent sur le versant de La Frache, vue vers le Sud, juillet 2002.*



*Photo 5.6 : Escarpement principal du glissement de Bois Noir. Vue vers le Sud, juillet 2002.*

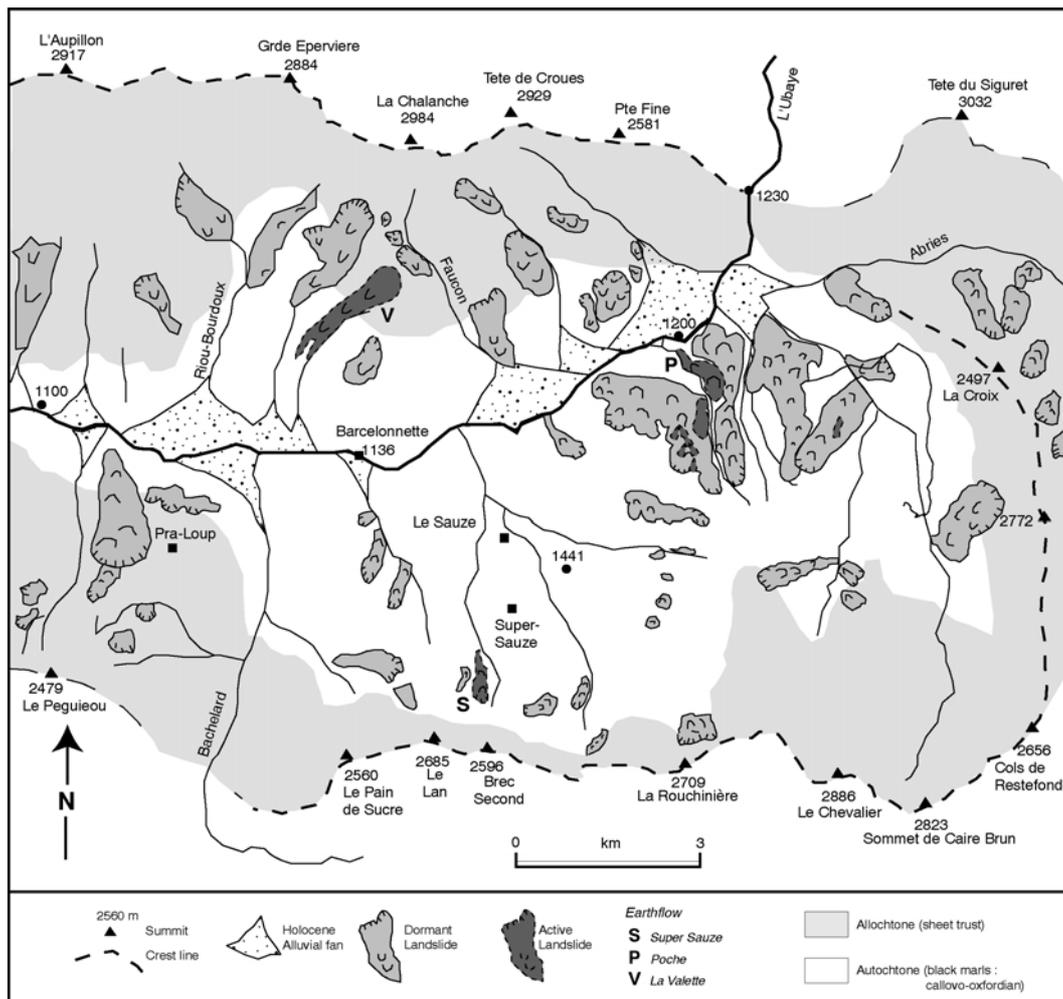


Figure 5.2 : Localisation des mouvements de terrain actifs et latents dans le bassin de Barcelonnette (in Maquaire, à paraître).

Ces trois glissements-coulées actifs sont localisés sur des versants ou dans des bassins torrentiels. Le plus grand, le glissement de La Valette, en rive droite de l'Ubaye, a un volume estimé à plus de 6 millions de m<sup>3</sup> et se développe sur une longueur de 1800 m ; les glissements de Poche (Manné et Schwin, 1998 ; Guillon, 2001) ou de Super-Sauze, plus modestes (de 600 000 à 700 000 m<sup>3</sup>), s'étendent sur des distances de l'ordre de 800 à 1200 m. Ils possèdent une morphologie caractéristique : les blocs et les panneaux glissent de la couronne, de manière rétrogressive, par des ruptures planes (Malet *et al.*, 2000a), s'accroissent en se disloquant dans une ou plusieurs ravines, et forment, après leur déstructuration progressive, une coulée de débris hétérogène. La conséquence de cette morphologie particulière est la grande difficulté à fixer la limite aval de la zone de rupture, et à identifier l'emplacement exact, les dimensions et la profondeur de la (des) ravine(s) fossilisée(s) par les matériaux en mouvement dans la zone d'accumulation. Dans cette dernière, les blocs et panneaux de marnes, plus ou moins déstructurés, se déforment et se fragmentent progressivement de l'amont à l'aval, et de la surface vers la profondeur, pour constituer une masse hétérogène aux caractéristiques très variables (Phan, 1993 ; Antoine *et al.*, 1995). Les vitesses de ces coulées sont en général de quelques mètres par an, mais des laves torrentielles peuvent s'y déclencher.

### 5.2.6. Une présence humaine forte

Le bassin est fortement marqué par la présence et l'activité humaine :

- d'abord ancienne avec en particulier les déforestations pour permettre l'agriculture, la culture d'arbres fruitiers ou bien encore l'élevage qui ont été en partie grandement responsables de l'intense torrencialité et de l'érosion des sols ;

- puis des reboisements et des corrections de torrents engagés par le service de Restauration des Terrains en Montagne (RTM) à partir de la deuxième moitié du 19<sup>ème</sup> siècle (Chondroyannis, 1992).

Maintenant, l'activité agricole se concentre dans le fond de la vallée et sur les principaux cônes alluviaux. L'activité principale est liée au tourisme estival et hivernal avec l'implantation de plusieurs stations de skis (Sauze, Super-Sauze, Pra Loup). Implantée au bord de l'Ubaye, la ville de Barcelonnette (3 600 habitants), sous préfecture, accueille une caserne et offre les nombreux services d'une ville enclavée reliée aux autres vallées par une seule voie de communication principale : nombreux commerces, hôtels, hôpital, zones d'activités industrielles et commerciales, etc. Plusieurs autres gros bourgs et villages (Les Thuiles, St-Pons, Faucon-de-Barcelonnette, Les Sanières, Jausiers, etc.) sont localisés le long de l'Ubaye ou bien sur les versants (le Villard de Faucon, Enchastrayes, la Frache, etc.).

### 5.2.7. De nombreux acquis de recherches antérieures

De nombreuses recherches ont été menées depuis le début des années 90 dans le bassin de Barcelonnette par l'équipe strasbourgeoise sous la direction du Professeur Flageollet. Plusieurs étudiants de maîtrise et de DEA ont entrepris des recherches et fournissent de nombreuses et précieuses informations sur des portions de territoire du bassin. Sans être exhaustif, je peux citer :

- une cartographie de l'évolution de l'occupation du sol à Enchastrayes (Augier, 1991)
- des cartographies morphodynamiques à l'échelle du 1/10 000 de la commune d'Enchastrayes (Augier et Rebmann, 1990), d'un versant de la commune de Jausiers (Koehlé, 1994), de la vallée d'Abriès, (Bossu, 1995), etc. ;
- des repérages d'anciens mouvements par photo-interprétation sur une partie des communes de Jausiers et Enchastrayes, (Quintlé, 1995, 1996) ;
- une banque de données historiques des aléas naturels (mouvements de terrain, inondation et crues, séismes, etc.) depuis 1850 par une recherche dans les archives (Amiot et Nexon, 1995) ;
- une analyse dendro-chrono-géomorphologique autour du glissement-coulée de Poche (Kirchhoffer, 1994) ;
- une analyse des conditions climatiques à partir des données anciennes, des données des postes Météo France de Jausiers et de Barcelonnette et des données d'un pluviographe chauffant installé par le CEREG depuis 1994 à la ferme de la Rente non loin de la coulée de Super-Sauze (Sommen, 1995) ;
- des mesures de déplacements de surface sur la coulée de Super-Sauze depuis 1991 (Weber, 1992 et 1993) ;
- des mesures de géophysique par sismique réfraction et résistivité électrique sur la coulée de Poche (Schmutz, 1995).

Des documents établis dans le passé par d'autres équipes de chercheurs sont également disponibles dont notamment : une carte géomorphologique de la fenêtre de Barcelonnette au 1/25 000 (Salomé et Beukenkamp, 1988) et l'inventaire des mouvements de terrain évoqué précédemment (Légier, 1977).

### 5.2.5. Conclusion

Sous un climat méditerranéen de montagne agressif, ce bassin, développé dans les marnes, offre de nombreux avantages pour la recherche envisagée :

- *mouvements de terrain complexes de toutes dimensions* (Super-Sauze, Poche, La Valette, Pra-Bellon, Bois Noir, ...). Certains glissements donnent progressivement naissance à des coulées de débris qui évoluent au rythme des conditions hydro-climatiques. Dans certaines conditions, des laves torrentielles peuvent s'initier à partir de ces accumulations ;
- *formations marneuses évolutives au comportement très variable* : mécanismes de rupture de massifs rocheux par glissements structuraux, évolutions progressives du matériau sous l'effet de la météorisation et de la cinématique, progression de coulées de débris dans un chenal d'écoulement, déclenchement de laves torrentielles cohésives ;

- *risques importants* en raison des volumes mobilisés et des vitesses parfois élevées de certains mouvements qui présentent un véritable danger pour les populations et aménagements situés à l'aval ;
- *enjeux scientifiques* par le fait que ces glissement-coulées sont très répandus dans le monde ainsi les résultats obtenus pourront être utiles hors du site étudié sous réserve d'en vérifier la transposabilité.

La richesse (en nombre comme en variété) et la localisation des mouvements de terrain peuvent être expliquées par la conjonction de divers facteurs prédisposants et déclenchants favorables d'ordre géologique et géomorphologique, mais aussi d'ordre climatique et hydrologique ou encore anthropique. Ainsi, reprenant en partie les travaux de Légier (1997), Weber (2001) indique que :

- les 2/3 des mouvements concernent les marnes noires recouvertes ou non par les formations quaternaires ;
- il y a une nette répartition des mouvements en fonction de *la pente*, de *l'altitude* et de *l'exposition* des versants, en relation directe avec la structure et la lithologie évoquées précédemment mais aussi avec une *influence climatique indéniable*. Les mouvements de terrain sont plus fréquents sur l'ubac entre les altitudes 1200 m et 1800 m que sur l'adret où ils s'échelonnent entre 1200 m et 1500 m.

Mais il reste encore beaucoup à faire pour préciser les mécanismes et les processus d'évolution pour pouvoir à terme établir une prévision temporelle et spatiale fiable de ces divers mouvements et principalement des glissements-coulées.

### **5.3. Le site d'étude principal : le glissement-coulée de Super-Sauze.**

Le glissement-coulée de Super-Sauze (SAU) se situe en rive gauche de l'Ubaye, sur la commune d'Enchastrayes dans un bassin torrentiel fortement raviné en bad-lands (Photo 5.7) et dominé par les silhouettes massives du Chapeau de Gendarme (2682 m) et des Brecs premier (2560 m) et second (2596 m). D'une longueur de 80 à 500 m, les interfluves (échines) nues, aiguës, très pentues, plus ou moins parallèles ou coalescentes sont espacées de 40 à 50 m. Ils individualisent des ravines plus ou moins profondes aux écoulements saisonniers et quelquefois pérennes. Deux imposantes échines orientées NW/SE canalisent le torrent de Sauze, en se rejoignant en pince vers l'aval (Figure 5.2b). Le torrent de Sauze prend sa source à La Goutta (2077 m) à la base du glacier rocheux à la morphologie caractéristique en lobe arqué. La végétation consiste en une maigre forêt de mélèzes et de pins sylvestres qui s'étend jusqu'à 1900 mètres d'altitude et en une pelouse alpestre.



Le bassin est dominé par les silhouettes massives du Chapeau de Gendarme (2682 m) et du Brec second (2596 m).

*Photo 5.7 : Bassin torrentiel raviné en bad-lands de Super-Sauze Vue vers le Sud depuis Faucon de Barcelonnette (Cliché : Malet, 1998).*



Au bassin torrentiel de Super-Sauze (en haut à droite) succède le chenal d'écoulement du torrent du Sauze étroit et profondément encaissé. Après la confluence des torrents du Sauze et des Galamonds, le vaste cône d'épandage de la Chaup a une superficie d'environ 1 km<sup>2</sup>. Un lotissement est implanté à quelques mètres du torrent. On distingue également la station du Sauze perchée à une altitude d'environ 1400 m.

*Photo 5.8 : Torrent du Sauze (vue vers le Sud, juillet 2002)*

Aucune information fiable et précise n'était disponible sur les conditions et la date du déclenchement des glissements à l'amont, ni sur la progression de la coulée à l'aval, contrairement par exemple, au glissement-coulée de La Valette qui avait été bien observé et suivi dès son déclenchement en 1982. Aussi, l'évolution historique a été déterminée par D. Weber (2001) grâce à l'analyse diachronique d'ortho-images et de MNT réalisés par photogrammétrie numérique (Chapitre 6) à partir des clichés de l'IGN dont les plus anciens datent de 1956.

Je me limiterai à donner les principaux traits morphologiques actuels qui seront décrits à partir de la carte morphologique (Figure 5.2a) levée en juillet 1999 à l'échelle du 1/1 000 et des photographies de la figure 5.4 et les principales étapes de l'évolution historique. Le lecteur pourra trouver une description très minutieuse et précise dans la thèse de Dominique Weber (2001).

### **5.3.1. Morphologie et évolution**

Le glissement-coulée s'étend sur une longueur de 800 m entre les altitudes de 2105 m à la couronne et 1740 m à la base de la coulée (Figures 5.3a et 5.4a), pour une pente moyenne de 25° et une superficie de l'ordre de 17 ha. *L'escarpement principal* (Figures 5.4a-b-c), en amphithéâtre, atteint une hauteur de 80 à 100 m. Il laisse apparaître en coupe une couverture morainique d'une dizaine de mètres d'épaisseur qui repose sur les marnes saines. De larges fissures ouvertes, verticales ou obliques, témoignent du recul de la couronne (2 m en 2000, dans l'axe de la coulée). Les plans de stratification présentent un aval-pendage de 65°. Son architecture est très irrégulière avec des flexures à très petit rayon de courbure et des diaclases soulignées par des filons de calcite.

*La zone d'ablation* prend la forme d'un replat supérieur (Figures 5.4a-c) de 7-8 ha de superficie entre 1930 m et 1970 m d'altitude. La topographie de détail est très chaotique. Des panneaux (Figure 5.4b) aux dimensions plurimétriques se retrouvent au pied de l'escarpement, parfois noyés dans un matériau plus fin. Leur structure (lamines, schistosité, intercalation de lits calcaires) est toujours conservée, mais leurs arêtes émoussées traduisent leur ancienneté. Ce replat est limité à l'aval par un *escarpement secondaire* (dont la pente atteint 30°, parfois 40 à 50°), au profil concave, au tracé en arc de cercle marqué par de larges fissures de traction, perpendiculaires à la pente, et de nombreux suintements (Figure 5.4c). Des panneaux de matériau remanié basculent par paquets successifs emboîtés le long de ce versant raide et s'écoulent dans la pente sur des distances pouvant atteindre 100 à 150 m.

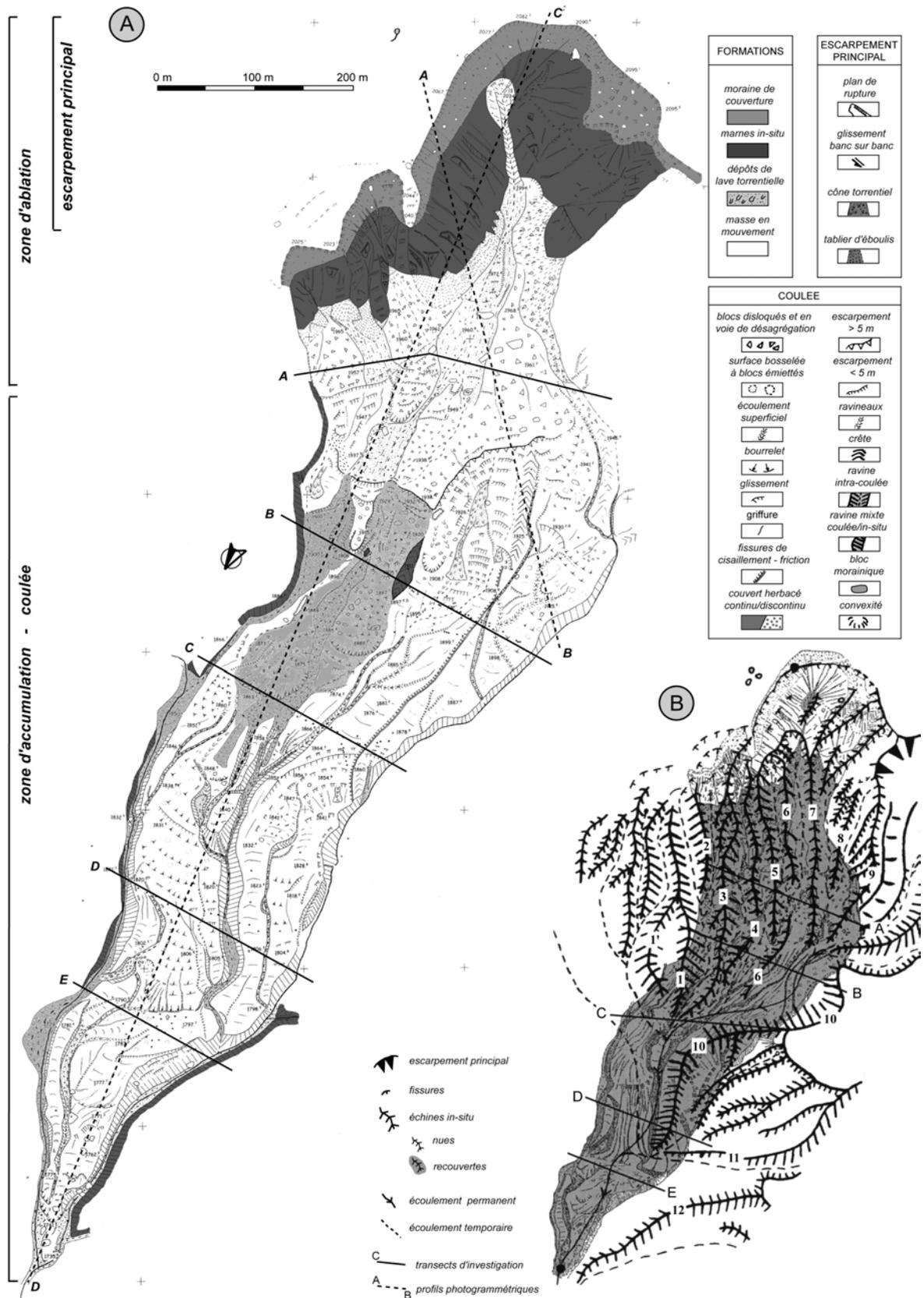


Figure 5.3 : Morphologie du glissement-coulée de Super-Sauze : (a) en 1999 ; (b) extension de la coulée sur la paléotopographie du bassin torrentiel des Roubines de 1956 (in Maquaire et al., 2001).

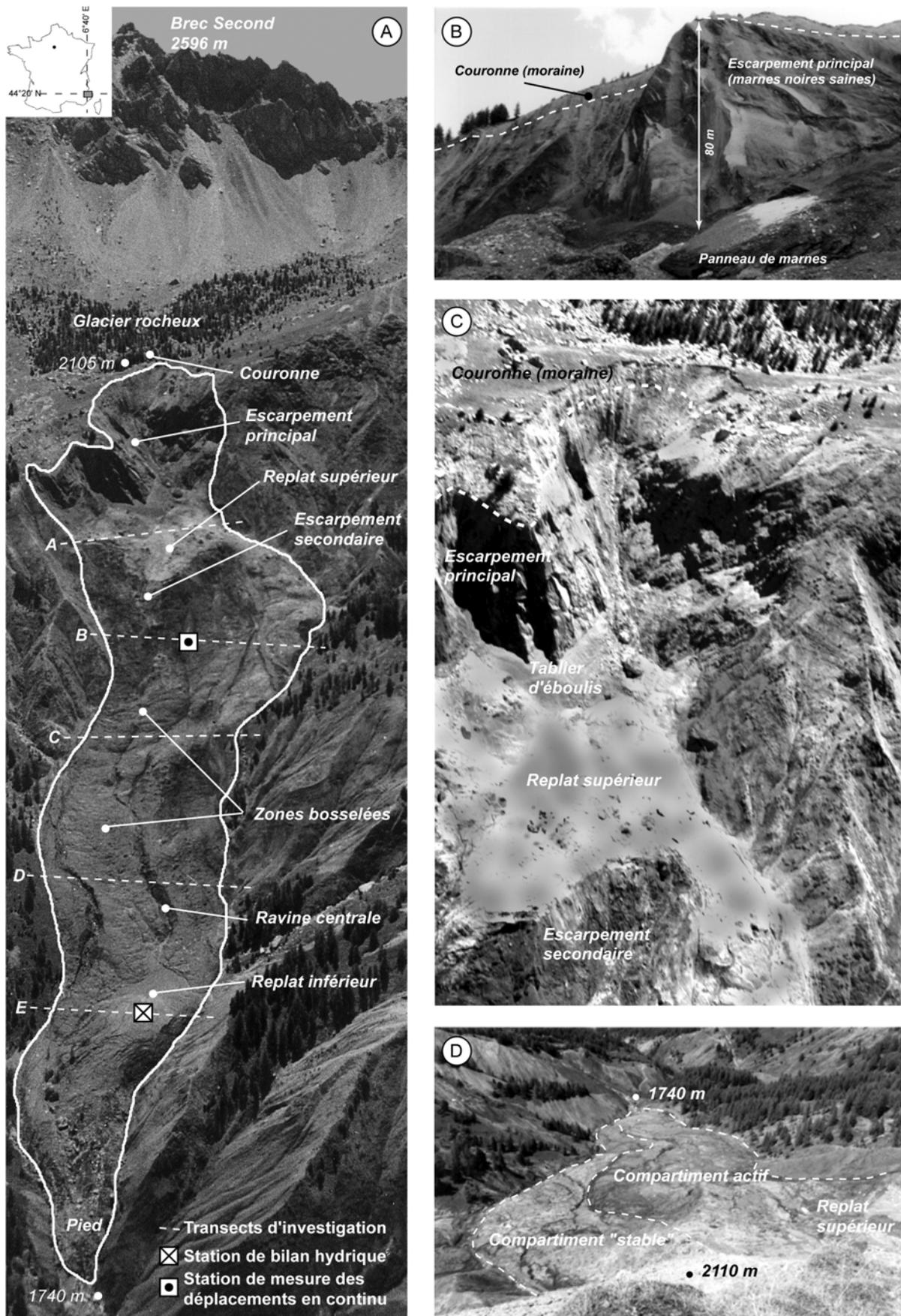


Figure 5.4 : Vue aérienne du glissement-coulée : (a) en 1991 ; (d) en 2000 ; (b, c) l'escarpement principal (in Maquaire et al., 2001).

La coulée qui s'est développée en contrebas du replat supérieur constitue la zone d'accumulation *stricto sensu* (Figure 5.4a). Les écoulements hydriques se concentrent à la base de l'escarpement secondaire, où prennent naissance des coulées boueuses localisées qui forment des bourrelets. Des fissures de traction apparaissent autour d'un éperon de marnes en place qui émerge actuellement au dessus de la coulée vers 1900 m (transect B). A l'aval, la pente s'adoucit et devient rectiligne. La fréquence et la taille des blocs diminuent en surface vers l'aval. Sous l'action des agents météoriques, les blocs et panneaux de marnes se désagrègent et produisent une matrice argileuse emballant de nombreux débris de tailles variables. La conséquence est la formation de zones bosselées où chaque bosse correspond à un bloc en voie de désagrégation (Klotz, 1999). Dans le tiers inférieur de la coulée, une *ravine centrale* qui entaille le matériau sur une profondeur de plus de 6 m, collecte les eaux de ruissellement et draine la nappe.

Le *replat inférieur*, en forme de triangle de quelques dizaines de mètres de côté, bombé et en légère contre-pente, termine la coulée. Sa partie occidentale présente de nombreuses fissures de traction sur un rebord escarpé. Plus à l'Est, le replat se raccorde au torrent du Sauze par une rupture de pente, une topographie chaotique, où des arbres morts sont entremêlés. La pointe terminale présente des versants raidis par l'érosion des deux torrents pérennes adjacents qui l'encadrent. Leur confluence marque l'extrémité aval de la coulée, au pied du bourrelet terminal.

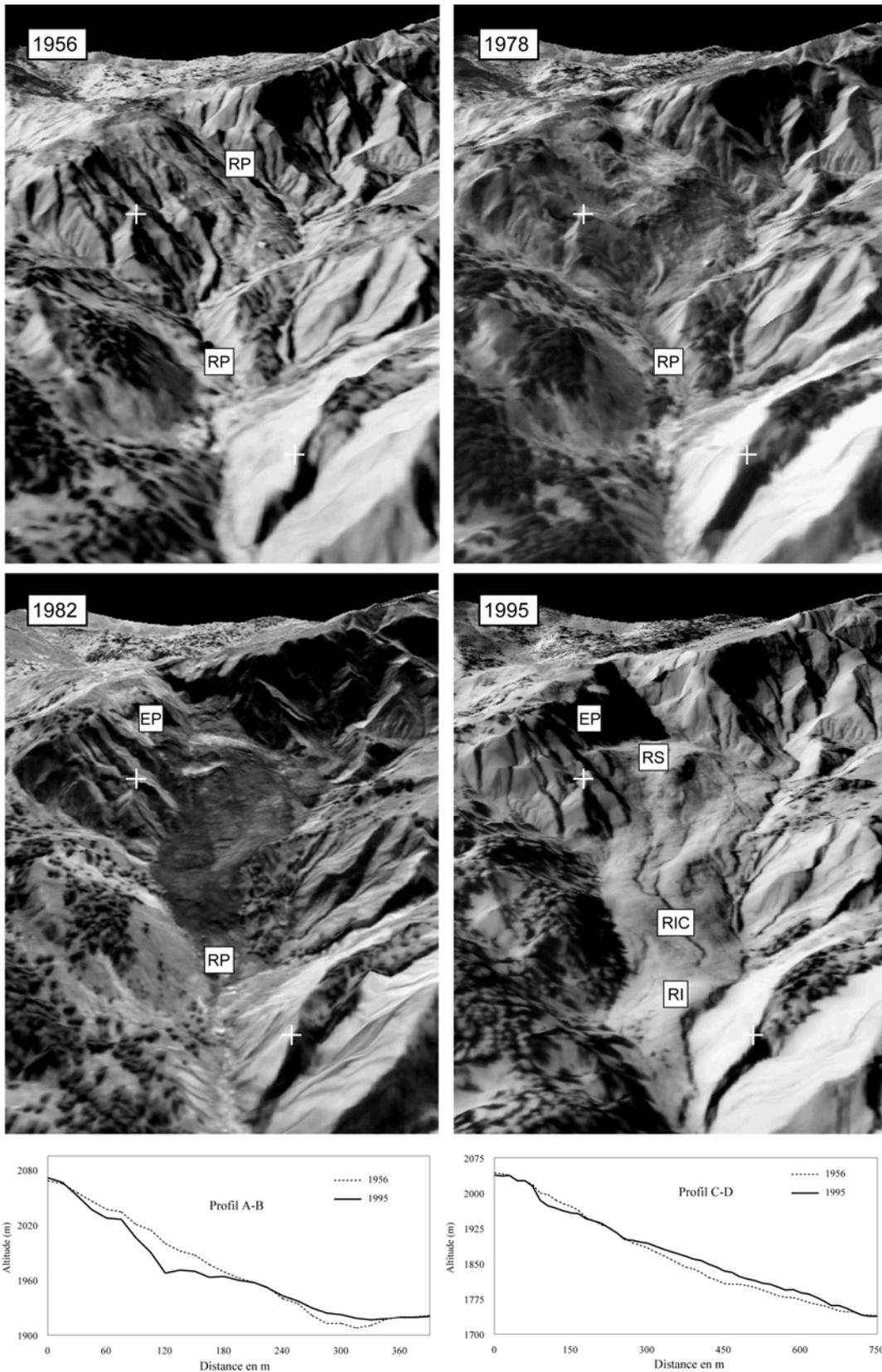
#### *Son évolution historique :*

L'analyse diachronique de photographies aériennes de l'IGN permet de situer les secteurs et les périodes de déclenchement et d'extension du glissement-coulée, de définir des vitesses de recul de l'escarpement principal ou des vitesses d'extension de la coulée de débris (Weber, 2001). Les quatre vues perspectives reconstituées de 1956, 1978, 1982 et 1995 (Figure 5.5) permettent de l'illustrer. Celles de 1971 et 1988 seront trouvées dans Weber et Hermann (2000).

Avant 1956, les nombreuses ravines, parallèles et coalescentes sont bien visibles. En contrebas du glacier rocheux, une ravine présente un recul, une largeur et une profondeur largement plus importants que ses voisines ; la moraine y est déjà largement entaillée par le ruissellement superficiel. Entre 1956 et 1971, des glissements superficiels s'opèrent, essentiellement aux dépens de la moraine, et provoquent un remplissage partiel des ravines du bassin. La ravine principale et la plupart des crêtes d'interfluves émergent encore entre ces accumulations. Entre 1971 et 1978 puis surtout entre 1978 et 1982, des ruptures importantes affectent le substratum marneux. Elles se traduisent par l'extension croissante d'un escarpement principal dans la partie supérieure du bassin. Les marnes déstabilisées se transforment en coulées visqueuses fossilisant les ravines situées en contrebas.

Dans les années 1980-90, si le recul de l'escarpement est modeste à l'amont, la coulée s'est considérablement développée sur une longueur de l'ordre de 180 m dans le thalweg principal. Ainsi, les mobilisations de matériau les plus importantes ont été détectées entre 1971 et 1982. Les profils topographiques longitudinaux (Figure 5.3a) issus des différents modèles altimétriques montrent très bien l'inversion progressive du relief qui s'opère entre zones d'ablation à l'amont et d'accumulation à l'aval (Figure 5.5).

La morphologie montre bien un tracé sinueux et des formes particulières qui semblent épouser une paléotopographie. L'analyse des photographies aériennes le confirme, la coulée s'est développée sur une trentaine d'années à un rythme variable en suivant et comblant la topographie accidentée de ravines et d'échines comme celles observées dans l'environnement immédiat du bassin torrentiel.



(RP) : ravine principale, (EP) : escarpement principal, (RS) : replat supérieur, (RIC) : ravine intra-coulée.

Figure 5.5 : Vues perspectives du bassin torrentiel des Roubines en 1956, 1978, 1982 et 1995. Exploitations quantitatives des traitements photogrammétriques numériques - profils multi-temporels (in Weber, 2001).

*Son évolution future :*

La probabilité de survenance d'une brusque et rapide évolution de la coulée ou d'une transformation éventuelle de tout ou partie de la masse accumulée en laves torrentielles n'était pas évaluée alors qu'à l'aval des infrastructures et des habitations constituaient des éléments exposés (Photo 5.8). Dans le but d'évaluer ce niveau d'aléa, il est nécessaire de :

- définir la paléotopographie car si son allure était fortement suggérée par la morphologie, il fallait tout de même en préciser la position et la géométrie exacte ainsi que la structure interne de la masse accumulée au-dessus ;
- comprendre son fonctionnement actuel et futur en relation avec les conditions climatiques par une modélisation hydromécanique, tenant compte de la variété des différentes lois de comportement des matériaux (fluide ou frottant) en appliquant différents modèles (Chapitre 3).

C'est pour répondre à ces questions que la coulée a été progressivement auscultée et surveillée.

### **5.3.2. Réseau de surveillance**

#### **5.3.2.1. Auscultation par forages**

##### *a) Contraintes et stratégies d'investigation.*

En raison de la grande hétérogénéité et de la forte variabilité latérale et amont-aval supposée de l'épaisseur de la coulée, il a été choisi de mettre en oeuvre, dans un tel site complexe, des techniques et méthodes permettant de disposer d'un maximum d'information complémentaire de sources différentes, puis de les confronter afin d'améliorer la restitution finale de l'objet. Les moyens d'investigation ont été choisis après qu'une étude de faisabilité, menée en mai 1996, dans le cadre d'un stage de terrain d'étudiants de DEA, ait montré qu'une prospection par pénétromètre dynamique apportait les résultats escomptés en terme de profondeur d'investigation et de « relative facilité » d'emploi.

L'accès terrestre du site étant impossible à des véhicules (zones humides et boueuses peu portantes, ravines larges et profondes) des outils d'investigation « légers » (pénétromètre dynamique, vibro-percuteur) ont été retenus en complément d'outils plus « lourds » héliportés, afin de pouvoir mettre en place des tubes inclinométriques et des piézomètres ouverts, et réaliser des essais pressiométriques et des essais d'eau (Lugeon et Lefranc). Une sondeuse NUZI (100 ch) a été héliportée (Photo 5.9 et 5.10) et six sondages profonds (un forage carotté et cinq forages destructifs au tricône avec enregistrements des paramètres) ont été réalisés par l'entreprise INFRASOL sur deux zones « planes » situées dans la partie amont de la coulée (transects A et C). Les sondages complémentaires ont été réalisés avec un pénétromètre dynamique « lourd » DL 030 (mouton de 30 kg) (Photo 5.17), un pénétromètre dynamique « léger » (mouton de 10 kg) et un vibro-percuteur à gouges (Photo 5.13 et 5.14) permettant la visualisation de la nature du sol et le prélèvement d'échantillons intacts ou remaniés jusqu'à une profondeur de l'ordre de 9 m (Maquaire *et al.*, 2001). Ces techniques classiques de prospection par forages géotechniques ponctuels ont été complétées par une prospection géophysique mettant en oeuvre plusieurs méthodes qui ont nécessité des adaptations et des développements spécifiques (Chapitre 6).



*Photo 5.9 : Hélicoptage de la sondeuse Nuzi sur le profil C (juillet 1996).*



*Photo 5.10 : Sondeuse Nuzi en place sur le profil A. Vue vers l'Est (juillet 1996).*



*Photo 5.11 : Essai préssiométrique : contrôleur pression-volume et foreuse Nuzi (juillet 1996)*



*Photo 5.12 : Sonde inclinométrique et tube rainuré en place dans un forage.*



*Photo 5.13 : Vibropercuteur à gouges sur le profil B (Cliché : Malet, mai 1998).*



*Photo 5.14 : Vibropercuteur à gouges sur le replat E (mai 1997).*

Les investigations ont été menées le long de cinq profils transversaux (Figure 5.3a) dont l'implantation a été guidée par la morphologie particulière décrite précédemment (replats supérieur et inférieur, échines apparentes, ...) et par la visualisation des photographies aériennes les plus anciennes (Weber et Herrmann, 2000). Le principe général retenu a été d'étalonner et de corrélérer en quelques points les différents résultats obtenus par les différentes méthodes, puis d'étendre la prospection à l'aide des outils les plus maniables, tels les pénétromètres dynamiques et le vibro-percuteur.

### b) forages, essais et équipements

Si la majeure partie de la prospection a été réalisée au cours de l'été 1996, plusieurs campagnes complémentaires avec pénétromètre « lourd » ou vibro-percuteur ont été nécessaires pour affiner les résultats dans quelques zones particulières ou bien suivre l'évolution dans le temps de la structure interne, ou encore pour compléter le réseau de surveillance par la mise en place de nouveaux tubes piézométriques ou tout simplement pour les remplacer. En effet, en raison des forts déplacements (plusieurs mètres par an, chapitre 8), de nombreux tubes ont été cisailés et ont dû être remplacés, généralement au début du printemps.

La répartition des forages et essais par transect est donnée dans le tableau 5.1.

| Transect     | Essai de pénétration dynamique<br>(longueur max = 9.30ml) | Sondages au vibro-percuteur<br>Ø 30 à 100 mm<br>(0.70 à 7.00 ml) | Sondages destructifs paramétrés<br>Ø 63 à 110 mm<br>18.50 ml à 28.80 ml | Sondage carotté<br>Ø 116 mm<br>13.50 ml | Essais pressio-métriques | Tubes Piézométriques<br>Ø 25 à 70 mm | Tubes inclinométriques<br>12,75 à 18,40 m<br>total : 44 ml | Essais Lefranc |
|--------------|---|--|---|---|--------------------------|--------------------------------------|--|----------------|
| A            | 14  | /  | 2   | 1                                       | 11                       | 1                                    | 2  |                |
| B            | 36  | 16   | /   | /                                       | 3                        | 14                                   | /  | 32             |
| C            | 39  | 3  | 3   | /                                       | /                        | 11                                   | 1  | 21             |
| D            | 17  | 3  | /   | /                                       | /                        | 3                                    | /  | 8              |
| E            | 19  | 6  | /   | /                                       | /                        | 14                                   | /  | 18             |
| <b>Total</b> | <b>125</b>  | <b>27</b>  | <b>5</b>  | <b>1</b>                                | <b>14</b>                | <b>43</b>                            | <b>3</b>   | <b>79</b>      |

Tableau 5.1 : Répartition des forages, essais et équipements sur la coulée de Super-Sauze par transect d'investigation (état en novembre 1999).

A noter que plusieurs fosses, réalisées à la pelle et à la pioche ou des forages à la tarière à main, ont permis le prélèvement d'échantillons intacts ou remaniés afin d'établir les caractéristiques physiques, hydrodynamiques, mécaniques et rhéologiques des formations (Photo 5.15 et 5.16). Les analyses et essais réalisés au laboratoire sont donnés au Chapitre 7 en même temps que le commentaire sur les résultats obtenus.



Photo 5.15 : Fosse manuelle réalisée à la pelle et à la pioche sur le replat E : prélèvement d'échantillons (Cliché : Malet, mai 1999).



Photo 5.16 : Essais au scissomètre dans une fosse manuelle sur le replat E (Cliché : Malet, mai 1999).



Photo 5.17 : Pénétrömètre dynamique lourd DL 30 et accessoires. Vue vers le Nord sur l'adroit de Faucon de Barcelonnette (juillet 1996).

Puisque l'interprétation des essais pénétrométriques peut être difficile (essai en aveugle), plusieurs carottages, fosses manuelles (pelle/pioche) et essais pressiométriques (Photo 5.11) ont permis d'étalonner les variations de résistance.

### 5.3.2.2. Le dispositif de mesures

Il a été progressivement mis en place à partir de 1996. Sur plusieurs sites du glissement-coulée (Tableau 5.2), des grandeurs mesurées, en continu et de manière épisodique lors de campagnes, permettent d'appréhender le fonctionnement du système. On distingue les *mesures de base* permettant de connaître les grandeurs classiques associées à l'étude de mouvements gravitaires (pluie, nappe, déformations) réalisées depuis l'origine du projet et les *mesures occasionnelles* réalisées pour répondre de manière plus limitée dans le temps à une question donnée.

Les *grandeurs de base* consistent en des données :

- de déformations en surface et en profondeur (sous forme de déplacements) ;
- climatiques : précipitations, hauteur de neige, températures de l'air et dans le sol, rayonnement, hygrométrie, vitesse et direction du vent ;
- hydrogéologiques et piézométriques (variations du niveau piézométrique) ;
- hydrodynamiques (potentiel de pression/succion dans le sol).

Les *grandeurs « ponctuelles »* sont acquises lors de :

- campagnes *in situ* de caractérisation géomécanique (résistance, cohésion non drainée, texture, etc.) et hydrodynamique (conductivité, perméabilité, rétention, sorptivité, etc.) ;
- suivis occasionnels pour relever les variations : hydrologique (débits des torrents, chimie des eaux), de la géométrie de la structure interne (sondages), de la morphologie (MNT tachéométrique, GPS, photogrammétrie), des états de surface

| Matériel   | Paramètres mesurés  | Enregistrement<br>Maintenance   | Date<br>Installation                     |
|--|---|---|--|
| <b>Pluviographe chauffant</b><br>(Précis mécanique)<br><br><i>Ferme de La Rente, 1720 m.</i>                                     | Pluie<br>Equivalent liquide de neige<br>( <i>pluviomètre chauffant</i> )  | Contrôle et déchargement des enregistrements.<br>Graphique avant juillet 2001<br>Datalogger depuis juillet 2001   | Septembre 1994                           |
| <b>Station météorologique automatique</b><br>(Campbell)<br><br><i>Station Super-Sauze, 1760 m.</i>                               | vent (direction et vitesse),<br>température, hygrométrie,<br>rayonnement,<br>pluie<br>( <i>pluviomètre non chauffant</i> )  | Centrale CR10 et carte SMS.<br>Contrôle des enregistrements.<br>Changement de carte SMS.  | Juillet 1996                             |
| <b>Station de bilan hydrique</b><br>(Campbell)<br><br><i>Coulée de Super-Sauze,<br/>Transect E,<br/>1740 m.</i>                  | succions matricielles à 4<br>profondeurs (0.56 à 1.08 m)<br>( <i>4 tensiomètres UMS T3 &amp; T4</i> ),<br>niveau piézométrique<br>( <i>sonde de niveau PDCR 830</i> ),<br>teneurs en eau volumique,<br>( <i>8 Tubes TDR-Trime</i> ) | Centrale CR10X.<br>Contrôle et déchargement des enregistrements.<br>Contrôle du niveau d'eau des cannes et tubes TDR<br>Contrôle du niveau d'eau dans le tube piézométrique | Avril 1997                               |
| <b>Station de mesure des déplacements en continu</b><br>(Campbell):<br><br><i>Coulée de Super-Sauze,<br/>Transect B, 1850 m.</i> | déplacement en continu<br>( <i>extensomètre, Scaime</i> )<br><br>pluie<br>( <i>pluviomètre non chauffant</i> )<br>teneurs en eau volumique<br>( <i>3 Tubes TDR-Trime</i> )  | Centrale CR10X.<br>Contrôle et déchargement des enregistrements<br>Contrôle du déplacement (topométrie)<br>Contrôle de la tension du câble                                  | Juin 1999                                |
| <b>Limnigraphe Orphimèdes</b><br>(Ott)<br><br><i>Coulée de Super-Sauze,<br/>Transect B, 1850 m<br/>Transect E, 1740 m.</i>       | niveau piézométrique<br>( <i>sonde bulle à bulle</i> )  | Datalogger intégré.<br>Contrôle et déchargement des enregistrements.<br>Contrôle du niveau d'eau du tube piézométrique  | E :<br>Juin 1999<br>B :<br>Novembre 2001 |
| <b>Capteur de Hauteurs de Neige</b><br>(Campbell)<br><br><i>Coulée de Super-Sauze,<br/>Transect B, 1850 m.</i>                   | épaisseur du manteau neigeux<br>température de l'air<br>température du sol  | Centrale CR10X.<br>Contrôle et déchargement des enregistrements.<br>Contrôle de l'épaisseur de neige  | Avril 2000                               |
| <b>Réseau de surveillance topométrique et piézométrique</b><br><br><i>Coulée de Super-Sauze</i>                                  | déformations de surface,<br>( <i>65 repères topométriques</i> )<br>niveau piézométrique<br>( <i>30 tubes piézométriques</i> )   | Contrôle du déplacement (topométrie)<br>Contrôle du niveau d'eau des tubes piézométriques<br>Contrôle de la stabilité des piliers d'auscultation                            | Juin 1996                                |

Tableau 5.2 : Dispositif de mesure du glissement-coulée de Super-Sauze (mis à jour : juillet 2002).

Les protocoles de mesures sont ceux adoptés par la communauté scientifique internationale et tiennent compte des normes en vigueur. Etant donné les vitesses assez rapides de déplacement, un pas de temps horaire est adapté au suivi des déformations, alors qu'un pas de temps de 6 mn est nécessaire au suivi des grandeurs climatiques et hydrologiques selon la norme OMM. Les fréquences de contrôle et d'échantillonnage sont de l'ordre de 4 à 6 semaines en saisons « chaudes », c'est à dire en dehors de la période hivernale pendant laquelle le site est recouvert par un épais manteau neigeux.

*Les données de déformations de surface et de profondeur :*

Les *déplacements de surface* sont mesurés lors de campagnes depuis 1991 par tachéométrie (théodolite et distancemètre infra-rouge) à partir d'un réseau d'une soixantaine de repères de visées installés sur la coulée et au-dessus de l'escarpement principal. Après une réflexion portant sur les protocoles de mesures et de contrôle à adopter pour assurer la précision attendue d'un positionnement des points à 3-4 cm près (Lang, 1996), ce réseau a été complété et amélioré en 1996 par l'installation de deux stations de mesures bétonnées avec centrage forcé qui permettent des positionnement par triangulation. Les détails seront trouvés dans Malet *et al.* (2002a) et Weber (2001). Les levés sont réalisés en périodes « chaudes » d'avril à novembre (en hiver, l'épais manteau neigeux ne le permet pas), tous les 4 à 6 semaines environ. L'instabilité progressive des terrains sur lesquels sont implantés les stations « fixes » d'observation conduit à rechercher d'autres moyens et méthodes de mesures, si possible en continu : en effet, la station P1 n'est plus utilisée depuis deux

années, et la durée restante d'utilisation de la seconde station P2 est limitée. Les déplacements en continu sont mesurés depuis juin 1999 en un seul endroit de la coulée par un extensomètre à câble qui a été développé et adapté au site. J'en donnerai les détails dans le chapitre 6.

Les *déplacements en profondeur* ont été mesurés à partir des 3 tubes inclinométriques à 4 reprises entre le 10 septembre et le 1<sup>er</sup> octobre 1996, date à laquelle la sonde (Photo 5.12) s'est bloquée, et ensuite par le suivi des déplacements des têtes des tubages par topométrie couplée avec le passage de gabarits dans les tubages, d'octobre 1996 à juillet 2000. Les résultats sont donnés dans le chapitre 8.

#### *Les données climatiques :*

La variabilité spatiale et temporelle des paramètres climatiques est abordée à partir d'un réseau de deux stations pluviométriques et d'une station climatique. L'installation des stations n'a pas été facile en raison de l'instabilité des terrains et des conditions environnementales (relief, arbres, etc.) qui rendaient difficiles le respect des normes de l'OMM. Un pluviomètre chauffant à augets basculeurs installé depuis septembre 1994 à La ferme de La Rente, non loin du site, permet de calculer l'équivalent liquide des précipitations solides. En juillet 1996, une station climatique automatique avec mât de 3 m de hauteur (température, vitesse et direction du vent, rayonnement, humidité de l'air, pluviomètre non chauffant) a été installée sur une crête à Super-Sauze, soit à environ 800 m du site. Elle permet de calculer l'évapotranspiration potentielle et les pluies efficaces (Sommen, 1997). En juin 1999, compte tenu des contrastes d'exposition au vent notamment entre la station climatique de Super-Sauze et le glissement-coulée, un second pluviographe automatique à augets basculeurs a été installé au centre de la coulée. Ce pluviographe non chauffant ainsi que celui de la station climatique doivent être désinstallés en novembre et réinstallés en avril. Les données sont stockées sur des centrales d'acquisition (Campbell ou Précis Mécanique) à un pas de temps de 6 mn.

#### *Les données hydrogéologiques et piézométriques :*

La variabilité de la position de la nappe libre et des pressions interstitielles au sein de la masse en mouvement est abordée à partir d'un réseau d'une trentaine de tubes piézométriques répartis sur toute la coulée le long des cinq transects. Des *mesures épisodiques* sont réalisées à une fréquence de 4 à 6 semaines avec d'une sonde manuelle piézométrique. Des mesures en continu sont enregistrées à des pas de temps 6 minutes par des trois limnigraphes : un à sonde de pression PDCR installé en avril 1997 et deux Orphimèdes bulle à bulle installés en juin 1999 et novembre 2001.

#### *Les données hydrodynamiques :*

Les conditions d'infiltration de l'eau depuis la surface, les conditions de recharge de la nappe, la possibilité de génération de surpressions interstitielles et les variations de teneur en eau dans la zone non saturée du terrain, sont mesurées :

- depuis avril 1997, *en continu* au pas de temps de 6 mn grâce à la mise en place d'une station automatique de bilan hydrique munie de quatre cannes tensiométriques à différentes profondeurs : 0.56 à 1.08 m (Velcin, 1997) ;
- depuis juin 1996, *épisodiquement* grâce à de nombreux essais et mesures réalisés lors de campagnes : six tubes TDR-Trime pour établir des profils d'humidité ; 79 essais Lefranc (vidange et suivi de la remontée de l'eau en fonction du temps) dans les tubes piézométriques ; de nombreux essais d'infiltration sous charge variable (double-anneau) et plus de 200 essais d'infiltration sous tension (T.R.I.M.S.). Deux campagnes de simulations de pluie ont également été réalisées pour déterminer la partition infiltration – ruissellement en fonction des différents états de surface (Malet *et al.*, à paraître).

## 5.4. Sites de recherches connexes

Des recherches ont été engagées *sur la coulée de Poche* (24 ha), dans le bassin de Barcelonnette, dans le but d'une future comparaison des sites de coulée et d'une éventuelle transposition des résultats. Sébastien Manné et Lionel Schwin ont réalisé une étude morphologique et retracé l'évolution historique du glissement-coulée de Poche (Manné et Schwin, 1998). Julien Guillon a complété la cartographie et proposé un schéma d'évolution de la coulée basé sur l'observation de la morphologie, réalisé quelques forages au vibro-percuteur et installé des tubes piézométriques et entrepris une caractérisation physique et mécanique des formations (Guillon, 2001).

Des recherches sont entreprises depuis juin 1998 dans *le bassin versant du torrent de Faucon de Barcelonnette*, dans lequel une importante lave torrentielle s'était produite en août 1996, pour faire le lien entre la problématique évolution des glissements-coulées et celle des laves torrentielles. Alexandre Remaître et Stéphane Pierre ont entrepris une étude des mécanismes d'initiation et de contribution des laves torrentielles (Pierre et Remaître, 1999 ; Remaître, 2000). Alexandre Remaître poursuit en thèse de doctorat.

*Toujours à l'échelle locale*, des recherches ont également été engagées *sur les bassins expérimentaux de Draix* gérés par le CEMAGREF, dans des environnements assez semblables à ceux des bad-lands de Barcelonnette dans le but de faire le lien entre les problématiques « mouvements de terrain » et « érosion » *stricto sensu*. L'objectif est de préciser la contribution des mouvements de masse à la fourniture de matériaux, rythmes et volumes produits, en dehors de la simple production aréolaire. Une description minutieuse des bassins sera trouvée dans les mémoires de recherche cités ci-dessous. Ainsi, à partir de juin 1999, dans le BVRE du Laval puis du Moulin, pour leur mémoire de maîtrise puis de DEA, Arnaud Ritzenthaler a caractérisé les épaisseurs des formations superficielles par pénétrométrie dynamique (Ritzenthaler, 2000, 2001) et Emmanuel Truchet a établi leurs caractéristiques physiques et hydrodynamiques (Truchet, 2000, 2001). De plus, ces bassins offraient de longues chroniques de mesures sur les débits et charges solides (mesures qu'il n'était pas possible de faire à Super-Sauze pour des raisons techniques et financières). Les recherches se poursuivent depuis octobre 2002 dans le cadre de la thèse de doctorat d'Albin Bernard.

Ces recherches sont engagées dans le cadre de programmes coordonnés par Didier Richard et Nicolle Mathys du CEMAGREF de Grenoble, PNRH 1999-2000, PNRH 2001-2002 et MATE-RIO2 2002-2003. Elles bénéficient du concours des collègues du CEMAGREF (Nicolle Mathys, Jean-Manuel Ollivier, ...), des autres collègues participant à ces programmes et, plus généralement des collaborations trouvées dans le cadre du GIS « Draix : étude de l'érosion en montagne ».

*A l'échelle « large » du bassin de Barcelonnette*, Yan Sommen a poursuivi ses recherches en DEA par une analyse des structures climatiques et la définition d'indices climatiques favorables au déclenchement des mouvements de terrain (Sommen, 1997). Cette recherche a été poursuivie en maîtrise par Emmanuelle Jung (Jung, 1998), puis par Thomas Skubizewski pour tenter de préciser les structures pluviométriques par l'étude des séries de précipitations à des pas de temps fins (Skubizewski, 2000). Nicolas Hempelé a engagé une réflexion sur une cartographie géomorphologique adaptée à la gestion des risques mouvements de terrain (Hampelé, 1997). Stéphane Pierre a entrepris une réflexion méthodologique sur la cartographie du risque " mouvements de terrain " à l'aide d'un S.I.G. (Pierre, 2000). Ce travail préliminaire a été poursuivi en DEA par Elise Beck avec une application au versant adret des communes de Jausiers et d'Enchastrayes (Beck, 2002) et en thèse de doctorat à l'échelle du bassin par Yannick Thiery depuis janvier 2002. Enfin, et pour amorcer le lien avec le risque, Virginie Sautrey a engagé dans le cadre de sa maîtrise une analyse et une évaluation quantitative de la vulnérabilité sur le torrent des Galamonds (Sautrey, 2002).

## 5.5. Bilan et perspectives

Grâce à un effort concerté et durable, de très nombreuses informations et données de base sont maintenant disponibles dans le bassin de Barcelonnette, aussi bien à l'échelle du bassin, qu'à celle du site de recherches du glissement-coulée de Super-Sauze. L'approche multidisciplinaire, les auscultations et surveillances engagées depuis près de sept années ont permis la constitution d'une base de données unique en Europe sur ce type de phénomène. Les séries de données ont été vérifiées, calibrées et validées. Nous n'avons pas eu à déplorer de problèmes de dérive de capteurs ou d'enregistrement de données. Les séries sont donc homogènes et continues sauf parfois quelques décrochages de tensiomètres en période estivale. Le plus gros problème a été la destruction de la station de bilan hydrique par un troupeau de vaches « folles » malgré la clôture périphérique de protection. Ces données ont été analysées et mises en relation (par exemple, comparaison des séries climatiques avec celles de la station Météo France de Faucon de Barcelonnette, ...). Elles vont maintenant permettre de nourrir les différentes modélisations envisagées. L'acquisition de ces données n'a été permise que grâce au courage et à la ténacité des nombreux étudiants et jeunes chercheurs et aux multiples collaborations.

De nombreux problèmes ont dû être résolus pour faire face aux contraintes de ce site contraignant : topographie marquée, climat agressif (neige, gel, ...), déplacements et déformations assez rapides, formations aux faciès changeant selon les conditions climatiques, etc. Ainsi, il a fallu rechercher, développer et adapter à ces milieux montagneux difficiles d'accès et très hétérogènes, des méthodes et des techniques pour la mesure des déplacements en continu par extensomètre à câble et par GPS, pour la cartographie et la prospection géophysique. Ces développements sont présentés dans le chapitre 6. De même, la nature des formations hétérogènes a demandé la mise en œuvre de protocoles de prélèvements et d'analyses particuliers (Chapitre 7).

Il faudrait maintenant assurer la pérennité des mesures de base pour obtenir de plus longues séries permettant le suivi des évolutions et l'observation d'évènements de fréquence rare.

Je peux tout de même regretter que le site n'ait pu être équipé que progressivement au rythme des financements et qu'aucune solution n'ait été à ce jour trouvée pour permettre, facilement et à des coûts acceptables, la mesure des déformations en profondeur compte tenu des forts déplacements de surface. Cela constitue en soit une perspective pour rechercher une méthode simple d'imagerie de la variation de la géométrie de la structure interne. De même, aucune mesure des contraintes totales *in situ* à différentes profondeurs n'a pu être entreprise en raison des coûts d'une telle opération et de la durée de vie limitée des cellules de pression en raison des déplacements. Il faudrait trouver des financements pour pouvoir amener l'électricité et équiper au moins le pluviographe de la station climatique de Super-Sauze d'un système chauffant et ainsi permettre l'enregistrement de séries de données continues sur l'ensemble de l'année. Pour celui de la coulée, il ne semble pas y avoir de solution actuellement, car il n'est pas envisageable d'y amener le réseau électrique en raison du coût exorbitant d'une telle opération, et il n'existe pas à ma connaissance sur le marché de système alimenté par énergie solaire suffisamment performant pour faire fondre la neige, sauf à y installer des surfaces démesurées de panneaux solaires.

Ce site s'inscrit parfaitement dans le tissu de la recherche, au niveau national ou international à travers les programmes de recherches de l'ACI Catastrophes Naturelles (*MOTE, SAMOA*), du PNRN (*ECLAT*) et dans le cadre du 5<sup>ème</sup> PCRDT (programmes *ALARM, RETINA*) et du futur 6<sup>ème</sup> PCRDT en particulier dans le projet de Réseau d'Excellence « *MOUVEMENTS GRAVITAIRES* » qui a identifié ce site comme représentatif d'un type de mouvement de terrain spécifique, où la connaissance scientifique est reconnue et où le site est équipé et suivi sur des durées suffisamment longues pour être représentatives des phénomènes et processus étudiés permettant de déduire les temps de récurrence et l'intensité des événements.

D'ores et déjà, ce site de recherche est reconnu et utilisé par la communauté scientifique nationale et internationale.

## Chapitre 6 : Les développements méthodologiques

Ces développements méthodologiques sont des préalables indispensables pour accomplir des progrès dans la compréhension des processus. Ainsi, à partir principalement du site de la coulée de Super-Sauze, une grande part de mes recherches a été consacrée, en collaboration, au développement et à l'adaptation à ces milieux montagneux difficiles d'accès, de méthodes d'investigation du sous-sol et de mesures des déplacements et de cartographie pouvant aussi être facilement transposables à d'autres sites.

Je présenterai successivement les résultats obtenus lors :

- du suivi en continu des déplacements par un système à câble et roue potentiométrique et par la technique GPS mise en œuvre en continu sur de longues périodes ;
- de la génération de MNT avec une haute résolution (précision 0,5 m dans les trois directions) à partir de photographies aériennes basses altitudes traitées par photogrammétrie numérique ;
- de l'investigation par prospection géophysique des coulées marneuses ;
- de la caractérisation du manteau dégradé du substratum marneux à l'aide d'un pénétromètre dynamique à énergie variable couplé à des observations morphologiques ;

Pour chacun des développements techniques et méthodologiques, je préciserai les circonstances, les projets de recherche, les personnes ou les équipes qui ont permis d'engager ces travaux de recherches. Ensuite, je donnerai les principaux résultats et les perspectives de recherches. De même, les principales références seront indiquées pour lesquelles certains articles seront trouvés en annexe II.

### **6.1. Suivi en continu des déplacements par GPS et extensométrie**

En complément des mesures de déplacements de surface réalisées épisodiquement par tachéométrie et dans l'impossibilité financière d'installer une station topométrique automatisée, comme cela est fait à la Clapière ou à Séchillienne (Chapitre 4), il a fallu rechercher un autre moyen de mesurer ces déplacements en continu. L'existence d'une portion d'échine de marnes *in situ* qui émergeait en permanence de la coulée et dont la stabilité était mesurée et vérifiée depuis 1996, permettait d'envisager l'installation d'un extensomètre à câble. En 1998 avec Jean-Philippe Malet, nous avons développé un système adapté au site. Ce système a été installé en juin 1999.

Mais pour bien apprécier la variation spatiale de ces déplacements en continu, il était préférable de compléter ce point de mesure par d'autres. Comme l'installation de systèmes similaires au précédent n'était pas possible (aucun autre secteur de la coulée n'y était favorable), nous avons donc envisagé l'utilisation du GPS qui jusqu'alors était seulement utilisé lors de campagnes de mesures répétées mais pas encore pour la surveillance en continu sur de longues périodes.

Après une étude préliminaire de faisabilité de l'utilisation du GPS en milieu montagneux engagée en 1997 par Loïc Gallisson dans le cadre de son stage de fin de seconde année de l'ENSAIS (Gallisson, 1997), le travail a été mené par Jean-Philippe Malet dans le cadre de sa thèse. Il a été essentiellement financé par le Programme National sur les Risques Naturels (PNRN) géré par l'Institut National des Sciences de l'Univers (INSU) dans le projet « *Développement de modèles de traitement en géophysique adaptés aux glissements-coulées des marnes callovo-oxfordiennes du bassin de Barcelonnette (Alpes de Haute Provence). Modélisation de leurs comportements* » que j'ai coordonné de 1997 à 1999 et financé dans une moindre mesure par le programme européen *Newtech*. Il a bénéficié du soutien scientifique d'Eric Calais de l'UMR Géosciences Azur à Nice et du soutien logistique du Parc de l'INSU pour le prêt de plusieurs GPS. En 2002, grâce aux soutiens financiers du Conseil Scientifique de l'ULP et de l'INSU, nous avons pu acquérir une plate-forme GPS bi-fréquence RTK Station totale 5700 Trimble. Trois publications sont parues dans des revues internationales.

### **Principales références :**

- Malet J.-P., Hartig S., Calais E., **Maquaire O.** (2000). Apport du GPS au suivi en continu des mouvements de terrain. Application au glissement-coulée de Super-Sauze (Alpes-de-Haute-Provence, France). *C. R. Acad. Sc., Série Ila*, 331, vol. 12, pp. 175-182.
- Malet, J.-P., **Maquaire, O.**, Calais, E. (2002a), The use of Global Positioning System techniques for the continuous monitoring of landslides: application to the Super-Sauze earthflow (Alpes-de-Haute-Provence, France), *Geomorphology*, 43, 1-2, pp. 33-54. (**Annexe II.6**)
- Malet, J.-P., **Maquaire, O.** et Calais, E. (2002b), Le GPS en géomorphologie dynamique. Application à la surveillance de mouvements de terrain (Super-Sauze, Alpes du Sud, France). *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 2, pp. 165-180.

#### **6.1.1. Extensomètre : Système à câble et roue potentiométrique**

Le principe de l'extensométrie a été donné dans le chapitre 4. L'équipement est décrit par le détail dans Malet *et al.*, (2002a) (Figure 6.1). Je voudrais seulement rappeler quelques points concernant la mise au point et l'adaptation de ce dispositif et discuter de sa précision intrinsèque et de ces avantages et inconvénients.

La morphologie et la pente forte du secteur retenu (Profil B) pour l'installation du système imposait une distance d'environ 20 m entre les sites fixe et mobile avec le problème technique et financier pour assurer la tension du câble. Il était impossible d'installer un coûteux et sophistiqué système de tension du fil comme celui de la coulée de Tessina (Angeli *et al.*, 2000) ou un contre-poids pour assurer cette tension, car d'une part, la morphologie ne s'y prêtait et d'autre part, mes moyens financiers modestes ne le permettaient pas. Mais, une roue potentiométrique disposant d'un système de frein directement intégré pour assurer la tension du fil et limiter la flèche résiduelle a pu être achetée auprès de la Société Scaime.

Ainsi, le capteur est monté sur un châssis métallique réglable en hauteur ancré profondément dans la marne en place par un massif en béton (Figures 6.1d-e-f). La partie de détection comprend : la roue potentiométrique, une poulie de guidage et le câble (fil Invar au faible coefficient de dilatation) qui relie le site "fixe" au site "mobile". Une centrale d'acquisition Campbell CR10X alimentée par panneau solaire enregistre le déroulement du fil toutes les 6 minutes, en même temps que la température de l'air et la pluie. Le site mobile est un poteau métallique enfoncé de 2 m dans la coulée marneuse. La longueur déroulée (18-20 m) engendre, sous le poids du fil, une flèche négligeable de l'ordre de seulement de 20 cm.

La précision du dispositif est proportionnelle à la longueur déroulée du câble compte tenu : des effets du vent qui fait vibrer le câble, de l'éventuelle formation de manchons de glace sur le câble, de la dilatation thermique du câble (très réduite par l'utilisation d'un fil Invar), du passage fortuit d'animaux (une clôture protectrice a été installée), etc. L'effet du vent a été atténué, d'une part, en installant le câble le plus proche possible du sol, et d'autre part, lors du traitement du " signal " par un lissage des données avec une moyenne mobile. Des mesures de contrôle ont été régulièrement effectuées (topométrie, mesures d'angles et de flèche). Les déplacements plans puis les vecteurs sont calculés en tenant compte de l'inclinaison et de la flèche du câble qui varient au fur et à mesure du déroulement. Après contrôles en laboratoire, étalonnage du système, prise en compte de la flèche, comparaison des déplacements calculés et mesurés par topométrie, la précision moyenne est *centimétrique* (Malet *et al.*, 2002a).

Depuis son installation, ce dispositif est parfaitement performant et permet l'acquisition de données fiables. L'inconvénient majeur réside dans le fait que les mesures ne peuvent être entreprises qu'en saisons « chaudes ». Il faut démonter le système avant les premières chutes de neige (selon la saison fin octobre, mi-novembre) et le remonter au printemps (généralement avril). En effet, la neige se colle sur le câble froid, des glaçons se forment et entraînent la chute du câble au sol. Pour le maintenir toute l'année, il faudrait envisager un système de chauffage du câble Invar avec le problème majeur non résolu, à l'heure actuelle, de l'énergie nécessaire (les panneaux solaires ne suffisent pas).

L'autre inconvénient réside dans sa vulnérabilité compte tenu de son implantation, en aval de l'escarpement secondaire, et de sa position basse au plus près du sol. En effet, en novembre 2000, un important volume de matériau s'est écoulé à partir de l'escarpement secondaire, et recouvrant

l'échine B a descellé, emporté et submergé le dispositif. L'ensemble du matériel a pu tout de même être retrouvé et extrait de la masse marneuse, nettoyé, remis en état et réinstallé en mai 2001.

Autre point, par rapport à d'autres sites comme à la Clapière (Follacci, 1999), équipé d'extensomètres à fil tendu d'une centaine de mètres de longueur, le dispositif n'a pas souffert des surtensions provoquées par la foudre. Ces surtensions avaient conduit à Séchillienne à la mise en place de nombreuses protections parafoudre et au remplacement des fils Invar par du Kevlar, moins précis car soumis à la dilation thermique.

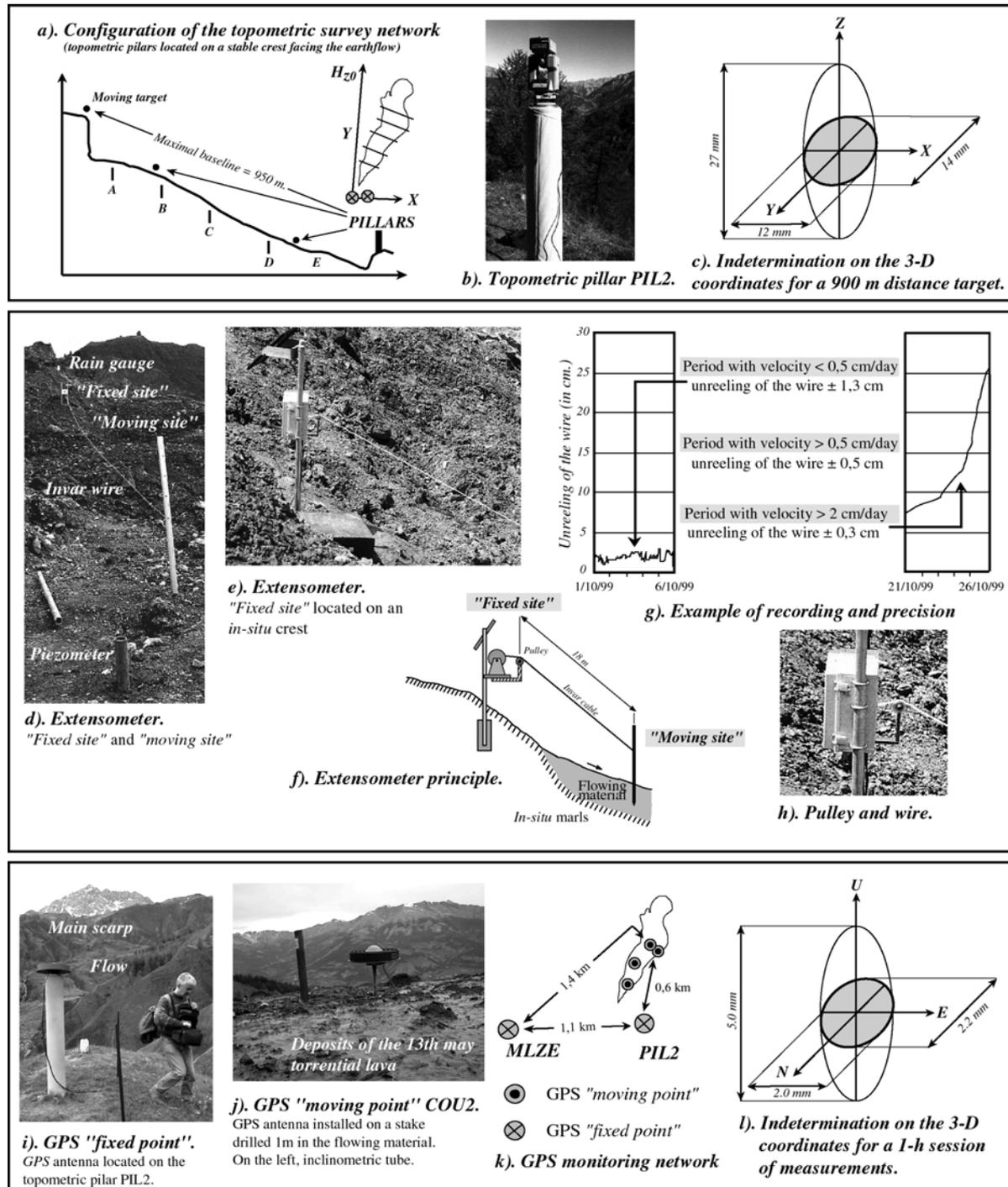


Figure 6.1 : Les dispositifs de surveillance des déplacements de surface de la coulée de Super-Sauze et précisions respectives : (a-c) réseau topométrique, (d-h) extensomètre et (i-l) système GPS (in Malet et al., 2002a).

## 6.1.2. Système de positionnement global : GPS en continu

### 6.1.2.1. Position du problème

Comme l'indique le chapitre 4, le GPS n'avait jamais été utilisé pour une surveillance en continu sur de longues périodes. Outre le coût de l'équipement, la raison principale est la suivante : si le GPS permet d'atteindre des précisions millimétriques pour des sessions longues de 24h, cette précision se dégrade lorsque la durée des sessions diminue, à cause des biais introduits par les multi-trajets et les variations de la constellation satellitaire au cours du temps (Genrich et Bock, 1992). Or, pour analyser en détail la cinématique d'un mouvement de terrain, et à plus forte raison pour en inclure la surveillance dans un système d'alerte en temps réel, il est nécessaire de disposer d'une position infra-centimétrique dans les trois dimensions et une résolution temporelle horaire ou infra-horaire. De plus, une précision millimétrique nécessite un traitement *a posteriori* sophistiqué des données GPS.

Afin d'évaluer la capacité de la technique GPS à conjuguer précision spatiale et résolution temporelle, une étude métrologique a été réalisée dans le but de déterminer la précision expérimentale qu'il est possible d'atteindre dans la surveillance de mouvements de terrain, en particulier, la variation de la précision en fonction de la durée des sessions de mesure. Plusieurs études des propriétés statistiques des mesures GPS ont en effet montré que l'erreur formelle déduite de l'inversion des données de phase sous-estime l'incertitude réelle par un facteur pouvant aller jusqu'à 11 (Zhang *et al.*, 1997; Mao *et al.*, 1999). Les résultats obtenus permettent d'évaluer les avantages et inconvénients du GPS pour la surveillance en continu.

Les principes du positionnement du système GPS ainsi que la méthodologie utilisée seront trouvés dans Malet *et al.* (2000, 2002a, 2002b). Je voudrais seulement discuter ici de la précision des mesures obtenues et de la durée optimale des sessions, puis des avantages et inconvénients ou limitations de la méthode et donner quelques perspectives en particulier pour la surveillance en temps réel. Les résultats obtenus seront analysés dans le chapitre 7.

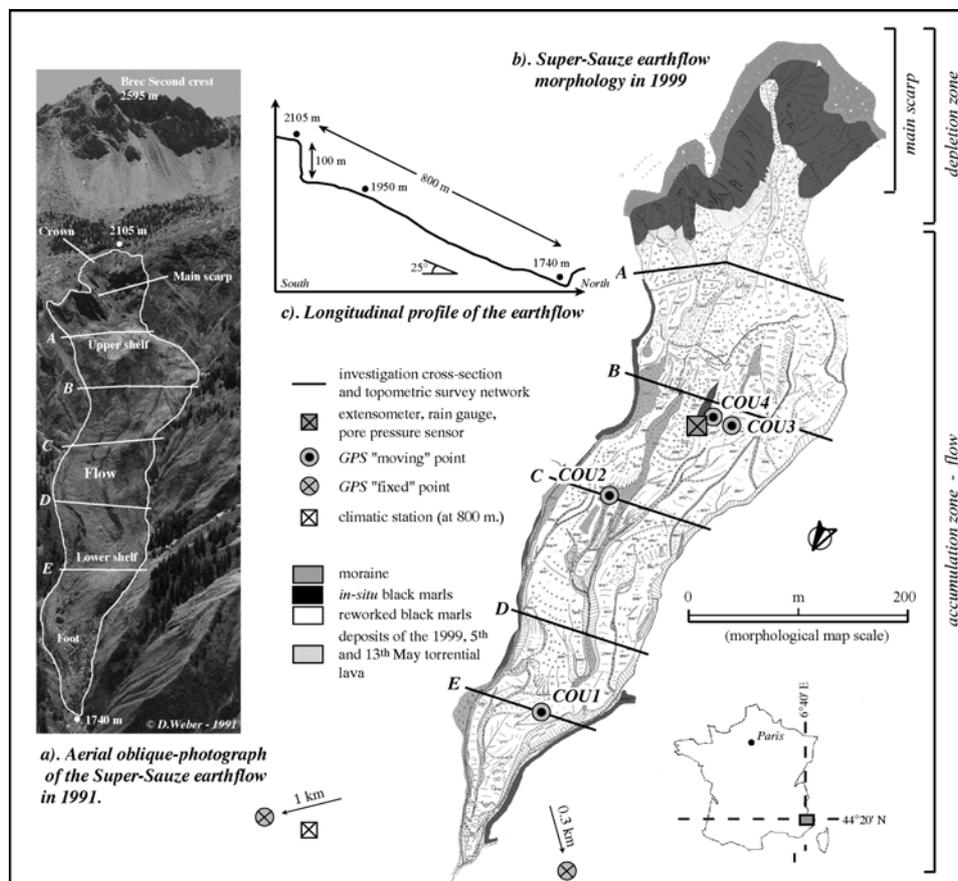


Figure 6.2 : Morphologie du glissement-coulée de Super-Sauze et localisation des sites de mesures (in Malet *et al.*, 2000)

### 6.1.2.2. Le dispositif et l'équipement

Les données GPS ont été acquises en continu à l'aide de six récepteurs Ashtech bi-fréquence Z XII équipés d'antennes « *Choke-Ring* » limitant les multi-trajets, du 7 au 23 mai 1999, du 9 au 15 octobre 1999 et du 4 au 22 mai 2000. En mai 1999, deux stations étaient installées en dehors de la coulée pour servir de référence et quatre stations "mobiles" étaient réparties de l'amont à l'aval de la coulée dans des secteurs au comportement cinématique différent (Figure 6.2). Les antennes GPS étaient installées sur un tube en PVC enfoncé de 1.5 m dans la coulée. La longueur maximale des lignes de base atteint 1.4 km et la dénivelée maximale 200 m. Les récepteurs GPS étaient alimentés par panneaux solaires. Le manque d'ensoleillement pendant la première moitié de la campagne de mai 1999 a entraîné plusieurs arrêts dans les enregistrements. En outre, plusieurs mesures topométriques de contrôle ont été effectuées parallèlement aux mesures GPS pendant les trois campagnes.

### 6.1.2.3. Précision des mesures et durée optimale des sessions

Les variations des composantes de la ligne de base entre les deux stations fixes MLZE et PIL2 en mai 1999 permettent de déterminer la précision réelle des mesures. Les deux stations, distantes de 1.1 km, sont situées sur des sites dégagés, *a priori* exempts de multitrajets. La dispersion des mesures par rapport à leur moyenne pondérée représente donc directement la précision expérimentale. Celle-ci est quantifiée par l'écart moyen quadratique de la dispersion des mesures par rapport à leur moyenne pondérée, ou *répétabilité* (Dixon, 1991).

La dispersion des mesures augmente quand la durée des sessions diminue, conformément à ce que l'on attend. La figure 6.3 montre l'évolution de la précision dans les trois dimensions en fonction de la durée de la session de mesure. La répétabilité à court terme atteint 2.7 mm, 2.2 mm et 5.0 mm respectivement pour les composantes N-S, E-W et verticale de cette ligne de base pour des sessions de 1h. Ces résultats sont comparables à ceux de Genrich et Bock (1992) et de Pragnère (1996).

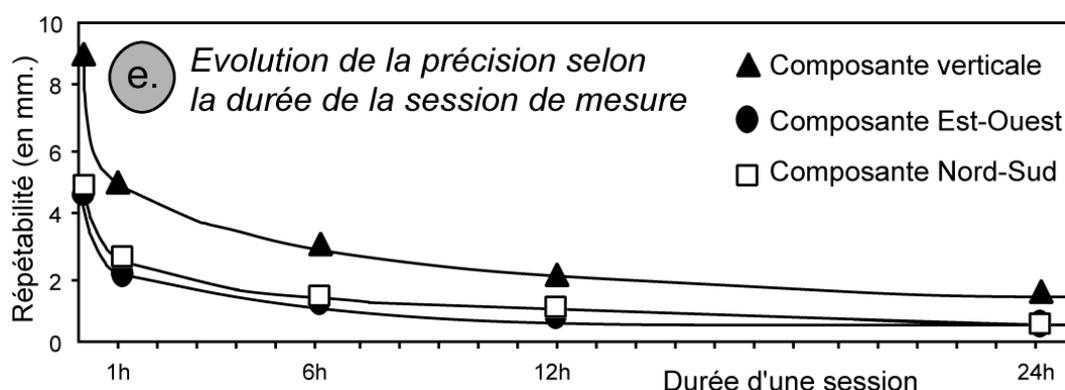


Figure 6.3 : Evolution de la précision selon la durée de la session de mesure (in Malet et al., 2000)

Les valeurs de l'intervalle de confiance à 95% de la variance établissent le seuil de détectabilité d'un mouvement significatif pour les quatre cas de résolution temporelle présentés : entre 3.5 mm/24h et 8.5 mm/h en planimétrie, entre 6 mm/24h et 19.5 mm/h en altimétrie. Le GPS est donc adapté à la mesure de déformations de faible cinématique. La dispersion des mesures observée, en particulier pour les sessions courtes (bruit haute fréquence), résulte des variations de la configuration de la constellation satellitaire et des multi-trajets (Genrich et Bock, 1992 ; Galisson, 1998).

### 6.1.2.4. Validation GPS / Extensométrie / Topométrie

Le mouvement général de la coulée est clairement détecté par les mesures GPS. Les déplacements cumulés obtenus en 17 jours de mesures continues en mai 1999 s'échelonnent entre 15 cm à 204 cm en plan et entre -1 cm à -75 cm en dénivelée. Ces déplacements correspondent à une vitesse moyenne de 0,9 cm/jour à 12 cm/jour. Les déplacements déterminés par GPS sont situés dans l'ellipse d'incertitude des mesures topométriques (Figure 6.1c).

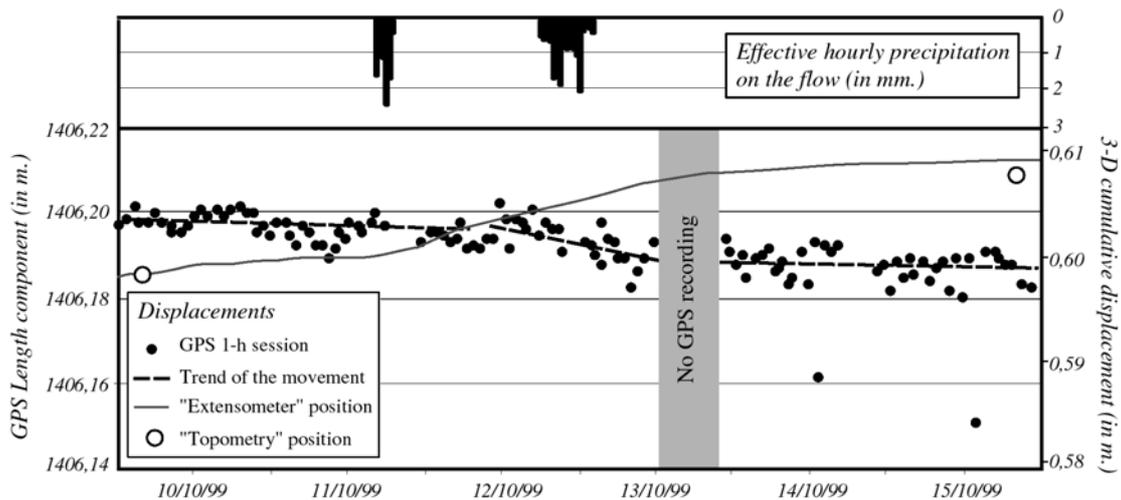


Figure 6.4 : Déplacements mesurés par GPS, extensomètre et tachéométrie en octobre 1999 (in Malet et al., 2002a)

La figure 6.4 montre les résultats sur la période du 9 au 15 octobre 1999 (période de vitesses faibles, inférieures à 1 cm/jour), où nous disposons de mesures GPS, extensométriques et topométriques du même point "mobile". En sept jours, les déplacements GPS (qui se traduisent par le raccourcissement de la longueur de la ligne de base MLZE-COU4) atteignent 1.2 cm, les déplacements mesurés par extensométrie 1.1 cm et les déplacements mesurés par topométrie 0.95 cm. La légère variation de vitesse du 12 octobre 1999, consécutive à une pluie efficace de 10 mm, est significativement et simultanément détectée par les mesures GPS et extensométriques. Ainsi, même au seuil de la vitesse la plus lente (0.2 cm/jour), le GPS détecte, avec une résolution temporelle horaire, un mouvement significatif et en accord avec les autres mesures de surveillance. Cette vitesse définit la limite inférieure de détection des mouvements par GPS.

#### 6.1.2.5. Discussion : stratégies de traitements et précautions d'usage du GPS

Je reprends en grande partie la discussion donnée dans Malet *et al.* (2002a) :

Le système GPS s'adapte aujourd'hui parfaitement aux opérations de surveillance d'objets géologiques (volcans, glaciers, mouvements de terrains), soit épisodiquement, soit en continu sous réserve de quelques précautions, avec une bonne résolution temporelle. Le système GPS permet de mettre en évidence des phénomènes éphémères, non détectables ou plus difficilement détectables par les techniques classiques de surveillance.

L'intérêt du GPS réside dans la possibilité de mesures en continu des déplacements, avec une précision millimétrique et une résolution horaire. Il est aujourd'hui facile de trouver un système d'acquisition de données GPS (récepteur, antenne) pour un prix équivalent, voir inférieur, à celui d'une station géodésique automatisée. Pour de courtes lignes de base, l'utilisation de GPS mono-fréquence (moins coûteux) suffit pour garantir une précision infra-centimétrique. Le rapport coût/bénéfice pour une surveillance par GPS est intéressant pour le suivi d'objets géologiques étendus ou pour le suivi d'objets où la configuration du site n'est pas adaptée aux mesures optiques. En effet, par rapport à ces dernières, le GPS permet de s'affranchir de la nécessité d'un (ou plusieurs) sites stables situés en face du mouvement de terrain, et en outre le suivi par GPS ne nécessite pas une vision directe entre les sites de mesure. Le site GPS "fixe" peut par exemple être localisé dans une vallée voisine. De plus, les mesures peuvent être effectuées par tout type de temps (pluie, neige, brouillard, fort soleil) et de nuit. Le GPS offre une précision plus homogène dans les trois dimensions que les techniques optiques. Enfin, sous réserve d'automatiser les méthodes de dépouillement des données par des programmes informatiques, le traitement peut être effectué par un non spécialiste.

Si par rapport aux techniques de surveillance "traditionnelles", le GPS offre de nombreux avantages. Toutefois, une contrainte spécifique à la technique GPS réside dans l'obligation de s'assurer d'une bonne visibilité du ciel dans toutes les directions. Dans le cas d'un suivi en continu,

pour garantir une résolution millimétrique, les précautions suivantes doivent également être prises : lignes de base courtes, strictement inférieures à 5 km et antennes GPS situées à la même altitude.

Il demeure également soumis à un certain nombre de contraintes, d'ailleurs communes à toutes les méthodes :

- une très bonne stabilité à long terme des points fixes du canevas de référence répartis autour du mouvement de terrain qui servent de points d'appui pour la détermination et la vérification de la qualité des mesures de déplacements ;
- un ancrage des repères au sol pour traduire le mouvement d'une tranche de sol suffisamment épaisse représentative ;
- des cibles (cas de la tachéométrie) ou des antennes (cas du GPS) situées le plus près possible du sol, une dizaine de centimètres environ, afin de limiter l'effet du vent (oscillation) et favoriser leur verticalité.

Dans le cadre d'un dispositif d'alerte, l'avantage du GPS sur les méthodes classiques s'appuie aussi en terme de rentabilité et de précision. Le mode d'acquisition des données et la possibilité de les envoyer vers un centre de traitement puis de décision, en temps quasi-réel, permet d'optimiser le rapport temps de réponse du système/prévision du phénomène. Le GPS permet, en outre, de disposer de manière permanente d'une information à jour et directement "intelligible" par les autorités responsables. Enfin, sous réserve de disposer d'une alimentation électrique ou de batteries rechargées efficacement par panneaux solaires, le GPS apparaît moins consommateur en terme de maintenance que l'extensométrie ou la topométrie automatisée.

### **6.1.3. Conclusion et perspectives**

Je reprends en la complétant la conclusion donnée dans Malet *et al.* (2002a).

L'utilisation du GPS sur le glissement-coulée de Super-Sauze constitue une première pour la mesure en continu des déplacements d'un mouvement de terrain sur plusieurs semaines. Ces résultats ont permis de quantifier la cinématique 3-D de la coulée et de mettre en évidence ses rythmes de fonctionnement. Les premières analyses conjointes des déplacements et des conditions hydrométéorologiques se poursuivent (Malet, thèse en cours) avec pour objectif d'affiner les relations entre les différents paramètres et de préciser les seuils de référence pour les conditions de déplacement ou d'écoulement, dans le but d'une modélisation prévisionnelle.

Cette première expérience pilote a été réalisée sur un nombre de points limité en raison du nombre réduit de récepteurs GPS disponibles et de la logistique lourde de leur maintenance : les GPS utilisés n'étaient pas optimisés pour ce genre d'application, en raison de leur importante consommation d'énergie et de leur faible capacité de mémoire. Ces deux points apparaissent maintenant résolus par les constructeurs. Les résultats obtenus sont en accord avec les mesures géodésiques classiques. L'étude montre qu'il est possible, même sur des sessions courtes (1 h), d'obtenir une précision de quelques millimètres sur des bases courtes (< 1 km), meilleures que celles obtenues par tachéométrie ou extensométrie. Les résultats présentés démontrent que le GPS permet de suivre en continu la dynamique d'objets géologiques aux déplacements faibles et lents (~5 mm/jour).

Pour le suivi des mouvements de terrain, le GPS offre l'avantage de délivrer un positionnement tridimensionnel de précision infra-centimétrique pour des sessions de mesure d'une heure. Cette technique ne nécessite pas une vision directe entre les sites. Sous réserve d'un moyen de communication permettant de rapatrier les données vers un centre de traitement, la précision obtenue en temps réel peut être la même que celle obtenue en temps différé. Ainsi, le GPS peut s'insérer dans un système d'alerte.

L'utilisation du GPS pour ce type d'application est cependant limitée par les caractéristiques environnementales du site (relief, végétation) qui peuvent constituer des masques limitant la visibilité du ciel et créer des multi-trajets. Dans ce cas, la précision des mesures se dégrade plus vite quand la durée des sessions diminue. Le coût du matériel et sa maintenance sont aussi et encore des obstacles à l'heure actuelle à une application en routine pour le suivi en continu des mouvements de terrain par GPS. Mais les rapides progrès techniques alliés à des baisses de coût faciliteront à court terme leur application. Comme le note Duranthon (2000), les qualités métrologiques du système

peuvent être sacrifiées aux intérêts militaires du pays d'origine du GPS (dégradations volontaires pendant la guerre du Golfe, par exemple). Le projet civil européen Galiléo ne pourra offrir une alternative que vers 2008-2010.

Les méthodes traditionnelles de topométrie (automatisées ou non) qui permettent d'atteindre des précisions de quelques millimètres sur de courtes lignes de base (< 1 km) avec une résolution temporelle fine, restent compétitives pour la surveillance (Follacci, 1999) dans des sites particulièrement favorables. Par contre, pour des sites très contraignants (accessibilité réduite, stabilité à long terme, visibilité), et pour suivre l'évolution de plusieurs points, le GPS apparaît aujourd'hui comme la seule solution pour l'obtention de mesures fiables, épisodiques ou en continu, sur plusieurs points de la zone à surveiller. Des dispositifs où plusieurs antennes sont reliées à un seul récepteur sont aujourd'hui disponibles sur le marché.

Pour l'aspect temps réel, des perspectives sont offertes dans le cadre du programme Européen « Retina : *Realistic Evaluation of Temporal Interaction of Natural hAzards (Quakes, Volcanoes, Slides)* » qui a débuté en janvier 2002 pour 42 mois. Le site de Super-Sauze a été choisi comme l'un des sites tests pour le suivi en continu et en temps réel des déplacements de surface par GPS. L'un des objectifs est de faire développer du matériel solide, performant et peu consommateur d'énergie, etc.

Mais les nombreux et rapides progrès accomplis depuis le début de l'utilisation du GPS par mon équipe et l'acquisition d'une plate-forme bi-fréquence RTK en avril 2002 permettront d'utiliser cet outil plus facilement et plus souvent. Il devient incontournable en raison des performances et du gain de temps qu'il procure. Par contre, il faut bien garder à l'esprit que dans bien des cas les masques locaux liés au relief ou à la végétation obligeront à recourir aux méthodes traditionnelles pour la surveillance ou pour la réalisation de cartes topomorphologiques.

## **6.2. Génération de MNT par photogrammétrie aérienne de petit format**

Pour l'analyse, la surveillance et la modélisation des phénomènes observés comme pour leur simple visualisation, il était nécessaire de disposer d'une cartographie morphologique et de MNT précis à haute résolution quelle que soit l'échelle d'étude considérée (Goudie, 1990 ; McCullagh, 1998). Mais sur ces bassins versants et ces sites souvent difficiles d'accès, il a fallu chercher une alternative aux méthodes jusqu'à présent employées à Barcelonnette qui fournissaient plus ou moins facilement des données de qualité très diverses à des coûts très différents : *levés topo-morphologiques terrestres* et *traitements photogrammétriques numériques* réalisés à partir de photographies aériennes de l'IGN disponibles tous les 4-5 ans à des échelles de l'ordre du 1/25 000 ou de missions aériennes spécifiques avec chambre de prise de vue métrique.

### **6.2.1. Position du problème**

*Les cartographies topo-morphologiques et MNT associés :*

Plusieurs cartes morphologiques précises ont été réalisées à des échelles variant du 1/1 000 au 1/250 :

- de l'ensemble du glissement-coulée de Super-Sauze en août 1995, juillet 1999 et octobre 2001 et seulement entre les profils B et C en octobre 1997 et mai 1998 ;
- de l'ensemble du glissement-coulée de Poche en juillet 1998 et du glissement de Draix en juin 2001.

Ce type de cartographie à partir de levés topo-morphologiques terrestres, est très précis (résolution de 1 m et précision inférieure à 5 cm) et peu coûteux mais demande beaucoup de main d'œuvre et de temps. Par tachéométrie, il faut au moins 3 personnes : une qui dessine, une qui tient le réflecteur et l'autre qui relève les points au théodolite et distancemètre. Avec un GPS, il faut au moins 2 personnes : l'une qui dessine et l'autre qui tient et déplace l'antenne et le récepteur GPS.

*La photogrammétrie numérique diachronique :*

Un traitement par photogrammétrie numérique (Weber et Herrmann, 2000 ; Weber, 2001) de six couples de photographies aériennes de l'IGN à des échelles comprises entre le 1/17 000 et le 1/30 000 a permis de générer des MNT avec une résolution planimétrique *de seulement 15 m*. Cette résolution ne permettait pas, par comparaison entre deux MNT de dates différentes, d'estimer correctement les volumes mobilisés dans la période de temps considérée. Il n'était pas non plus possible de comparer les MNT réalisés à partir de la photographie aérienne de 1995 avec celui élaboré en août 1995 par tachéométrie. Avec des traitements poussés et dans des environnements favorables, la précision peut atteindre 3 m en altimétrie et 1 m en planimétrie (chapitre 4). L'utilisation d'une image orthorectifiée permet aussi une photo-interprétation et l'établissement d'une carte morphologique directement à l'échelle.

*Objectifs :*

Les budgets de recherches ne me permettaient pas de faire appel à des cabinets spécialisés pour réaliser des photographies aériennes à basse altitude avec des chambres métriques, de manière à générer des MNT à haute résolution, aussi j'ai recherché, en collaboration, une solution intermédiaire pour proposer une méthodologie « clé en main » et « peu coûteuse » de cartographie ou de génération de MNT, à des géomorphologues non-spécialistes de la photogrammétrie, avec des photographies prises avec un appareil photographique classique de petit format, tenu à la main et à partir d'un petit avion de tourisme à aile haute, pour garantir une précision altimétrique de l'ordre de 0,5 m. Cette précision attendue a bien sûr guidé le choix des différents paramètres de vol, du matériel de prise de vue (appareil et objectif) et du traitement..

Après une étude de faisabilité en été 1998 sur la coulée de Poche, par Quentin Gross dans le cadre de son stage de fin de seconde année de l'ENSAIS (Gross, 1998), le travail a été réalisé l'année suivante sur la coulée de Super-Sauze par Jean-Baptiste Henry, élève ingénieur à l'Ensaïs

dans le cadre de son stage de fin de seconde année dans mon équipe (Henry, 1999). Jean-Philippe Malet a également participé à cette recherche dans le cadre de sa thèse. Le PNRN a apporté le soutien financier et nous avons bénéficié du matériel de traitement et des compétences de Pierre Grussenmeyer de l'équipe Photogrammétrie et Géomatique du Laboratoire d'Etudes et de Recherches en Génie Civil de Strasbourg (Lergéc) de l'Ensis. Deux articles ont été publiés.

### **Principales références :**

Henry, J.-B., Grussenmeyer, P., Malet, J.-P., **Maquaire, O.**, (2001), Génération de MNT par photogrammétrie aérienne de petit format : application au versant instable de Super-Sauze. *Revue XYZ*, n°87, pp. 42-50.

Henry, J.-B., Malet, J.-P., **Maquaire, O.**, Grussenmeyer, P. 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). Note technique. *Earth Surface Processes and Landforms* (à paraître). (**Annexe II.9**)

## **6.2.2. Méthodologie**

Les détails sur le choix du matériel et la précision associée et la sélection de la chambre de prise de vues seront trouvés dans les deux publications citées. Je voudrais seulement insister sur le mode opératoire et le traitement et sur les points cruciaux à respecter pour garantir la précision recherchée.

Le mode opératoire se décompose en deux grandes étapes (la préparation du vol et la prise de vue, puis le traitement photogrammétrique proprement dit), chacune d'elle nécessitant des précautions spécifiques. Comme le traitement photogrammétrique repose sur les méthodes de projection et similitude spatiales, toute erreur, aussi réduite soit elle, peut rapidement engendrer des écarts considérables. Les erreurs propres commises à chaque étape doivent pouvoir être quantifiées.

Pour permettre le calcul, il est nécessaire de placer au sol des balises sur des points localisés par un levé géodésique, tachéométrique ou GPS. La précision et la répartition géographique de ces points de contrôle sont d'une importance capitale pour l'étape d'aérotriangulation. La difficulté majeure réside dans le respect des valeurs du calcul de préparation du vol. L'emploi d'un récepteur GPS de navigation semble être actuellement la solution la plus adéquate, sur le plan tant de la précision que des investissements humains et financiers.

La méthode de stéréorestitution utilisée a été *l'aérotriangulation par les faisceaux* à l'aide du logiciel *Photomod*. L'aérotriangulation est une extension des méthodes de stéréorestitution, qui permet de restituer de façon globale un bloc de clichés (*mosaïque de clichés*) tout en minimisant le nombre de points de calage à déterminer sur le terrain. Il est ainsi possible de survoler des zones possédant une faible densité de points géodésiques.

*La méthode de compensation par les faisceaux* repose sur l'utilisation des coordonnées images comme observations, et sur l'emploi d'une projection centrale (Kraus et Waldhäusl, 1998). Cette méthode de calcul permet de lier directement les coordonnées image aux coordonnées objet, sans passer par les coordonnées modèle. *Elle nécessite un bloc de clichés présentant un recouvrement minimum de 60% en longitudinal, et de 20% en latéral.* Elle dispose d'autre part d'un avantage considérable puisqu'elle autorise l'introduction dans le calcul de paramètres additionnels, comme par exemple : les éléments d'orientation interne ; les paramètres de déformation de l'image liée aux distorsions de l'objectif et aux déformations du film ; les diverses anomalies de réfraction ou toute autre source d'erreur. Par conséquent, Il faut tenir compte de toutes les erreurs systématiques. Ceci est important dans le cas de l'utilisation d'une chambre de prises de vue pour amateur.

## **6.2.3. Application à Super-Sauze**

Le calcul des différents paramètres de vol a amené à employer une chambre RICOH KR-10M semi-métrique (dotée de repères de fond de chambre, connus en coordonnées par rapport au centre du format) équipée d'un objectif amateur de focale 50 mm. Le choix de la chambre semi-métrique a notamment été guidé par la volonté de disposer de la motorisation de l'avancée de pellicule. Les valeurs des paramètres de vol sont données sur la figure 6.5.

La zone d'étude, assimilée à un rectangle de 1500 m par 500 m, présente une importante dénivellée de 400 m entre la couronne (amont) et l'étranglement (aval). Afin de limiter les effets sur le facteur d'échelle, il a été décidé de suivre des paliers d'altitude de vol, adaptés à la position de chaque bande au-dessus de la coulée (Figure 65b). Cet aspect a par conséquent ajouté une difficulté supplémentaire à la réalisation du vol photographique, faute de moyen de positionnement absolu des bandes.

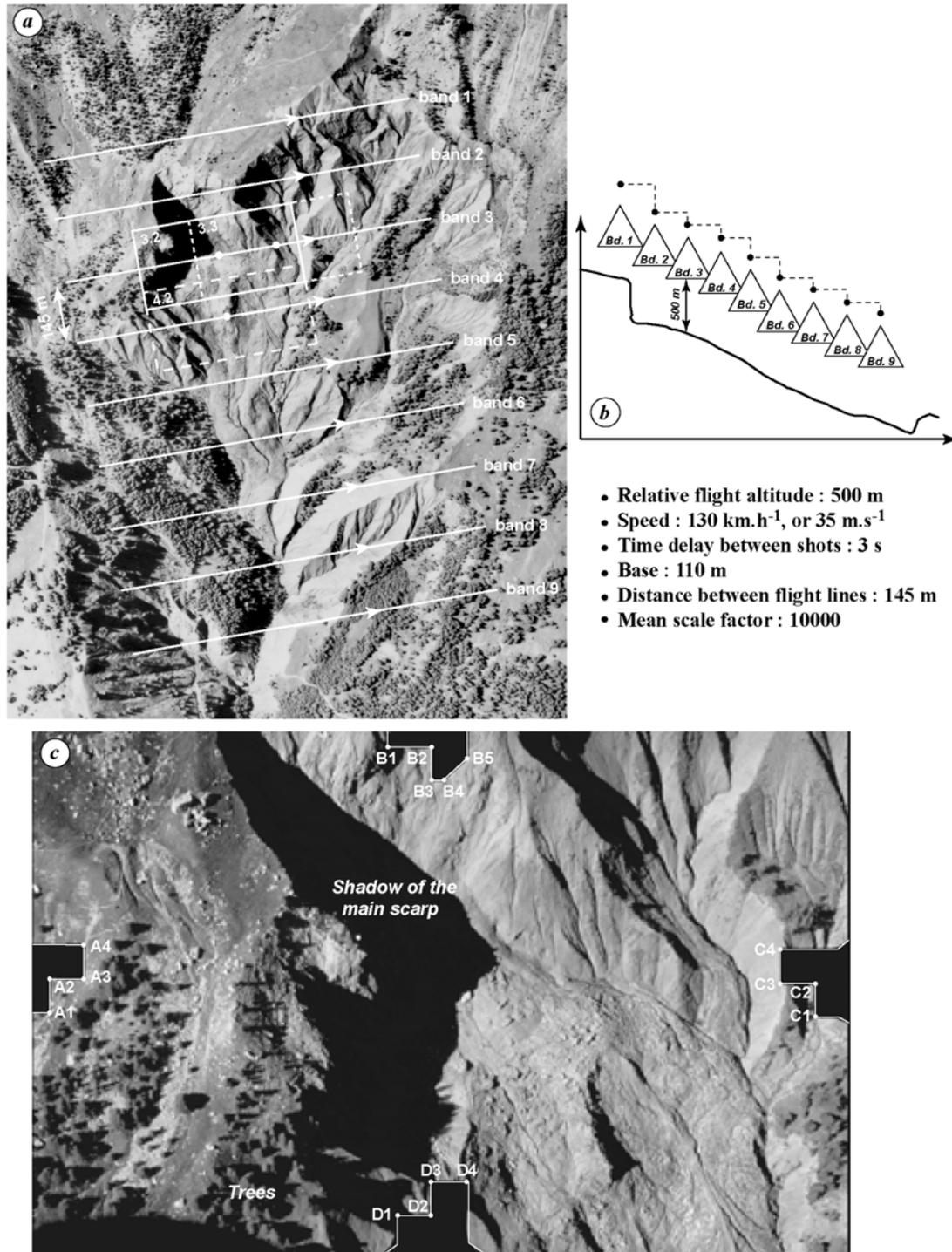


Figure 6.5 : Vol photographique à Super-Sauze : (a) lignes de vol, (b) paliers d'altitude de vol, (c) cliché de la bande 3 avec les repères de fond de chambre notés A1-A4, B1-B4, C1-C4, D1-D4 (in Henry et al., à paraître).

Compte tenu des conditions d'illumination (8h30 GMT, 43° de latitude Nord, début juillet), les prises de vue ont été réalisées avec des films de sensibilité 100 ISO. Par conséquent, l'ouverture du

diaphragme à  $f/5.6$  et la vitesse d'obturation a été fixée à  $1/1000^e$  de seconde. Ces choix ont pour objectif de limiter l'effet de filé. Les balises ont été réalisées dans des plaques cartonnées de  $45 \times 45 \text{ cm}^2$  de couleur rouge et jaune, de façon à être bien visibles sur des clichés au  $1/500$  (Gross, 1998) tant sur la coulée (gris-noir) que sur son pourtour (vert). Au total, une soixantaine de balises ont été disposées sur l'ensemble de la zone.

Avec les moyens limités mis en oeuvre, les résultats d'aérotriangulation sont de qualité moyenne, mais d'une précision bien suffisante pour les applications envisagées. On constate que sur les bords extérieurs du modèle, c'est-à-dire sur les premiers et derniers clichés de chaque bande, la prépondérance de points de jonction sur les points de calage semble être à l'origine de la dérive du modèle. La conséquence est alors l'augmentation de l'emq globale  $\sigma_0$  (Henry *et al.*, à paraître). D'autre part, le calcul fournit les données d'orientation externe (position et attitude de la chambre de prise de vues pour chaque cliché). De grandes incertitudes sur leurs déterminations, provenant de la difficulté de fournir des valeurs approchées au calcul itératif ont été constatées. *L'emploi du GPS de navigation dans l'avion ressort à nouveau comme une nécessité, avec comme objectif principal de fournir des valeurs approchées fiables à l'amorçage du calcul.*

La qualité de la génération totalement automatique des modèles numériques de terrain n'a pas été celle escomptée. De fréquentes erreurs de corrélation ont été constatées, souvent liée à la radiométrie de l'image, ayant pour conséquence des points aberrants dans le MNT. Ils ont pu être décelés grâce à l'observation stéréoscopique du couple de clichés avec, en surimposition, les courbes de niveau provenant du modèle calculé.

L'interpolation a donc été complétée et corrigée par des saisies manuelles de points, ainsi que par l'importation de données issues de levés tachéométriques. Finalement, dans les zones de recouvrement entre semis d'origine topographique et semis d'origine photogrammétrique, on constate des écarts d'environ 0,5 m. Par conséquent, l'ensemble de la restitution et des MNT est évaluée à une précision sub-métrique. La nature particulièrement chaotique de la zone d'expérimentation pousse à considérer les écarts entre MNT photogrammétrique et tachéométrique réalisés sensiblement à la même période en juillet 1999 (Figure 6.6).

| Zone   | Moyennes des écarts en Z | Ecart-types (Z) |
|--|--------------------------|-----------------|
| A. Escarpement principal                           | +41.3 cm                 | 14.0 cm         |
| B. Ravines   | +46.7 cm                 | 9.2 cm          |
| C. Surfaces sub-horizontales (pente < $10^\circ$ ) | +7.8 cm                  | 4.2 cm          |
| D. Surfaces inclinées (pente > $10^\circ$ )        | -8.2 cm                  | 11.4 cm         |

Tableau 6.1 : MNT de la coulée de Super-Sauze : comparaison des résultats sur différentes zones morphologiques obtenus par photogrammétrie numérique et par tachéométrie.

Chacune des zones présentées dans le tableau 6.1 met en évidence les problèmes majeurs que peut rencontrer l'expérimentateur dans ce type d'environnement. Le plus gênant pour les traitements photogrammétriques est très certainement l'ombre des éléments morphologiques importants : celle de l'escarpement principal masque une zone étendue à son pied, les arbres sur les versants créent des éléments dits en sursol qui font dériver le modèle numérique de terrain. Mais quand la qualité des photographies est bonne (sans ombre et avec une bonne radiométrie), la différence entre les deux MNT est inférieure à 10 cm.

#### 6.2.4. Discussion et perspectives

Cette expérience concluante, en terme de rapport précision obtenue / moyen mis en oeuvre et coût, basée sur l'emploi de photographies aériennes de petit format, présente l'avantage d'être peu coûteuse (hormis le prix du logiciel de photogrammétrie), rapidement mobilisable, et opérationnelle. Le géomorphologue dispose alors d'une capacité de réaction et de production d'information très élevée (caméra amateur, objectifs et films grand public, avion sans équipements spécifiques mais à aile haute), essentielle lorsqu'il s'agit d'évaluer rapidement les conséquences d'un événement. En effet, cela serait plus difficile voire impossible à faire réaliser rapidement, quelques heures ou quelques jours après l'événement, par un cabinet de géomètres professionnels avec du matériel spécifique (chambre métrique, avion adapté, ...). En France par exemple, ces méthodes de couverture

photographique rapide sont exploitées pour la cartographie des champs de crue, le levé des laisses de hautes eaux, etc.

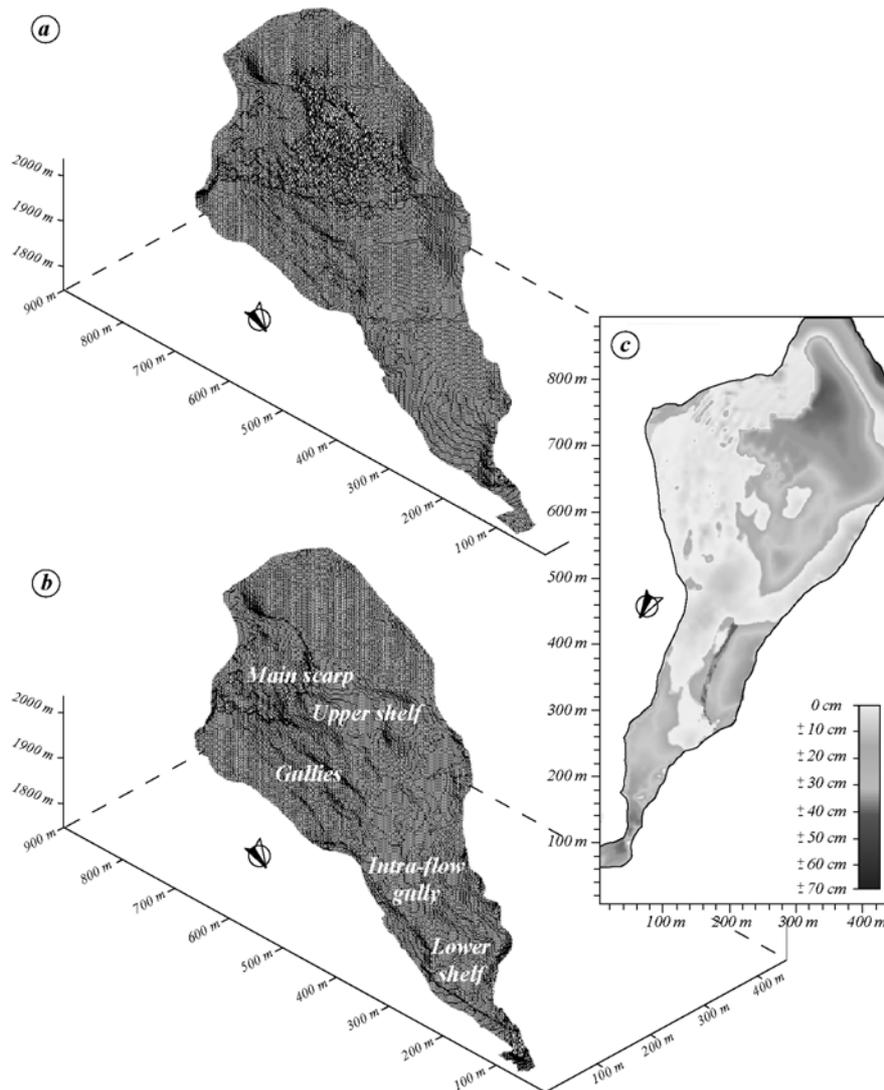


Figure 6.6 : Représentation 3D des MNT de la coulée de Super-Sauze : (a) photogramétrique, (b) tachéométrique, (c) carte des différences d'altitude entre les deux MNT (d'après Henry et al., à paraître).

Concernant la réalisation pratique des clichés, il est important de rappeler l'influence de l'heure de vol. Les zones boisées ou à fort relief vont conditionner l'emprise des ombres. Le vol à midi solaire apparaît alors comme une nécessité. L'emploi d'un récepteur GPS de navigation au cours du vol est apparu nécessaire pour pouvoir disposer de valeurs approchées fiables de la position de chaque cliché, mais également au cours de la stéréopréparation pour assurer une bonne homogénéité dans la disposition des balises.

Il faut tout de même garder à l'esprit la multiplicité des sources d'erreur qui doivent être prises en compte. La gamme de variation est extrêmement large : du micromètre pour l'orientation interne à la dizaine de mètres pour les erreurs de corrélation dans la génération du MNT. Par conséquent, il semble capital d'être pleinement conscient de ces ordres de grandeurs, afin de ne pas demander au résultat final plus de précision qu'il ne peut en fournir.

Le cadre scientifique et financier pour le développement et la poursuite des recherches dans ce domaine et ses applications aux sites du bassin de Barcelonnette pour calage et validation puis transposition à d'autres sites instables français ou étrangers sera fourni par le projet SAMOA « Surveillance et Auscultation de Mouvements Gravitaires Alpines ». Ce projet est accepté, dans le

cadre du thème prioritaire sollicité en 2002 par l'ACI « Prévention des Catastrophes Naturelles », pour les trois prochaines années et dont je suis l'un des trois co-coordonateurs avec C. Delacourt et D. Amitrano.

Ainsi, pour les perspectives, de nombreux progrès ont été accomplis depuis cette expérience, les développements de certains de nos collègues (C. Delacourt, Laboratoire Sciences de la Terre (LST) à Lyon, par exemple) conduisent :

- à l'élaboration d'une nouvelle technique d'orthorectification d'images (Casson *et al.*, 2002) essayée sur 3 couples de photographies du glissement de La Clapière. Elle pourra être appliquée aux mêmes couples de photographies aériennes de l'IGN de Super-Sauze pour servir de validation de cette nouvelle technique de génération de MNT. Elle pourra être étendue par la suite à d'autres mouvements de terrain, comme la coulée de Poche, par exemple.
- à la proposition d'une technique d'acquisition d'image aérienne à partir d'une plate-forme radiocommandée : *le drone lent*. Ceci permettra à l'utilisateur d'adapter la résolution temporelle d'acquisition à l'objet de l'étude mais surtout d'étudier les objets avec une haute résolution spatiale (~ 10 cm). La mise en place de points repères au sol connus en XYZ n'est pas nécessaire. Les images obtenues serviront également à la construction de MNT et par études différentielles à quantifier en 3D les mouvements. Les MNT créés par photogrammétrie par drone seront validés au sol à partir des réseaux suivis par tachéométrie, extensométrie et GPS.

Toujours dans le cadre du projet SAMOA, l'imagerie au sol et spatiale sera envisagée. Pour la première, le système de surveillance « classique » (cibles dont les déplacements sont mesurés par GPS ou tachéométrie ou autres, etc.) sera complété par la prise d'images haute résolution face au glissement. Cette technique offre un fort potentiel, car elle permet, en acquisition permanente devant la zone instable, de suivre automatiquement les mouvements par corrélation d'images et en prise de vue rapprochée de suivre les mouvements de surface locaux (inférieurs au centimètre). De plus elle offre l'avantage de fournir une carte des déformations de surface et non plus des valeurs ponctuelles. Cette approche sera développée en collaboration avec le Centre d'études en photogrammétrie et télédétection de Ecole Nationale des Sciences Géographiques.

Pour la seconde, comme évoqué au chapitre 4, jusqu'alors les données spatiales optiques n'offrait que peu d'intérêt pour l'étude des mouvements gravitaires en raison de l'inadéquation entre résolution spatiale des images (10-20 m) et la taille caractéristique des zones instables (quelques centaines de mètres). Actuellement, il existe de nombreux projets de capteurs spatiaux avec des résolutions métriques (*IKONOS*, *SPOT5*, *Pléiades*). Un objectif sera de tester le potentiel de ces nouveaux capteurs et de sensibiliser la communauté spatiale (CNES, ESA) à l'intérêt de capteurs dédiés aux mouvements gravitaires. En effet il est fondamental que soient élaborés des projets spatiaux optimisés pour l'étude des mouvements gravitaires (résolution et cycle orbitaux courts).

L'interférométrie radar Insar n'a pas été utilisée à Super-Sauze par le simple fait que la zone instable se trouve sur le versant ubac mal orienté par rapport aux révolutions des satellites, ce qui ne permettait pas l'obtention d'images de qualité. Par contre, cette technique a été appliquée avec succès par Delacourt *et al.* (soumis) au glissement de la Valette situé en versant adret malgré une surface instable couverte par la végétation. Actuellement, il est difficile voire impossible d'obtenir des interférogrammes en raison du faible nombre de satellites encore en service, aussi l'interférométrie terrestre semble fournir une alternative très intéressante et performante pour la mesure des déplacements de jour comme de nuit et dans n'importe quel type de temps (brouillard, pluies, etc.). Un prototype nommé Lisa (*Linear Synthetic Radar*) a été développé par le Joint Research Centre, ISPC – Ispra (Casagli *et al.*, 2002) avec le soutien de l'Italian Space Agency (ASI) et du National Research Council (CNR). Il suffit de disposer le système à quelques kilomètres en face de la zone à surveiller pour obtenir des informations précises et fiables. Des contacts ont été pris avec le JRC d'Ispra pour envisager dans les prochains mois une utilisation sur l'un des sites de Barcelonnette pour validation avant une éventuelle acquisition d'un tel système d'un montant de l'ordre de 15 000 €,.

### **6.3. Investigation des coulées par prospection géophysique multiméthodes**

En complément de prospections par sismique réfraction et par électrique menées sur un glissement du Riou Bourdoux (Caris et Van Asch, 1991), Myriam Schmutz avait engagé une première étude en été 1994 sur la coulée de Poche dans le cadre de son mémoire de Maîtrise (Schmutz, 1995) sous la direction du Professeur Jean-Claude Flageollet et de Jean-Jacques Schott, Maître de Conférences à l'IPGS. L'année suivante dans le cadre de son mémoire de DEA, elle a reproduit les investigations sur la coulée de Super-Sauze par sismique (20 sondages) et par électrique (15 sondages Schlumberger dont cinq croisés et 5 sondages longitudinaux dans la direction de propagation de la coulée, ainsi qu'une cartographie de résistivité). Les mesures électriques avaient cette fois-ci été interprétées à l'aide de la méthode statistique « bayésienne » qui permettait d'avoir un aperçu de la variation de la résistivité avec la profondeur (Schmutz, 1996).

Pour les deux coulées, les résultats permettaient de distinguer trois couches distinctes aux valeurs de résistivité et de vitesses de propagation suffisamment contrastées dans des gammes sensiblement comparables d'un site à l'autre. Les différentes lignes des sondages croisés indiquaient clairement la forte hétérogénéité du milieu et l'influence de l'orientation des lignes de mesure. Par contre, les épaisseurs de ces horizons n'étaient pas toujours bien définies en utilisant des protocoles de mesures "classiques" en raison sans doute du fait que ces méthodes de prospection étaient adaptées à l'étude de milieux tabulaires où l'interprétation 1D peut suffire et non à des sites complexes et hétérogènes nécessitant une interprétation 3D. Il convenait donc de développer une recherche sur ces sites complexes 3D pour obtenir une meilleure acquisition des données suivie d'un traitement optimal : tel était le projet de thèse de Myriam Schmutz. Celle-ci ayant obtenu une allocation de recherche, mais le Professeur Jean-Claude Flageollet étant en retraite, j'ai été l'un des deux co-directeurs de sa thèse avec Jean-Jacques Schott, Michel Mietton étant son Directeur de thèse.

La recherche a débuté en 1996 sans financement spécifique, mais avec tout de même un soutien du programme *NEWTECH*. Jean-Jacques Schott m'a aidé à préparer un projet de recherches qui a été soumis à l'appel d'offres du *PNRN* en avril 1997 et accepté : « *Développement de modèles de traitement en géophysique adaptés aux glissements-coulées des marnes callovo-oxfordiennes du bassin de Barcelonnette (Alpes de Haute Provence). Modélisation de leurs comportements* ». Plusieurs collègues géophysiciens et géochimistes ont apporté leur soutien scientifique à ce projet et à la thèse de Myriam Schmutz :

- J.J. Schott, Institut de Physique du globe de Strasbourg,
- Y. Géraud, Centre de Géochimie de la Surface Strasbourg,
- R. Guerin, Département de Géophysique Appliquée, Université Pierre et Marie Curie, Paris,
- Y. Albouy, M. Descloîtres, P. Vassal, Laboratoire de Géophysique Interne, département RED, IRD, Bondy,
- M. Dietrich, Laboratoire de Géophysique Interne et Tectonophysique, Grenoble,

Plusieurs stagiaires géophysiciens et de nombreux étudiants ou jeunes chercheurs géomorphologues sont venus aider pour mettre en œuvre le lourd et encombrant matériel sur le site de la coulée de Super-Sauze. La thèse de Myriam Schmutz a été soutenue en automne 2000 et deux articles sont parus dans des revues à comité de lecture.

#### **Principales références :**

- Schmutz, M., Guerin, R., **Maquaire, O.**, Descloîtres, M., Schott, J.-J., Albouy, Y. (1999), Apport de l'association des méthodes TDEM (Time-Domain Electromagnetism) et électrique pour la connaissance de la structure interne du glissement-coulée de Super-Sauze (Bassin de Barcelonnette, Alpes de Haute Provence, France). *C. R. Acad. Sc.*, Série IIa, n° 328, pp. 797-800.
- Schmutz, M., Albouy, Y., Guérin, R., **Maquaire, O.**, Vassal, J., Schott, J.J., Descloîtres, M. (2000), Joint electrical and time domain electromagnetism (TDEM) data inversion applied to the Super-Sauze earthflow (France). *Surveys in Geophysics*, Vol. 21, n°4, pp. 371-390. **(Annexe II.3)**
- Schmutz, M., Guérin, R., Andrieux, P., **Maquaire, O.**, (2001). Apport de la méthode Slingram à l'étude du glissement-coulée de Super-Sauze (Alpes-de-Haute-Provence, France). 3<sup>ème</sup> Colloque Geofcan, 25-26 septembre, Orléans, pp. 141-144.

### 6.3.1. La prospection géophysique engagée

La prospection géophysique a nécessité de développer une méthodologie d'étude (acquisition et traitement) pour des sites complexes et hétérogènes. La méthode électromagnétique transitoire (TDEM) couramment utilisée pour la recherche minière et hydrogéologique, a été mise en oeuvre pour la première fois sur un mouvement de terrain. Les méthodes électriques et électromagnétiques ont fait l'objet de nombreuses adaptations de mise en oeuvre et d'interprétation avec le développement d'outils d'interprétation conjointe (Schmutz, 2000 ; Schmutz *et al.*, 2001).

Les matériaux accumulés et la roche marneuse *in situ* diffèrent par leurs teneurs en eau, leurs porosités et leurs compacités. Pour ces raisons, plusieurs méthodes complémentaires ont été utilisées pour répondre à la complexité du site :

- la mesure de la résistivité électrique (électrique par courant continu et TDEM) a été choisie en raison de la présence supposée d'une nappe ;
- la sismique réfraction a été mise en oeuvre pour déterminer les variations latérales d'épaisseur et la stratification interne de la coulée à partir des contrastes de vitesse de propagation des ondes sismiques.
- une prospection Slingram, méthode électromagnétique à faible nombre d'induction, a été réalisée sur une zone d'environ 150 m de large et 100 m de long.



Photo 6.1 : Prospection Slingram avec un appareil EM 31 sur la coulée de Super-Sauze, octobre 1998.

Les différents outils et dispositifs utilisés ainsi que les cinq campagnes de mesures, les types de dispositif de mesure et les centaines de sondages réalisés ne seront pas développés ici. Les détails seront trouvés dans la thèse de Myriam Schmutz (2000). Les dispositifs ont été choisis pour trouver le meilleur compromis entre le nombre d'électrodes pour l'électrique ou la taille de la boucle pour le TDEM nécessaire à la réalisation d'un profil, la profondeur d'investigation et la sensibilité aux hétérogénéités de surface, latérales et locales. Dans la pratique, l'électrique n'a pas permis de prospecter au-delà d'une dizaine de mètres de profondeur. Cette limitation provenait de la topographie escarpée qui interdisait de réaliser des lignes d'une longueur supérieure à 50 m environ, des variations latérales de structure qui augmentaient avec cette distance, et de la faiblesse des résistivités des terrains argilo-marneux. Par contre, le TDEM a permis une plus grande pénétration dans le sol pour un dispositif géométrique relativement peu étendu en surface (boucle de 5\*5 m ou 10\*10 m) et une grande sensibilité en présence de conducteurs, mais il était aveugle sur les 4-5 premiers mètres.

### 6.3.2. Les principaux résultats

La prospection Slingram se révèle être un bon outil de reconnaissance des zones de conductivités différentes. L'interprétation qualitative obtenue est en accord la plupart du temps avec les résultats et observations disponibles (Schmutz, 2000 ; Schmutz *et al.*, 2001). En prospection sismique réfraction, les vitesses moyennes obtenues sont en accord avec celles trouvées dans la littérature pour ce type de roches. Lorsque le terrain peut être considéré comme localement tabulaire, le modèle de terrain est globalement compatible avec celui obtenu par la géotechnique et par l'interprétation conjointe des méthodes électriques et électromagnétiques.

Parmi les nombreux résultats intéressants, je choisis de présenter ceux relatifs à la vérification de la possibilité d'une interprétation 1-D des données TDEM puis ceux obtenus par l'inversion jointe des données électriques et TDEM.



Photo 6.2 : Profil de mesure géophysique situé à l'aval de l'échine centrale (visible en haut à droite du cliché) de la coulée de Super-Sauze, octobre 1998.

#### 6.3.2.1. Vérification de la possibilité d'une interprétation 1-D des données TDEM

Puisque seule une interprétation 1-D était envisageable pour la méthode TDEM. Il a été vérifié *a priori* si l'hypothèse de tabularité pouvait être utilisée localement, malgré la complexité 3-D du site. Cette vérification a consisté à comparer les enregistrements de sondages azimutaux, c'est-à-dire de sondages réalisés successivement, à partir d'un même point central, en déplaçant dans les quatre directions cardinales le dispositif d'acquisition (boucle émettrice et réceptrice). L'hypothèse est vérifiée si les enregistrements sont superposables, ou si les valeurs obtenues après interprétation des quatre sondages se situent dans la même gamme d'équivalence (étendue des possibilités). La tabularité locale est vérifiée en l'absence d'échine, dans le compartiment central de la coulée. En revanche, à proximité des échines affleurantes ou sub-affleurantes, l'interprétation 1-D n'est plus valable. *Ceci constitue un des résultats méthodologiques importants de ces travaux, car cela signifie qu'une interprétation 1-D, et donc en amont une acquisition 1-D, est suffisante sous certaines conditions.*

#### 6.3.2.2. L'inversion jointe des données électriques et TDEM.

Les valeurs de résistivités apparentes obtenues avec les différentes méthodes ne sont pas comparables, car elles sont dépendantes de la profondeur d'investigation et de la sensibilité aux conducteurs, c'est-à-dire du dispositif de mesure utilisé. Les résultats des sondages TDEM et électriques et l'interprétation d'un panneau électrique (profil C) et des sondages TDEM en variation continue ont été donnés dans Schmutz *et al.* (1999).

Les sondages sur lesquels un traitement d'inversion jointe a été effectué se situent dans une zone où la tabularité locale est vérifiée. L'interprétation peut être effectuée après inversion en mode multicouches ou à " nombre minimum de couches ". Le premier mode permet de connaître la variation de la valeur de résistivité avec la profondeur et d'évaluer le nombre de terrain minimal. Il ne permet toutefois pas de connaître la profondeur de ces terrains. C'est pourquoi l'interprétation en nombre 'minimal' de couches est indispensable, même si en raison de la non-unicité de la solution illustrée par le principe d'équivalence, elle reste délicate à employer. Ainsi un modèle numériquement correct peut être géologiquement totalement aberrant. En revanche, la famille des solutions se réduit considérablement lorsqu'on inverse de manière conjointe deux jeux de données électriques et TDEM, car cette combinaison optimise leurs sensibilités différentes (Schmutz *et al.*, 2000).

L'inversion conjointe a été réalisée à partir des données enregistrées sur le transect C qui bénéficie des forages géotechniques identifiant le toit du substratum. Les résultats seront présentés dans le chapitre 8 consacré à la structure de la coulée.

### 6.3.3. Conclusion et perspectives

La géophysique n'avait été que peu mise en œuvre sur des sites complexes 3-D et le TDEM encore jamais utilisé sur un glissement de terrain. La méthodologie mise en œuvre constituait donc une première. Ainsi, des résultats très intéressants ont été obtenus. L'interprétation conjointe électrique-TDEM a permis de mettre en évidence des lits intermédiaires (Schmutz *et al.*, 2001) non détectés par la prospection géotechnique. Ils apparaissent cependant vraisemblables et constituent donc un apport efficace et inédit de l'inversion jointe. Dans le cas de variations latérales modérées (pas d'échines affleurantes ou sub-affleurantes), une détermination très précise de la structure peut être obtenue en accord avec les informations disponibles par ailleurs (géotechnique, photographies aériennes), et ce, sans fixer de paramètre *a priori* dans le modèle. L'interprétation jointe des autres couples de sondages disponibles sur le site devrait être rapidement menée par Myriam Schmutz pour valider ses résultats.

Pour ce qui est des perspectives, même si n'étant pas spécialiste en ce domaine, je ne souhaite pas moi-même investir beaucoup de temps dans les prochaines années sur ces aspects prospection géophysique, le programme SAMOA permettra tout de même la poursuite de ces recherches. Compte tenu des progrès accomplis, d'autres techniques et d'autres modes de traitement seront mis en œuvre conjointement et validés sur le site de Super-Sauze grâce aux données existantes et aux dispositifs de suivi disponibles :

- *méthodes sismiques* (sismique réfraction, tomographie sismique, ondes de surface, mesure du bruit de fond et *Spectral Analysis of Surface Waves –SASW-*) ;
- *méthodes électriques et électromagnétiques* (EM fréquentiel et TDEM en domaine temporel). Pour l'électrique, les techniques de quatre équipes (Géosciences Rennes, LIRIGM Grenoble, Géosciences Azur Nice, Laboratoire des Sciences de la Terre de Lyon) possédant des matériels et des techniques de traitement différents seront mise en œuvre sur le site afin de réaliser des mesures 2D et 3D. Un objectif sera de déterminer la résolution spatiale optimale des mesures afin de caractériser la géométrie 3D de la coulée et de comparer les résultats à ceux précédemment obtenus entre 1996 et 1999 (Schmutz, 2001). Pour le TDEM, une nouvelle campagne de mesure sera effectuée afin d'étudier l'évolution temporelle des limites basales de la coulée ;
- *Résonance Magnétique Protonique (RMP)*. Cette technique sera appliquée afin d'estimer la profondeur des nappes phréatiques. Les données seront validées grâce au maillage dense de tubes piézométriques et de mesures en continu des fluctuations de la nappe. En outre ces mesures seront répétées afin de déterminer les variations temporelles de la profondeur de la nappe.

## 6.4. Caractérisation des formations superficielles par pénétrométrie dynamique

Une connaissance précise et détaillée des volumes et profils verticaux des formations superficielles, qui constituent les principaux réservoirs d'eau et de matériau mobilisable (par érosion aréolaire et par mouvements de masse de quelques  $\text{dm}^3$  à quelques  $\text{m}^3$ ), est nécessaire pour de nombreuses applications tant en géomorphologie qu'en hydrologie. Les méthodes géophysiques et géotechniques disponibles pour de telles prospections et cartographies sont lourdes à mettre en œuvre, et donc peu utilisables en terrain difficile d'accès, et ont en général une résolution verticale insuffisante pour identifier des successions de couches minces.

La pénétrométrie dynamique qui exploite les variations de résistance à l'enfoncement induites par les différences de compacité entre les couches, est utilisée depuis longtemps en prospection géotechnique (Waschkowski, 1983) mais avec une énergie de battage constante qui la rend inadaptée pour identifier des couches peu épaisses et peu compactes. Cependant, des essais précurseurs avec du matériel léger ont eu lieu dès les années 1980 sur des matériaux tendres et altérables comme les marnes du Sud-Est de la France : à Draix sur les 10-15 premiers centimètres (Dumolard, 1984), dans la vallée du Buëch sur l'épaisseur totale (Olivry *et al.*, 1988) ou bien encore dans le Trièves (Phan, 1993). Avec le développement récent d'un système portable (Zhou, 1997), la *pénétrométrie dynamique à énergie variable (Panda)* apparaît maintenant beaucoup mieux adaptée à ce type d'application, notamment en zone accidentée.

Cette méthode a été testée et validée dans un secteur de badlands dans les Terres Noires des bassins versants de Draix, où le manteau d'altérites sur marne, qui constitue le principal réservoir hydrique et sédimentaire, présente de fortes variations d'épaisseur, essentielles à connaître pour comprendre et modéliser le comportement de ces bassins affectés de crues violentes très érosives (Richard et Mathys, 1999).

Démarrée en juin 1999, la recherche a été menée essentiellement par Arnaud Ritzenthaler dans le cadre de sa maîtrise (Ritzenthaler, 2000), puis de son DEA (Ritzenthaler, 2001). Elle a été financée par le *Programme National sur les Risques Hydrologiques (PNRH) de l'INSU (1999-2000)* dans le projet « *Formation des crues et de l'érosion dans les bassins versants marneux* ». La recherche se poursuit actuellement dans le cadre du programme MATE-RIO2 (2002-2003) « *Crues et inondations : Etude et modélisation des flux solides associés aux crues torrentielles de petits bassins versants de montagne méditerranéens: les bassins de recherche de Draix sur marnes noires* » et du programme du PNRH 2001-2002 « *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)* ». Ces trois programmes sont coordonnés par Didier Richard et Nicole Mathys du Cemagref, Grenoble.

Dans ces programmes, je suis plus particulièrement chargé de la cartographie et de la caractérisation hydromécanique des formations superficielles et de l'évaluation des rythmes et des volumes de matériaux libérés par mouvements de masse de types très variés. Ceci correspond à une contribution originale mais indispensable pour une bonne prise en compte et intégration de ces phénomènes dans la modélisation des mécanismes impliqués dans la formation des crues sur bassins versants torrentiels marneux. La recherche est menée en multi-disciplinarité, dans le cadre des programmes énoncés ci-dessus et plus largement dans le cadre du Groupement d'Intérêt Scientifique (GIS) « Draix, étude de l'érosion en Montagne ». Elle a bénéficié du soutien scientifique de Denis Fabre et Jacques Monet du LIRIGM de Grenoble et de Bruno Ambroise du CEREG (actuellement depuis janvier 2002 à l'IMFS de Strasbourg). Un pénétromètre Panda a été acquis en octobre 2001 grâce au financement du programme RIO2.

Ces recherches sont conduites principalement dans les bassins expérimentaux de Draix, mais également dans le bassin de Barcelonnette pour des conditions litho-structurales, d'altitude et d'exposition différentes. Un article a été accepté dans une revue à comité de lecture et plusieurs communications ont été présentées à des réunions scientifiques et à des colloques internationaux dont un à comité de lecture.

## Principales références :

**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). *C. R. Geoscience* 334, pp. 835-841. (**Annexe II.8**)

Fabre, D., Ritzenthaler, A., **Maquaire, O.**, Ambroise, B., Thiery, Y., Truchet, E., Malet J-Ph., Monnet, J. (2002). Apport du pénétromètre dynamique léger à énergie variable pour la connaissance du manteau d'altérites de Terres Noires. *In Proceedings of the Symposium "Geomorphology: from expert opinion to modelling. A tribute to Professor Jean-Claude Flageolle"*, 26-27 Avril 2002, Strasbourg. Édité par D. Delahaye, F. Levoy et O. Maquaire. Publications Cerg, pp. 185-192.

### 6.4.1. Principe et méthodologie

Je reprends en partie l'article de Maquaire *et al.*, (2002)

La dégradation superficielle des marnes à faciès de schistes argileux, qui se fragmentent en clastes de tailles diverses, engendre des altérites de nature et d'épaisseur très variables selon les conditions topographiques et structurales, constituées de plusieurs couches superposées de densité apparente et de compacité croissantes en fonction de la profondeur (Coulmeau, 1987 ; Bufalo, 1989 ; Chodzko et Lecompte, 1992 ; Alexandre, 1995 ; Klotz, 1999), dont notamment :

- la *couverture détritique* mobilisable, en place ou colluvionnée : lit de paillettes friables à matrice fine peu abondante formant une couche homogène peu cohésive très sensible à l'érosion ;
- le *régolite*, où la marne est débitée en plaquettes tabulaires ou nodules ovoïdes, avec une subdivision possible entre (2a) le *régolite supérieur ameubli* où la marne est très fragmentée et sa structure estompée et (2b) le *régolite inférieur compact* conservant la structure de la marne mais pas sa cohésion du fait de l'ouverture des plans de schistosité ;
- à la base, la *marne intacte*, très compacte, structurée et cohésive.

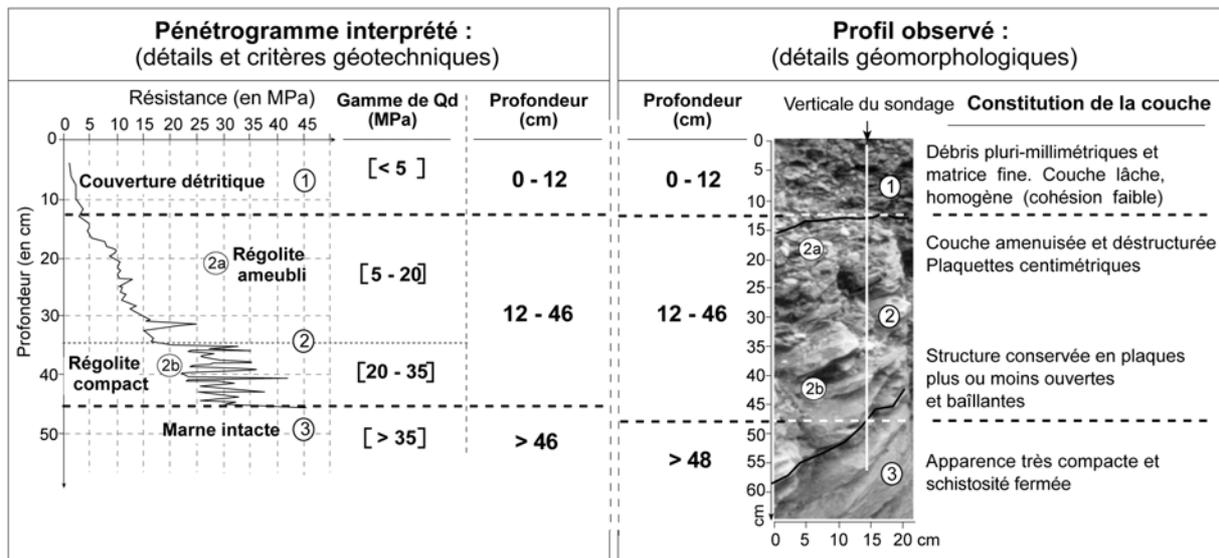
Ces caractéristiques mécaniques et granulométriques se traduisent en termes de variations de compacités qu'il est possible d'évaluer, par la réalisation de profils verticaux de résistance de pointe ( $Q_d$ ) par pénétration dynamique. Le principe et la méthode retenue seront trouvés dans les deux publications citées ci-dessus. Le lecteur trouvera en particulier dans Fabre *et al.* (2002) les informations concernant l'influence du frottement latéral et des conditions de l'arrêt des sondages (refus) qui peuvent gêner l'interprétation et le caractère reproductible des essais, l'influence de la teneur en eau des matériaux sur la résistance mesurée qui doit être prise en compte en particulier si l'on souhaite suivre l'évolution de certains profils en fonction du temps (bilans saisonniers). Je voudrais tout de même donner le détail de la procédure d'étalonnage et de validation.

L'interprétation des pénétrogrammes (Figure 6.7) pour identifier les différentes couches présentes et estimer leurs épaisseurs à l'aplomb des sondages réalisés se fait en comparant les valeurs de résistance mesurées à des seuils préfixés, mais aussi en analysant l'allure même des courbes mesurées : présence de cassures ou de points d'inflexion, de segments à variation plus ou moins régulière, etc. Elle revient à définir pour chaque type de formation superficielle des seuils de résistance et des formes de courbe caractéristiques. Comme pour toutes les méthodes géotechniques et géophysiques indirectes, un étalonnage spécifique est donc à réaliser et valider dans chaque contexte géologique. La procédure classique d'étalonnage et de validation pour une zone d'étude donnée consiste à :

- réaliser en plusieurs sites représentatifs des principales unités géomorphologiques et positions topographiques des sondages pénétrométriques puis des fosses à l'aplomb de chaque sondage ;
- étalonner la méthode sur une première série de sites, en identifiant les critères d'interprétation à prendre en compte par comparaison des pénétrogrammes mesurés aux profils observés ;
- valider cet étalonnage sur une deuxième série de sites, par comparaison des profils observés aux profils déduits de l'interprétation des pénétrogrammes selon ces critères – ce qui peut conduire à reprendre de façon itérative cette procédure.

Une fois l'étalonnage réalisé et validé dans un milieu donné, l'interprétation de chaque nouveau sondage peut être faite en tenant compte du contexte structural, topographique et morphologique.

**a Exemple d'étalonnage** : sondage n° 95, site 5 (bassin versant du Laval, Draix)



**b Exemple de validation** : sondage n° 89, site 5 (bassin versant du Laval, Draix)

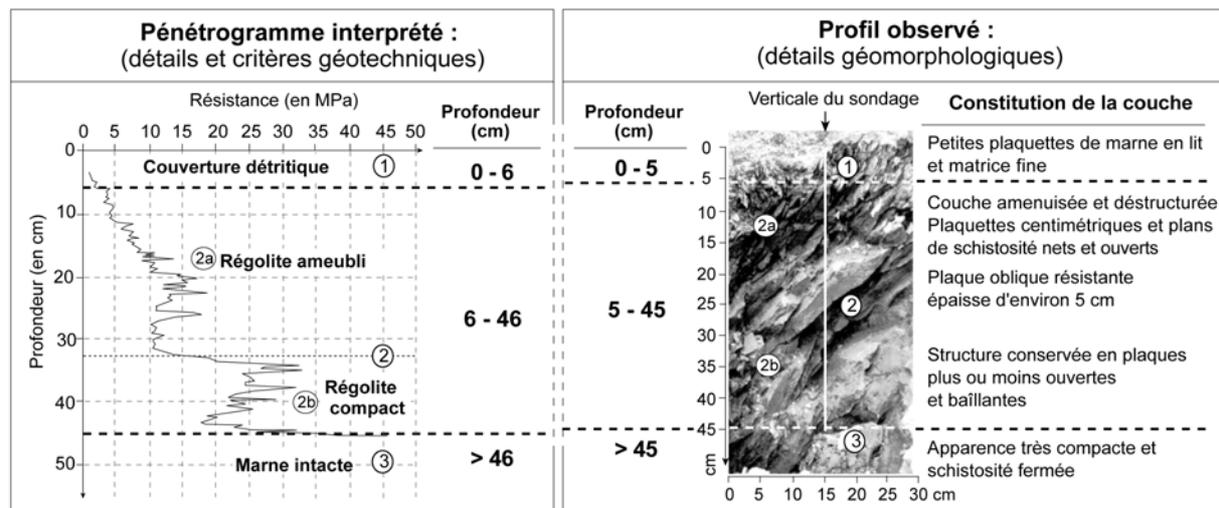


Figure 6.7 : Principe d'interprétation des pénétrogrammes, organisation du manteau d'altérites et profil de résistance associé : (a) étalonnage, (b) validation (in Maquaire et al., 2002).

### 6.4.2. Les principaux résultats

A ce jour, plusieurs centaines de sondages ont été réalisées à Draix dans les deux bassins versants du Laval et du Moulin sur plusieurs sites accessibles, représentatifs des principales situations morphologiques du bassin, très contrastées en termes de pente, exposition et altitude. Une trentaine de fosses d'étalonnage ou de validation a été également réalisée. A noter que la distinction visuelle ou au toucher entre les couches de marnes dégradées s'est avérée plus ou moins aisée et précise selon les conditions d'observation (éclairage, humidité, orientation de la schistosité).

Pour illustrer, je reprends les résultats obtenus sur le transect longitudinal du site 7 présentés dans Maquaire et al. (2002).

La comparaison systématique des pénétrogrammes et des profils observés dans les fosses aux deux sites d'étalonnage, a permis de retenir les critères géotechniques suivants pour caractériser les trois niveaux de dégradation dans ce type de milieu (Figure 6.8a) :

- en deçà de 5 MPa, la couverture détritique (couche 1) très peu résistante : clastes produites et/ou en transit sur les versants, ou charge sédimentaire des fonds de talweg ;
- de 5 à 35 MPa, le régolite (couche 2) avec une distinction possible entre le régolite ameubli (couche 2a) marqué généralement par une augmentation assez régulière de la résistance en profondeur et le régolite compact (couche 2b) où la résistance est plus forte mais varie largement au passage de chaque plaque de marne ;
- au delà de 35 MPa (valeur prise comme seuil de refus) la marne (couche 3) très résistante.

Ces critères géotechniques ont été utilisés pour interpréter les sondages obtenus aux cinq sites de **validation**. Comme l'illustrent la figure 6.7b et le tableau de la figure 6.8b, la pénétrométrie permet de bien identifier les structures en place et d'estimer leurs épaisseurs et profondeurs avec une précision de quelques centimètres, du même ordre de grandeur que l'incertitude sur les observations. Elle peut avantageusement remplacer l'observation directe du régolite dans des fosses. Notons que la plaque résistante localisée dans le régolite ameubli (profondeur 20-27 cm) est très bien mise en évidence sur le pénétrogramme (Figure 6.7b).

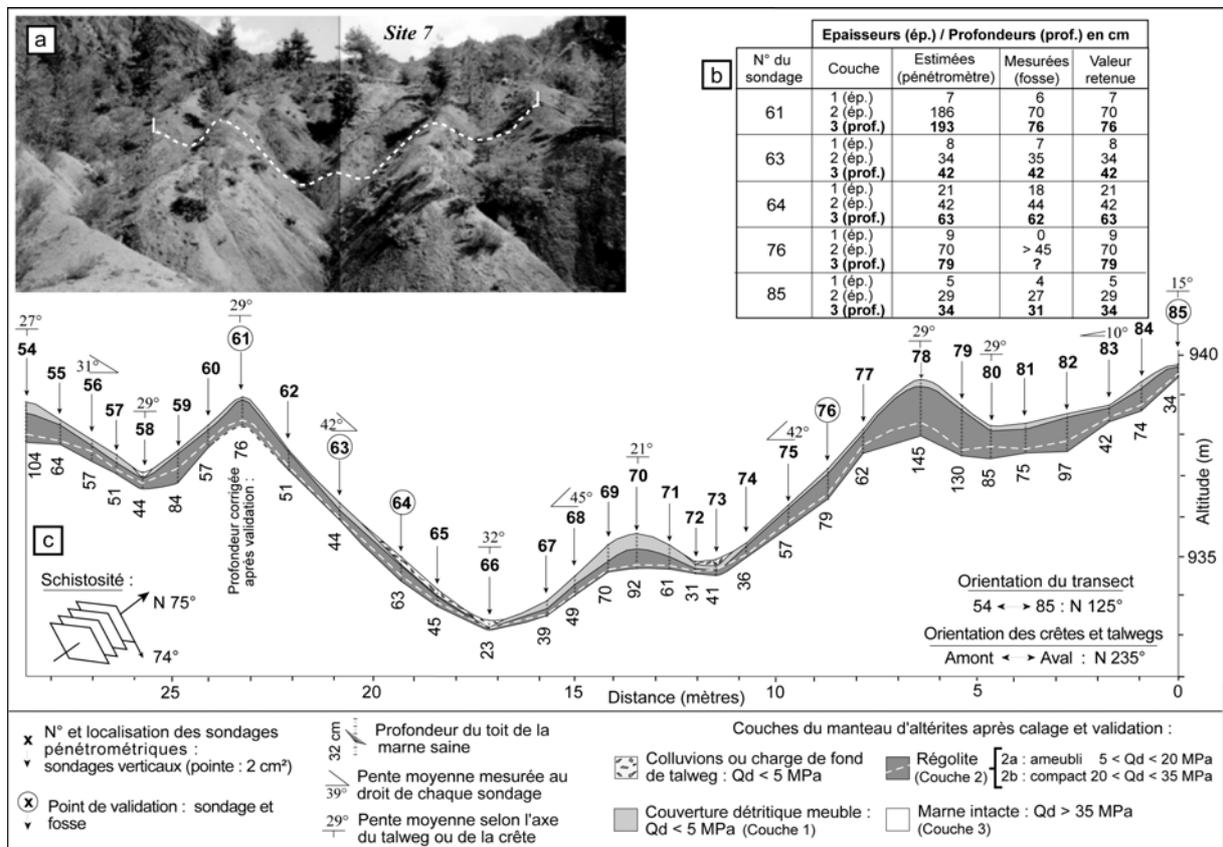


Figure 6.8 : Transect longitudinal du site 7 (bassin versant du Laval, Draix), 29 avril 2000 : (a) photographie du site; (b) tableau comparatif des épaisseurs des couches déduites des pénétrogrammes et observées dans les fosses de validation, (c) coupe verticale estimée par pénétrométrie (in Maquaire et al., 2002).

La cohérence d'ensemble de ces interprétations doit cependant toujours être vérifiée, au besoin par des fosses de contrôle, certains résultats pouvant être trop influencés par des conditions locales. C'est par exemple le cas pour le sondage n° 61 (Figure 8b-c), donnant une épaisseur de régolite bien trop forte car irréaliste en position d'échine : une fosse de contrôle a permis de montrer que le train de tige avait en fait emprunté une fracture subverticale ouverte dans la marne.

Ainsi validés pour ce milieu, ces critères permettent d'interpréter tous les autres sondages disponibles. A titre d'illustration de l'application de cette méthode et de son apport en prospection, la Figure 8c montre la coupe verticale déduite de la pénétrométrie à partir de 32 sondages réalisés en

une journée par 2 personnes sur le même transect du site 7 – rapidité que ne permettrait aucune autre méthode. Les résultats apparaissent cohérents, avec une épaisseur des altérites :

- maximale sur les crêtes, du fait notamment d'une décompression latérale plus importante ;
- homogène sur les flancs, affectés d'une double dynamique d'altération verticale et de transit latéral ;
- minimale dans les talwegs, plus fréquemment récurés.

Ces résultats sont bien sûr à interpréter du point de vue géomorphologique et à étendre à l'ensemble du bassin versant en vue d'une cartographie des épaisseurs et d'une évaluation des volumes.

### **6.4.3. Conclusion et perspectives**

La pénétrométrie dynamique à énergie variable s'avère, y compris en zone accidentée, une méthode de prospection pratique, rapide, performante et très peu destructive pour estimer et cartographier la nature, l'épaisseur et le volume des couches du manteau d'altérites sur marnes noires. A travers la résistance mécanique mesurée, elle renseigne aussi sur leurs caractéristiques physiques. Moyennant certaines précautions d'emploi et d'étalonnage, elle fournit ainsi des informations utiles, mais difficiles à obtenir autrement, sur ces formations superficielles peu épaisses, grâce aux précisions et résolutions centimétriques obtenues.

Les travaux se poursuivent actuellement dans le cadre de la thèse d'Albin Bernard débutée en septembre 2002 avec le soutien financier des programmes RIO2 et PNRH2002. A partir de campagnes de sondages répétées, le suivi de l'évolution des épaisseurs et des volumes est entrepris en précisant l'influence des teneurs en eau sur les résistances mesurées. La caractérisation hydromécanique des formations superficielles sera développée en couplant sondages pénétrométriques et fosses dans lesquelles seront réalisés, à différentes profondeurs et pour chacun des niveaux caractéristiques, des mesures in situ (densités au densitomètre à membrane, cohésion drainée au scissomètre) et des prélèvements en vrac ou intacts en trousse métalliques (granulométrie, limites d'Atterberg, valeur au bleu, caractéristiques intrinsèques -cohésion et angle de frottement interne par essais de cisaillement rectiligne et triaxial). Après calage et validation, il sera ensuite possible grâce aux seuls profils de résistance de pointe de fournir des indications sur les densités in situ, la cohésion et les foisonnements des formations selon les différentes teneurs en eau.

Le couplage des résultats obtenus avec une caractérisation hydrodynamique et mécanique des couches identifiées pour différentes situations morphologiques (flancs, crêtes, talweg, ...) et à des levés topographiques détaillés devrait permettre d'améliorer la compréhension et la modélisation du fonctionnement hydrologique et morphodynamique de ces milieux marneux soumis à une érosion intense.

Moyennant un étalonnage spécifique, selon la procédure simple et efficace testée dans les marnes noires de Draix, cette méthode pourra être appliquée à d'autres types de formations superficielles, sous réserve des limites d'application, en particulier lorsque le milieu est hétérogène avec fragments de roche ou lorsqu'il présente une fissuration.

## **6.5. Conclusion du chapitre 6**

Au terme de ce chapitre, il apparaît que de plusieurs avancées méthodologiques ont été permises grâce aux collaborations multidisciplinaires nombreuses et efficaces.

Ainsi, pour le suivi en continu des déplacements, un système à câble et roue potentiométrique a été développé, de même que la technique GPS a été mise en œuvre en continu sur de longues périodes pour la première fois sur un mouvement de terrain. Des photographies aériennes à basse altitude ont été traitées par photogrammétrie pour générer des MNT avec une haute résolution (précision 0,5 m dans les trois directions). Une investigation par prospection géophysique des coulées marneuses a été entreprise pour définir leurs structures internes et a conduit à des développements méthodologiques intéressants, en particulier l'inversion conjointe des données électrique-TDEM. Sur le substratum marneux en place, les épaisseurs des différentes couches du manteau dégradé sont caractérisées, avec une bonne reproductibilité et avec une précision centimétrique, à l'aide d'un pénétrömètre dynamique à énergie variable couplé à des observations morphologiques.

Comme il a été indiqué au fur et à mesure pour chacune des méthodologies mise en œuvre, les résultats obtenus vont permettre dans les prochains paragraphes de proposer ou de conforter des interprétations sur la structure et le fonctionnement des coulées et les rythmes des déplacements en relation avec les conditions hydro-climatiques, etc.

Les progrès techniques constants apportent de nouvelles et nombreuses perspectives de recherches ou d'application qui ont été données au fur et à mesure et que je ne reprendrai donc pas ici dans la conclusion de ce chapitre. Je retiens tout de même un point, à mon avis, très important. En effet, la poursuite du développement de ces techniques nécessite l'existence de sites instrumentés sur lesquels les validations pourront être engagées, ce qui pose le problème du maintien en état de ces sites de recherches.

# Chapitre 7 : Caractérisation des formations superficielles marneuses au laboratoire

## 7.1. Problématique

La compréhension des mécanismes de déclenchement des mouvements de terrain et du fonctionnement des glissements-coulées et la modélisation de ces processus ont rendu obligatoire la caractérisation du comportement des différents matériaux. En complément des investigations *in situ*, les propriétés des substrats et des formations superficielles contrôlant leur comportement hydrodynamique ont été caractérisées à partir d'analyses et d'essais de laboratoire. La complexité des mécanismes en jeu, la nature et l'origine des formations ont obligé à mettre en œuvre des méthodes et des techniques issues de la géomorphologie et de la mécanique des roches, des sols et des fluides.

L'objectif est de caractériser le comportement des coulées, des dépôts de laves torrentielles et des matériaux « sources » des bassins de Barcelonnette et de Draix, qu'ils soient issus du manteau dégradé superficiel des marnes en place ou de blocs et panneaux mobilisés par mouvements de masse, ou bien encore des formations superficielles allochtones (moraines, etc.). Sous l'action de processus hydro-météorologiques, ces matériaux se situent à différents degrés d'évolution et/ou de mélanges.

La démarche scientifique adoptée a été fortement contrainte :

- par les moyens en matériel et personnel disponibles et par les possibilités offertes lors de mon arrivée à Strasbourg dans ce domaine de la caractérisation ;
- par les spécificités des formations marneuses sensibles et des dépôts hétérogènes.

Dans la mesure où la matrice fine détermine le comportement rhéologique de l'ensemble des formations, il convenait de définir précisément sa proportion au sein du mélange et de ne pas en fabriquer artificiellement, de manière excessive pendant le transport ou l'analyse, en raison de la fragilité des paillettes de marnes. Pour ces raisons, un protocole d'analyse spécifique a été défini.

L'hétérogénéité des formations comportant des clastes de marnes (paillettes, frites, plaquettes, etc.) et des cailloux et blocs (calcite et calcaire siliceux) emballés dans une matrice fine et la fragilité des clastes de marnes doivent être bien prises en compte pour correctement définir leurs textures et leurs caractéristiques mécaniques. Une des particularités communes aux essais et analyses de laboratoire tient au fait qu'ils sont entrepris sur de faibles volumes de matériaux (quelques centaines de cm<sup>3</sup>) qui doivent être représentatifs de l'ensemble de la formation hétérogène (Filliat, 1981). Pour les essais de cisaillement, cela exclut les fractions supérieures à 5-10 mm environ qui perturbent ou faussent les résultats. Il convient de s'interroger sur les protocoles à mettre en œuvre pour assurer de bonnes représentativités des résultats et, en cas de besoin définir un protocole d'analyse spécifique.

Ces problèmes d'échantillonnage se posent notamment pour la représentativité des granulométries (Hey et Thorne, 1981 ; Meunier et Carion, 1987) mais également pour les essais de cisaillement : faut-il faire les essais sur l'échantillon intact contenant éventuellement des éléments grossiers qui vont perturber l'essai ou fausser les résultats ? ou vaut-il mieux, comme le préconisent certains auteurs (Serratrice, 1978, 1995 ; Wu, 1996), reconstituer une éprouvette avec les seules particules fines après tamisage des éléments grossiers.

Tous les essais nécessaires aux caractérisations ont été entreprises, mais je choisis seulement de présenter les contraintes et problèmes rencontrés pour la détermination des textures et des caractéristiques mécaniques et rhéologiques (ces dernières étant moins bien connues des géomorphologues).

## 7.2. Démarche

Les premières caractérisations ont été engagées, dès juin 1996, sur les coulées boueuses dans le cadre du mémoire de maîtrise de David Herrmann consacré aux caractéristiques physiques et géotechniques des marnes de la coulée de Super-Sauze et à la recherche bibliographique de données sur les marnes du bassin de Barcelonnette ou plus généralement sur les marnes noires du Sud Est de la France (Herrmann, 1997). Le travail a été élargi aux problèmes de météorisation et d'altération par Sébastien Klotz pendant sa maîtrise et son DEA (Klotz, 1998, 1999), puis complété par Julien Guillon sur les matériaux de la coulée de Poche (Guillon, 2001). En 1999, Stéphane Pierre et Alexandre Remaître ont été amenés à identifier et à caractériser les dépôts de laves torrentielles et les formations superficielles sur le plan des textures et de la pétrographie (Pierre et Remaître, 1999). Alexandre Remaître a poursuivi les caractérisations en DEA (Remaître, 2000) puis en thèse. A partir de juin 1999, Emmanuel Truchet a entrepris, pendant sa maîtrise et son DEA, la caractérisation physique et hydrodynamique des formations superficielles autochtones et allochtones du B.V.R.E. du Laval à Draix (Truchet, 2000, 2001). Les soutiens financiers ont été apportés par les programmes *NEWTECH*, *PNRN 1997-1999* et *PNRH 1999-2000*. Le Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Strasbourg a apporté un soutien technique et logistique permettant à Sébastien Klotz de réaliser plusieurs essais (essai triaxial et cisaillement alterné, essai Proctor, etc.). De même, Jean-Philippe Malet a pu faire de nombreux essais (cisaillement annulaire, compressibilité à l'oedomètre, minéralogie, etc.) au Centre de Géologie Appliquée de l'Université Laval au Québec. Des essais triaxiaux à succion contrôlée ont été sous-traités au Laboratoire de Mécanique des Sols de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.

Les caractérisations rhéologiques ont été réalisées par Jean-Philippe Malet et par Alexandre Remaître dans le cadre de leur thèse, grâce aux collaborations et soutiens techniques et scientifiques apportés par les programmes *MOTE (2001-2001)* et *ECLAT (2001-2002)*. Les analyses rhéologiques ont été menées sur la fraction inférieure à 400  $\mu$ , à Strasbourg grâce au prêt par le *CEMAGREF* de Grenoble d'un rhéomètre plan/plan. D'autres essais ont été réalisés par Jean-Philippe Malet sur un rhéomètre coaxial lors d'un séjour au Centre de Géologie Appliquée de l'Université Laval au Québec. C. Ancey, J. Locat et M. Meunier ont apporté leur concours à l'interprétation de ces données.

Un pôle « géomécanique » a été progressivement développé au laboratoire d'analyse des sols du *CEREG*. A mon arrivée à Strasbourg en septembre 1995, le laboratoire d'analyses permettait seulement la caractérisation physique des matériaux (teneur en eau, teneur en CaCo<sub>3</sub> par calcimétrie, limites d'Atterberg à la coupelle de Casagrande, granulométrie, etc.) et hydrodynamique (rétention hydrique, conductivité hydraulique, etc.). Dans l'impossibilité de se doter d'un matériel neuf et performant adapté aux besoins, une machine de cisaillement *SATTEC* datant de 1965 a été acquise en 1998 auprès de mon ancien laboratoire du *CEBTP* de Tours. Bien qu'ancienne, avec seulement deux vitesses de cisaillement, non asservie à une centrale de mesure, de contrôle et d'acquisition automatique, cette machine a permis la réalisation d'un grand nombre d'essais. En 2000, le pôle « géomécanique » a été complété par du matériel récupéré à l'*ENGEES* : cellule oedométrique et perméamètre à charge variable, bâti de consolidation, moules proctors (normal et modifié), ... Ce qui a permis de réaliser à Strasbourg la plupart des essais courants nécessaires à la caractérisation physique et géomécanique des matériaux.

Un article de synthèse sur les caractéristiques physiques et mécaniques des marnes a été soumis (Maquaire *et al.*, soumis). Les résultats obtenus ont été publiés au fur et à mesure de leur acquisition :

- pour nourrir et valider des hypothèses de travail sur le fonctionnement de la coulée de Super-Sauze par exemple ou sur le déclenchement d'un mouvement structural sur une échine en place du bassin de Super-Sauze (Malet *et al.*, 2000) ;
- pour expliquer l'origine et la dynamique de la lave torrentielle de 1996 à Faucon de Barcelonnette (Remaître *et al.*, 2002) ou pour la caractérisation rhéologique des coulées de débris et des laves torrentielles du bassin de Barcelonnette (Malet *et al.*, à paraître) ;

### Les principales références :

- 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*, n°1, pp. 71-84.

Malet, J.-P., Auzet, A.-V., **Maquaire, O.**, Ambroise, B., Descroix, L., Estèves, M., Vandervaere, J.-P., Truchet, E. Investigating the influence of soil surface characteristics on infiltration on marly hillslopes. Application to callovo-oxfordian black marls landslides in the Barcelonnette basin (Alpes-de-Haute-Provence, France). *Earth Surface Processes and Landforms*, (à paraître).

Malet, J.-P., Remaître, A., Ancey, C., Locat, J., Meunier, M., **Maquaire, O.** Caractérisation rhéologique des coulées de débris et laves torrentielles du bassin marneux de Barcelonnette (Alpes-de-Haute-provence). Premiers résultats. *Journal de Rhéologie*, (à paraître). (**Annexe II.10**)

**Maquaire, O.**, Malet, J.-P., Remaître, A., Locat, J., Klotz, S., Guillon, J. Instability conditions of marly hillslopes, towards landsliding or gullyng? The case of the Barcelonnette basin, South East France. (soumis en juin 2002 à Engineering Geology)

### 7.3. Méthodes de laboratoire

Les analyses et essais « classiques » sont ceux habituellement préconisés pour l'étude des mouvements de terrain (Filliat et Camelan, 1981 ; Wu, 1996). Les méthodes utilisées sont conformes aux protocoles standards décrits par ASTM (*American Society for Testing and Materials*) et par AFNOR (*Association Française de Normalisation*). Ont ainsi été définies les caractéristiques :

- *physiques* (répartition granulométrique des éléments constitutants, limites d'Atterberg, valeur au bleu, % de CaCO<sub>3</sub>, cortège minéralogique, densités humides et sèches, compacité, porosité, indice des vides, etc.) ;
- *hydrodynamiques* (courbes de rétention hydrique, conductivités hydrauliques à saturation  $K_{sat}$ , sorptivité, etc.) ;
- *mécaniques* (compressibilité à l'oedomètre, cisaillements rectiligne, annulaire et triaxial) et *rhéologiques* (rhéomètre plan/plan et coaxial).

#### 7.3.1. Texture des formations hétérogènes : protocole adopté

Le protocole tient compte du choix et de la représentativité de la fraction à analyser, du volume d'échantillon représentatif et de la voie utilisée : sèche ou humide.

##### 7.3.1.1. Choix et représentativité de la fraction à analyser

L'analyse granulométrique peut être réalisée sur l'ensemble du matériel, de 0 au diamètre maximal ( $D_{max}$ ) ou bien sur une fraction particulière. Par exemple, pour l'étude des laves torrentielles, les analyses granulométriques sont réalisées sur des échantillons écrêtés à 20 mm. Les pourcentages présentés sont exprimés sur cette fraction inférieure à 20 mm, afin de pouvoir comparer les résultats avec ceux déterminés par d'autres auteurs. Cette limite de 20 mm qui ne prend pas en compte la charge grossière a été définie à partir de diverses études menées sur la rhéologie des laves torrentielles. Ces études montrent que le comportement de l'écoulement est majoritairement guidé par la matrice et non par les blocs ou les débris qu'elle transporte (Martinet, 1993 ; Coussot, 1993). Comme l'indiquent Tacnet *et al.*, (2000), les courbes granulométriques de la fraction inférieure ou égale à 20 mm devraient être accompagnées du pourcentage de cette fraction sur la fraction  $[0-D_{max}]$ , et de la taille du  $D_{max}$ .

##### 7.3.1.2. Volume d'échantillon représentatif

Pour tenir compte de l'hétérogénéité des formations et obtenir des analyses représentatives, un volume important de matériau doit être prélevé. Cette quantité optimale (en volume ou masse) a été définie expérimentalement en comparant le pourcentage d'argiles et de limons obtenu pour différents masses d'échantillons (de 4 à 200 kg, Figure 7.3a). Ce pourcentage varie de 15 à 57 %. Ainsi, plus le poids échantillonné est important, plus la probabilité de prendre un élément de grand diamètre augmente et plus la fraction argileuse diminue proportionnellement. Un regroupement net dans la distribution des valeurs indique une teneur en fines de 33-38 % pour une masse optimale variant de 70-110 kg. Ces valeurs sont comparables à celles évaluées par la règle empirique de Tacnet *et al.* (2000) :  $2D \text{ (mm)} < \text{masse prélevée en kg} < 5D \text{ (mm)}$ , qui indique une masse à prélever de 40 à 100 kg pour l'analyse de la fraction 0-20 mm.

### 7.3.1.3. Voie sèche ou voie humide ?

L'utilisation du protocole normalisé AFNOR NP94-57 par voie humide, basé sur la granulométrie de grains de sable quartzeux qui ne subissent aucune usure tout au long des opérations (Rivière, 1977) entraînait la fragmentation des clastes marneuses très érodables, au contact de l'eau, par choc répétés lors de l'agitation dans les colonnes de tamis ou dans les allonges d'autant plus qu'un défloculant était utilisé.

Phan (1993) montre que les marnes peuvent libérer 80% de fines au tamisage par voie humide alors qu'elles n'en libèrent que 2% par voie sèche. Cela est confirmé par Antoine *et al.* (1995) et Herrmann (1997) : les analyses par tamisage à l'eau entraînent une totale dissociation du matériau accompagné par un certain changement dans la forme de la courbe granulométrique en comparaison des tamisages à sec. Les courbes indiquent une réduction de la taille des particules et une surestimation du pourcentage de limons et d'argiles (>80%).

### 7.3.1.4. Un protocole adapté aux formations marneuses hétérogènes

Pour ces raisons, un protocole adapté à ce type de matériaux a été proposé (Klotz, 1998 ; Maquaire *et al.*, soumis). Il repose sur un processus de tamisage, délicat, en limitant au maximum le nombre de frottements et de chocs. Ce protocole doit permettre de désolidariser les différents clastes scellés par la matrice limono-argileuse sans provoquer leur fragmentation. Le protocole, coûteux en temps, est le suivant :

**a) sur le terrain :** 1. prélever 80-100 kg de matériaux ; 2. faire sécher au soleil le matériau sur une bâche pour désolidariser les agrégats argileux ; 3. séparer, tamiser et peser chaque fraction (0 – 20 mm ; 20 – 40 mm ; 40 – 80 mm ; etc. entre  $[0 - D_{\max}]$  sur le terrain ; 4. effectuer un quartage de la fraction inférieure à 20 mm pour emporter au laboratoire une quinzaine de kilogrammes.

**b) au laboratoire :** après un deuxième quartage, lors d'un unique cycle humectation-dessiccation, les différents éléments sont décollés et séparés manuellement avec précaution sous un filet d'eau, puis séchés et tamisés ; les fractions < 400  $\mu\text{m}$  sont tamisées par voie humide, la fraction < 50  $\mu\text{m}$  est passée au granulomètre-laser (Coulter LS-230) sans ajout de défloculant ; le refus à 400  $\mu\text{m}$  est tamisé manuellement par voie sèche.

## 7.3.2. Les caractéristiques géomécaniques

Les essais de cisaillement ont pour objectif de mesurer la résistance au cisaillement  $\tau_f$  sous contrainte normale  $\sigma$  appliquée à la facette du glissement et d'en déduire la valeur des deux constantes  $c$  (cohésion) et  $\varphi$  (angle de frottement interne) qui représentent des caractéristiques mécaniques du milieu. L'équilibre limite d'un sol est défini par le passage de l'état élastique à l'état plastique ; il se traduit par l'apparition des déformations irréversibles, c'est-à-dire, dans la pratique, par la « rupture » (Filliat, 1981). Cet équilibre limite dans la représentation de Mohr, est défini par la loi de Coulomb :  $\tau_f = c + \sigma \tan \varphi$

Ce critère de Mohr-Coulomb est largement utilisé pour définir la rupture (Lambe et Whitman, 1979 ; Wu, 1996) et pour une analyse en équilibre limite, ce critère est encore le plus convenable. Lorsque la cohésion  $C$  et l'angle de frottement interne  $\varphi$  sont connues, il est possible de facilement, au moyen de l'équation de Coulomb, de calculer la résistance au cisaillement  $\tau_f$  qui, n'est pas une constante propre du milieu, car elle dépend de  $\sigma$ . Les caractéristiques à long terme, c'est à dire la résistance au cisaillement du squelette solide après dissipation de la pression interstitielle ont été recherchées. Le protocole sera donc celui de l'essai consolidé drainé (CD). La résistance au cisaillement a été mesurée au moyen de trois types de matériel : l'appareil de cisaillement rectiligne (boîte de Casagrande) direct et alterné, l'appareil triaxial et l'appareil de cisaillement annulaire (*Ring shear test*).

### 7.3.2.1. Les essais de cisaillement direct

Les essais de cisaillement direct ont été réalisés selon la norme française NF P 94-071-1 (1994) à partir d'échantillons cylindriques (diamètre 68 mm) qui ont été soigneusement retaillés aux dimensions de la boîte utilisée (60 mm de diamètre et 30 mm de hauteur). La contrainte normale appliquée a varié

de 31 à 300 kPa (pour tenir compte de la contrainte effective du sol en place jusqu'à une profondeur de l'ordre de 15 m qui correspond aux épaisseurs moyennes des coulées) et une vitesse de cisaillement de  $0,02 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$  a été choisie. Cette vitesse de cisaillement relativement élevée d'environ  $28 \text{ mm}\cdot\text{jour}^{-1}$ , correspond finalement à celles mesurées à Super-Sauze (Malet *et al.*, 2001). Les essais de cisaillement ont été effectués dans des conditions drainées, après une phase de consolidation de 24 h.

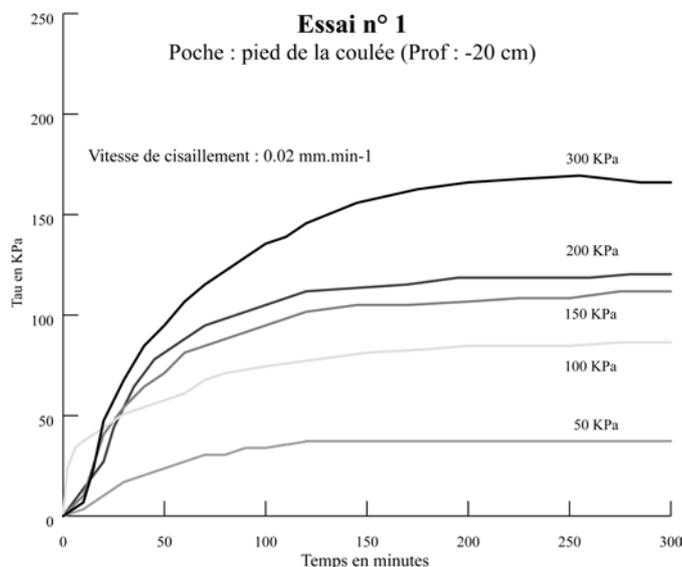


Figure 7.1 : Courbes efforts-déformations (cisaillement direct consolidé drainé – CD-) des marnes remaniées de la coulée de Poche (in Guillon, 2001).

Les courbes contraintes-déformations (contrainte de cisaillement  $\tau$  en fonction du déplacement horizontal  $\delta l$ ) (Figure 7.1) montrent une forme asymptotique, une absence de pic et une allure semblable à celles des sables lâches, ce qui est assez logique dans la mesure où les matériaux des coulées sont par nature remaniés. Ces comportements ne sont pas spécifiques aux marnes du bassin de Barcelonnette et ont été observés par plusieurs auteurs (Phan, 1993 ; Colas et Locat, 1992 ; Van Beek et Van Asch, 1996). Généralement, les courbes atteignent un palier après quelques millimètres de cisaillement. Par contre, dans certains cas, les courbes présentent des oscillations de la valeur de contrainte de cisaillement avec chute momentanément et reprise d'une croissance plus ou moins régulière. Ces irrégularités sont à mettre en relation avec les clastes de marnes de dimensions supérieures à 5 mm, trop grandes en rapport de la taille de la boîte de cisaillement utilisée.

L'effet d'éventuelles liaisons argileuses a été analysé en comparant les données obtenues à partir d'échantillons « intacts » prélevés par carottier et d'éprouvettes reconstituées à partir des mêmes matériaux de la coulée de Super-Sauze. Comme attendu, aucun pic n'est observé et les éprouvettes reconstituées montrent une rupture de type plastique.

Après l'application d'une contrainte normale faible ( $< 200 \text{ kPa}$ ), la résistance des liaisons des échantillons « intacts » excède clairement celle de l'échantillon reconstitué ; ce qui pourrait être l'effet des liaisons argileuses du sol demeurées plus ou moins intactes dans l'échantillon non remanié artificiellement. Un comportement semblable a été observé lors d'essais de cisaillement direct sur des marnes des Pyrénées par Camapum de Carvalho (1985).

### 7.3.2.2. Les essais de cisaillement annulaires (Ring shear test)

Des échantillons reconstitués (fraction  $< 20 \text{ mm}$ ) ont été testés à l'aide l'appareil de cisaillement « Ring shear » modifié de Bromhead, sur lequel une série de petites palettes a été fixée aux platines inférieures et supérieures (Bromhead, 1979 ; Boyce *et al.*, 1988). Cet essai donne des informations sur la résistance résiduelle des sols et des effets de la teneur en eau sur la cohésion effective apparente ( $C'$ ) et l'angle de frottement effectif ( $\varphi'$ ). À cette fin, l'eau est ajoutée aux échantillons secs jusqu'à obtenir la teneur en eau souhaitée. Avant cisaillement, l'échantillon a été consolidé sous un

l'effort normal effectif de 200 kPa. Des échantillons des trois coulées ont été cisailés à  $0.6 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  sous des conditions non drainées, selon le procédé d'Anayi *et al.* (1989).

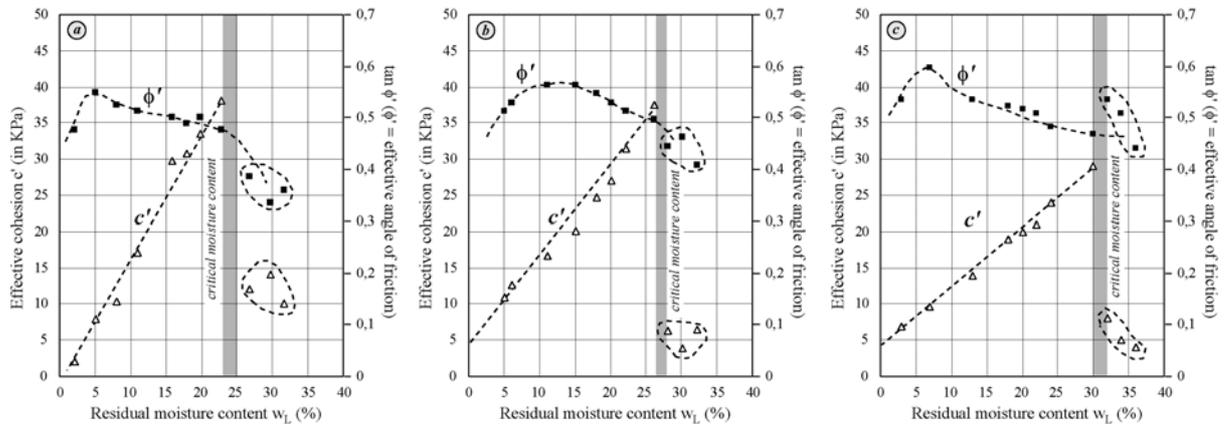


Figure 7.2 : Valeurs de la cohésion apparente ( $c'$ ) et de l'angle de frottement effectif ( $\phi'$ ) en fonction de la teneur en eau ( $w_L$ ) obtenues avec l'appareil de cisaillement annulaire de Bromhead modifié pour les coulées de (a) la Valette, (b) Super-Sauze et (c) Poche (in Maquaire *et al.*, soumis)

Les paramètres résiduels de résistance dépendent des teneurs en eau à la fin de l'essai (Figure 7.2). De la distribution de ces valeurs, on peut conclure :

- qu'une relation linéaire existe entre la cohésion effective apparente et la teneur en eau ;
- mais que la relation entre l'angle de frottement et la teneur en eau est plus complexe.

### 7.3.3. Rhéologie

Si, ces dernières années, la rhéologie des laves torrentielles a connu des progrès importants (Phillips et Davies, 1991 ; Major et Pierson, 1992 ; Coussot, 1994 ; Iverson, 1997), le comportement rhéologique des écoulements lents, à l'interface entre les domaines de plasticité et de liquidité, reste un domaine peu exploré. Dans le cadre du programme de recherche *MOTE*, une étude a été engagée en 2001 pour :

- vérifier si les différentes vitesses mesurées et les modes d'écoulement observés sur le terrain (vitesse de propagation, morphologie des dépôts) sont une conséquence des caractéristiques rhéologiques des matériaux, et donc vérifier si les caractéristiques rhéologiques permettent de distinguer quantitativement ces divers types d'écoulement ;
- définir les processus de transformation des matériaux accumulés en écoulements boueux et les conditions d'acquisition de leur mobilité (vitesse, distance de propagation).

Pour cela, des analyses rhéologiques ont été menées sur des dépôts issus de divers mouvements de terrain (glissements évoluant en coulées, coulées de débris, laves torrentielles) et impliquant les marnes noires, mélangées dans des proportions diverses à des moraines ou à des flyschs. Comme les caractéristiques physiques montraient que plus le matériau était cohésif et plastique, plus les vitesses d'écoulement étaient lentes (pour une pente équivalente), il s'agissait de savoir si ces caractéristiques se retrouvaient dans les paramètres rhéologiques.

Les fluides soumis aux essais rhéométriques sont des suspensions de neuf matériaux, écrêtés à  $400 \mu\text{m}$ . Les essais ont été réalisés pour six concentrations volumiques solides. Un volume donné de matériau solide a été ajouté à de l'eau puis mélangé à l'aide d'un malaxeur mécanique à  $600 \text{ t} \cdot \text{min}^{-1}$  pendant une minute puis à  $400 \text{ t} \cdot \text{min}^{-1}$  pendant 30 min. Les essais rhéométriques ont été réalisés à l'aide d'un rhéomètre plan-plan Rotovisco RV20 (Haake) du Cemagref de Grenoble et d'un rhéomètre coaxial Rotovisco RV12 (Haake) de l'Université Laval (Québec). Le protocole expérimental détaillé retenu tenant compte des précautions pour limiter les effets perturbateurs (Locat et Demers, 1988 ; Coussot et Piau, 1990 ; Magnin et Piau, 1990 ; Coussot *et al.*, 1993) sera trouvé dans Malet *et al.* (2002).

## 7.4. Les principaux résultats

Les matériaux traités proviennent essentiellement des glissements-coulées (*earthflow*) de Super-Sauze (SAU), de Poche (POC) et de la Valette (VAL), de dépôts de laves torrentielles (*debris-flow*) des bassins versants du Faucon (FAU) et du Riou Bourdoux (RBX), de dépôts de coulées de débris (*debris avalanche*) superficielles déclenchées en 1999 et 2000 à partir de la couche de surface de la coulée de Super-Sauze, du manteau d'altérite des marnes *in situ* dans les secteurs ravinés : dépôt stratigraphique inférieur (*LSD, Lower Stratigraphic Deposit*) et supérieur (*USD, Upper Stratigraphic Deposit*) et des formations superficielles (moraines, dépôts de pente, etc.). Je reprends les mêmes notations que celles données dans les articles : Malet *et al.*, 2001 ; Malet *et al.*, à paraître ; Remaître *et al.*, 2002 et Maquaire *et al.*, soumis.

Les échantillons ont été prélevés à partir de fosses manuelles à des profondeurs variant de 0,50 à 1,00 m soit *intacts* dans des trousseaux métalliques d'un diamètre de 68 mm pour un volume de 248 cm<sup>3</sup>, soit *remaniés et en vrac* dans les sacs plastiques et pour des masses variant de quelques kg à plusieurs dizaines de kg.

Les résultats ont été complétés par ceux trouvés par la littérature : Caris et Van Asch, 1991 ; Phan, 1993 ; Colas et Locat, 1993 ; Antoine *et al.*, 1995 ; Durville et Serratrice, 1997 ; Van Asch et Buma, 1997 ; Le Mignon, 1999. Je choisis de ne détailler que les résultats concernant les caractérisations texturales, mécaniques et rhéologiques.

### 7.4.1. Les textures

Plusieurs dizaines d'analyses granulométriques ont été réalisées sur les différents matériaux.

Dans le torrent du Faucon, les analyses granulométriques des dépôts de la lave torrentielle du 19 août 1996 (Remaître *et al.*, 2002) montrent que l'écoulement a d'abord été de type granulaire dans les premiers hectomètres puis de type cohésif jusqu'à la zone principale de dépôt, ce qui traduit l'hétérogénéité géologique observée dans le bassin versant du Faucon. L'analyse morphologique associée aux analyses comparatives (granulométriques et pétrographiques) des dépôts de laves et des formations superficielles ont permis de distinguer deux zones "sources" bien distinctes : une zone de déclenchement *stricto sensu* et plusieurs zones de contribution latérales.

Pour les coulées du bassin Barcelonnette, un classement logique du pourcentage de fines est mis en évidence en fonction de l'âge des coulées ainsi qu'une relation logique entre la nature des matériaux des coulées et la nature des formations « sources » (Maquaire *et al.*, soumis). (Tableau 7.1 ; Figure 7.3b).

|     | Classes granulométriques |           |           |            |   | Limites d'Atterberg |                    |                    |                |   | SS                     |   |
|-----|--------------------------|-----------|-----------|------------|---|---------------------|--------------------|--------------------|----------------|---|------------------------|---|
|     | Gravier (%)              | Sable (%) | Limon (%) | Argile (%) | n | W <sub>l</sub> (%)  | W <sub>p</sub> (%) | W <sub>r</sub> (%) | I <sub>p</sub> | n | SS (m <sup>2</sup> /g) | n |
| USD | 37                       | 37        | 9         | 17         | 2 | 33-35               | 16-18              | 14-15              | 16-18          | 5 | /                      | / |
| LSD | 26                       | 34        | 13        | 27         | 1 | 28-30               | 20-22              | 17-18              | 8-9            | 4 | 21-25                  | 4 |
| SAU | 32-38                    | 30-32     | 11-12     | 21-24      | 6 | 32-34               | 16-18              | 14-15              | 14-17          | 8 | 30-37                  | 9 |
| VAL | 37-42                    | 32-34     | 9-11      | 16-18      | 3 | 29-32               | 17-19              | 12-13              | 11-14          | 6 | 36-42                  | 4 |
| POC | 28-34                    | 23-29     | 15-17     | 22-26      | 3 | 35-38               | 18-20              | 15-16              | 16-19          | 7 | 32-45                  | 4 |

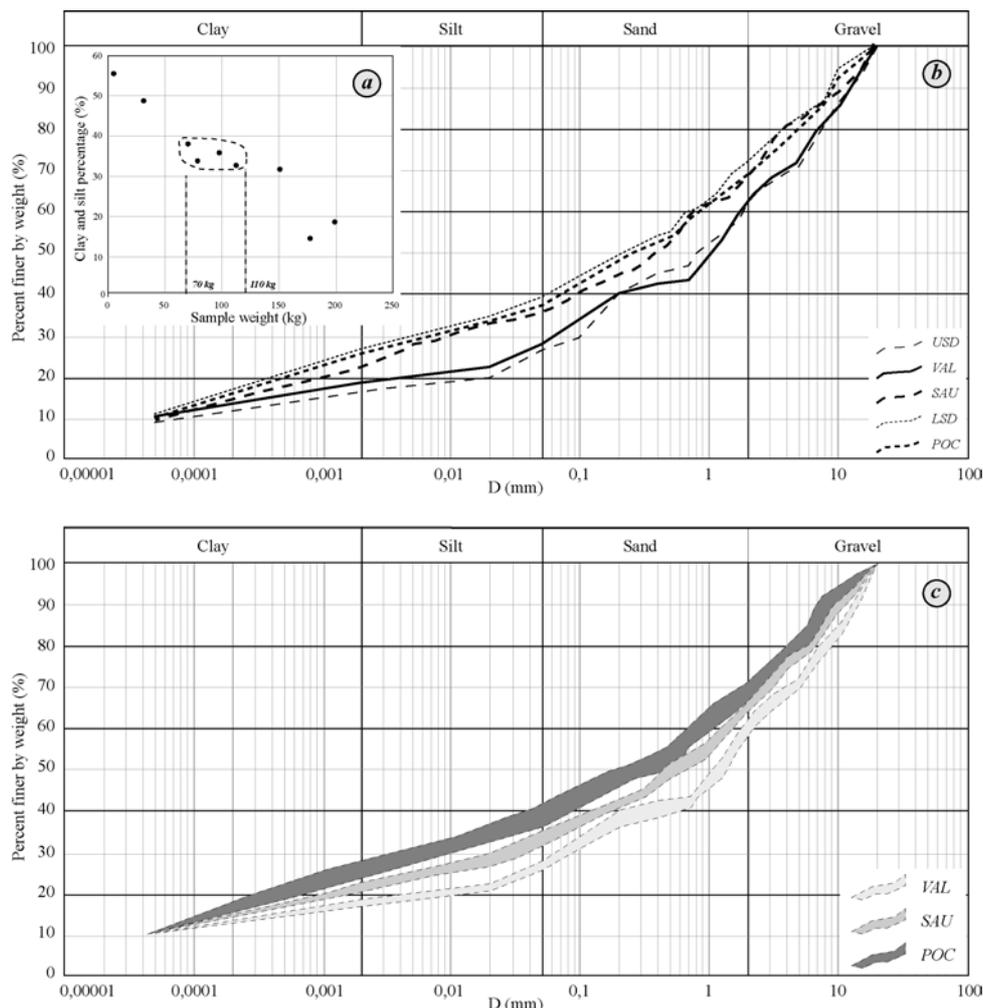
Avec W<sub>l</sub> : limite de liquidité ; W<sub>p</sub> : limite de plasticité ; W<sub>r</sub> : limite de retrait ; I<sub>p</sub> : indice de plasticité ; SS : surface spécifique ; n : nombre de valeurs.

Tableau 7.1 : Classes granulométriques sur la fraction 0-20 mm et indices de consistance pour des matériaux marneux *in situ* et issus des coulées de débris (in Maquaire *et al.*, soumis).

En effet, les échantillons contiennent une forte proportion de limons et d'argiles (25-40 %), ce qui les classent dans les textures limono-argileuses à sablo-limoneuses. Les courbes granulométriques des formations sont assez similaires, à part VAL et USD qui sont plus grossières que les autres. Pour les trois coulées, les fuseaux s'individualisent clairement (Figure 7.3c). Les médianes (Q<sub>50</sub>) indiquent un diamètre moyen de plus en plus élevé d'une coulée à l'autre : entre 0.2 et 0.6 mm pour POC, entre 0.4-0.7 mm pour SAU, et entre 1.1-1.5 mm pour VAL. Ces valeurs sont à mettre en relation avec l'âge des coulées : *plus la coulée est ancienne, plus le pourcentage d'argiles et de limons est élevé à cause de la météorisation des marnes*. Ce pourcentage atteint 36-42 % pour POC (> 150 ans), 32-35 % pour

SAU (25-30 ans) et 26-27 % pour VAL (20 ans). Les courbes granulométriques montrent également une remarquable corrélation entre les zones géologiques « sources » (USD et LSD) et les formations des coulées. Pour La Valette (VAL), la texture plus grossière est en relation avec la présence de flysch. Ces textures couplées avec les valeurs des limites d'Atterberg et de la surface spécifique (valeur au bleu) permettent de classer les formations des glissements-coulées comme *des formations peu plastiques faiblement sablo-limoneuses* (classification USCS).

De même, Malet *et al.* (à paraître) mettent bien en évidence une nette distinction entre les différents types de mouvements et d'écoulements par la composition granulométrique de la matrice. Ce résultat est conforme à la classification des écoulements proposée par Hungr *et al.* (2001) fondée sur la texture des matériaux mobilisés. Les laves torrentielles contiennent moins de 30 % de limons et d'argiles. Elles peuvent donc être distinguées des glissement-coulées, beaucoup plus cohésifs car très riches en matrice. Les coulées de débris présentent une texture intermédiaire.



VAL la valette (4 analyses) ; SAU : Super-Sauze (5 analyses) ; POC : Poche (5 analyses) ; Dépôt stratigraphique supérieur (USD) et inférieur (LSD) des marnes.

Figure 7.3 : Courbes granulométriques des matériaux des coulées : (a) Relation entre la masse totale sèche de l'échantillon et le pourcentage d'argiles et de limons ; (b) Courbes granulométriques moyennes pour cinq formations ; (c) Fuseaux granulométriques pour trois coulées (in Maquaire *et al.*, soumis).

#### 7.4.2. Les caractéristiques mécaniques : une grande dispersion des résultats

Pour obtenir le comportement à long terme des matériaux, onze essais de cisaillement rectiligne direct lent (consolidé drainé, CD) ont été réalisés sur les matériaux de la coulée de Super-Sauze et sept essais pour ceux de Poche. A titre de comparaison, un essai de cisaillement rectiligne direct

rapide (non consolidé, non drainé, UU) a été réalisé sur les matériaux de la coulée de Super-Sauze pour obtenir le comportement à court terme des matériaux. Un essai de cisaillement alterné a également été réalisés pour obtenir les caractéristiques résiduelles. En complément, un essai triaxial et 11 essais de cisaillement annulaire pour chacune des coulées ont également été entrepris.

| N° éch. | Prof. (m)   | Nb | Type d'essai | Section (cm <sup>2</sup> ) | $\sigma_n$ (Kpa) | Vitesse mm/mn | C' (kPa)                | $\varphi'$ (kPa)                  |
|---------|-------------|----|--------------|----------------------------|------------------|---------------|-------------------------|-----------------------------------|
| E4F1    | 0.50        | 3  | CD           | 36                         | 36; 86; 186      | 0,02          | n.d.                    | n.d.                              |
| E4F1    | 0.65        | 3  | CD           | 36                         | 36; 86; 186      | 0,02          | 16                      | 31                                |
| 2EF2    | 0.40        | 3  | CD           | 36                         | 86; 136; 300     | 0,02          | 18                      | 31                                |
| 2EF2    | 0.70        | 3  | CD           | 36                         | 86; 186; 300     | 0,02          | 32                      | 30                                |
| 2EF2    | 0.90        | 3  | CD           | 36                         | 86; 186; 300     | 0,02          | 32                      | 30                                |
| 2EF2    | 1.10        | 3  | CD           | 36                         | 86; 186; 300     | 0,02          | 29                      | 32                                |
| ER      | 0.50        | 3  | CD           | 36                         | 100 ; 200 ; 300  | 0,02          | n.d.                    | n.d.                              |
| ER      | 1.30        | 3  | CD           | 36                         | 100 ; 200 ; 300  | 0,02          | 20                      | 32                                |
| ER      | 1.50        | 3  | CD           | 36                         | 100 ; 200 ; 300  | 0,02          | 37                      | 30                                |
| Fosse E | 0,80 à 1,50 | 7  | CD           | 36                         | 31 à 135         | 0,02          | 30                      | 29                                |
| ER      | 0.80        | 3  | CD*          | 100                        | 100 ; 200 ; 300  | 0,012         | 12                      | 24                                |
| Fosse E | 0,20 à 0,80 | 8  | UU           | 36                         | 31 à 200         | 1,2           | 11                      | 37                                |
| Fosse E | 0,70        | 3  | CU + U       | 36                         | 100 ; 300 ; 400  | 0,06          | 55                      | 24                                |
| Fosse E | 0,80        |    | CD Alterné   | 32                         | 100 ; 200        | 0,0004        | C' <sub>res</sub> = 0   | $\varphi'$ <sub>res</sub> = 24    |
| Fosse E | 0,20 à 0,80 | 11 | annulaire    |                            |                  |               | C' <sub>res</sub> = 3-7 | $\varphi'$ <sub>res</sub> = 22-25 |

Nb : nombre d'éprouvettes ; Boite ronde 36cm<sup>2</sup> ;  $\sigma_n$  : contrainte normale ; C' : cohésion et  $\varphi'$  : angle de frottement interne; \* Boite carrée 100 cm<sup>2</sup> et vitesse 0,012 mm/mn (LRPC, Strasbourg) ; n.d. : non déterminé ; Essai triaxial CU + U (C = 50 kPa ;  $\varphi = 20^\circ$ ) ; Essai alterné CD (C' <sub>pic</sub> = 20 kPa ;  $\varphi'$  <sub>pic</sub> = 36)

Tableau 7.2 : Synthèse des caractéristiques mécaniques obtenus par différents essais de cisaillement : fosses proches du replat E de la coulée de Super-Sauze (d'après Klotz, 1998, 1999 et Guillon, 2001)

A des fins de comparaisons, le tableau 7.4 a été complété avec des valeurs de cohésion non drainée obtenues avec un scissomètre sur le terrain (Maquaire et al., soumis).

|                       | Cisaillement direct |          |    | Scissomètre          |    | Cisaillement annulaire |                       |    |
|-----------------------|---------------------|----------|----|----------------------|----|------------------------|-----------------------|----|
|                       | $\varphi'$ (°)      | c' (kPa) | n  | c <sub>u</sub> (kPa) | n  | $\varphi'_r$ (°)       | C' <sub>r</sub> (kPa) | n  |
| <b>Marnes in situ</b> |                     |          |    |                      |    |                        |                       |    |
| USD                   | 30-33               | 15-22    | 7  | 25-46                | 32 | /                      | /                     | /  |
| LSD                   | 34-39               | 8-17     | 9  | 15-32                | 14 | /                      | /                     | /  |
| <b>Coulées</b>        |                     |          |    |                      |    |                        |                       |    |
| SAU                   | 29-32               | 16-37    | 10 | 28-45                | 52 | 22-25                  | 3-7                   | 11 |
| VAL                   | 21-24*              | 31-40*   | 9* | 34-52                | 18 | 19-21                  | 10-14                 | 11 |
| POC                   | 28-37               | 8-22     | 7  | 19-38                | 38 | 24-27                  | 4-8                   | 11 |

\*d'après Le Mignon, 1999

C' : cohésion et  $\varphi'$  : angle de frottement interne ; n : nombre de valeurs ; c<sub>u</sub> : cohésion non drainée ;  $\varphi'_r$  : angle de frottement résiduel ; C'<sub>r</sub> : cohésion résiduelle.

Tableau 7.3 : Caractéristiques de cisaillement pour des matériaux marneux in situ et issus des coulées de débris (in Maquaire et al., soumis).

Les résultats obtenus montrent l'extrême dispersion des valeurs de cohésion c' et de frottement interne  $\varphi'$  ce qui était a priori prévisible en raison de l'hétérogénéité des matériaux. Ainsi, si l'on représente l'ensemble des droites intrinsèques obtenues pour chacun des essais sur un même diagramme (Figure 7.4a et b), on obtient des faisceaux caractéristiques. Ces faisceaux sont relativement étroits pour SAU ( $\varphi'$ =29-32°), VAL ( $\varphi'$ =21-24°), USD ( $\varphi'$ =30-33°), LSD ( $\varphi'$ =34-39°) et largement ouvert en éventail pour POC ( $\varphi'$ =28-37°) traduisant une plus grande dispersion pour les matériaux de cette coulée. La cohésion effective est comprise entre 8 et 40 kPa.

Dans la mesure où les prélèvements ont été réalisés dans des fosses assez voisines, une analyse globale a été ensuite engagée. L'ensemble des couples de points ( $\sigma' - \tau_f$ ) obtenus pour chacune des éprouvettes sont représentés sur un même diagramme de Mohr (contrainte normale – contrainte tangentielle). Les nuages de points, plus ou moins dispersés, sont bien délimités par les droites intrinsèques. Les valeurs de cohésion et d'angle de frottement sont données sur la figure 7.4.

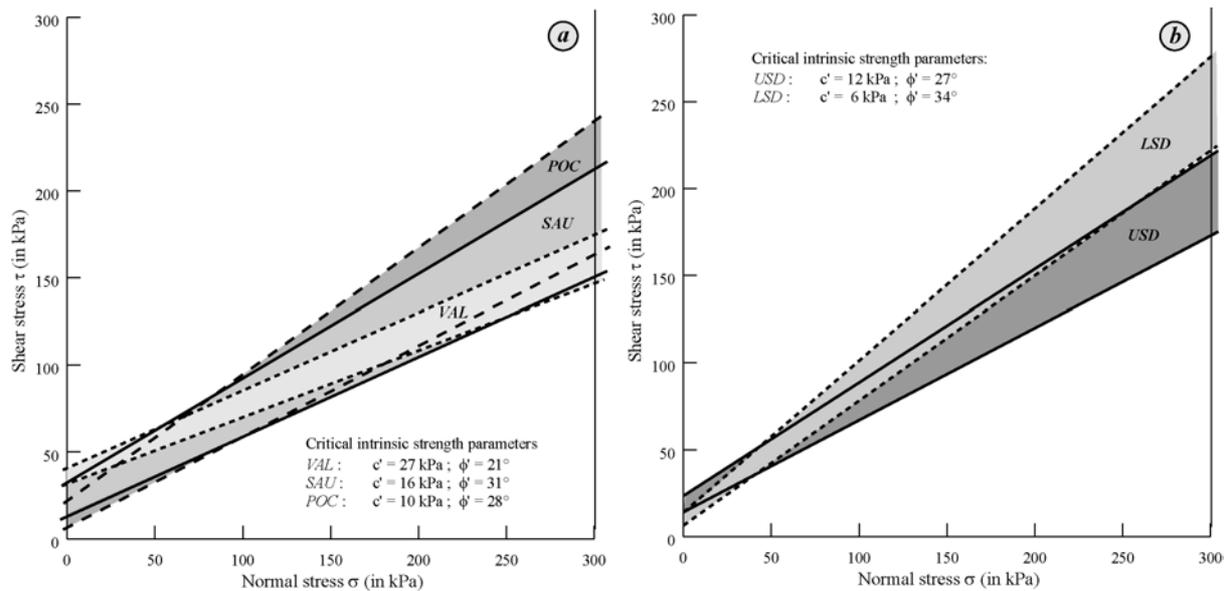


Figure 7.4 : Droites de Mohr-Coulomb : (a) pour les formations des coulées et (b) pour les formations dégradées des marnes in situ (in Maquaire et al. soumis).

Par comparaison avec les essais au scissomètre menés sur le terrain, les cohésions non drainées sont plus élevées que celles obtenues par le cisaillement direct, car prenant en compte les hétérogénéités de la matrice (Lupini et al., 1981) avec des valeurs de  $C_u$  comprises entre 15 et 52 Kpa (Tableau 7.4). Les résultats obtenus avec un essai de cisaillement alterné réalisé sur la formation SAU donne une cohésion nulle pour un angle de frottement de  $24^\circ$  sous des contraintes normales de 100 et 200 Kpa (Klotz, 1998). Ces résultats indiquent que la résistance du sol décroît d'un tiers pour de longs déplacements.

Pour les marnes in situ, les résultats sont assez conformes aux valeurs trouvées par d'autres auteurs (Phan, 1993 ; Antoine et al., 1995) et également par les valeurs obtenues par Klotz (1999). Ce dernier a réalisé plusieurs essais de frottement en disposant la surface de discontinuité parallèlement au plan de cisaillement de manière à cisailier des épontes géométriquement identiques (Durville et Serratrice, 1997). Ces essais donnent des cohésions de  $C'=0 \text{ kPa}$  et des angles de frottement de  $\phi'=32^\circ$ , pour des poids spécifiques secs de  $\gamma_d=26 \text{ kN/m}^3$ .

### 7.4.3. Les paramètres rhéologiques

Dans la mesure où ma participation à cette caractérisation rhéologique a été très marginale, les essais ayant été conduits par Jean-Philippe Malet et Alexandre Remaître et l'interprétation par ces deux mêmes doctorants avec l'aide des collègues du CEMAGREF et de l'Université Laval au Québec, je ne détaillerai pas les résultats mais j'en donnerai seulement les principaux points. Le lecteur trouvera le détail et la justification dans Malet et al. (à paraître).

Cette étude préliminaire a mis en évidence que la fraction inférieure à  $400 \mu$  des matériaux issus des glissements évoluant en coulées, des coulées de débris et des laves torrentielles déclenchées dans les marnes noires, possèdent, dans la gamme de taux de cisaillement explorée, un comportement rhéologique en cisaillement simple qui peut être ajusté par un modèle de Herschel-Bulkley où tous les paramètres mécaniques augmentent avec la concentration volumique solide. Les résultats obtenus avec les deux rhéomètres sont satisfaisants, puisque les écarts relevés pour le seuil de contrainte et la viscosité sont faibles. Les similitudes dans le comportement des matériaux permettent de tracer des courbes maîtresses. La distinction qui existe en termes d'indice de plasticité entre les matériaux ayant coulé sous forme de glissements-coulées, de coulées de débris ou de laves torrentielles est moins évidente dans les paramètres rhéologiques. Ces derniers discriminent plutôt deux groupes de matériaux selon le pourcentage de marnes et de moraine et/ou flysch.

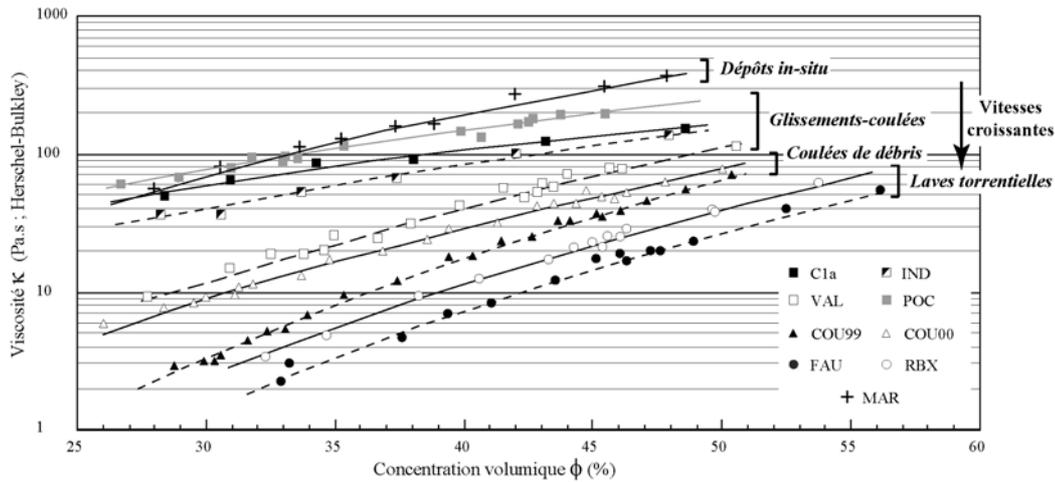


Figure 7.5 : Relation Viscosité (Herschel-Bulkley) – Concentration volumique pour tous les matériaux (in Malet et al., à paraître).

Néanmoins, sur le seul paramètre viscosité, une classification des matériaux selon leur mode d'écoulement peut être observée (Figure 7.5). Quelle que soit la concentration volumique, les matériaux ayant coulé avec les vitesses de déplacement les plus fortes présentent les viscosités les plus faibles ; les matériaux en place présentent les viscosités les plus importantes.

## 7.5. Synthèse et discussion

En ce qui concerne les analyses granulométriques réalisées sur l'ensemble du spectre ou sur la fraction < 20 mm, les résultats obtenus permettent de bien distinguer les différentes formations, de mettre en évidence des relations entre certaines, des degrés d'évolution, etc. Il était donc très important d'accorder une grande attention à la réalisation de ces analyses en raison de la nature des marnes qui constituent la majeure partie des différentes formations superficielles. Le protocole proposé permet ainsi d'assurer une certaine cohérence des résultats.

Pour les caractéristiques mécaniques, il y a beaucoup plus de choses à dire. En effet, en dehors de la dispersion relative de certaines valeurs, classique en mécanique des sols (Mulder et Van Asch, 1988b), les valeurs de frottement et de cohésion obtenues pour les différents matériaux nécessitent des commentaires pour juger de leur représentativité. Des comparaisons avec des résultats obtenus par différents auteurs permettront de juger de leur cohérence. Il s'agit notamment d'identifier quels sont les paramètres qui influent, et *in fine* quelle sont les valeurs à retenir pour les modélisations, en dehors du simple choix des valeurs les plus pénalisantes pour la stabilité.

Le problème est d'abord technique : il est depuis longtemps admis que les caractéristiques C et  $\phi$  sont pour un même matériau, variables en fonction de divers paramètres tels que la teneur en eau, mais surtout en fonction de la vitesse du mouvement. Ainsi, comme le précisaient déjà Antoine *et al.* (1971) on voit donc ainsi apparaître une importante difficulté dans la mesure de ces paramètres : adéquation difficile entre les valeurs de vitesses du mouvement naturel et celles reproduites en laboratoire, etc..

Les formations des glissements-coulées présentent des valeurs d'angle de frottement faibles mais des cohésions effectives plus élevées que celles des formations "sources" des marnes en place, ce qui est *a priori* surprenant. Cela est à mettre en relation avec les phénomènes de dégradation (météorisation et altération) qui contribuent à créer des ponts argileux dans la matrice et à réduire les frottements entre les particules. Cette cohésion est également fonction des liaisons physico-chimiques des éléments minéraux en contact, soit directement, soit par l'intermédiaire de la coquille d'eau adsorbée. Ces contacts sont également fonction, du degré de consolidation du sol donc de l'indice des vides qui traduit la distance entre les particules, et de l'orientation des particules par rapport à l'orientation du champ de contraintes.

Les valeurs d'angles de frottement permettent de classer les trois coulées selon leur âge : VAL possède les valeurs d'angle les plus faibles, POC les plus élevées. Pour chaque formation, les nuages de points, plus ou moins dispersés, sont bien délimités par les droites intrinsèques qui délimitent le domaine de rupture (Figure 7.4). Ces valeurs sont en concordance avec celles données par Antoine *et al.* (1995) sur des colluvions de marnes noires (moyenne  $c' = 13,5$  kPa,  $\sigma^2 = 49,1$  kPa; moyenne  $\phi' = 35,4^\circ$ ,  $\sigma^2 = 3,8^\circ$ ) sur 131 cisaillements directs drainés.

L'ensemble de ces essais corrobore ainsi les analyses rétrogrades d'Antoine *et al.* (1988) sur six petits glissements de terrains affectant les marnes noires. En faisant l'hypothèse que la pression interstitielle correspond à un toit de nappe coïncidant avec la surface topographique, les calculs de stabilité donnent des angles de frottement de l'ordre de  $29 \pm 2^\circ$  et des cohésions de  $72 \pm 13$  kPa.

Outre des problèmes liés à une adéquation difficile entre les vitesses du mouvement naturel et celles reproduites en laboratoire (Leroueil, 2001), des problèmes spécifiques liés à l'hétérogénéité de la formation et à l'influence des clastes dans les échantillons pendant le cisaillement doivent être pris en compte. Après chaque essai, il est nécessaire de vérifier si aucune claste n'a influencé le plan de cisaillement. Ainsi, certains auteurs (Colas et Locat, 1993; Van Beek et Van Asch, 1996) préfèrent tailler des échantillons dans des matériaux tamisés, pour réduire les dispersions engendrées par les éléments grossiers. L'emploi de grandes boîtes de cisaillement ne résout pas le problème de l'hétérogénéité de la formation (Klotz, 1998) car un élément grossier peut toujours freiner le cisaillement. De plus, des boîtes de grandes dimensions ( $> 100 \times 100$  mm) ne sont pas courantes.

Le type d'essai est également important à considérer : les limites du cisaillement direct sont souvent évoquées en particulier en raison de l'imposition du plan de cisaillement et de la difficulté de contrôler la variation de pression interstitielle au cours de l'essai. Comme le soulignent Antoine *et al.* (1995), l'essai triaxial drainé montre probablement des valeurs plus réalistes, malgré des variances élevées (moyenne  $c' = 12,4$  kPa,  $\sigma^2 = 243,5$  kPa; moyenne  $\phi' = 24,7^\circ$ ,  $\sigma^2 = 0,4^\circ$  pour 19 tests). Ces valeurs correspondent à celles obtenues par Klotz (1998) sur un essai triaxial ( $c' = 20$  kPa;  $\phi' = 24^\circ$ ).

Ainsi pour disposer de valeurs réalistes de résistance, un nombre important d'essais doivent être réalisés. Enfin, il convient de ne pas accorder une trop grande importance à la dispersion des valeurs de cohésion :

- d'une part, la cohésion, liée aux ponts carbonatés, diminue lors de l'imbibition qui détruit la plupart des liaisons (Phan, 1993) ;
- et d'autre part, la partie de la résistance due à la cohésion n'est mobilisée que pour de faibles déplacements, alors que pour de grands déplacements, c'est le frottement entre les particules qui conditionne la résistance.

En rupture lente, on assiste à une réorganisation progressive des particules argileuses en cours de l'essai (Lambe et Whitman, 1979).

Pour les caractéristiques rhéologiques de la fraction inférieure à  $400 \mu$ , les travaux menés dans le torrent de Faucon par A. Remaître (thèse en cours) montrent que si les laves torrentielles cohésives du Faucon se comportent comme des fluides de Hershel-Bulkley, les laves torrentielles granulaires et les moraines se comportent comme des fluides de Bingham. Les essais réalisés sur des mélanges artificiels (marnes noires/moraines) montrent que la rhéologie de ces mélanges évolue fortement en fonction de la proportion des marnes et des moraines. Ainsi, plus la proportion de moraines est grande, plus le fluide a tendance à s'écouler comme un fluide de Bingham avec pour conséquence une baisse de la valeur du seuil d'écoulement. Comme les recherches ont montré la participation de plusieurs formations "sources" à l'écoulement de la lave torrentielle d'Août 1996 (Remaître *et al.*, 2002), il est indispensable de connaître les changements induits par ces apports successifs à l'écoulement en réalisant des essais rhéologiques sur des mélanges artificiels impliquant les différents matériaux dans des proportions différentes.

### En résumé :

Les marnes noires se composent de matériaux facilement météorisables et érodables. Cette susceptibilité à la météorisation les rend particulièrement favorables à l'érosion et aux mouvements de masse. Les conclusions suivantes peuvent être tirées des résultats et de la discussion présentée ici :

- des soins particuliers et des procédures spécifiques doivent être pris en considération pour correctement définir le comportement des marnes noires évolutives et l'hétérogénéité de la formation, composée d'un mélange de débris grossiers et d'agrégats argileux fragiles ;
- le comportement des marnes noires « reconstituées » est nettement différent de celui des marnes noires remaniées jusqu'à un certain seuil. Au-dessus d'une contrainte normale de 200 kPa, la résistance produite par les liaisons du sol est détruite et les courbes de contraintes-déformations ne diffèrent pas entre les deux types d'échantillons ;
- quand la teneur en eau des marnes noires reconstituées augmente, la cohésion apparente effective monte linéairement jusqu'à une valeur limite de 30-40 kPa pour une teneur en eau de 35-30 %, après quoi les valeurs chutent ;
- l'angle de frottement effectif est maximal pour une teneur en eau de 5-10 % et tombe ensuite à une valeur plus basse de 25-30 %, après quoi les paramètres de résistance effective se stabilisent quand le sol devient saturé ;
- la météorisation des marnes noires conduit, à court terme, à une réduction de résistance due à une diminution de la cohésion, et à long terme, à une augmentation progressive de résistance dû à l'augmentation de l'angle du frottement. Cette variation de résistance au cours du temps peut être liée au remaniement du matériel pendant l'écoulement et à la disparition des liens argileux et carbonatés ;
- en tenant compte de l'hétérogénéité des formations, les paramètres intrinsèques à retenir pour les analyses de stabilité des pentes et pour l'évaluation des risques sont les valeurs de résistance les plus basses, à savoir ( $c' = 0$  kPa,  $\varphi' = 25-28^\circ$ ) ;
- à partir des premiers résultats sur la caractérisation rhéologique, une classification des matériaux selon leur mode d'écoulement peut être observée sur le seul paramètre viscosité. Quelle que soit la concentration volumique, les matériaux ayant coulé avec les vitesses de déplacement les plus fortes présentent les viscosités les plus faibles ; les matériaux en place présentent les viscosités les plus importantes.

## 7.6. Bilan et perspectives

Les caractérisations physico-mécaniques, hydrodynamiques et rhéologiques en laboratoire, des marnes et des matériaux des glissement-coulées, des coulées de débris et des laves torrentielles, couplés à ceux obtenus par investigation *in situ* et comparés à ceux trouvés dans la littérature fournissent les paramètres indispensables à la compréhension des phénomènes et de leur interdépendance, à l'élaboration de scénario d'évolution et aux modélisations. Les lois de comportement les mieux adaptées aux différentes situations (élasto-plastique, visqueux à seuil de contrainte, ...) permettent maintenant d'entreprendre les différentes modélisations envisagées (Chapitre 3). Il reste néanmoins pour les années à venir de nombreuses choses à poursuivre ou à entreprendre.

Tout d'abord, il faut continuer à faire des analyses et des essais sur ces formations hétérogènes pour disposer d'une banque de données plus fournie et entreprendre des analyses probabilistes : c'est particulièrement vrai pour les granulométries et les essais de cisaillement. Pour les granulométries, il faudrait trouver une solution pour éviter d'avoir à traiter les gros volumes de matériaux pour tenir compte de leur hétérogénéité. Pour les essais de cisaillement, il faudrait pouvoir s'équiper d'une machine de cisaillement performante asservie pour le contrôle strict des différentes mesures avec enregistrement et l'application de vitesses de cisaillement très faibles sur de grands volumes. Une cellule triaxiale avec contrôle de la succion en cours d'essai serait également utile. En l'absence de ces équipements en propre, les collaborations effectives devront être renforcées avec des équipes en disposant.

Dans le cadre des projets *MOTE* et *ECLAT* et des thèses en cours de J. Ph. Malet et A. Remaître, la caractérisation rhéologique se poursuivra pour définir le comportement des matériaux sous de très faibles contraintes (essais à contrainte imposée) et pour analyser le rôle des « constituants » des matériaux (granulométrie, minéralogie). Il s'agira de comprendre l'évolution du comportement à partir d'essais rhéologiques réalisés sur des mélanges artificiels dans des proportions différentes (marnes/moraine, marnes/flysch, différentes formations superficielles identifiées etc.) et l'influence de l'historique des écoulements (vitesses) sur les différences de comportement.

Ces résultats seront comparés avec les courbes rhéométriques des dépôts de laves torrentielles (1) pour mieux cerner leurs conditions de formation et d'écoulement, (2) définir quel mélange minimise le seuil d'écoulement, (3) déterminer les seuils rhéologiques à introduire dans les modèles de propagation.

De même, pour prendre en compte le large spectre granulométrique de ces formations hétérogènes, il est indispensable de combiner plusieurs méthodes complémentaires :

- (1) rhéométrie en laboratoire sur des solutions écrêtés à 400  $\mu\text{m}$  ;
- (2) essais d'affaissement (au laboratoire et/ou sur le terrain au cône d'Abrams et au cylindre de différentes tailles sur des échantillons écrêtés à 40 mm ;
- (3) détermination des seuils d'écoulement et d'arrêt par essais au plan incliné sur le spectre total (plus proche de la réalité). Pour ce faire, un plan incliné a été construit au laboratoire d'analyses des sols à Strasbourg.

Un autre chantier à ouvrir est celui de la détermination en laboratoire des conditions d'évolution « naturelle » des matériaux marneux (sous l'effet de la météorisation, de la cinématique, des pressions interstitielles) pour pouvoir quantifier la part respective de chacun des processus. Cela pourrait être conduit par la réalisation de test de dégradabilité du matériau (à partir de la coulée récente de Draix et à partir de plaques et plaquettes marneuses intactes de la coulée de débris de Super-Sauze, par exemple). Cette approche expérimentale consisterait à appliquer plusieurs cycles humectation/dessiccation et gel/dégel (en liaison avec les caractéristiques climatiques du site de Super-Sauze) aux plaquettes marneuses jusqu'à la formation d'une matrice fine (Biarez et Boucek, 1987). La variation de la cohésion du matériau serait déterminée par scissométrie et la variation du seuil de contrainte par la méthode du plan incliné. Le protocole d'étude est en cours de mise au point.

## Chapitre 8 : La structure 3D de la coulée de Super-Sauze

Les observations morphologiques et les investigations géotechniques et géophysiques décrites dans les chapitres précédents ont fourni des informations de diverses natures, qualitatives ou quantitatives, qui ont pu être comparées, ajustées et validées. Ainsi, des interprétations objectives et étayées ont pu être proposées sur la position et la forme de la paléotopographie, sur le rôle de cette paléotopographie dans le compartimentage de la coulée, et sur la structure interne de la coulée de débris dans la zone d'accumulation et dans la zone d'ablation.

Ce chapitre est une synthèse reprenant l'ensemble des résultats publiés obtenus en géophysique superficielle (Schmutz *et al.*, 2000), en géotechnique (Flageollet *et al.*, 2000 ; Maquaire *et al.*, 2001) guidées par les indices morphologiques (bossellement, escarpements, fissures de cisaillement latérales, formes particulières, etc.) et complétés par les mesures topométriques (Malet *et al.*, 2002b). J'utiliserai également les résultats des photo-interprétations des photographies ortho-rectifiées de 1956 et 1995 (Weber et Hermann, 2000).

### Principales références :

- Flageollet, J.-C., Malet, J.-P., **Maquaire, O.** (2000), The 3-D structure of the Super-Sauze earthflow : a first stage toward modelling its behaviour. *Physics and Chemistry of the Earth*, Part B, n° 25, vol. 9, pp. 785-791.
- Schmutz, M., Albouy, Y., Guérin, R., **Maquaire, O.**, Vassal, J., Schott, J.J., Descloîtres, M. (2000), Joint electrical and time domain electromagnetism (TDEM) data inversion applied to the Super-Sauze earthflow (France). *Surveys in Geophysics*, Vol. 21, n°4, pp. 371-390. **(Annexe II.3)**
- Maquaire, O.**, Flageollet, J.-C., Malet, J.-P., Schmutz, M., Weber, D., Klotz, S., Albouy, Y., Descloîtres, M., Dietrich, M., Guérin, R., et Schott, J.-J. (2001), Une approche multidisciplinaire pour la connaissance d'un glissement-coulée dans les marnes noires du Callovien-Oxfordien (Super-Sauze, Alpes-de-Haute-Provence, France). *Revue Française de Géotechnique*, 95/96, pp. 15-32. **(Annexe II.5)**
- Malet, J.-P., **Maquaire, O.** et Calais, E. (2002b), Le GPS en géomorphologie dynamique. Application à la surveillance de mouvements de terrain (Super-Sauze, Alpes du Sud, France). *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, n°2, pp. 165-180.

### 8.1. Position et forme de la paléotopographie

Les investigations confirment bien ce qui avait été observé grâce à l'analyse diachronique des photographies aériennes (Weber, 2001 ; Weber et Hermann, 2000) et déduit de l'analyse morphologique de détail : une coulée qui progresse en recouvrant l'ancienne topographie constituée par une série de crêtes et de talwegs intacts dans la zone d'accumulation (Figure 8.1). Au droit du transect B, les échines (4) et (3) émergent de la coulée sur quelques mètres de longueur alors que l'échine (6) est située à quelques mètres sous la surface. La coulée présente une épaisseur maximale dans l'axe de la ravine principale du bassin torrentiel de 1956. Elle atteint :

- un maximum de 20 m dans la zone d'ablation (profil A) ;
- un maximum de 8 m dans la zone d'accumulation (profil B) ;
- une vingtaine de mètres (partie Est du profil C), zone de confluence des ravines du bassin torrentiel visible sur la photographie aérienne de 1956 ;
- puis, l'épaisseur diminue progressivement vers l'aval (8 à 9 m le long du profil E et quelques mètres au pied de la coulée).

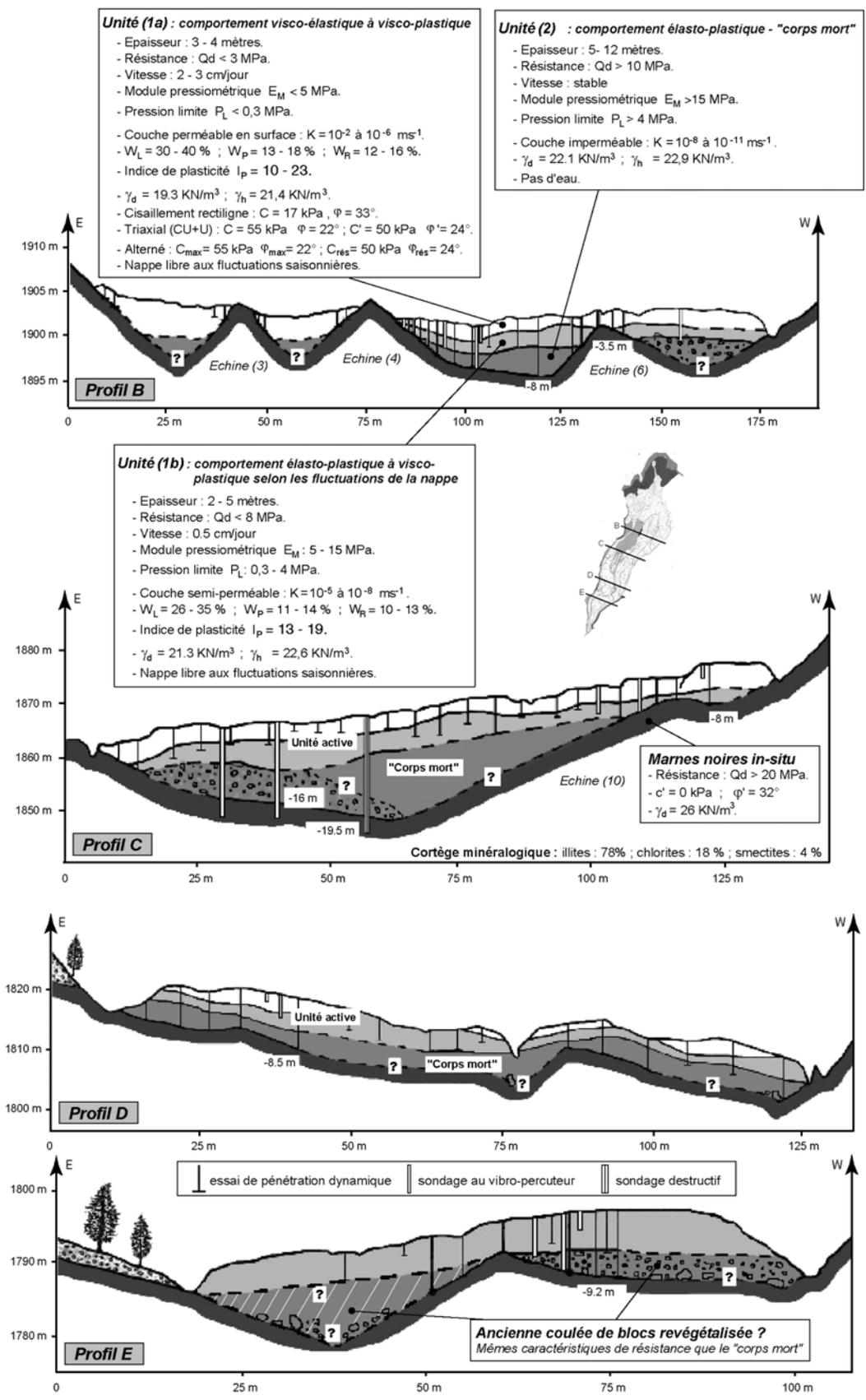


Figure 8.1 : Structure interne de la coulée dans la zone d'accumulation (localisation des profils sur la Figure 5.3) (in Maquaire et al., 2001).

L'incertitude sur l'épaisseur est minimale sur les profils B à E. Par contre, la position du substratum dans la zone d'ablation est encore incertaine, en raison des nombreux pseudo-blocages obtenus sur les essais pénétrométriques du transect A (blocs morainiques et nombreux panneaux et blocs de marnes structurées). Les sondages au pénétromètre réalisés en partie inférieure de la coulée, à partir du profil D, atteignent des profondeurs supérieures à celles des sondages de la partie amont. Cela traduit, d'une part un nombre plus réduit de blocs de moraines, et d'autre part une plus grande fragmentation des blocs de marnes au sein de la formation remaniée (Flageollet *et al.*, 2000).

## **8.2. Compartimentage de la coulée**

Le compartimentage en plusieurs « gouttières » longues et étroites en relation directe avec la topographie fossilisée d'échines et de ravines est également mis en évidence grâce aux mesures des déplacements de surface depuis juillet 1996 qui quantifient l'amplitude et les vitesses de déplacements (Malet *et al.*, 2002b). Les compartiments présentent des comportements cinématique et hydrodynamique différents, variables saisonnièrement en relation avec les conditions climatiques (Chapitre 9).

La direction générale des déplacements correspond à la ligne de plus grande pente et à l'axe d'écoulement préférentiel du matériau dans les anciennes ravines : *les changements successifs de direction des déplacements correspondent bien au tracé sinueux de la morphologie de la coulée* visible sur la figure 5.3a et détaillée dans le chapitre 5. Les changements de direction de la partie intermédiaire entre les profils C et D épousent le tracé courbe de l'échine 10 invisible de la surface.

Les cibles topométriques situées sur les anciennes échines *in situ* sont stables. L'amplitude des déplacements diminue de l'amont vers l'aval de la coulée et du centre vers les bords (Figure 2b). Les déplacements maxima observés entre juillet 1996 et août 2000, s'échelonnent, en planimétrie entre 24 m (transect B) et 3 m (transect E), et en altimétrie, entre -9.5 m (transect B) et -0.15 m (transect E). Le compartimentage de la coulée par la topographie fossilisée est bien visible notamment entre les transects A, B (Figure 2c) et C, et au centre de la coulée où les déplacements sont les plus importants. Les eaux de l'impluvium sont canalisées, depuis l'amont, sous le profil A (limite de la zone d'ablation), entre les deux principales anciennes ravines (Figure 8.2c) au tracé continu (Malet *et al.*, 2000) : les vitesses moyennes maximales enregistrées sont supérieures à 3 cm/jour dans le compartiment central, alors qu'elles sont inférieures à 0.2 cm/jour dans le compartiment externe drainé latéralement par le torrent. A l'aval du profil C, les vitesses moyennes sont faibles principalement en raison du drainage par la ravine intra-coulée encaissée de 4 à 5 m.

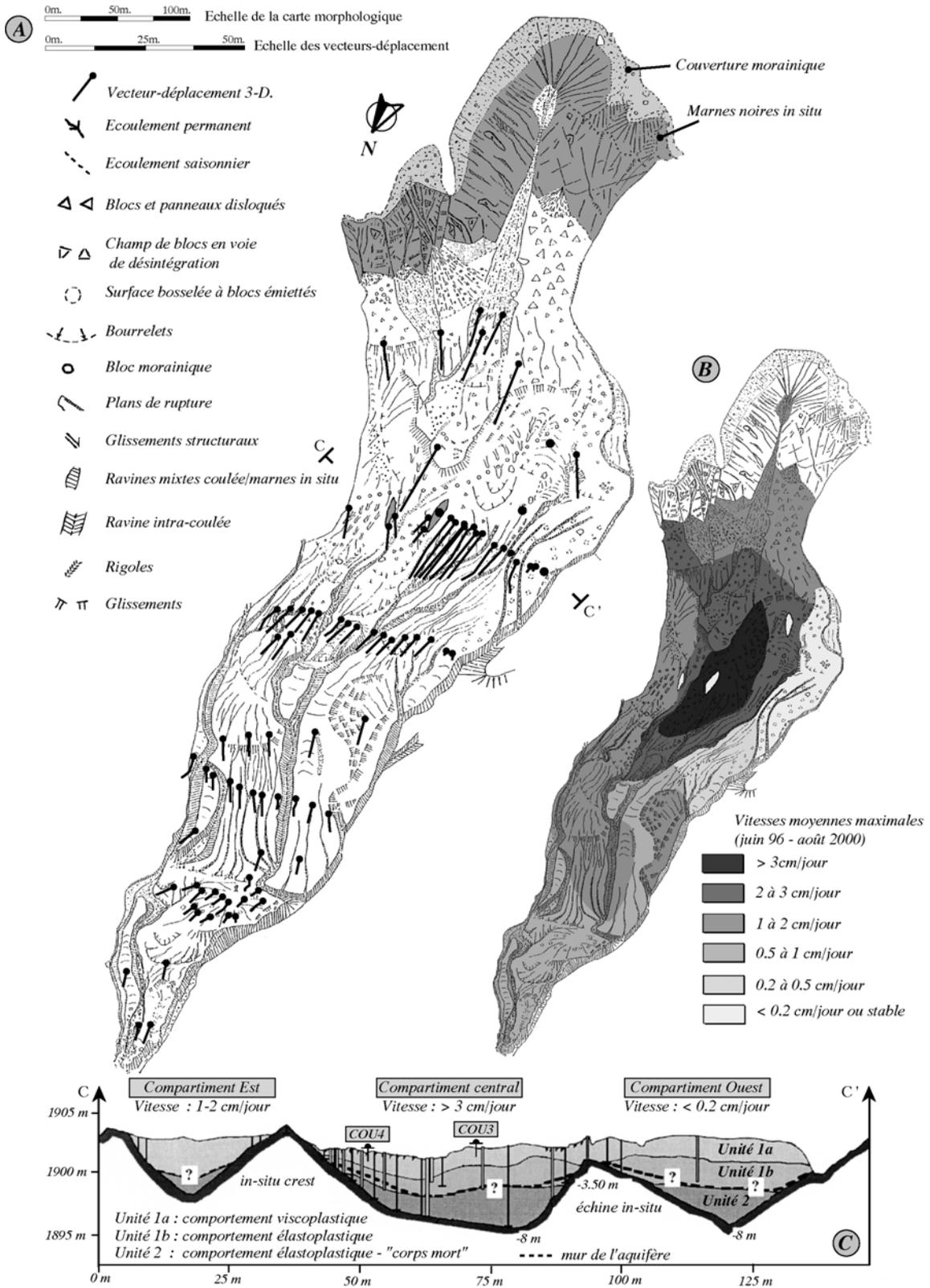


Figure 8.2 : Comportement cinématique et mécanique de la coulée de Super-Sauze : (a) carte morphologique et déplacements, (b) vitesses moyennes maximales (juin 1996 – août 2000), (c) compartimentage de la partie amont de la coulée (in Malet et al., 2002b)

### 8.3. La structure interne de la coulée de débris.

#### 8.3.1. Dans la zone d'accumulation.

La coulée constitue une langue hétérogène à forte matrice limono-sableuse mélangée à des débris morainiques. Dans la zone d'accumulation (transects B à E), trois couches « géotechniques » peuvent être identifiées, sur la base des critères de résistance mécanique, des contrastes dans la nature des matériaux et des déformations et cisaillements des tubes inclinométriques et piézométriques.

Le pénétrogramme D3 (Figure 8.3) illustre clairement ces trois couches en même temps qu'il permet de discuter des limites des investigations menées à l'aide d'un pénétromètre dynamique. Une profondeur maximale de 9.50 m a été atteinte, mais dans bien des cas, la profondeur a été moindre en raison du développement de frottement latéral au passage de couches instables et saturées. La présence de nombreux blocs de moraines ou de blocs de marnes peu déstructurés au sein de la masse a également limité les investigations, car la pointe ne pouvait pénétrer ce matériau très résistant. Enfin, la présence de cailloux de moraine ou d'éclats de calcite au sein d'une couche moins résistante génère des pics localisés (faux-refus) sur les pénétrogrammes. Dans les marnes *in situ* (ou dans un bloc de marnes noyé dans la coulée), la résistance de pointe  $Q_d$  augmente progressivement, atteignant des valeurs proches de 25 MPa ou plus quand la paléotopographie était atteinte. Quelquefois, il fut possible de forcer la pénétration, puis de continuer l'essai au sein d'une couche moins résistante. Le pénétrogramme D3 (Figure 8.3) illustre également le problème majeur du faux-refus, qui aurait pu partiellement être résolu s'il existait un pénétromètre démontable et transportable à dos d'homme avec un mouton plus lourd chutant d'une plus grande hauteur.

Plus encore que les valeurs brutes de résistance de pointe  $Q_d$ , c'est l'allure des courbes qui est discriminante et permet l'interprétation des différentes couches. Sur la plupart des 125 pénétrogrammes réalisés, trois couches ont pu ainsi être déterminées dans la coulée en accord avec les sauts éventuels de résistance (rupture dans les courbes, transition progressive).

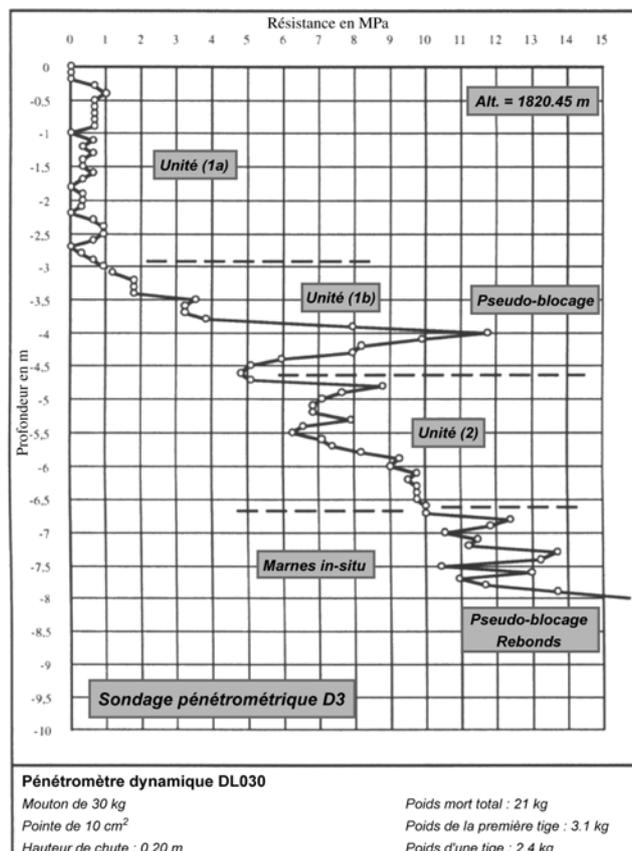


Figure 8.3 : Exemple de pénétrogramme (in Maquaire et al., 2001).

La structure verticale de la coulée est composée (Figure 8.1) :

- d'une unité superficielle épaisse de 5 à 9 m ( $Q_d < 10$  MPa,  $E_M < 15$  Mpa, vitesses de déplacement superficiel  $> 5$  m/an). Une surface de glissement a été identifiée à une profondeur de l'ordre de 5 m sur le transect B et 8 m de profondeur sur le transect C. Selon la forme de la paléotopographie et la zone de battement de la nappe, cette unité active peut être subdivisée en deux sous-unités (1a et 1b) ;
- d'une unité profonde ayant une épaisseur maximale de 5-6m au droit du transect B et de 10 m sur le transect C. Sur la base des mesures inclinométriques et des essais pressiométriques ( $E_M > 15$  Mpa,  $PI > 4$  Mpa), cette unité est considérée comme imperméable, très compactée, aux très faibles déplacements ou stable comme un "corps mort" : comme cela avait été identifié à La Valette (Colas et Locat, 1993) ou sur la coulée de débris de Slumgullion (Varnes *et al.*, 1996).

La géophysique indique la même succession de couches avec des gammes de résistivité et de vitesses sismiques respectivement pour chaque couche de : 5-40  $\Omega$ .m et 450-600 m/s pour la couche 1 ; de 45-100  $\Omega$ .m et 450-600 m/s pour la couche 2 (corps mort) et  $> 100$   $\Omega$ .m et 2200-5000 m/s pour le substratum (Schmutz *et al.*, 1999 ; Schmutz, 2000). A partir d'un modèle géophysique en six couches (Figure 8.4), en considérant un modèle général comprenant une masse active superposée à une masse stabilisée, elle-même superposée au substratum, l'interprétation jointe électrique-TDEM a permis de mettre en évidence des lits intermédiaires (Schmutz *et al.*, 2001) non détectés par la prospection géotechnique. Ils apparaissent cependant vraisemblables et constituent donc un apport efficace et inédit de l'inversion jointe. Ces lits intermédiaires peuvent s'interpréter comme :

- une zone de transition d'épaisseur faible (0.7-0.9 m) de boue très lâche et humide située entre la masse active et la masse « stabilisée ». Cet horizon est le plus conducteur avec des résistivités peu contrastées (2-3  $\Omega$ .m) et des facteurs d'anisotropie s'étendant de 0.35 à 1. Ces valeurs de résistivité correspondent aux résistivités mesurées dans les échantillons d'eau pure. Par ailleurs, aucun effet de polarisation provoquée dû à des minéraux métalliques ou argileux ne perturbe les mesures. De ce fait, cet horizon doit être saturé ;
- le toit de la masse stabilisée, sur une épaisseur très mince de 0.7-0.9 m, le matériau est compacté et « glacé », comme cela est parfois observé sur les surfaces de glissement. Les résistivités sont supérieures au précédent terrain (31-35  $\Omega$ .m) ;
- la transition entre la masse stabilisée et le substratum. D'une faible épaisseur (0.7-1.4 m), cet horizon peut correspondre au manteau de formations superficielles autochtones des marnes en place tel qu'il a été décrit et caractérisé au chapitre 6 (Maquaire *et al.*, 2002), à des altérites mélangées à des formations de pente ou à des épandages de moraines (Weber, 2001). La gamme de résistivité varie de 37 à 80  $\Omega$ .m pour un facteur d'anisotropie compris entre 0.7 et 1.

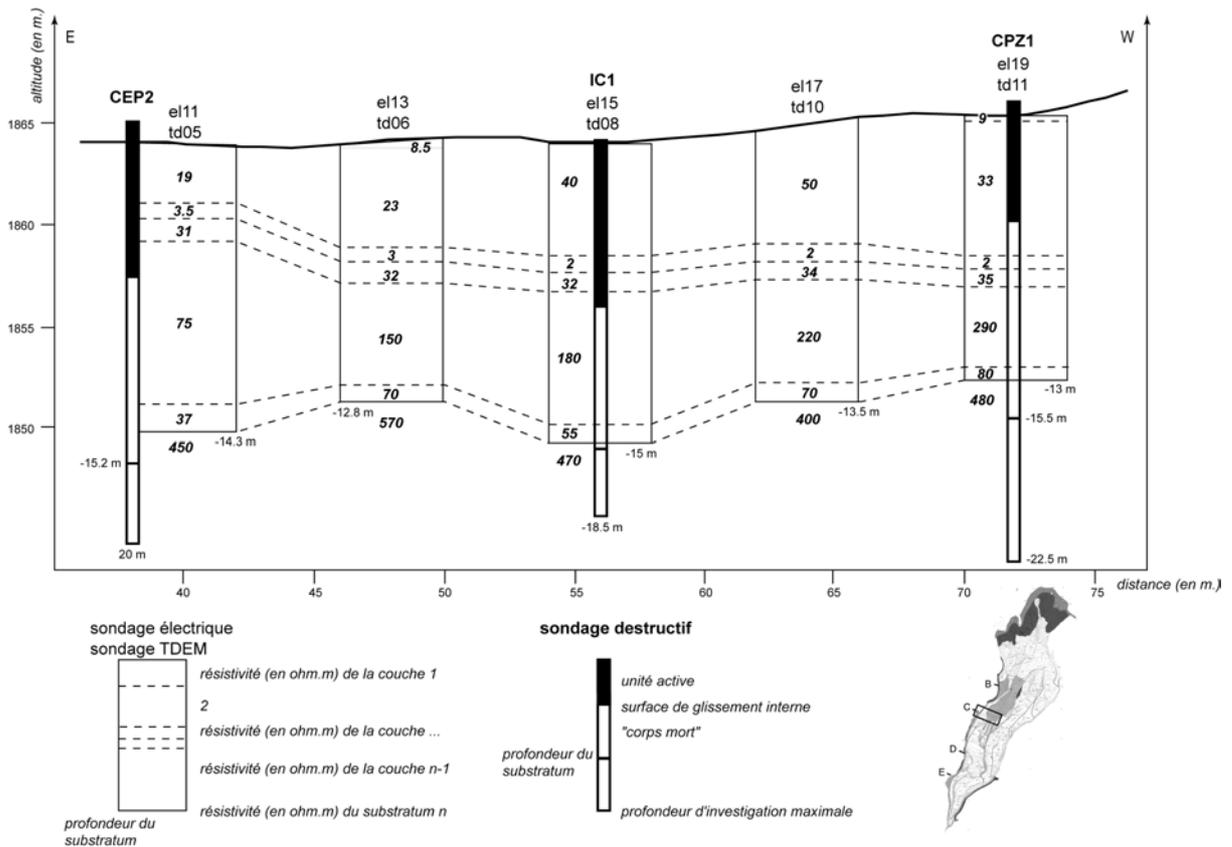


Figure 8.4 : Interprétation jointe de cinq couples de sondages TDEM-électrique avec sondages géotechniques sur le secteur est du transect C (in Schmutz et al., 2000).

### 8.3.2. Dans la zone d'ablation.

A l'inverse, dans la zone d'ablation (transect A), la géométrie de la masse accumulée et la forme de la surface de rupture restent délicates à définir. Les trois forages profonds EP5, EP8 et F1 localisent, respectivement, les marnes *in situ* à -19.50 m, -20.50 m et -8.85 m sous la surface topographique actuelle (Figure 8.5a). Les profils photogrammétriques montrent un abaissement de l'altitude de 15 à 20 m entre 1956 et 1995 (Chapitre 5). L'altitude des terrains en place s'est donc abaissée localement de 40 m au maximum avec un encaissement comblé sur la moitié environ de sa hauteur. La surface de rupture présente une forme irrégulière qui s'apparente à celles des ravines qui se trouvaient initialement 30 à 40 m au-dessus. La localisation des forages sur l'orthophotographie de 1956 montrent d'ailleurs que les différences de profondeur coïncident avec l'emplacement d'une ravine et de l'échine (4) du paléo-relief (Figure 8.5b).

L'interprétation des profils inclinométriques (du 10 septembre au 1 octobre 1996, date après laquelle la sonde était bloquée) et surtout le suivi des déplacements des têtes de forage (topométrie), de leur déformation puis cisaillement (passage de gabarits dans les tubages), d'octobre 1996 à juillet 2000, va aussi dans ce sens. Sur la coupe AA' de la figure 8.5a, les altitudes de cisaillement des tubages s'alignent parfaitement le long d'une surface de rupture située -8,50 m sous la surface topographique, vers 1950 m d'altitude.

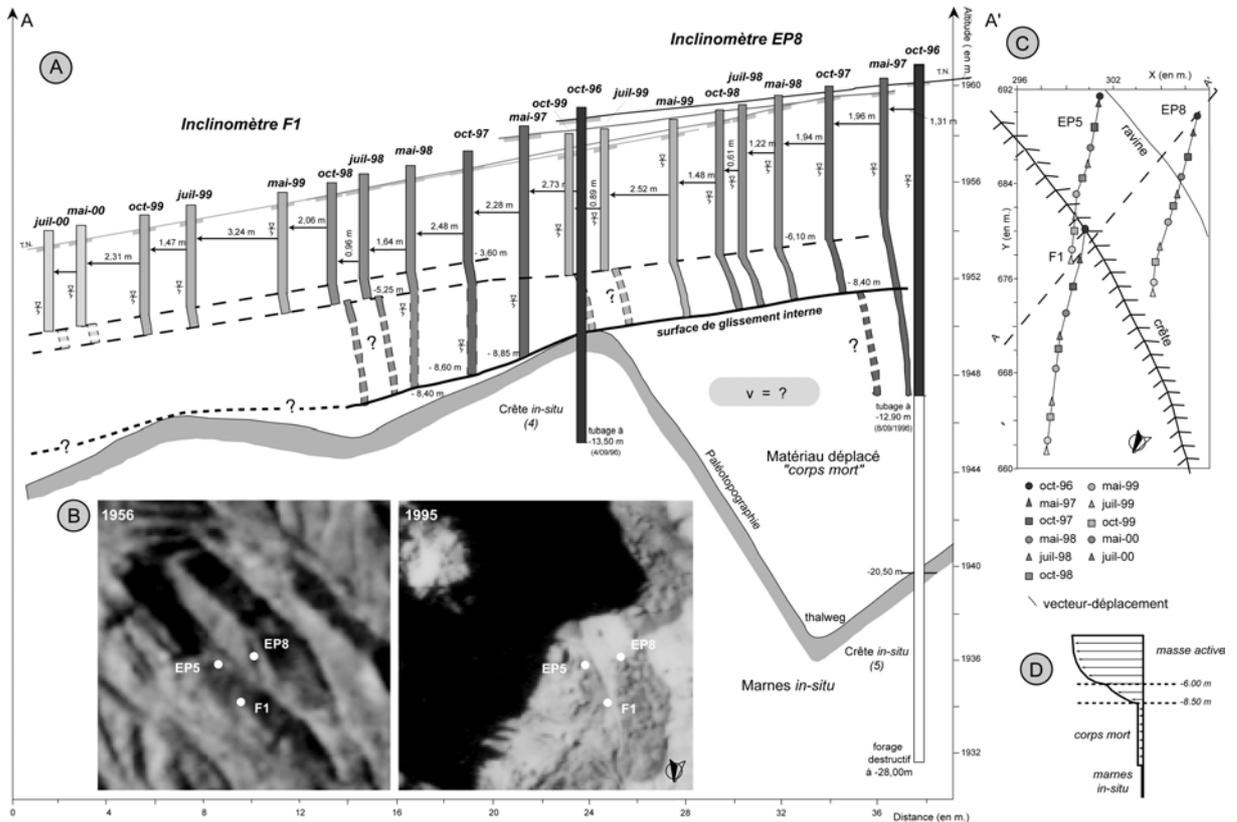


Figure 8.5 : Structure interne de la coulée de débris dans la zone d'ablation : (a), schéma interprétatif du suivi des inclinomètres entre 1996 et 2000, (b) extrait des orthophotographies de 1956 et 1995 et position des sondages, (c) vecteurs-déplacement des têtes de tubage, (d) profil vertical de vitesse de la coulée (in Maquaire et al., 2001).

Cette surface de glissement principale est calée sur le toit d'échines, non tronquées lors du paroxysme du mouvement. Les déformations et cisaillements successifs des tubes au cours de leur déplacement permettent de proposer un profil interprétatif de vitesse (Figure 8.5d) : à partir de 3-4 m, les déplacements s'amortissent, progressivement vers la profondeur. Ce même modèle géotechnique peut être adopté dans la zone d'accumulation :

- masse active d'une épaisseur de 8 à 9 m, aux vitesses superficielles très variables, d'une zone à l'autre de la coulée, de 2 à plus de 10 m/an, avec une discontinuité de vitesse de 5 à 6 m de profondeur au comportement « rigide-plastique » sur les deux premiers mètres, puis élasto-plastique à « visqueux » en profondeur ;
- « corps mort » dans le fond des ravines, dont l'écoulement est bloqué par la topographie en échines.

Dans la zone d'ablation, les directions des vecteurs déplacements des sondages (Figure 8.5c) sont obliques à transverses par rapport aux axes des crêtes et ravines contrairement à la zone aval d'accumulation, où les vecteurs sont calés sur la paléotopographie (Malet et al., 2002b). Cela indique clairement que dans cette zone amont en pente forte, la gravité l'emporte sur l'influence de la paléotopographie.

## 8.4. Bilan et perspectives

Sur ce site complexe, l'approche multidisciplinaire associant géomorphologie, géotechnique et géophysique a montré toute son efficacité en fournissant de précieux résultats complémentaires. Leur comparaison, ajustement et validation ont permis de définir la position et forme de la paléotopographie, la structure interne de la coulée de débris dans la zone d'accumulation et dans la zone d'ablation avec une gamme de précision tout à fait satisfaisante et de proposer un modèle conceptuel d'évolution. Partout où l'existence d'un talweg ou d'une crête était supposée, la prospection l'a confirmée en en donnant une géométrie précise. Ces suppositions reposaient sur les informations fournies par la photographie aérienne ortho-rectifiée de 1956, mais surtout sur l'analyse d'une certaine morphologie caractéristique, comme par exemple :

- les *crêtes d'échines*, portion de terrain *in situ*, visibles au droit et juste à l'amont du profil B, comme celle de l'échine 4 toujours plus ou moins visible, ou bien celle de l'échine 3 brièvement apparue en 1997 avant d'être à nouveau recouverte en 1998 (Weber, 2001) ;
- la *longue fissure de cisaillement* soulignée par des fractures ouvertes obliques qui s'étendait sur plus de 300 m de longueur (ouest de la coulée). Elle marquait par un escarpement la limite ouest du compartiment central « en s'appuyant » sur le flanc de l'échine 6 supposée (invisible de la surface) ;
- les *escarpements secondaires* (talus raide), généralement orientés plus ou moins transversalement à la coulée, et en particulier *celui au tracé courbe*, situé à l'aval immédiat du profil C dans la partie ouest de la coulée. Il est marqué par un talus frontal en forte pente de l'ordre de 40 à 50° sur lequel des petits escarpements et des fractures ouvertes se succèdent vers l'aval (ce talus correspond au flanc de l'échine 10).

Sur la base de l'analyse de ces formes particulières, Julien Guillon a proposé une interprétation assez convaincante de la paléotopographie de la coulée de Poche (Guillon, 2001). Par exemple, la figure 8.6 montre que l'escarpement souligné par des fractures de cisaillement et de traction s'appuie sur une échine en place visible sur le flanc nord de la coulée.

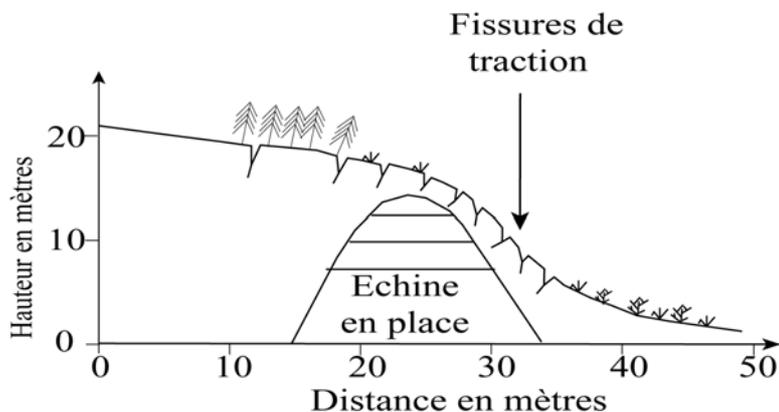


Figure 8.6 : Profil en long sur la coulée de Poche : l'escarpement s'appuie sur le flanc d'une échine fossilisée (in Guillon, 2001).

Il a été possible de vérifier le long du profil B la pertinence et la justesse des interprétations et propositions sur la géométrie de la paléotopographie. En effet, à la suite d'une importante vidange survenue en novembre 2000, le substratum marneux était parfaitement visible. Un nouveau levé topomorphologique a d'ailleurs été réalisé en juillet 2001 pour relever la position et la forme de cette paléotopographie et pour calculer précisément les volumes déplacés par comparaison avec le MNT précédent (les résultats seront trouvés dans le mémoire de thèse de Jean-Philippe Malet).

Dans le compartiment est entre l'échine n°3 et 4 (Figures 8.1 et 8.2c), la forme en V du talweg et de ses flancs étaient parfaitement visibles. La crête et le flanc est de l'échine 3 était également assez bien marquée, quoique encore recouverte par d'épais dépôts. Dans le compartiment central entre l'échine 4 et 6, à une cinquantaine de mètres à l'amont de l'axe du profil B, le substratum apparaissait en plusieurs endroits sur plusieurs dizaines de m<sup>2</sup> et en particulier le flanc est de l'échine 6. La marne

in situ était compacte et « raclée » : le manteau d'altération (couverture détritique et régolite) avait été décapé par le passage de la coulée. D'ailleurs, des stries de glissements ont été observées en plusieurs endroits, bien marquées dans un matériau très plastique. Sur ce substratum compact, l'eau ruisselait. Les déplacements se poursuivant, cette zone était à nouveau totalement recouverte et comblée au début du printemps 2002.

Dans les perspectives, il pourrait être envisagé de lever encore les quelques zones « d'ombre » dans lesquelles des imprécisions demeurent. C'est particulièrement le cas pour la partie amont située entre le profil B et l'escarpement principal. Cette zone dans laquelle se fait la transition entre zone d'accumulation et zone d'ablation n'a été investiguée que par quelques sondages géotechniques pour les raisons évoquées plus haut et pas du tout prospectée avec les méthodes géophysiques. Comme je l'ai déjà précisé dans le chapitre 6, le programme SAMOA permettra la mise en œuvre d'investigations géophysiques sur les profils déjà bien définis pour valider ces différentes méthodes et sur cette zone amont pour tenter d'obtenir une image de la structure moins partielle qu'à l'heure actuelle.

La géométrie de la paléotopographie et des deux couches principales constituant la coulée couplée avec le MNT de la topographie de surface déterminée permettront maintenant à Jean-Philippe Malet d'entreprendre des modélisations spatialisées et de vérifier différents scénarii d'évolution.

## Chapitre 9 : Déclenchement et évolution des mouvements de terrain

Ce chapitre est consacré à la recherche des conditions favorables au déclenchement ou à la réactivation des mouvements de terrain.

Je présenterai tout d'abord les résultats obtenus à l'échelle du bassin de Barcelonnette grâce à une analyse conjointe de données historiques recensées dans les archives et de données climatiques. J'insisterai, en premier lieu, sur les principaux types de relations caractéristiques mises en évidence entre des situations climatiques particulières et le déclenchement ou la réactivation des mouvements de terrain et, en second lieu, je montrerai les limites d'une telle démarche et le besoin de disposer de données plus précises.

Puis, j'exposerai les principaux résultats obtenus à l'échelle locale de Super-Sauze grâce à l'ensemble des travaux présentés dans les précédents chapitres, sur le déclenchement et l'évolution des mouvements de terrain dans les marnes. Le rôle majeur des conditions structurales du massif associées à la perte de cohésion et des pressions interstitielles sera montré. Puis, le rôle des conditions climatiques dans l'évolution et la propagation des coulées sera évoqué, sous l'angle de la dynamique pluriannuelle de la coulée et sous l'angle des rythmes de fonctionnement saisonniers. En synthèse, un modèle conceptuel d'évolution du glissement-coulée sera proposé.

Enfin, l'évolution à long terme des coulées de Poche, la Valette et Super-Sauze sera abordée en présentant la relation entre, d'une part les changements de résistance résiduelle des matériaux des coulées liées à la météorisation et au remaniement et, d'autre part le facteur de sécurité.

Pour une grande part, les résultats découlent des analyses des relations pluie-nappe-déplacements des données enregistrées principalement sur le site expérimental de la coulée de Super-Sauze dans le cadre des programmes de recherches et avec les collaborations déjà citées dans le chapitre 5. Les caractéristiques géomécaniques présentées dans le chapitre 7 sont utilisées. Les résultats ont été présentés dans les six publications et dans plusieurs rapports de recherche.

### Principales références :

- Flageollet J. C., **Maquaire O.**, Weber D., Martin B. (1999). Landslides and climatic conditions in Barcelonnette and Vars Basin (Southern Alps, France). *Geomorphology*, 30, pp. 65-78. **(Annexe II.2)**
- Flageollet, J.-C., Malet, J.-P., **Maquaire, O.** (2000). The 3-D structure of the Super-Sauze earthflow : a first stage toward modelling its behaviour. *Physics and Chemistry of the Earth, Part B*, n° 25, vol. 9, pp. 785-791.
- Malet J.-P., **Maquaire O.**, Klotz S. (2000). The Super-Sauze flowslide (Alpes-de-Haute-Provence, France). Triggering mechanisms and behaviour. In *Proceedings of the VIIIth International Symposium on Landslides*, 26-30 juin 2000, Cardiff, T. Telford, Vol. 2, pp. 999-1004. **(Annexe II.4)**
- Malet, J.-P., **Maquaire, O.**, Calais, E. (2002a), The use of Global Positioning System techniques for the continuous monitoring of landslides: application to the Super-Sauze earthflow (Alpes-de-Haute-Provence, France), *Geomorphology*, 43, 1-2, 1, pp. 33-54. **(Annexe II.6)**
- Maquaire, O.**, Malet, J.-P., Remaître, A., Locat, J., Klotz, S., Guillon, J. Instability conditions of marly hillslopes, towards landsliding or gullying? The case of the Barcelonnette basin, South East France. (soumis en juin 2002 à Engineering Geology).
- Malet, J-Ph., van Asch, Th.W.J., van Beck, L.H., **Maquaire, O.**, (2002), Distributed hydrological modelling of the Super-Sauze earthflow (South East France): implementation of the Starwars model. In: Delahaye, D., Levoy, F., Maquaire, O. (eds), *Proc. Symp. "Geomorphology: from expert opinion to modelling. A tribute to Professor Jean-Claude Flageollet"*, 26-27 Avril, Strasbourg, Publications Cerg, pp. 185-192.

## **9.1. Mouvements de terrain et conditions de déclenchement dans le bassin de Barcelonnette**

### **9.1.1. Contexte**

Cette recherche a été menée dans le prolongement du programme européen *Epoch* « *Temporal occurrence and forecasting of landslides in the European Community, 1991-1993* » et dans le cadre du programme européen Teslec « *The Temporal Stability and activity of Landslides in Europe with respect to Climatic change* ». Elle s'appuie :

- d'une part, *dans le bassin de Barcelonnette*, sur l'analyse des données historiques des aléas naturels (mouvements de terrain, inondation et crues, séismes, etc.) recensés depuis 1850 par une recherche dans les archives (Amiot et Nexon, 1995) et des données climatiques anciennes complétées par des données récentes des postes Météo France de Barcelonnette et de Jausiers, données recueillies et analysées par Yann Sommen (1995) ;
- d'autre part, *dans les autres régions européennes concernées* par le programme Teslec, sur la synthèse des données recueillies par les différentes équipes. Données complétées par celles obtenues par Brice Martin sur la Commune de Vars (Hautes-Alpes) dans le cadre de sa thèse de Doctorat (Martin, 1996) et par celles recueillies dans la littérature (Casale *et al.*, 1994 ; Dikau *et al.*, 1996b ; Corominas, 2000 ; etc.).

Cela a conduit à la rédaction d'un rapport thématique sur ce thème « *Relations entre les mouvements de terrain et les conditions climatiques* » (Flageollet *et al.*, 1996b) et à la publication d'un article de synthèse dans la revue « *Geomorphology* » (Flageollet *et al.*, 1999). Je m'en tiendrais ci-après à la présentation des résultats qui intéressent le bassin de Barcelonnette.

### **9.1.2. Inventaire des mouvements de terrain**

Je ne reviendrai pas en détail sur la manière dont a été élaborée la banque de données (Amiot et Nexon, 1996), je préciserai seulement que la consultation des différentes archives municipales ou départementales (Vogt, 1979 ; Fanthou et Kaiser, 1990 ; Brunnsden et Ibsen, 1994 ; etc.) a permis d'identifier 132 mouvements de terrain depuis 1850 dans le bassin de Barcelonnette. Le degré de précision des informations collectées pour chacun des phénomènes est très variable. Les données climatiques journalières ou mensuelles sont celles des postes de Jausiers depuis 1961 et de Barcelonnette depuis 1928 (Sommen, 1995).

Les mouvements de terrain peuvent se produire à n'importe quel moment de l'année avec tout de même une répartition mensuelle contrastée : *aucun mouvement enregistré en décembre, et seulement quelques uns en avril, octobre et novembre*. C'est pendant les mois de mars, août et septembre que le plus grand nombre de mouvements est enregistré. Cela se traduit par la répartition saisonnière suivante : 33 % des événements se déclenchent en été pour seulement 14 % en automne. Les coulées boueuses et les ravinements se produisent en majorité pendant les mois d'été, en relation avec les pluies orageuses intenses, ce qui correspond aux constatations faites par ailleurs pour ce type d'aléa, comme par exemple dans les Hautes-Alpes (Fanthou et Kaiser, 1990).

### **9.1.3. Les types de situations climatiques déclenchantes**

Le déclenchement ou la réactivation des mouvements de terrain peuvent être parfois expliqués par plusieurs types de situations climatiques. En dehors des cas pour lesquels aucune relation ne peut être mise en évidence, trois principaux types de situation ont été retenus :

- forte intensité de pluie sur courte période provoquant un déclenchement immédiat ;
- pluies cumulées au cours d'une période antécédente de durée variable avec établissement d'un seuil de déclenchement ;
- pluies cumulées au cours d'une période antécédente de durée variable sans identification précise d'un seuil de déclenchement.

### 9.1.3.1. Forte intensité de pluie sur courte période avec déclenchement immédiat

Ce type de relation concerne les mouvements superficiels et les phénomènes torrentiels de type laves torrentielles. Les phénomènes vont se déclencher quelques minutes ou quelques heures après la pluie intense généralement liée à des orages violents et localisés. Si ailleurs, il a été possible parfois de définir des *seuils de pluies caractéristiques* pour une intensité et une durée données, comme par exemple dans la région de Ripoll dans les Pyrénées Orientales (Corominas et Moya, 1996 ; Corominas, 2000) ou dans le nord-est de l'Italie (Pasuto et Silvano, 1996), cela n'a pas été possible dans le bassin de Barcelonnette en raison du manque de données sur les champs pluviométriques à des pas de temps fins.

En effet, les pluies d'orages très localisés, généralement sur les sommets, ont rarement été enregistrées par les deux seuls postes climatiques situés dans la vallée. Le meilleur exemple est celui du violent orage de grêle du 19 août 1996 localisé sur les hauteurs du bassin versant du Faucon et responsable d'une importante lave torrentielle (Remaître *et al.*, 2002). Pourtant, le poste climatique situé à quelques kilomètres en aval n'a rien enregistré alors que cet orage est attesté par des témoignages oculaires « sérieux ». De plus, pour tenter ce type d'analyse, il faut disposer de données au moins horaires ou à l'échelle de l'événement ce qui n'était pas le cas puisque seules les données journalières étaient disponibles en l'absence d'un pluviomètre automatique.

Il n'en reste pas moins que presque tous les mouvements déclenchés durant les mois de juillet et août, et les quelques uns des mois de mai, juin et septembre étaient bien corrélés avec de fortes pluies journalières du jour ou du jour précédent l'événement.

### 9.1.3.2. Pluies cumulées au cours d'une période antécédente de durée variable avec établissement d'un seuil de déclenchement

Dans le bassin de Barcelonnette, le nombre de mouvements datés avec une bonne précision (au moins au jour près) n'est, là encore, pas suffisant pour dégager de véritables seuils de déclenchement. Pour les quelques mouvements bien datés, comme par exemple, le glissement du 26 mai 1971 ou bien celui du 28 juin 1958, il est possible de dégager quelques caractéristiques pluviométriques :

- le premier s'est déclenché à la suite d'une période de 10 jours pluvieux avec cumul de pluie de 50 mm dont 30 mm tombés dans les deux jours précédents. La pluie totale du mois précédent atteignait 108 mm. Cette pluie était tombée durant un printemps très humide (265 mm entre le 14 mars et le 26 mai à Barcelonnette) qui faisait suite à un hiver peu neigeux ;
- le second s'est produit à la suite d'un cumul de pluie de 103 mm dans le mois précédent dont 60 mm tombés dans les quatre derniers jours et 30 mm le 26 mai.

Par contre, des seuils de déclenchement ont été établis pour des précipitations tombant sur des périodes de durées différentes dans les régions citées précédemment (Flageollet *et al.*, 1999). En complément, je peux encore citer l'exemple, de la région de Montaldo en Italie, où, pour différents types de glissement de terrain, Sorriso-Valvo *et al.* (1994) mettent en évidence une relation entre le déclenchement d'un mouvement et une quantité de pluie de l'ordre de 530 mm tombée sur une période précédente d'une durée de 50 jours.

*Ainsi, la pluie tombée le mois précédent l'événement doit jouer un rôle majeur, en combinaison avec les pluies enregistrées dans la décade précédente.* Dans ces cas, cette situation pluviométrique, avec maintien ou augmentation des conditions de saturation dans la masse, est particulièrement favorable à la réactivation des mouvements. Pour le préciser, il faudrait calculer les pluies efficaces (P-ETP) (Maquaire, 1990, 1997).

### 9.1.3.3. Pluies cumulées au cours d'une période antécédente de durée variable sans identification d'un seuil de déclenchement

Ainsi, une approche plus qualitative a été adoptée pour essayer de mettre en évidence des *périodes excédentaires ou déficitaires en pluie* par rapport à la moyenne. L'analyse a été conduite pour des totaux pluviométriques annuels ou mensuels.

Certaines années humides ou périodes excédentaires coïncident avec des années pendant lesquelles les mouvements sont nombreux (Figure 9.1) : par exemple 1960, 1977, 1959-1965 et 1975-1981. En considérant, la moyenne annuelle calculée sur toute la période 1928-1994 et la moyenne mobile sur 3 années successives, il est possible de mettre en évidence des fluctuations « cycliques » de 6 à 7 années excédentaires ou déficitaires. J'avais mis en évidence de telles situations dans le Calvados (Maquaire, 1990). La plus récente période excédentaire qui démarre au début des années 70 se prolonge sur une dizaine d'années. C'est d'ailleurs à la fin de cette période que le glissement de la Valette se produit en 1982 et que la progression du glissement-coulée de Super-Sauze est la plus forte (Chapitre 5). Mais, à l'inverse, certaines années « riches » en mouvements sont aussi des années ou des périodes pluriannuelles déficitaires, comme par exemple 1964, 1982-1990.

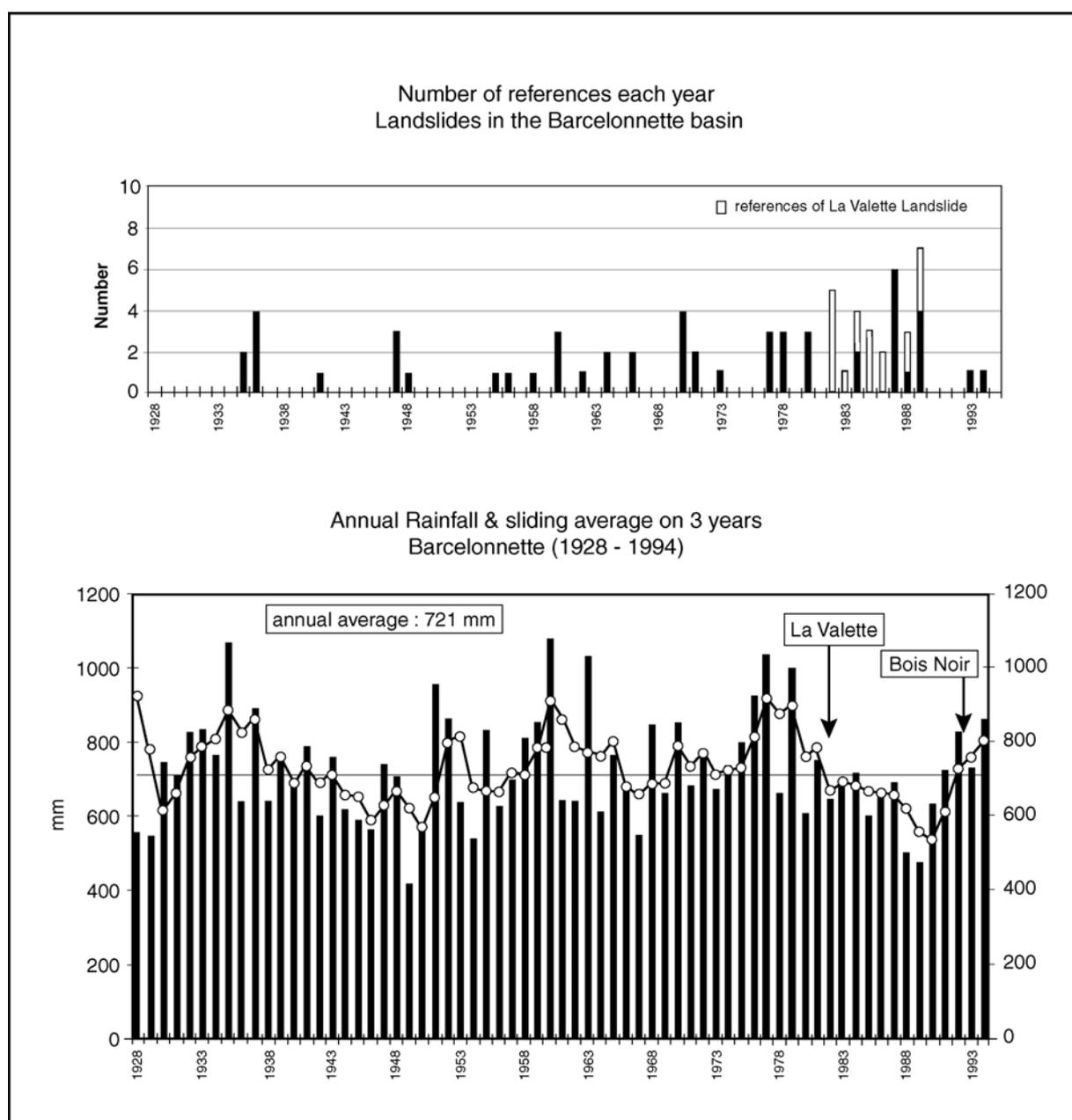


Figure 9.1 : Précipitations annuelles et nombre de références de mouvements de terrain dans le bassin de Barcelonnette de 1928 à 1994 (in Flageollet et al., 1999).

Similairement, pour les pluies mensuelles (Figure 9.2) il n'y a pas de corrélation systématique, bien que quelques cas soient associés aux fortes précipitations du mois ou des mois précédents, par exemple, octobre 1977, hiver 1977-1978, juin 1983 ou encore octobre 1960.

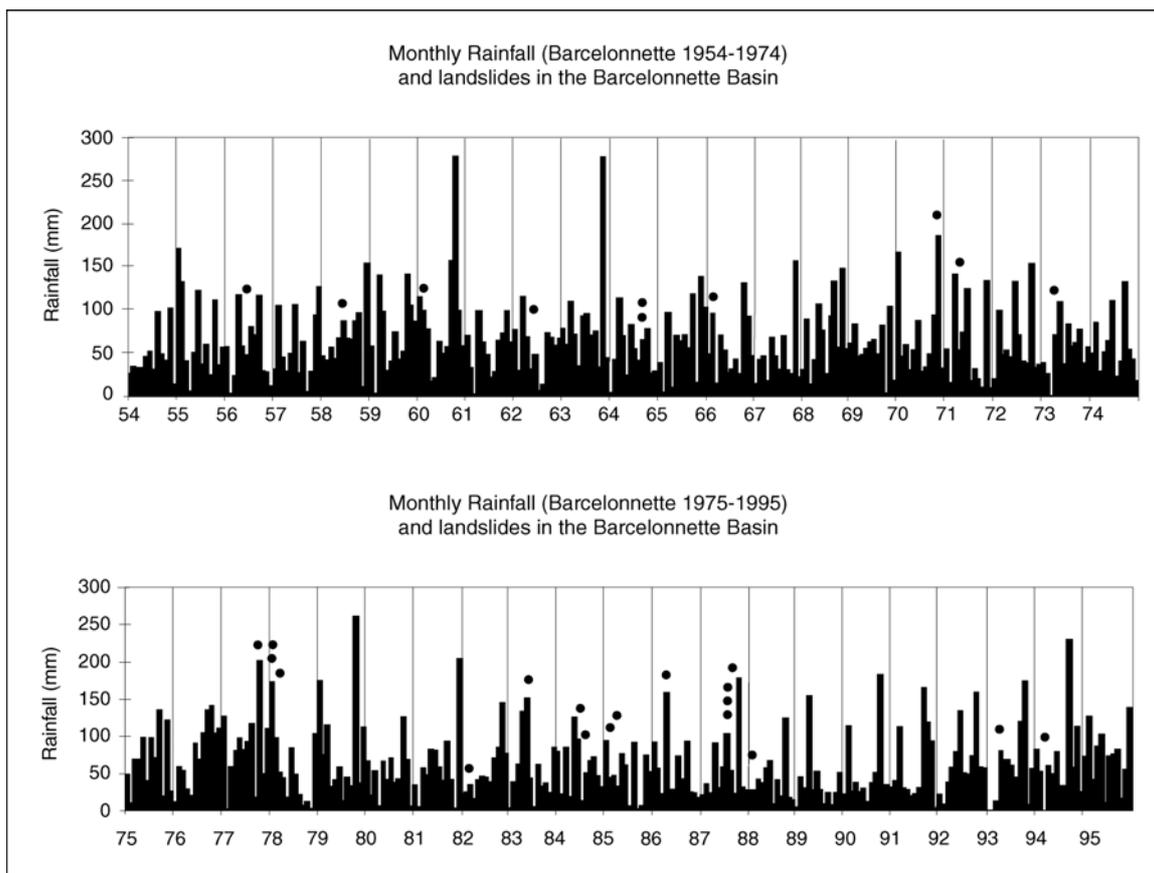


Figure 9.2 : Précipitations mensuelles et mouvements de terrain dans le bassin de Barcelonnette de 1954 à 1995 (in Flageollet et al., 1999).

Comme j'avais pu le mettre en évidence dans le Calvados (Maquaire, 1990, 1997), les conditions climatiques qui précèdent les mouvements de terrain sont *diverses*. Il peut se détacher une *tendance qui associe un facteur lointain pluriannuel à un paramètre proche (saisonnier ou mensuel)*. Ils se superposent l'un à l'autre, mais leur poids respectif dans le déclenchement est cependant difficile à estimer. Le glissement de Bois Noir l'illustre parfaitement : il se déclenche au printemps 1993 (date précise non connue) à la suite de cinq mois d'automne et hiver particulièrement déficitaires (Figure 9.2), mais après une année 1992 excédentaire (Figure 9.1).

L'influence climatique saisonnière sur les mouvements de terrain est généralement admise par de nombreux auteurs (Vibert, 1987 ; Bonnard, 2001), l'étude historique menée à Barcelonnette conduit également à la même conclusion, *un printemps pluvieux est indéniablement favorable aux instabilités de versant*.

#### 9.1.3.4. Pas de relation évidente

Comme l'indiquait EPFL (1985a), la corrélation simultanée entre les précipitations et les mouvements de terrain ne donne pas toujours des résultats très tangibles, principalement dans le cas de glissements profonds de grande importance.

C'est particulièrement le cas pour le glissement de la Valette déclenché en mars 1982. Il était couramment admis par divers auteurs (Evin, 1990 ; Colas et Locat, 1993) que ce mouvement s'était déclenché à la suite d'une période très pluvieuse sur un manteau neigeux en début de fonte printanière. En réalité, il apparaît que *les conditions climatiques proches* du déclenchement du glissement sont celles de plusieurs mois d'hiver faiblement pluvieux et plutôt froids. Elles succèdent à un mois de décembre à très fortes précipitations neigeuses. Le réchauffement, réellement perceptible en fin du mois de mars, marque le véritable début de la fonte des neiges. Cette eau est tout juste augmentée de quelques faibles pluies. Quant aux *conditions climatiques lointaines*, elles sont marquées par la succession d'années consécutives soit faiblement déficitaires, soit très largement ou

à peine supérieures à la moyenne (Figure 9.1). Sur quarante années d'observations, deux périodes de 6-7 années ont des moyennes mobiles excédentaires, 1959-1965 et 1976-1981. Le glissement de la Valette se déclenche après la seconde.

Les conditions climatiques qui précèdent le déclenchement de ce glissement n'ont donc *rien d'exceptionnelles*, aussi bien pour la quantité de précipitations des mois ou des années précédentes, que pour les températures qui ne marquent pas en mars un brusque réchauffement responsable de la fonte rapide d'un très épais manteau neigeux, ce qui va à l'encontre des idées reçues. Il faut donc rechercher ailleurs la cause du déclenchement de ce glissement de terrain : fatigue et rupture progressive dans les marnes, ou bien secousses sismiques. En effet, deux séismes se sont produits à quelques kilomètres du bassin les 8 et 25 mars 1982 avec une magnitude respective de 2.8 et 2.7. Par contre, par la suite les différentes phases d'évolution et de réactivation sont en assez bonnes corrélation avec les précipitations (Colas et Locat, 1993).

D'autres exemples de ce type peuvent être trouvés ailleurs. Comme en Sicile où Sorriso-Valvo *et al.* (1994) montrent qu'une augmentation très nette du nombre de mouvements de terrain entre 1931 et 1939 n'est apparemment pas en relation avec les conditions climatiques. Il en est de même, mais pour d'autres périodes d'études, dans l'Italie Centrale.

#### **9.1.4. Conclusion**

A l'échelle de ce bassin de Barcelonnette, les résultats obtenus sur les relations climats et mouvements apparaissent *parfois vagues et incertains*. Comme il était prévisible, une grande diversité de situations apparaît avec une complexité de combinaisons entre des *conditions climatiques immédiates et lointaines*.

Si les conditions climatiques sont généralement *favorables* au déclenchement de l'instabilité, elles ne sont *pas suffisantes*. Il ne faut pas être tenté de trop rapidement établir seulement de simples *relations de cause à effet*. Les causes sont généralement multiples, avec conjonction, superposition de plusieurs facteurs prédisposants et de facteurs déclenchants. Il faut donc examiner en détail la fiabilité et la qualité de ces relations établies entre le climat et les mouvements et évaluer la part effective du climat à côté des autres facteurs.

Les autres points suivants ont été discutés et présentés en détail dans l'article de Flageollet *et al.* (1999) :

- influence de la qualité et de la fiabilité des informations de base (description et date de l'aléa, données climatiques, ...) ;
- degré de précision de ces données ;
- influence des types et de l'âge des mouvements de terrain ;
- degré de stabilité initial du versant ;
- de la saison pendant laquelle il se déclenche ;
- la fiabilité et la qualité des relations établies entre le climat et les mouvements.

Il apparaît très clairement que des seuils précis de déclenchement ou de réactivation ne peuvent être obtenus que grâce à des mesures et à des observations « fines » simultanées des différents paramètres (déplacements, climat, hydrologie, etc.) réalisées à des pas de mesure adaptés. Je vais donc maintenant présenter les principaux résultats qui ressortent de l'analyse des données collectées à l'échelle locale des glissements-coulées.

## **9.2. Evolution du glissement-coulée de Super-Sauze**

### **9.2.1. Déclenchement par glissements structuraux**

L'influence de la structure, associée à d'autres facteurs prédisposants, a pu être appréciée par l'analyse d'un glissement récent survenu au début de l'année 1997 sur une échine marneuse située à l'Ouest de la coulée de Super-Sauze (Figure 5.3b ; chapitre 5) (Malet *et al.*, 2000). Cela a permis, en

l'absence d'observation directe et de témoignages, de reconstituer les conditions de déclenchement des autres glissements survenus dans les bassins torrentiels.

Cette échine s'étend sur plus de 80 m, entre 1840 et 1910 m d'altitude (Photo 9.1). Sa pente moyenne atteint 35°, alors que la pente de la surface topographique initiale devait être plus proche de 40° (Figure 9.3). En octobre 1997, plusieurs blocs disloqués séparés par de petits décrochements sont bordés par de larges et profondes fractures ouvertes quasi-verticales. En surface, ces blocs sont fragmentés sur plusieurs décimètres alors qu'ils sont cohérents et peu déstructurés en profondeur. L'escarpement principal atteint 7 m de hauteur. Des plans de fracturation, des plans de schistosité (inclinés à 32-35° vers l'aval) et de nombreuses stries de glissement y sont visibles. L'ouverture de fractures structurales s'est initiée sous l'effet de la gravité et de la décompression. D'ailleurs, des traces de dépôts ocres sur l'escarpement principal, les plans de fracturation et les plans de schistosité suggèrent de faibles circulations d'eau le long de ces fractures ouvertes.



Photo 9.1 : Petit glissement structural sur une échine située sur le flanc à l'Ouest de la coulée de Super-Sauze (octobre 1997).

En mai 1998, la rupture est nettement plus visible et huit blocs s'individualisent (Figure 9.3). Sur toute la longueur de l'échine courent un plan de fracturation incliné à 58° sur le flanc sud, et un autre incliné à 38-40° sur le flanc nord. Ces plans délimitent des blocs (dièdres) plus ou moins disloqués et fracturés. La forme et la position de la surface de rupture sont obtenues, en prolongeant ces plans de fracturation en profondeur selon la méthode des intersections (Van Asch, 1984). La surface de rupture obtenue est rectiligne, située en moyenne 8-9 m sous la surface topographique actuelle, inclinée à 33° vers l'aval, et donc sensiblement parallèle aux plans de schistosité (Malet, 1998). En mai 1999, les huit blocs identifiés ont progressé vers l'aval entre 5 et 8 m et les vecteurs-déplacements sont parallèles à la surface de glissement définie, ce qui confirme l'exactitude de la reconstitution de la forme et de la pente de cette surface de rupture (Figure 9.3).

Les caractéristiques géomécaniques des joints de stratification et des discontinuités naturelles, zones fragiles des massifs rocheux, ont été déterminées à partir de plusieurs essais de frottement (Klotz, 1999 ; Maquaire *et al.*, soumis). Les valeurs sont les suivantes : cohésion  $C' = 0$  kPa et angle de frottement interne  $\varphi' = 32^\circ$ , pour des poids spécifiques secs de  $\gamma_d = 26$  kN/m<sup>3</sup>. Pour ces valeurs et sur le profil de la figure 9.3, plusieurs calculs de stabilité fournissent des valeurs de coefficients de sécurité proche de l'unité. Pour le déclenchement de glissement structuraux (banc sur banc), les conditions suivantes sont réunies :

- secteurs où les avals-pendages atteignent des valeurs égales ou supérieures à celles de l'angle de frottement ;
- réduction voire l'annulation de la cohésion par les phénomènes de décompression ;
- éventuelles surpressions liées aux infiltrations dans les diaclases, bancs calcaires, plans de schistosité et autres linéations.

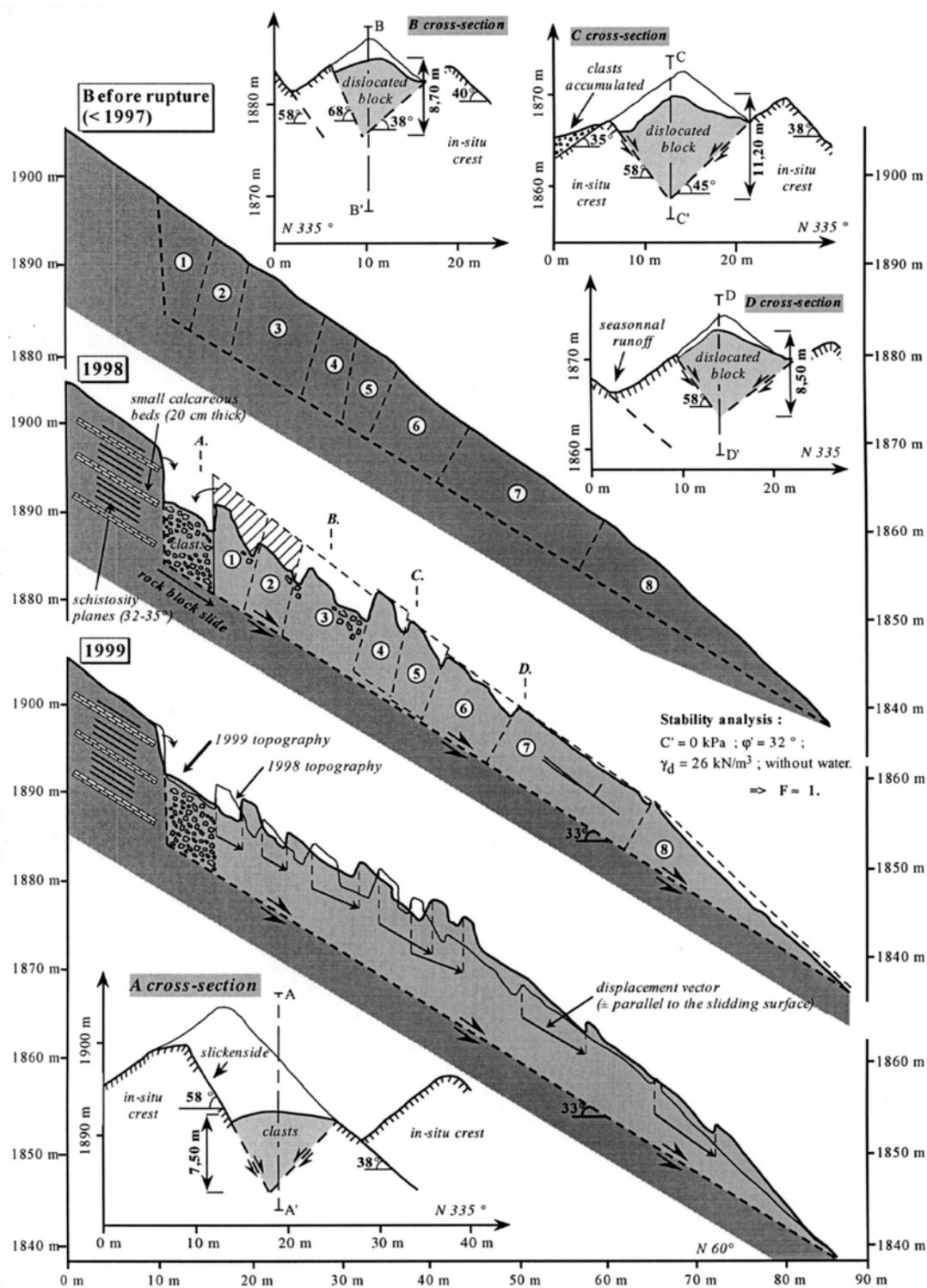


Figure 9.3 : Evolution morphologique, cinématique et mode de rupture par glissement structural dans une échine marneuse en place (in Malet et al., 2000).

A noter qu'un glissement structural banc sur banc s'est également déclenché au printemps 1999 dans le bassin versant raviné du Laval (Draix, Alpes-de-Haute-Provence) dans des « Terres-Noires ». C'est également ce même type de glissement structural banc sur banc qui se produit sur le flanc nord de la coulée de Poche (Manné et Schwin, 1998 ; Guillon, 2001). Ces glissements en se succédant dans l'espace et le temps concourent au recul progressif de la zone instable sur ce flanc (glissement en élargissement latéral –*widening*-) et à l'alimentation de la coulée.

## 9.2.2. Dynamique pluri-annuelle de la coulée

Entre octobre 1996 et octobre 2000, Malet *et al.* (2002b) ont établi les relations entre la pluviométrie, les fluctuations de la nappe phréatique et les déplacements à une échelle annuelle et ont identifié les variations saisonnières du comportement de la coulée. Les variations du niveau piézométrique sont calées avec la pluviométrie. Ce calage est encore plus net avec la pluviométrie efficace (pluie brute moins l'évapotranspiration potentielle selon la formule de Penman). L'analyse du comportement piézométrique montre une grande amplitude des variations de la pression (jusqu'à 20 kPa) avec des recharges brutales consécutives à la fonte de la neige au printemps ou à l'automne pour un seuil de 50 à 60 mm de précipitation efficace cumulée. Les épisodes de nappe haute sont brefs. Le drainage, lent et progressif, intervient de juin à septembre et pendant l'hiver quand un manteau neigeux recouvre la coulée. La position d'étiage s'accroît chaque année, et notamment pendant l'année hydrologique 1998-99 où le déficit hydrique est particulièrement marqué (pluie brute annuelle inférieure d'un quart à la normale).

*L'amplitude à long terme des déplacements est directement contrôlée par l'histoire hydrologique du site puisque les pics de vitesses sont localisés au printemps à la fonte des neiges ce qu'il faut maintenant analyser en détail.*

## 9.2.3. Dynamique saisonnière de la coulée

La relation entre la pluviométrie, les fluctuations de la nappe phréatique et les déplacements peut être abordée à l'échelle fine de l'événement pluvieux, grâce aux mesures en continu obtenu par GPS et par extensométrie (Chapitre 6). La figure 9.4 (Malet *et al.*, 2002a) montre l'évolution temporelle des déplacements du site extensométrique "mobile", entre les mois de juin (installation du dispositif) et de novembre 1999 (enlèvement du dispositif avant les chutes de neige). Les déplacements 3-D atteignent 1.10 m avec une succession de ralentissement et d'accélération, liées à la position de la nappe en relation avec la pluviométrie. Les vitesses s'échelonnent entre moins d'un cm/jour et 9 cm/jour en période de nappe haute.

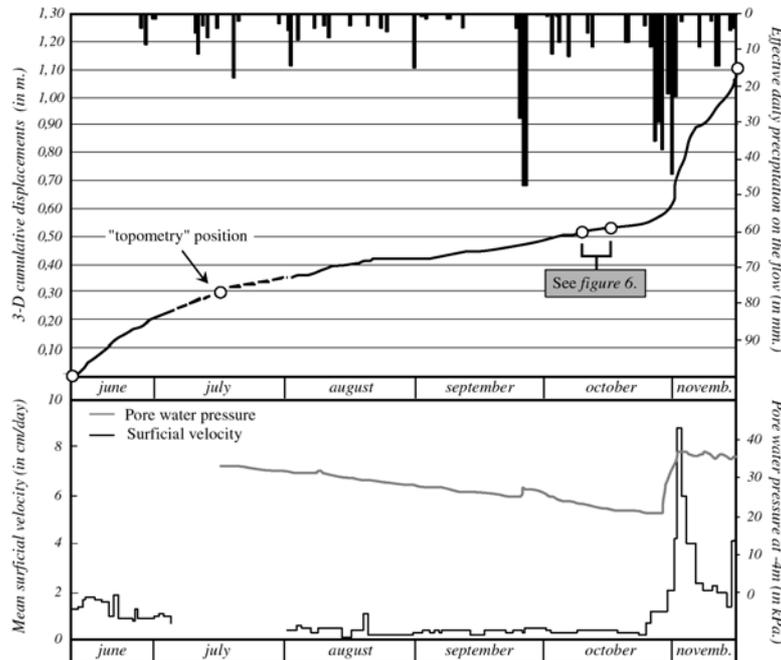
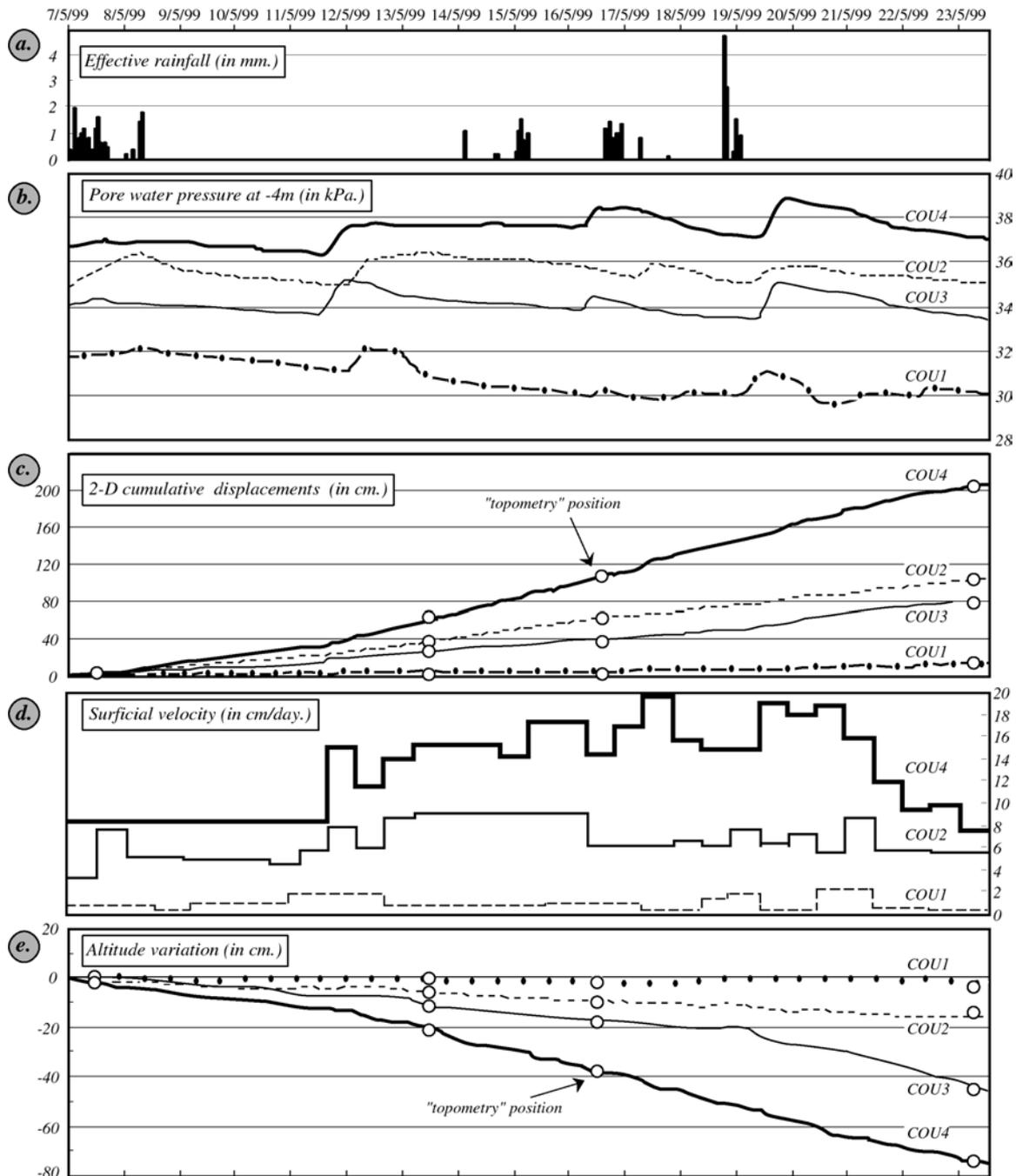


Figure 9.4 : Déplacements mesurés par extensométrie, précipitations journalières efficaces et pressions interstitielles entre juin et novembre 1999 (in Malet *et al.*, 2002a)

La comparaison des déplacements mesurés par GPS en mai 1999 (Figure 9.5c) confirme la cinématique de la coulée identifiée par le suivi topométrique. Les déplacements s'amortissent vers le pied de la coulée. Pendant cette période, la nappe est en position haute. En comparant les précipitations efficaces sur le site et les fluctuations de la nappe (Figure 9.5a-b), on constate qu'à certains épisodes pluvieux de fin d'hiver correspond une remontée de la nappe non simultanée en

tous points du site. Ce déphasage s'explique par le fait que les premières pluies contribuent à faire fondre le manteau neigeux qui recouvraient encore la coulée sur les transects B et C au début du mois. Les remontées piézométriques simultanées du 11 mai 1999 correspondent à une période de fort ensoleillement ayant accentuée la fonte.



Les récepteurs GPS sont localisés sur la figure 6.2 : COU1 en E ; COU2 en C ; COU3 et COU4 en B.  
 (a) pluie efficace, (b) variations de la pression interstitielle, (c) déplacements plans cumulés, (d) variations de la vitesse superficielle, (e) déplacements verticaux cumulés

Figure 9.5 : Relations Pluie-Nappe-Déplacements pour les sites GPS en mai 1999 : (in Malet et al., 2002a).

Sur les transects B et C (COU2 à COU4), les vitesses sont élevées, avec des pics de vitesses qui correspondent aux valeurs élevées de pressions interstitielles (Figure 9.5b-d). Les mesures GPS mettent en évidence un comportement identique de l'ensemble des points "mobiles", à savoir que les vitesses de déplacement peuvent être élevées (supérieures à 10 cm/jour) dès que la nappe se situe vers  $-0.30$  m/T.N. Selon les conditions initiales, les variations de pressions interstitielles entre l'amont

et l'aval contrôlent en partie les variations de vitesses. Ainsi, sur les transects B et C, où la nappe est alimentée par la fonte de la neige des secteurs amont de la coulée, les vitesses s'échelonnent entre 6 et 20 cm/jour, alors qu'elles ne dépassent pas 2 cm/jour sur le transect E (COU1). Le rôle des pressions interstitielles est renforcé par la pente en long du terrain qui accentue les différences de vitesses sous l'action de la gravité.

Pour le site COU4 (Figure 7d), les vitesses moyennes de déplacement atteignent 12 cm/jour en mai 1999 et seulement 0.2 cm/jour en octobre 1999 (période sèche). Ce rythme saisonnier est directement à attribuer aux battements de la nappe, en position d'étiage en octobre (position moyenne -2,10 m/T.N.).

*Pendant le régime général de drainage et de décroissance des vitesses, et selon les conditions initiales, des précipitations efficaces de l'ordre de 10 mm suffisent à produire une petite remontée piézométrique et une accélération fugace du mouvement. Malgré le drainage important pendant l'été, les vitesses ne s'annulent pas, et le matériau continue à s'écouler sous l'influence de la gravité.*

De même les déplacements significatifs se produisent lors d'une mise en charge rapide de la nappe. Si la mise en charge se poursuit, les déplacements croissent en s'accélégrant jusqu'à un pic de vitesse peu éloigné du pic de pressions interstitielles. On constate que celles-ci ne se maintiennent pas à leurs valeurs les plus fortes et le drainage s'opère plus lentement que la phase d'alimentation, alors que la vitesse de déplacement chute très rapidement.

Les mesures en continu apparaissent donc ici, et peut être plus qu'ailleurs, indispensables pour comprendre la dynamique et fixer des valeurs seuils de référence. Les brusques remontées du niveau de nappe entraînent des déplacements. Le mouvement s'initie (Figure 9.6) dès que la nappe se situe entre 0.50 et 0.40 m de profondeur par rapport au terrain naturel (*i.e.* 35 kPa à -4 m). De même, le mouvement diminue progressivement dès que le niveau redescend en-dessous de 0.80 m de profondeur (*i.e.* 32 kPa à -4 m). La relation entre la pression interstitielle et les vitesses de déplacement peut être modélisée simplement par une régression hyperbolique avec un coefficient de détermination de 0.92. *Le nuage de point est limité par une courbe enveloppe. Celle-ci délimite les seuils de déclenchement pour une accélération des déplacements.* Pour des pressions interstitielles supérieures à 35 kPa, les mouvements se produisent avec une vitesse supérieure à 2-3 cm/jour, l'amplitude atteinte étant alors fonction de l'intervalle de temps où le niveau de la nappe reste supérieur à ce seuil de pression.

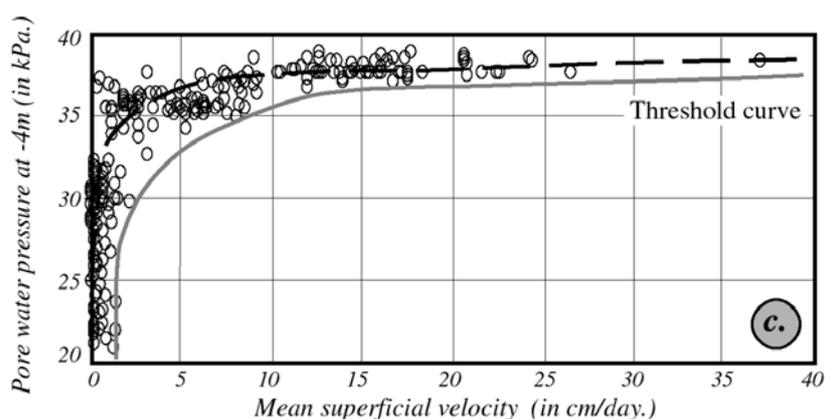


Figure 9.6 : Relations entre les pressions interstitielles et la vitesse des déplacements (in Malet et al., 2002a).

#### 9.2.4. Evolution à long terme

Les relations entre la météorisation, la résistance géomécanique, l'instabilité des pentes et le déclenchement des mouvements de masse rapides dans les coulées peuvent être examinés. A partir des valeurs des caractéristiques mécaniques (Chapitre 7), il est possible d'analyser localement la stabilité des glissements-coulées, d'un point de vue dynamique, en faisant l'hypothèse d'un glissement de type translationnel (*translational slab slide*) ayant une surface de glissement supposée localisée à 8 m de profondeur (Chapitre 8).

La stabilité des pentes soumises à ce glissement de translation peut être évaluée en utilisant l'analyse sur un plan infini (*Infinite Slope Analysis*). L'équation donnée par Skempton et DeLory (1957) a été modifiée pour le cas actuel comme suit :

$$F_s = \frac{c' + [\gamma Z - m \gamma_w Z] \cos^2 \beta \tan \phi'}{\gamma Z \sin \beta \cos \beta} \quad (1)$$

où  $\gamma$  et  $Z$  sont le poids spécifique saturé de la formation et l'épaisseur du sol,  $F_s$  le facteur de sécurité,  $\gamma_w$  le poids spécifique de l'eau,  $\beta$  l'angle de pente,  $C'$  et  $\phi'$  la cohésion et l'angle de frottement interne, et  $m$  la fraction de  $Z$  telles que  $mZ$  est la hauteur de la nappe souterraine au-dessus de la surface de glissement. En utilisant les paramètres résiduels de résistance dans l'équation (1), les rapports entre  $F_s$  et  $\beta$  ont été obtenus (Figure 9.7) pour diverses valeurs de  $m$  ( $m = 0$ , complètement vidangé;  $m = 1$ , nappe à la surface du sol). Dans notre cas, la nappe fluctue dans la moitié supérieure de la masse instable ( $m = 0.5$  à  $1$ ).

À l'état critique,  $F_s = 1.0$ , les angles maximum de stabilité des pentes, pour des caractéristiques résiduelles et en supposant  $m = 0.5$ , atteignent  $21^\circ$  pour des glissements-coulées de VAL et de SAU, et  $23^\circ$  pour celle de POC. Les angles de pente diminuent à, respectivement,  $16^\circ$  et  $18^\circ$  pour des conditions entièrement saturées ( $m = 1$ ). Comme les pentes topographiques moyennes des trois glissements-coulées se situent dans cette fourchette, l'écoulement peut s'accélérer pour des conditions de précipitations courantes et de fonte de la neige et chacune des coulées peut être caractérisée comme très active.

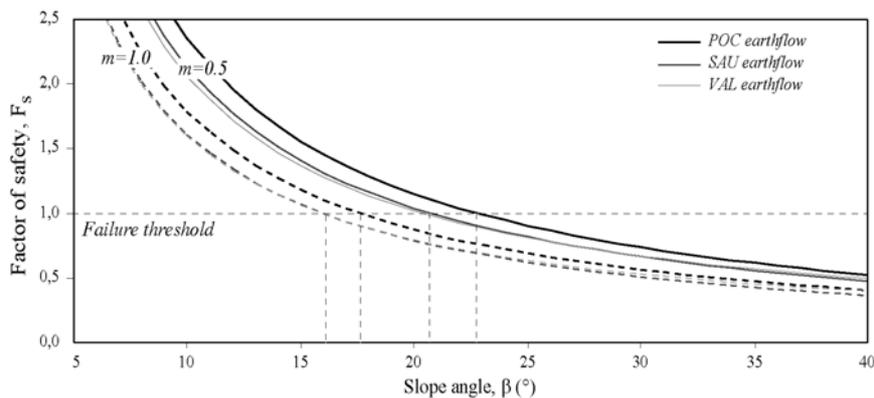


Figure 9.7 : Relations entre l'angle de pente  $\beta$  et le facteur de sécurité  $F_s$ , pour deux valeurs de  $m$  et pour les caractéristiques mécaniques résiduelles des glissements-coulées de la Valette (VAL), Super-Sauze (SAU) et Poche (POC) (in Maquaire et al., soumis).

Le résultat de cette analyse est compatible avec les résultats des mesures *in situ* qui prouve que les glissements-coulées sont « inactifs » quand les eaux souterraines sont très basses (dans la moitié inférieure de la couche en glissement) tandis qu'ils sont en activité quand le toit de la nappe est dans la moitié supérieure (Figure 9.7). Les relevés piézométriques sur le glissement-coulée de Super-Sauze ont démontré qu'un seuil existe pour initier une accélération du mouvement (Paragraphe 9.2.3). Le glissement-coulée de Poche présente un état plus stable car la pente topographique et la position moyenne annuelle de la nappe phréatique sont inférieures (Guillon, 2001) ; l'état plus stable de ce glissement-coulée est également expliqué par une augmentation de la résistance des matériaux par la météorisation (Chapitre 7).

Comme démontré au chapitre 7, une corrélation forte existe entre les caractéristiques de la roche mère en place (USD ou LSD) et celles des formations des glissements-coulées. Les granulométries des dépôts de glissements-coulées montrent une augmentation de la fraction limoneuse et argileuse du plus jeune (VAL) au plus ancien (POC) des glissements-coulées. Cette évolution devrait produire une augmentation de la résistance globale des matériaux avec le temps. La formation de POC doit donc être plus cohésive que la formation de SAU et de VAL. Avec le temps, l'angle résiduel de frottement tend à augmenter graduellement et se stabilise à un niveau constant, alors que la cohésion

résiduelle tend à diminuer et à se stabiliser à un certain niveau. Ceci peut être expliqué par la météorisation qui produit des particules fines (au moins en surface), mais également par des ruptures des liens argileux ou des dissolutions des liens carbonatés. L'altération des minéraux argileux détermine probablement la transformation ou la néoformation des argiles. Étonnamment, à long terme, le matériel semble devenir plus frictionnel et moins cohésif (Figure 9.8a).

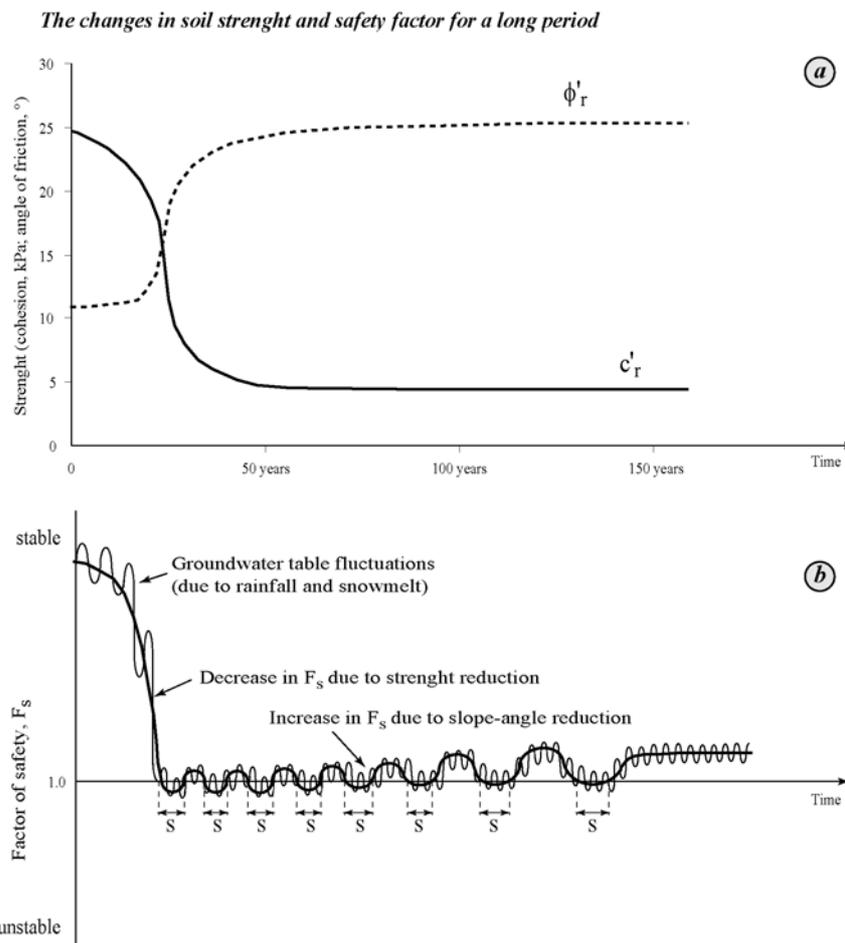


Figure 9.8 : Schéma de principe de l'évolution à long terme : (a) de la résistance au cisaillement, (b) du facteur de sécurité  $F_s$  (in Maquaire et al., soumis).

Un diagramme idéalisé peut être construit (Figure 9.8b) pour l'illustrer le concept de variation du facteur de sécurité lié :

- à la réduction de résistance par la diminution de la cohésion, dans une première étape ;
- au regain progressif de la résistance lié à l'augmentation de l'angle du frottement en relation avec la météorisation, dans un second temps ;
- aux fluctuations de la nappe phréatique ;
- aux changements d'angle de pente sur une longue période.

Il est difficile, cependant, de prévoir le moment exact où la pente devient instable entraînant la nouvelle occurrence du mouvement de masse, car les données sur le taux de météorisation sont peu nombreuses. Afin de prévoir la stabilité/instabilité de la pente à court terme, le taux de réduction de la résistance (réduction de la cohésion pas totalement compensée par une augmentation d'angle de frottement) doit être examiné pendant une période critique, comme sur le long terme, le matériel tend naturellement à récupérer un état stable. Ces considérations sont conformes aux vitesses sur le glissement-coulée SAU plus élevées que sur le glissement-coulée POC.

Dans quelques zones des trois glissements-coulées peuvent se déclencher des laves torrentielles (*channelized debris-flows*) (Malet et al., 2001; Maquaire et al., soumis). Cette susceptibilité au déclenchement de laves torrentielles peut être évaluée au moyen de la résistance au cisaillement non

drainée par rapport aux limites de liquidité, car la résistance au cisaillement non drainé donne une bonne évaluation du fléchissement de la résistance du matériel (Locat et Demers, 1988; Locat, 1997). La figure 9.9 montre que pour déclencher une lave torrentielle, une plus grande quantité d'eau est nécessaire pour POC que pour SAU et VAL. Ceci doit néanmoins être confirmé par les essais rhéologiques sur les mêmes formations (Malet *et al.*, 2001).

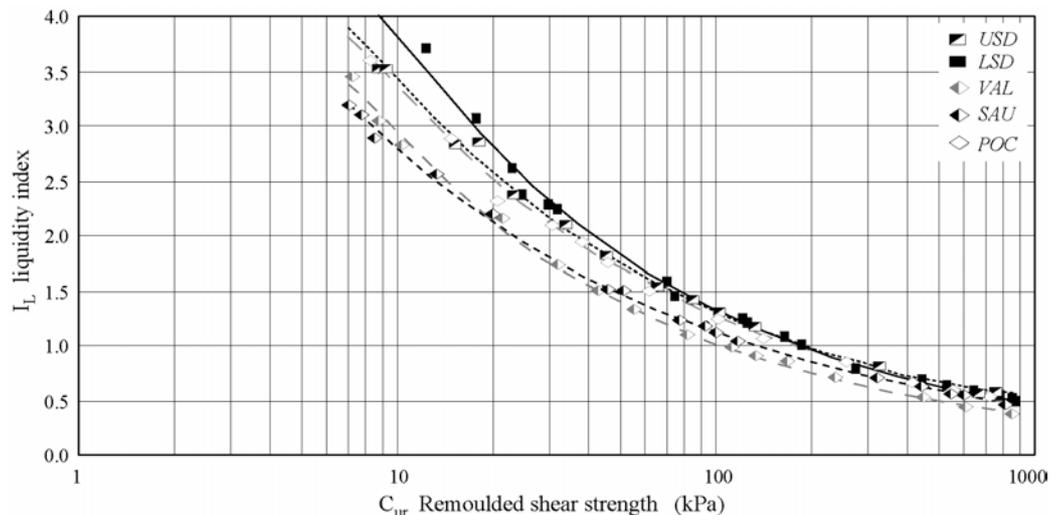


Figure 9.9 : Relations entre la résistance au cisaillement non drainée reconstitué (remoulded)  $C_{ur}$  et l'indice de liquidité  $I_L$  pour différents matériaux de coulées et de marnes in-situ (in Maquaire *et al.*, soumis).

### 9.3. Modèle conceptuel d'évolution du glissement-coulée

L'ensemble des résultats permet de proposer un modèle conceptuel qualitatif d'évolution à Super-Sauze (Figure 9.10) qui devrait pouvoir être appliqué à d'autres glissements-coulées développés dans les bassins torrentiels marneux (Malet *et al.*, 2000).

Le mouvement majeur s'initie selon des glissements structuraux sur des discontinuités existantes (tectonique et schistosité) qui sont encore nettement visibles sur l'escarpement principal. Les cassures et déformations sont accentuées par une faille localisée dans l'axe du bassin torrentiel. Sur le flanc Est, les couches marneuses sont ployées et relevées avec des pendages parfois supérieurs à 60°. On comprend dès lors l'ampleur du phénomène (en terme de volume de matériau mobilisé), sa complexité (rupture de plusieurs échines) et sa progressivité. Les ruptures dans les marnes se sont initiées, dans les années 1970, dans la partie haute des échines, avant de se propager vers l'aval ; en même temps, le matériau s'accumule dans les ravines (Figure 9.10a). Puis, par étapes, l'escarpement recule, alors que les échines continuent à s'écrouler et le matériau à combler les thalwegs. Des panneaux et des dièdres, de plusieurs mètres cubes, sont emballés dans une matrice argilo-marneuse hétérogène et progressent dans les ravines. L'élévation du niveau d'accumulation dans les ravines fossilise progressivement l'ensemble de la paléotopographie et recouvre les échines (Figure 9.10b). Ainsi, la coulée très hétérogène se développe dans le chenal d'écoulement et « charrie » des débris de toutes tailles. La coulée de débris continue à progresser rapidement vers l'aval (plus de 180 m depuis 1982). Mais son alimentation est réduite à de petites chutes de blocs ou de plaquettes issues de l'escarpement. La conséquence est un démaigrissement de la zone d'accumulation amont et la réapparition des anciennes échines fossilisées le long du transect B (Figure 9.10c). La paléotopographie joue un rôle essentiel dans le développement de la coulée en chenalisant les écoulements sauf dans la partie amont en forte pente. Le recoupement des analyses photogrammétriques avec les informations géotechniques nous permet d'estimer à 650 000 m<sup>3</sup> le volume global actuel de matériaux remaniés.

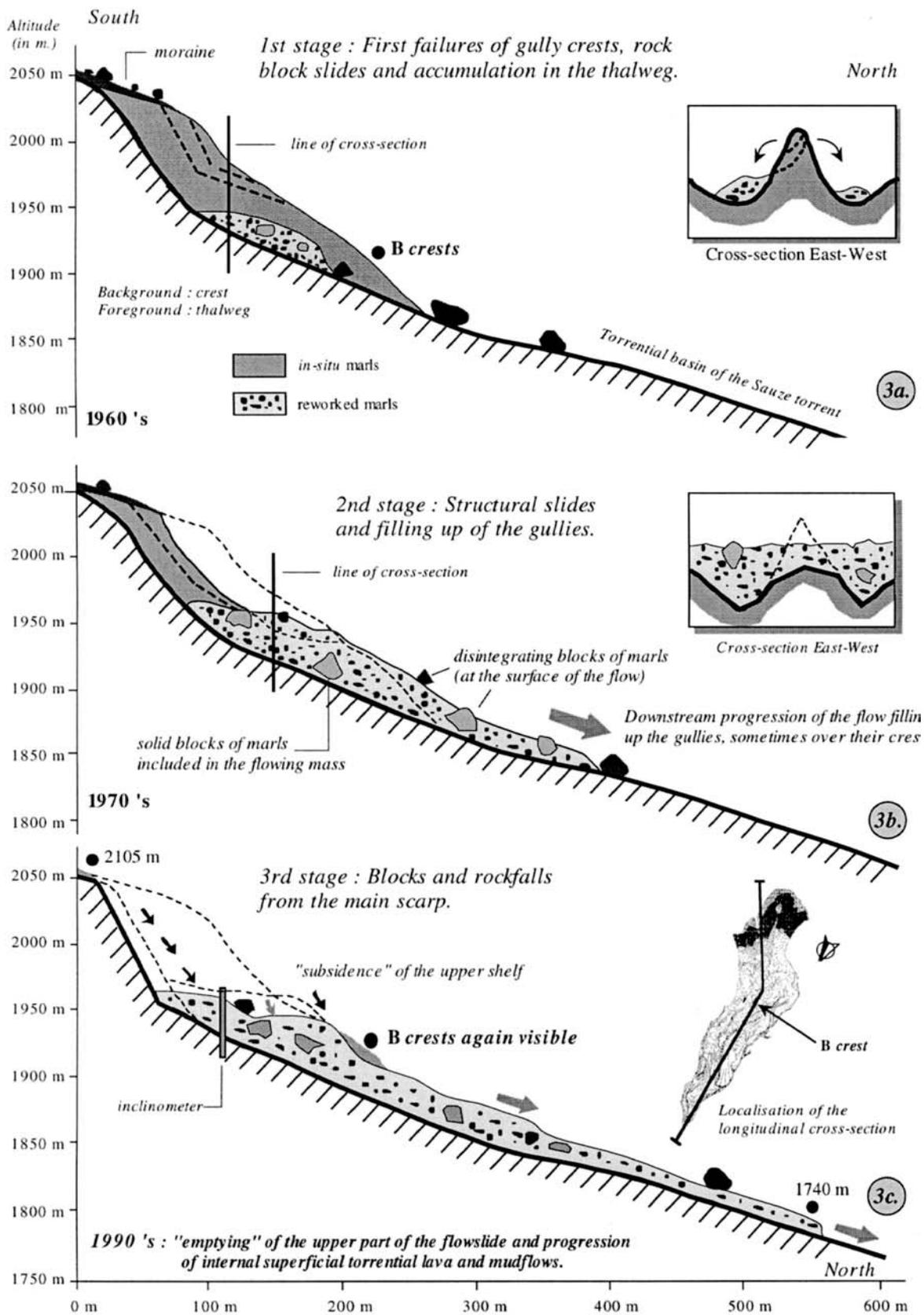


Figure 9.10 : Modèle conceptuel d'évolution du glissement-coulée de Super-Sauze (in Malet et al., 2000).

## 9.4. Bilan et perspectives

Ainsi, grâce à un jeu de données fiables spécialement acquises avec des pas d'échantillonnage spatio-temporel adaptés au phénomène, un grand pas a été fait dans la définition des conditions de déclenchement et l'évolution des mouvements de terrain depuis les premières analyses des seules données historiques imprécises de mouvements de terrain et du climat à l'échelle du bassin.

Plusieurs types de relations caractéristiques ont ainsi été mis en évidence entre le déclenchement ou la réactivation des mouvements de terrain et les *conditions climatiques proches ou lointaines* dans le bassin de Barcelonnette. Les désordres peuvent survenir même à la suite de mois relativement secs précédés ou non d'abondantes pluies annuelles. A l'opposé, de fortes pluies dans une période précédente de quelques jours à quelques dizaines de jours peuvent suffire à déclencher des désordres même à la suite d'années faiblement humides.

Malgré l'imprécision des résultats obtenus par la *démarche « historique »*, la collecte de toutes les informations existantes est un préalable indispensable pour dégrossir les problèmes et guider dans le choix des moyens à mettre en œuvre. Si dans ce chapitre, je n'ai présenté que ce qui concerne l'évolution temporelle, la distribution spatiale des mouvements est importante à connaître pour la cartographie des aléas et pour l'identification des zones d'instabilité anciennes ou déclarées ou l'estimation d'une date de déclenchement d'un événement repéré par photo-interprétation ou reconnu sur le terrain.

A l'échelle locale, le couplage des observations morphologiques et structurales, des mesures et suivis cinématique, géotechnique, hydrologique, etc., des analyses géomécaniques, rhéologiques et hydrodynamiques permet de quantifier la cinématique 3-D de la coulée, de mettre en évidence des rythmes de fonctionnement, de fournir des explications réalistes sur le déclenchement et le comportement à court et long termes des glissements-coulées, et d'envisager des modélisations permettant après calage et validation de proposer des scénarios d'évolution. Ces modélisations en cours seront trouvées dans la thèse prochainement soutenue de Jean-Philippe Malet. J'en retiens les points essentiels suivants :

- déclenchement des glissements structuraux influencé par la structure, la perte de cohésion et les pressions interstitielles
- rôle primordial de la paléotopographie dans le fonctionnement de la coulée ;
- déplacements saisonniers variables en relation avec les conditions climatiques ;
- infiltration préférentielle liée aux macropores, recharge de la nappe à l'automne et au printemps (fonte de la neige) et tarissement progressif en été et en hiver ;
- déplacements initiés sous l'action du déjaugage (pression interstitielle) ou du changement d'état du matériau (visco-plastique ou élasto-plastique) se poursuivant *sous l'action de la gravité* avec un amortissement progressif lié aux forces de frottement et au ressuyage des matériaux ;
- évolution à court et long termes des coulées illustrée par un diagramme idéalisé montrant le rapport entre la météorisation, la résistance des matériaux et le coefficient de sécurité.

Les mesures en continu apparaissent indispensables pour comprendre la dynamique et fixer des valeurs seuils de référence et les conditions initiales.

Comme cela est aussi couramment observé ailleurs, les précipitations, combinées à d'autres facteurs, sont l'une des composantes du système qui déclenche ou accélère les mouvements. C'est cependant, en général, et de loin, l'élément le plus important du système. La complexité de ces relations entre mouvements de terrain et conditions climatiques rend impossible la définition de « *lois universelles* ». Pour une région donnée, elles doivent être définies en tenant compte des types de mouvements de terrain, de leur génération (déclenchement ou réactivation), de la saison pendant laquelle le mouvement est observé, et enfin du degré initial de stabilité du versant. Le degré de finesse dépendra de la précision des informations disponibles, en particulier de la date d'apparition du mouvement de terrain qu'il n'est pas toujours aisé de connaître.

Dans les perspectives, il me semble primordial de poursuivre les observations à l'échelle locale pour mieux juger de l'influence, de la variabilité temporelle des paramètres climatiques (pluie, neige, température) et des conséquences du changement climatique annoncé, sur le comportement à long terme de ce type de glissements-coulées. En conséquence, la durée d'observation devrait être encore au moins une dizaine d'années, de manière à bien faire ressortir les évolutions « cycliques » pluriannuelles comme celles observées à Séchillienne ou sur les glissements littoraux de Villerville-Cricqueboeuf. Comme le montre la figure 9.11, la périodicité des événements majeurs de 5-6 ans et en relation étroite avec la variation pluriannuelle de la nappe phréatique.

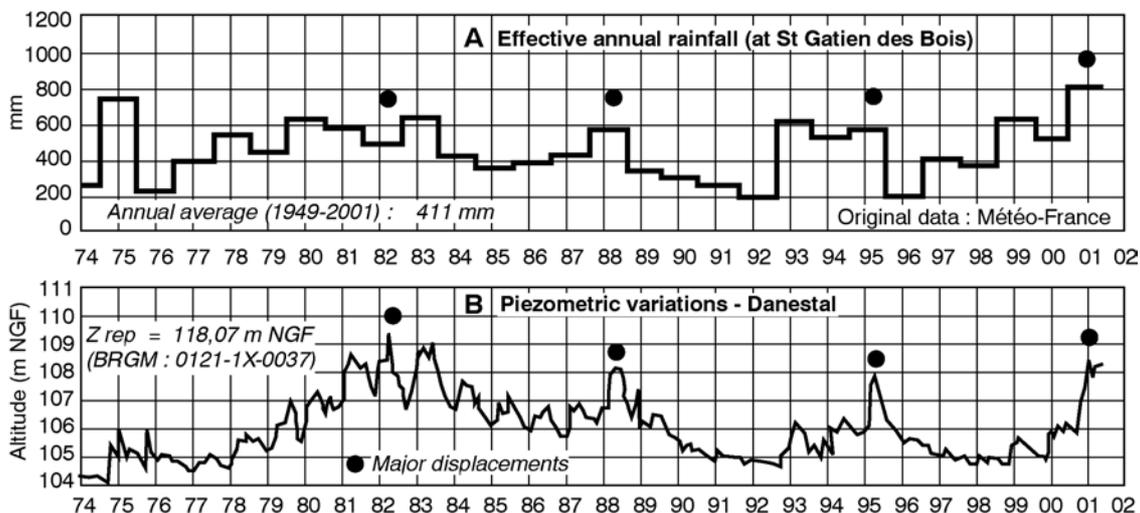


Figure 9.11. Evolution pluriannuelle des glissements de Villerville-Cricqueboeuf (Calvados, France) en relation avec les données piézométriques et climatiques entre 1974 et 2001 : (a) précipitations annuelles efficaces à St Gatien-des-Bois, (b) variations piézométriques à Danestal (in Maquaire, à paraître).

Les données pourront être valorisées de plusieurs manières en servant d'une part, de paramètres d'entrée et de validation des simulations numériques à partir de modèles existants, et d'autre part, de calage ou d'étalonnage à des modèles encore « à construire » en particulier dans le cas de transition de lois de comportement : comportement aux très faibles vitesses de cisaillement (viscoélastique puis viscoplastique) et comportement aux vitesses de cisaillement faibles à fortes. Les données serviront également pour le développement et la validation de différentes techniques d'auscultation et de suivi (Chapitre 6).

Ceci rentre bien dans le contexte actuel de « demande » de bases de données longues et fiables pour développer, caler et valider des modèles de comportement.

Il faudrait également s'intéresser d'un peu plus près à l'influence de l'évolution de l'occupation du sol et des actions anthropiques (terrassement, vibration, déboisement, exploitation de matériaux ou de nappes aquifères, etc.) sur la stabilité des versants.



*Troisième partie : Perspectives et programmes de  
recherche*



Ayant déjà détaillé dans la seconde partie, à la fin de chaque chapitre, mes perspectives de recherche dans les différentes thématiques de recherche abordées, je donnerai ci-après mes grands axes de recherche pour les prochaines années. Ils s'appuient sur des programmes, en cours (démarrés pour certains en 2002), sur un nouveau programme débutant prochainement et enfin sur des programmes en gestation dans le cadre du futur 6<sup>ème</sup> PCRDT. Ces programmes assurent le soutien financier et scientifique aux quatre thèses en cours.

## *Chapitre 10 : Perspectives et programmes de recherche*

### **10.1. Cadre institutionnel de ma recherche**

#### **10.1.1. Insertion au sein de l'Institut de Physique du Globe de Strasbourg**

L'insertion récente de mon équipe « Risques Géomorphologiques » depuis janvier 2002 au sein de l'UMR 7516 (Institut de Physique du Globe de Strasbourg, IPGS), suite à la fermeture du CEREG, me donne l'opportunité d'envisager la mise en place à terme d'une équipe multidisciplinaire pour des recherches élargies à plusieurs autres aléas naturels ou anthropiques (sismiques, technologiques, etc.). Les collaborations seraient d'abord trouvées au sein de l'UMR, puis au niveau de Strasbourg avec les autres équipes travaillant sur la thématique large des aléas et des risques. Cette fédération devrait d'une part favoriser la mise en commun de moyens et outils de prospection, d'analyse, de spatialisation, etc., et d'autre part, renforcer la cohérence et la lisibilité du panorama local de la recherche dans ce domaine. Cela dépendra bien évidemment du taux de réactivité et de la volonté des différents collègues et de mes capacités à susciter, à organiser et à animer une telle équipe. Cela pourrait être grandement favorisé dans le cadre du futur 6<sup>ème</sup> PCRDT, par la mise en place d'un réseau d'excellence (NoE).

#### **10.1.2. Projet de réseau d'excellence européen dans le cadre du 6<sup>ème</sup> PCRDT**

Même si au moment d'écrire ces lignes, de nombreuses interrogations demeurent sur ce que sera le contenu du 6<sup>ème</sup> PCRDT, et en particulier sur ses deux principaux outils : réseaux d'excellence (*Network of Excellence, NoE*) et projets intégrés (*Integrated projects, IP*), c'est à travers et par ces outils que je devrai trouver les principales collaborations internationales et l'essentiel des moyens de financer mes recherches dans les prochaines années.

Dans ce cadre, une grande partie du 1<sup>er</sup> semestre de cette année 2002 a été consacrée, avec l'aide de Jean-Philippe Malet, à la rédaction d'une lettre d'intérêt (*Expression of Interest –EoI-*) pour un projet de Réseau d'Excellence intitulé « *MOVIDIS : Mass Movements and global change: Implications for Disaster management* ». Grâce au réseau déjà constitué du *CERG (Centre Européen sur les Risques Géomorphologiques)*, association hébergée au sein de l'Université Louis Pasteur et dont je suis l'actuel secrétaire général, il a été possible de fédérer dans *MOVIDIS* l'ensemble des équipes et institutions reconnues pour « l'excellence » de leurs travaux et les utilisateurs finaux (administrations, bureaux d'études, etc. chargés de l'application des connaissances théoriques à des cas concrets). Dans sa constitution actuelle, le projet fédère 26 consortiums (groupes thématiques ou nationaux) incluant chacun entre 20 et 40 chercheurs potentiels, soit au total plus de 500 personnes. Ce regroupement cohérent est l'un des principaux atouts de ce projet.

Quelle que soit l'issue de cette consultation et les termes du prochain appel d'offres, retenant ou non cette thématique « Risques Géomorphologiques » et la constitution de ce NoE, éventuellement regroupé à d'autres projets similaires sur d'autres aléas, cette action m'a permis de renforcer le positionnement de l'équipe à l'échelle européenne, déjà reconnue par l'ICL (*International Consortium on Landslides*). Son Président m'a sollicité en juillet dernier pour intégrer, en tant que coordinateur de

MOVIDIS et du CERG, le comité de pilotage de l'ICL et de l'IPL (*International Programme on Landslides*).

Ce projet de réseau d'excellence est bâti autour d'un programme d'activités scientifiques avec cinq thèmes prioritaires de recherche incluant les relations entre l'aléa, la vulnérabilité et le risque, l'ensemble en liaison avec le changement global :

- Compréhension des relations entre climats et mouvements de masse ;
- Prédiction du comportement des mouvements pour différents scénarios de changements de climat et d'occupation du sol ;
- Prédiction à court terme de l'activité des mouvements de terrain ;
- Développement de systèmes de détection et d'alerte précoce ;
- Mise en oeuvre de mesures pratiques pour réduire le risque en vue d'un développement durable.

Deux autres activités sont transversales :

- collecte d'informations et constitution d'une banque de données européenne sur les mouvements de terrain (*European Landslide database, ELD*) ;
- renforcement et transfert des connaissances par l'enseignement et la mobilité.

Le projet propose que j'assure la coordination générale avec l'aide d'un responsable scientifique par activité. Le réseau serait animé par un comité de coordination de réseau (*Network Steering Committee, NSC*) comportant une dizaine de personnalités choisies pour leur compétence scientifique, leur représentativité et leur expérience de coordination de projets de recherche scientifiques.

## **10.2. Thématiques de recherche**

Mes propres activités de recherches trouvent naturellement leur place dans les thèmes retenus de ce projet. Mon activité de recherches des prochaines années sera la poursuite de l'étude de l'aléa :

- inventaire des bases de données « événementielles » sur les mouvements de terrain ;
- constitution d'une banque de données multi-paramètres, multi-échelles spatio-temporelles du site de Super-Sauze s'appuyant sur des développements méthodologiques (instrumentation, techniques d'investigation, etc.) ;
- recherches sur les processus d'évolution des marnes noires et des coulées, sur les relations « Transformations Coulées - Laves torrentielles » et sur la détermination des zones sources potentielles de laves torrentielles ;
- recherches sur les rythmes et volumes de production de sédiments par mouvements de masse dans les petits bassins versants ravinés en bad-lands.

Dans le même temps, une transposition géographique et régionale sera engagée par une cartographie des aléas à l'échelle du 1/10 000 dans le bassin de Barcelonnette, puis l'analyse de la vulnérabilité permettra d'envisager la cartographie du risque.

### **10.2.1. Bases de données**

La future *ELD (European Landslide Database)* sera constituée d'une part de *données événementielles* extraites des archives historiques, et d'autre part de *banques de données multi-paramètres, multi-échelles spatio-temporelles* issues de l'investigation et du suivi « fin » de différentes grandeurs (déplacements, eau dans le sol, conditions climatiques, etc.) de sites déjà bien instrumentés dont la surveillance sera poursuivie et si besoin renforcée. Une quinzaine de sites ont déjà été reconnus représentatifs des différents types de mouvements de terrain dont celui de Super-Sauze pour les glissements-coulées. Les données collectées sur chacun de ces sites seront mis à la disposition de la communauté. Ces données sont essentielles pour tester de nouveaux modèles, mettre au point des procédures de cartographie, etc. Ce projet structurant renforcera l'intégration et la synergie entre les différents partenaires.

C'est exactement sur ce même principe que je compte poursuivre mes recherches dans ce domaine.

#### **10.2.1.1. Bases de données « événementielles »**

Je poursuivrai cette activité dont je n'ai pas fait mention dans la reconstitution de mon itinéraire de recherches puisqu'elle n'avait pas encore fait l'objet d'une publication : il s'agit d'une recherche visant à inventorier et constituer un site d'information général sur les banques de données « mouvements de terrain ». Depuis juin 1999, je coordonne cette recherche financée dans le cadre des activités du *CERG* soutenues par l'*EUR-OPA* (Accord Partiel Ouvert Risques Naturels). Les objectifs sont les suivants :

- inventorer les différentes bases de données et informations disponibles en Europe, en s'appuyant sur le réseau constitué par les membres du *CERG* dans les différents pays de la Communauté Européenne ;
- et mettre à disposition ces informations par un site Internet.

Le site mis en ligne en avril 2002 est hébergé à l'ULP : <http://cerg.u-strasbg.fr> .« *European Database on Landslide* » propose ainsi un inventaire, encore incomplet, de sites Internet et de bases de données sur les mouvements de terrain dans les pays européens. Elle fournit pour chacun des pays :

- une identification et un bref descriptif des sites Internet et des bases de données nationales, régionales, départementales et locales : le nom de la base, la période de recensement, le nombre de références et la nature des informations disponibles, le contenu (public visé, objectif, définition des causes, conséquences, cartes, photographies, graphiques, informations sur d'autres aléas, etc.), les conditions de consultation et d'accessibilité des informations, les coordonnées du gestionnaire, etc.
- des références bibliographiques ;
- des définitions et informations pédagogiques sur ces phénomènes naturels, etc.

Cet inventaire sera poursuivi jusqu'à fin 2003. Il constitue en quelque sorte l'embryon d'un des deux volets de la future banque de données européenne sur les mouvements de terrain (*ELD*) telle qu'elle est décrite précédemment.

#### **10.2.1.2. Site de recherche (observatoire) et développements méthodologiques**

D'une manière générale, le manque de maîtrise sur les processus impliqués dans l'évolution du milieu naturel s'explique souvent par l'absence de mesures adéquates, répétées régulièrement sur les durées longues qui sont imposées par le temps de réaction des systèmes étudiés. N'étant pas correctement alimentés par ces données, les modèles d'évolution reposent parfois sur des hypothèses simplistes, souvent insuffisantes pour représenter correctement l'évolution de l'environnement. Il est donc indispensable de renforcer ou de créer des observatoires de recherche, installés dans la durée pour la compréhension, la modélisation, la prévision du fonctionnement des milieux et la prévention des risques en particulier sur le long terme. L'existence de tels « chantiers de recherche » est d'autant plus pertinent pour le futur dans la perspective du changement climatique global.

La France et d'une façon générale la plupart des pays européens souffrent d'une pénurie grave de systèmes d'observation et d'expérimentation environnementales pérennes. Cette pénurie pénalise fortement toutes les communautés concernées par la recherche en environnement. En dehors de sites spécifiques représentatifs d'un aléa particulier, il faudrait également envisager de s'appuyer sur des « chantiers communs » dans une *démarche multi-aléas et multidisciplinaire*. Il est en effet primordial de tenir compte des interactions des différents processus naturels et des interventions humaines.

Dans la philosophie des nouveaux « *Observatoires de Recherche en Environnement, ORE* », le site du glissement-coulée de Super-Sauze, représentatif des mouvements gravitaires visqueux, s'inscrit parfaitement, dans cet objectif de fournisseur de données scientifiques de qualité et, dans le

tissu de la recherche, au niveau national et international à travers ses quatre fonctions : *laboratoire de terrain, observatoire à long terme, site de validation et lieu de formation*.

Le gros effort entrepris ces dernières années sur ce site, pour l'équipement et le suivi, doit être poursuivi en attendant un éventuel label ORE (un dossier a été soumis à l'appel d'offres d'avril dernier) ou la mise en place du *NoE* et de *l'ELD*. Il est nécessaire d'assurer la pérennité des mesures de base pour obtenir de plus longues séries permettant le suivi des évolutions et l'observation d'évènements de fréquence rare. Les données pourront être valorisées de plusieurs manières en servant d'une part, de paramètres d'entrée et de validation des simulations numériques à partir de modèles existants, et d'autre part, de calage ou d'étalonnage à des modèles « à construire » en particulier dans le cas de transition de lois de comportement : comportement aux très faibles vitesses de cisaillement (viscoélastique puis viscoplastique) et comportement aux vitesses de cisaillement faibles à fortes. Les données serviront également au développement et à la validation de différentes techniques d'auscultation et de suivi.

Dans l'immédiat, le cadre scientifique et financier, pour la poursuite des recherches et l'acquisition des données d'entrée de base à Super Sauze et le développement méthodologique, est fourni par le projet *Samoa* et dans une moindre mesure par le projet européen *RETINA*.

Le projet national de l'ACI « *Prévention des Catastrophes Naturelles* » : *SAMOA* « *Surveillance et Auscultation de Mouvements Gravitaires Alpines* » sera financé pour les trois prochaines années, dans le cadre d'un thème prioritaire sollicité en 2002 par l'ACI. Je suis l'un des trois co-coordonateurs avec C. Delacourt et D. Amitrano. Ce projet comporte *quatre volets principaux* dont j'ai donné les détails au chapitre 6 : caractérisation géométrique et physique par méthodes géophysiques, caractérisation hydrique et chimique par méthodes géophysiques et traçage naturel et artificiel, mesures des déformations de surface et écoute sismique, corrélation sismicité-déformation. L'association de l'ensemble de ces méthodes de manière concertée sur un même site présente un potentiel très fort d'amélioration de la compréhension des instabilités de versants. Ces différentes opérations seront menées sur le glissement rocheux de la Clapière (Alpes-Maritimes), représentatif de mouvements gravitaires rigides, et sur le glissement-coulée de Super-Sauze, représentatif des mouvements gravitaires visqueux.

Le programme européen du 5<sup>ème</sup> PCRD : *RETINA* « *Realistic Evaluation of Temporal Interaction of Natural Hazards (Quakes, Volcanoes, Slides)* » a débuté en janvier 2002 pour 42 mois. Le site de Super Sauze a été choisi comme l'un des sites tests pour le suivi en continu et en temps réel des déplacements de surface par GPS. L'un des objectifs est de développer un kit GPS adapté à la surveillance de sites instables (solide, transmission en temps réel, performant et peu consommateur d'énergie, etc.).

### **10.2.2. Caractérisations physiques, géomécaniques et rhéologiques des marnes**

Une bonne caractérisation des formations est primordiale pour fournir les données d'entrée aux différentes modélisations. Elle l'est d'autant plus dans ces formations marneuses au comportement rhéologique évolutif (étude de l'interface mécanique des sols - mécanique des fluides - transition élasto-plastique – fluide-). Pour ces raisons, j'envisage la poursuite des caractéristiques géomécaniques et rhéologiques des marnes (au laboratoire et *in situ* par couplage de méthodes d'analyses géotechniques, rhéophysiques et morphologiques). L'hétérogénéité de ces formations et leur rôle dans l'évolution morphogénétique des versants le justifie pleinement, en particulier dans les petits bassins versants de montagne ravinés en bad-lands.

Les résultats pourront être utilisés comme données d'entrée pour la cartographie des aléas, pour les modèles de déclenchement et de propagation des coulées et des laves torrentielles, pour les modèles d'évolution des versants ou pour les modélisations des flux d'eau et de sédiments dans les petits bassins versants ravinés en bad-lands qui connaissent des crues soudaines caractérisées par l'importance du transport de sédiments. Les différentes opérations à mener sont détaillées dans le chapitre 7. Elles concernent le substratum marneux et les mélanges marnes-formations superficielles.

### 10.2.3. Modélisation

Le volet « modélisation » sera poursuivi même si de nombreux aspects auront été traités dans le cadre de la thèse de Jean-Philippe Malet (soutenance prévue au 1<sup>er</sup> semestre 2003) sur la modélisation cinématique des glissements-coulées par propagation fluide ou avec frottement. Les problèmes rencontrés sont nombreux : complexité des phénomènes, multiplicité des lois de comportement des matériaux en fonction de leur évolution dans le temps (rigide-plastique frottant, viscoélastique, viscoplastique, fluide), difficulté à choisir la loi de comportement la mieux adaptée au matériau, en particulier dans le cas de transition de la loi de comportement (par exemple, comportement aux très faibles vitesses de cisaillement (viscoélastique à viscoplastique) et comportement aux vitesses de cisaillement faibles à fortes, problème des interfaces, géométrie 3D, etc.

Certains modèles ou approches, pas encore utilisés, seront engagés dans le cadre du projet *Mote* de l'ACI pour lequel le financement d'une 3<sup>ème</sup> année en 2003 est acquis et dans celui du programme *Retina* qui va permettre de confronter les différentes approches engagées avec celles d'autres collègues : par exemple, la modélisation de l'endommagement et du fluage en utilisant essentiellement l'outil FLAC 2D pour des matériaux à comportement viscoplastique ou bien encore, la modélisation par éléments finis (élastoplastique avec écrouissage) pour pouvoir tester l'influence des conditions d'interface. Cette démarche permettra de faire progresser les modèles existants en comparant les résultats obtenus par chacun et en proposant des modifications aux codes de calcul.

Des travaux sont engagés par Alexandre Remaître dans le cadre de sa thèse (soutenance fin 2004) et du projet *ECLAT* du *PNRN* sur la caractérisation et la modélisation des changements de comportement des laves torrentielles au cours de leur propagation et la définition de l'extension de la zone à risque en fonction de la rhéologie évolutive des laves. Il mène une approche multidisciplinaire (géomorphologie, hydrodynamique, rhéologie et géomécanique) en vue de prendre en compte la multiplicité des processus intervenant dans la genèse d'une lave torrentielle.

En tenant compte des différents facteurs déclenchants, il s'agira de montrer les relations génétiques et la répartition spatiale et temporelle de ces différents phénomènes parfois intimement liés en raison :

- d'une part de la transition coulée (issue d'un glissement de terrain) – coulées de débris et laves torrentielles ;
- et d'autre part en fonction des mélanges et des proportions relatives des marnes dans les mélanges marnes-formations superficielles (cf. ci-dessus).

### 10.2.4. Rythmes et volumes de production de sédiments par mouvements de masse dans les petits bassins versants

Les travaux engagés à Draix en 1999 dans le cadre du *PNRH* se poursuivent actuellement dans le cadre de la thèse d'Albin Bernard débutée en octobre 2002 avec le soutien financier des programmes *RIO2* et *PNRH 2002-2003*. Dans les petits bassins versants ravinés en bad-lands, l'objectif est de déterminer les zones, les volumes et les rythmes de production de sédiments par mouvements de masse (de quelques dm<sup>3</sup> à quelques m<sup>3</sup>) qui intéressent principalement le manteau dégradé des marnes. Pour ce faire, une typologie « orientée » des ravines et une caractérisation de ce manteau seront réalisées. Cette localisation des zones « actives » et « contributives », c'est à dire rattachées au torrent, en matière de fourniture de matériaux par mouvements de masse pelliculaires ou plus profonds et l'estimation des volumes fournis seront envisagées à partir d'une modélisation couplée et distribuée associant les caractéristiques physiques, hydriques et géomécaniques des matériaux du manteau dégradé et du substratum.

### 10.2.5. Cartographie : de l'aléa au risque

Tout en continuant mes recherches actuelles sur la compréhension et la quantification de l'aléa, je souhaite dans les prochaines années progressivement les orienter aussi vers la cartographie du risque en développant des collaborations avec des collègues des Sciences Humaines et Sociales (Géographie humaine, Economie, ...) sur le point particulier de la vulnérabilité. Les travaux ont débuté

au début de l'année 2002 dans le cadre du programme européen *ALARM* (durée 36 mois) qui finance la thèse de Yannick Thiery.

Pour la cartographie du risque, le niveau de risque sera établi par des indicateurs à base physique pour chacun des types de mouvements identifiés. On tiendra compte des interactions entre les différents aléas dans une démarche multi-aléas. Ces approches pourront être qualitatives ou quantitatives (Leroi, 1996). Cela dépendra pour une large part de la connaissance acquise sur le phénomène, de sa complexité, des moyens techniques et financiers disponibles et de la disponibilité d'outils puissants et efficaces (SIG, modèles à base physiques, etc.).

Cette cartographie du risque sera dans un premier temps appliquée au bassin de Barcelonnette. Elle sera l'occasion :

- de développer des approches méthodologiques utilisant l'outil SIG, comme outil de gestion des données géoréférencées (édition de planches et cartes thématiques, intégration aisée des mises à jour ultérieures), mais surtout comme un outil d'analyses multicritères (Dikau *et al.*, 1996b ; Van Westen, 2000) intégrant différentes relations déterministes ou statistiques entre les paramètres ;
- de vérifier les conditions de transposition à d'autres sites et/ou à l'échelle régionale des connaissances acquises sur des sites de recherche ;
- de comparer les résultats avec ceux obtenus par la démarche classique de type « expert » qui consiste à délimiter « subjectivement » le zonage à partir des connaissances acquises. Cette méthode de cartographie est celle qui est utilisée actuellement en France pour la cartographie réglementaire des risques (PPR) ; elle repose sur des simplifications, en particulier pour la définition de la vulnérabilité qui se borne au simple inventaire des éléments exposés, sans tenir compte des différentes vulnérabilités de type corporel, structurel, fonctionnel, ... (Varnes, 1984 ; Flageollet, 1988 ; Leone *et al.*, 1996 ; Leroi, 1996). L'objectif est d'essayer de proposer une alternative à cette démarche classique.

Ces approches utilisent pour l'essentiel les mêmes données spatialisées géoréférencées sous forme de cartes thématiques ou de banques de données gérées par SIG. Le travail de relevé et de saisie sera donc valorisé à chaque fois. Dans ces deux types de cartographie, les outils SIG seront donc essentiels.

## *En guise de conclusion générale*

J'ai essayé de présenter une vision cohérente de mon travail mené depuis septembre 1995 à mon arrivée à l'Université Louis Pasteur après mon expérience pratique et concrète acquise pendant sept années passées dans un bureau d'études et de recherches géotechniques. Cette expérience m'a fait prendre conscience d'une part, du *large fossé* qui pouvait encore exister entre la communauté chargée d'appliquer les connaissances à des cas concrets et la communauté scientifique chargée de la production de cette connaissance théorique, et d'autre part *du besoin* que nous avions de disposer d'outils et de solutions « clé en main » ou de modèles relativement simples et efficaces pour répondre rapidement aux questions et attentes des décideurs et aménageurs sur le fonctionnement d'un site ou sur le risque encouru par une construction ou un aménagement.

Mon intégration à l'ULP constitue, doublement, une rupture et un véritable changement de cap :

- d'une part, par le passage d'une fonction d'Ingénieur-Géotechnicien en charge de dossiers appliqués et de la responsabilité d'un Bureau d'Etudes d'une quinzaine de personnes à celle d'enseignant-chercheur consacrant la totalité de son temps à l'enseignement et à la recherche fondamentale ;
- et d'autre part, par les phénomènes et les comportements très particuliers des matériaux étudiés dans des environnements de montagne assez nouveaux pour lesquels je n'avais pas d'expérience, à part une connaissance théorique bien insuffisante.

En effet, pendant ma thèse, puis durant mon métier d'ingénieur, je ne m'étais préoccupé que du fonctionnement, des mécanismes ou de la modélisation de glissements de terrain développés dans des marnes du nord-ouest de la France au comportement élasto-plastique (marnes du Bajocien, Bathonien, Kimméridgien et Callovo-oxfordien). Alors que mes recherches académiques étaient conduites sur des glissements-coulées complexes pouvant évoluer en laves torrentielles développés dans les marnes noires callovo-oxfordiennes des Alpes du Sud, au large spectre de comportement à l'interface mécanique des roches - mécanique des sols - mécanique des fluides (transition élasto-plastique - visco-plastique - fluide).

En raison du large spectre de comportement observé des matériaux et des phénomènes, j'ai privilégié le couplage de la **géomorphologie** et de la **géotechnique** pour conduire mes recherches. Tout en restant bien humble sur la portée des résultats obtenus en équipe, je pense que cela constitue en soit une certaine originalité et une richesse pour la communauté des sciences de la terre et de la géomorphologie en particulier.

Cette recherche permet aussi et surtout d'offrir à nos étudiants de second et de troisième cycle, des sites expérimentaux sur lesquels des travaux pratiques peuvent être entrepris et concrètement illustrés lors de stages.

Le scientifique et en particulier le géographe peut jouer un rôle majeur dans les réponses concrètes apportées aux questions de la société en raison de la dimension spatio-temporelle des aléas et des risques et de la complexité des mécanismes en jeu et des relations homme nature.

Au terme de ce mémoire, je tiens à rappeler que mes recherches ont été grandement favorisées par :

*une rapide intégration dans une équipe dynamique*

A mon arrivée à la Faculté de Géographie de l'Université Louis Pasteur en septembre 1995, j'ai été intégré à l'équipe « Risques géomorphologiques » animée par le Professeur Jean-Claude Flageollet du *CEREG*. L'équipe menait depuis quelques années des recherches dans le bassin de Barcelonnette dans les Alpes-de-Haute-Provence et dans celui de Vars dans les Hautes-Alpes. Ces recherches ont d'abord été soutenues entre 1991 et 1993 par le programme de recherches européen *EPOCH*

coordonné par le Professeur Flageollet. J'ai d'ailleurs apporté une contribution à ce programme sur les versants littoraux de la côte du Calvados (Maquaire, 1994b) étudiés depuis ma thèse. Un second programme européen *TESLEC* (juillet 1994-juin 1996) en a permis la poursuite. Dès mon arrivée, je me suis engagé dans ce programme et j'ai contribué à finaliser la proposition d'un troisième programme de recherches européen : *NEWTECH* qui a débuté pour deux années en juillet 1996.

Plusieurs doctorants étaient engagés sous la direction du Professeur Flageollet dans des recherches sur la cartographie des mouvements de terrain, notamment Brice Martin dans le bassin de Vars et Dominique Weber dans le bassin de Barcelonnette ; plusieurs étudiants géomorphologues avaient entrepris, ou étaient engagés dans, des travaux de recherches en maîtrise ou DEA.

Tout en apportant mes compétences en géotechnique, j'ai donc tout de suite trouvé à Strasbourg, une équipe dynamique et un environnement scientifique qui ont bien évidemment fortement contribué à mon intégration et à favoriser le développement de mes recherches.

#### *de nombreux étudiants et chercheurs*

En juin 1996, j'ai commencé à encadrer mes propres étudiants de maîtrise et de DEA. Ces nombreux étudiants puis doctorants ont permis de faire avancer assez vite les recherches conduites à l'échelle du site de Super-Sauze et à l'échelle du bassin de Barcelonnette avec une extension aux petits bassins de recherche de Draix. Ainsi, entre juin 1996 et octobre 2002, j'ai encadré 29 étudiants de maîtrise de géographie physique, 12 étudiants de DEA, 4 élèves ingénieurs de l'Ensis dans le cadre de leur stage de fin de seconde année. J'ai co-encadré la thèse de doctorat de Myriam Schmutz soutenue en 2000 et encadre 4 doctorants : Jean-Philippe Malet depuis novembre 1998, Alexandre Remaître depuis novembre 2000, Yannick Thiery depuis janvier 2002 et Albin Bernard depuis octobre 2002.

#### *de nombreuses collaborations*

De très nombreux collègues d'une quinzaine de laboratoires appartenant à plusieurs institutions de recherches (CEMAGREF, CNRS, IRD, universités, etc.) français ou étrangers ont apporté leur soutien. Ces nombreuses collaborations ont été précisées dans les différents chapitres.

#### *des financements importants*

A la suite au programme *NEWTECH*, les soutiens financiers ont été apportés soit par des programmes que j'ai coordonné (PNRN de 1997-1999, projet *MOTE* de l'ACI Catastrophes Naturelles 2000-2001, puis le projet *ECLAT* du PNRN de 2001-2002), soit des programmes coordonnés par Didier Richard et Nicolle Mathys du *CEMAGREF* de Grenoble pour les bassins de Draix, PNRH 1999-2000, PNRH 2001-2002 et MATE-RIO2 2002-2003.

## *Références bibliographiques*



- Agliardi, F., Crosta, G., Zanchi, A. (2001), Structural constraints on deep-seated slope deformation kinematics, *Engineering Geology*, 59 (1-2), pp. 83-102.
- Al Hayari, M. (1989), Une détermination des caractéristiques mécaniques résiduelles des versants naturels. Méthodes à l'équilibre limite et des éléments finis, Thèse de l'Université J. Fourier, Grenoble, 214 p.
- Alcantara-Ayala, I. (2002), Geomorphology, natural hazards, vulnerability and prevention of natural disasters in developing countries. *Geomorphology*, 47, pp. 107-124.
- Aleotti, P., Baldelli, P., Polloni, G. (1996), Landsliding and flooding event triggered by heavy rains in the Tanaro basin (Italy). *Proc. Int. Congr. Interpraevent Garmisch-Partenkirchen*, vol.1, pp. 435-446.
- Aleotti, P., Baldelli, P., Polloni, G. (1998), Soil slips, rock-block slides and stream hydraulic processes caused by heavy rains : their interaction and relevant hazard. *Proc. of the Second Conf. Environ Management ICEM2*, Wollongong, 10-13 Feb 1998, 1, pp. 553-564.
- Aleotti, P., Chowdhury, R. (1999), Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives. *Bull. Eng. Geol. Env.*, 58, pp. 21-44.
- Alexander, D. (1988), Valtellina landslide and flood emergency, Northern Italy. *Disaster*, 12, pp. 212-222.
- Alexandre, A., (1995), Suivi expérimental du ravinement des marnes dans les Baronnies, in *Trav. Lab. Géog. Phys.*, Paris, N° 23, 154 p.
- Allen, C.K., (1997), Analysis of Lawyer's Pointe Drive Landslide. Anderson Township, Cincinnati, Ohio, *Master's of Bowling Green State University*, 131 p.
- Almeida-Teixeira, M.E., Fantechi, R., Oliviera, R., Gomes Coelho, A. (1991), Natural hazards and engineering geology. Prevention and control of landslides and other mass movements. *Proc. of the Eur. School of Climatology and Natural Hazards course, Lisbon, 28 march to 5 april 1990*. Commission of the European Communities, 350p.
- Amar, S., Clarke, B.G.F., Gambin, M.P., Orr, T.L.L. (1991), The application of pressuremeter test results to foundation design in Europe, Ed. Balkema, 48 p.
- Amiot, A., Nexon, C. (1995), Inventaire des aléas dans le bassin de Barcelonnette depuis 1850. *Mémoire de maîtrise de géographie physique*. ULP, Strasbourg, 173 p. et annexes.
- Ammann, W.J. (1999), A new Swiss test-site for avalanche experiments in the Vallée de la Sionne (Valais). *Cold Regions Science and Technology*, 30, pp. 3-11.
- Anayi, J.T., Boyce, J.R., Rogers, C.D.F. (1989), Modified Bromhead ring shear apparatus. *ASTM, Geotechnical Testing Journal*, 12(2), 121-130.
- Anbalagan, R., Singh, B. (1996), Landslide hazard and risk assessment mapping of mountainous terrains – a case study from Kumaun Hymalaya, India. *Engineering Geology*, 43, pp. 237-246.
- Ancey, C. (2001), Debris Flows and Related Phenomena. In: Balmforth, N.,J., Provenzale, A. (eds), *Geomorphological fluid mechanics*, Springer, pp. 528-547.
- Anderson, M.G., Burt, T.P. (1985), Modeling strategies, in Anderson M.G. et Burt T.P. (Ed.): *Hydrological forecasting*, J.Wiley et Sons, pp. 552-625.
- Anderson, M.G., Hartshorne, J., Lloyd, D.M., Othman, A. (1998), Predicting rainfall-induced slope instability: a discussion. *Geotechnical Engineering*, 131, pp. 115-118.
- Angeli, M.C., Gasparetto, P., Menotti, R.M., Pasuto, A., Silvano, S. (1995), A system of monitoring and warning in a complex landslide in northeastern Italy. *Landslides News*, 8, pp. 12-15.
- Angeli, M.C., Pasuto, A., Silvano, S., (1999), Towards the definition of slope instability behaviour in the Alverà mudslide (Cortina d'Ampezzo, Italy), *Geomorphology*, 30, pp. 201-211.
- Angeli, M.C., Pasuto, A., Silvano, S., (2000), A critical review of landslide monitoring experiences. *Engineering Geology*, 55, pp. 133-147.
- Antoine, P., Biarez, J., Desvarreux, P., Mougin, J.P. (1971), Les problèmes posés par la stabilité des pentes dans les régions montagneuses. *Travaux Lab. Géol. Fac. Sc. Grenoble*, Tome 47, pp. 5-24.
- Antoine, P., Fabre, D., Giraud, A., Al Hayari, M. (1988), Propriétés géotechniques de quelques ensembles géologiques propices aux glissements de terrains. *Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Symposium on Landslides*, Lausanne, Balkema, Vol. 2, pp. 1301-1306.
- Antoine, P., Giraud, A., Meunier, M., Van Asch, T. (1995), Geological and geotechnical properties of the "Terres Noires" in the southeastern France: weathering, erosion, solid transport and instability. *Engineering Geology*, 40, 223-234.
- Arnal, C., Masure, Ph. (1999), L'évaluation de l'impact économique et financier de la catastrophe de Nîmes d'octobre 1988. In : Hubert, G., Ledoux, B. (dir.), *Le coût du risque. L'évaluation des impacts socio-économiques des inondations*, Paris, Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, pp. 115-121.
- Arrattano, M., Savage, W.Z., Pierson T.C. (1993). Application of kinematic wave theory to a debris flow at Lower Rudd Canyon, Farmington, Utah, in *Novosad S. et Wagner P. (Editors) : Proceedings of the VIIIth International*

- Conference and Field Workshop on Landslides in Czech and Slovak Republics, 28 August - 15 September 1993, Balkema, Rotterdam, pp. 123-130.
- Artru, P. (1972), *Les Terres Noires du bassin rhodanien (Bajocien supérieur à Oxfordien moyen): stratigraphie, sédimentologie, géochimie*. PhD Thesis, Lyon III University, 182p.
- 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, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 185 p.
- Augier, (1991), *L'évolution de l'occupation du sol à Enchastrayes (Alpes-de-Haute-Provence)*. Mémoire de DEA, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 48 p.
- Avolio, M.V., Di Gregorio, Mantovani, F., Pasuto, A., Rongo, R., Silvano, S., Spataro, W. (2000), Simulation of the 1992 Tessina landslide by a cellular automata model and future hazard scenarios. *JAG*, 2 (1), pp. 41-50.
- Awongo, M.-L. (1984), *Stratigraphie, sédimentologie et géochimie des Terres Noires du Jurassique moyen et supérieur de la Provence*, (sud-est de la France). Th. Doct., Univ. Aix-Marseille, 180p.
- Ballais, J.L., Maquaire, O., Ballais, H. (1984), Esquisse d'une histoire des mouvements de terrain dans le Calvados depuis 2 siècles. Colloque « Mouvements de terrain », 22-24 mars, *Documents du BRGM*, n° 83, pp. 476-483.
- Barbarella, M., Bitelli, G., Folloni, G., Gubellini, A., Russo, P., Tomassini, L. (1998), Deformation survey on landslides using terrestrial measurements and space techniques. V<sup>th</sup> International Symposium on Deformation Measurements, Fredericton, pp. 195-201.
- Barbas, A. (1981), *Contribution à l'utilisation de la méthode des éléments finis en mécanique des sols dans le domaine de l'élasto-plasticité*, Thèse de Docteur-Ingénieur ENPC.
- Beck, E. (2002), *Cartographie de la susceptibilité aux mouvements de terrain à l'aide de modèles. Applications à un bassin de risques de la commune de Jausiers (Alpes-de-Haute-Provence)*, Mémoire de D.E.A., ULP Strasbourg, 91 p.
- Bell, D.H. (ed.) (1992), *Landslides, Proc. 6<sup>th</sup> Int. Symp. on Landslides*, Christchurch, Nouvelle-Zélande, Balkema, Rotterdam, Netherlands, 2 volumes, 1495p.
- Berti, M., Genevois, R., Ghirotti, M., Tecca, P.R. (1996), *Mechanical characteristics and behaviour of a complex formation by landslide investigation and analyses*, in Proceedings of the VIII<sup>th</sup> International Symposium on Landslides, Trondheim, vol. 1, pp. 1155-1162.
- Bessero, G. (1993), Un exemple d'utilisation du GPS différentiel en levé hydrographique. *Revue Hydrographique Internationale*, LXX (2), pp. 51-63.
- Besson, L. (1996), *Les risques naturels en montagne. Traitement, prévention, surveillance*. Artès-Publialp, 438p.
- Biarez, J., Boucek, B. (1987), Viscoplasticité de l'argile in situ et en laboratoire. *C. R. 8e Congrès Int. de Méca. des Sols et des Travaux de Fondations*, Moscou, vol. 1, pp. 51-56.
- Bisci, C., Dramis, F. (1993), The concept of activity in Geomorphology : problems and evaluation methods. CERG internal report, 21p.
- Bitri, A., Le Bégat, S., Baltassat, J.M. (1998), Shear(wave velocity determination of soils from in-situ Rayleigh waves measurements. 4<sup>th</sup> meeting of EEGS, Barcelona, Spain.
- Blondeau, F. (1976), *Les méthodes d'analyse de stabilité*, in Bulletin de Liaison du Laboratoire des Ponts et Chaussées, Numéro spécial Stabilité des Talus, pp. 56-62.
- Bogaard, T.A., Antoine, P., Desvarreux, P., Giraud, A., van Asch, T.W.J. (2000), The slope movements within the Mondorès graben (Drôme, France) : the interaction between geology, hydrology and typology. *Engineering Geology*, 55 (4), pp. 297-312.
- Bonnard, Ch. (2001), *Comportement passé, présent et futur des grands versants instables en fonction de l'évolution climatique*. Rapport d'études Versinclin, EPFL, 225 p.
- Bonnard, Ch. (ed.) (1988), *Landslides, Proc. 5<sup>th</sup> Int. Symp. on Landslides*, Lausanne, Balkema, Rotterdam, Netherlands, 3 volumes, 1564p.
- Bossu, G., *Cartographie géomorphologique de la vallée du torrent d'Abriès (Commune de Jausiers, Alpes-de-Haute-Provence)*. Mémoire de maîtrise, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 81 p.
- Boyce, J.R., Anayi, J.T., Rogers, C.D.F. (1988), Residual strength of soils at low normal stresses. Proceedings V<sup>th</sup> International Symposium on Landslides, Lausanne, Balkema, Vol. 1, pp. 85-88.
- Brabb, E.E. (1984), Innovative Approaches to Landslide Hazard and Risk Mapping, In: Proc. 4<sup>th</sup> Int. Symp. Landslides, Toronto, Vol. 1, pp. 307-323.
- BRGM (1974), Barcelonnette. Notice géologique de la carte XXXV-39. (Bureau des Recherches Géologiques et Minières).
- Bromhead, E., Dixon, N., Ibsen, M.L. (eds.) (2000), *Landslides, in research, theory and practice. Proc. 8<sup>th</sup> Int. Symp. on Landslides*, Cardiff, T. Telford., 3 volumes, 1684p.
- Bromhead, E.N. (1979), A simple ring shear apparatus. *Ground Engineering*, 15(5), pp. 40-44.
- Bromhead, E.N. (1986), *The stability of slopes*, Surrey University Press, Chapman & Hall, New-York, 304 p.

- Bromhead, E.N. (1987), Groundwater and landslides : principles and practice, in Memoire of the Geological Society of China 9, pp. 147-158.
- Bromhead, E.N., Curtis, R.D., Shofield, W. (1988), Observations and adjustment of geodetic survey network for measurement of landslide movement. V<sup>th</sup> International Symposium on Landslides, Lausanne, Balkema, Vol. 1., pp. 383-386.
- Brown, C.J., karuma, R., Askhenazi, V., Roberts, G.W., Evans, R.A. (1999), Monitoring of structures using the GPS. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Structures and Buildings, 134 (1), pp. 97-105.
- Bruno, F., Marillier, F. (2000), Test of Hight-Resolution seismic reflection and other geophysical techniques on the Boup Landslide in the Swiss Alps. Surveys in Geophysics, Vol. 21, 4, pp. 333-348.
- Brunsdon, D., Prior, D.B. (1984), Slope Instability. John Wiley and Sons, Chichester, U.K., 620p.
- Brunsdon, D., Ibsen, M.L. (1994), The nature of the european archive of historical landslide data, with specific reference to the United Kingdom. In: Casale, R., Fantechi, R., Flageollet, J.C. (Eds.), The Temporal Occurrence and Forecasting of Landslides in the European Community, Science Research Development, European Commission, 1, pp. 21-70.
- Brunsdon, D., Ibsen, M.L., Bromhead, E., Collison, A. (1996), Final national report June 1996 - King's College London, United Kingdom, in The temporal stability and activity of landslides in Europe with respect to climatic change, European Commission, Science Research Development, practical information and programmes, Prog. TESLEC EV5V-CT94-0454, Bruxelles, vol 2, pp. 309 - 408.
- Bufalo, M. (1989), L'érosion des terres noires dans la région du Buëch (Hautes-Alpes, France). Thèse Doct., Univ. Aix-Marseille III, 230p.
- Bulmer, M., Mantovani, F., Petley, D., Murphy, W., Pasuto, A., Jibson, W.R., Silvano, S., Keefer, D. (2002a), The interpretation of landslide monitoring data for movement forecasting – an analysis of data from the Tessina landslide in Italy. In IAG Symposium "Relationships between man and the mountain environment in terms of geomorphological hazards and human impact in Europe". IAG Proceedings, Dornbirn (Austria), 14 July 2002 edited by L. Borgatti et M. Soldati, pp. 52-53.
- Bulmer, M., Mantovani, F., Murphy, W., Petley, D. (2002b), SAR Interferometry in landslide monitoring : experiences from Black Ven Landslide, Dorset 2001. In Proceedings of the Symposium "Geomorphology: from expert opinion to modelling. A tribute to Professor Jean-Claude Flageollet", 26-27 Avril 2002, Strasbourg. Édité par D. Delahaye, F. Levoy et O. Maquaire. Publications Cerg, pp. 21-28.
- Camapum de Carvalho, J. (1985), Étude du comportement d'une marne noire compactée. PhD Thesis, Toulouse I University, 181p.
- Canadian Geotechnical Society (1984), Landslides, Proc. 4<sup>th</sup> Int. Symp. on Landslides, Toronto, Canada, 3 volumes, 1484p.
- Cancelli, A., Nova, R. (1985), Landslides in soil debris cover triggered by rainstorm in Valtellina (Central Alps, Italy). In: Proc. 4<sup>th</sup> Int. Conf. on Landslides, Tokyo, 1, pp. 267-272.
- 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, n° 31, pp. 249-276.
- Carrara, A., Merenda, L. (1976), Landslide inventory in Northern Calabria, southern Italy. Geol. Soc. Am. Bull., 87, pp. 1153-1162.
- Carrara, A. (1983), Multivariate methods for landslide hazard evaluation. Mathematical Geol., 15, pp. 403-426.
- Carrara, A. (1988), Landslide hazard mapping by statistical methods: a black box model approach. In: Proc. of the Workshop on Natural Disaster in European Mediterranean Countries. Perugia, Italy. Consiglio Nazionale delle Ricerche.
- Carrara, A., Cardinali, M., Guzzetti, F. (1992), Uncertainty in assessing landslide hazard and risk. ITC Journal, 2, pp. 172-183.
- Carrara, A., Guzzetti, F. (eds) (1995), Geographical Information Systems in assessing natural hazards. International workshop, Perugia, September 20-22, Kluwer Academic Publishers, 353 p.
- Casagli, N., Farina, P., Leva, D., Nico, G. et Tarchi, D. (2002), Ground-based SAR Interferometry for monitoring landslides. In IAG Symposium "Relationships between man and the mountain environment in terms of geomorphological hazards and human impact in Europe". IAG Proceedings, Dornbirn (Austria), 14 July 2002 edited by L. Borgatti et M. Soldati, pp. 93-94.
- Casale, R., Fantechi, R., Flageollet, J.C. (1994), The Temporal Occurrence and Forecasting of Landslides in the European Community. Practical information and Programmes, Science Research Development, European Commission, EUR 15805 EN, 2 volumes, 959p.
- Casale, R., Margottini, C. (eds.) (1999), Floods and landslides. Integrated Risk Assessment, Berlin, Springer, 373p.
- Casson, B., Baratoux, D., Delacourt, C., Allemand, P. (2002), La Clapière landslide motion observed from aerial differential high resolution DEM. Soumis à Eng. Geology.
- Catalao, J., Catita, C., Miranda, J. (2002), Photogrammetric analysis of the coastal erosion in the Algarve (Portugal). Géomorphologie: Relief, Processus, Environnement, 2-2002, pp. 119-126.

- Catenacci, V. (1992), Geological and geoenvironmental failure from the post-war to 1990, Italy. Servizio Geologico Nazionale – Memorie Descrittive della Carta Geologica d'Italia, 301p.
- Chandler, J. (1999), Effective application of automated digital photogrammetry for geomorphological research. *Earth Surface Processes and Landforms*, 24, pp. 51-63.
- Chodzko, J., Lecompte, M. (1992), Suivi expérimental du ravinement dans les Baronnies, *Trav. Lab. Geog. Phys. Paris*, VII, 20, 111p.
- Chondroyannis, P. (1992), Ubaye, la forêt reconstruite. Le sentier de découverte du Riou-Bourdoux. Editions Office National des Forêts, Barcelonnette, 112 p.
- Chowdhury, R.N. (1976), The mechanisms of natural slope failures in the greater Wollongong area of new South Wales. *Search*, Sydney, 7, 9, pp. 396-397.
- Chowdhury, R.N. (1984), Recent developments in landslide studies : probabilistic methods, state of the art report. Session VII (a). IV Internat. C.R. Symposium in Landslides, Toronto, vol. 1, pp. 209-228.
- Chowdhury, R.N., Flentle, P.N. (1998), A landslide database for landslide hazard assessment. In: Workshop hazard assessment – Progressing from qualitative to quantitative approaches, Wollongong, February 8-9.
- Chung, C.F., Fabbri, A.G. (1998), Three Bayesian prediction models for landslide hazard. *Proceeding of IAMG '98*. A. Buccianti, G. Nardi, R. Potenza (Eds). Isola d'Ischia, Naples. pp. 204-211.
- Clerici, A., Perego, S., Tellini, C., Vescosi, P. (2002), A procedure for landslide susceptibility zonation by the conditional analysis method. *Geomorphology*, In Press
- Colas, G., Locat, J., (1993), Glissement et coulée de La Valette dans les Alpes de Haute-Provence. Présentation générale et modélisation de la coulée. *Bull. Liaison Labo. P. et Ch.*, 187, pp. 19-28.
- Collectif (1993). Sécheresse et constructions : guide de prévention. Ministère de l'Environnement. Direction de la prévention des pollutions et des risques. Délégation aux Risques Majeurs. *La Documentation Française*, Paris, 51 p.
- Collectif (1997), Plans de prévention des risques naturels (PPR) : guide général. Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement (Direction de la prévention des pollutions et des risques) et Ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement. *La Documentation Française*, Paris, 76p.
- Collectif (1999), Plans de prévention des risques naturels (PPR) : risques de mouvements de terrain. Guide méthodologique. Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement (Direction de la prévention des pollutions et des risques) et Ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement (Direction générale de l'urbanisme, de l'habitat et de la construction). *La Documentation Française*, Paris, 71p.
- Collison, A., Brunsden, D., Ibsen, M.L., Bromhead, E. (1996), Final report June 1996 - King's College London, in Programme TESLEC (The Temporal Stability and Activity of Landslides in Europe with Respect to Climatic Change).
- Compagnon, F., Guglielmi, Y., Mudry, J., Follacci, J.P., Ivaldi, J.P. (1997), Approche chimique et isotopique de l'origine des eaux en transit dans un grand glissement de terrain : exemple du glissement de la Clapière (Alpes-Maritimes). *C.R.Acad.Sci.*, Paris, 325 (II), pp. 565-570.
- Corominas, J., Moya, J. (1996), Historical landslides in the Eastern Pyrenees and their relation to rainy events. In: Chacon, J., Irigaray, C., Fernandez, T. (Eds.), *Landslides*. A.A. Balkema, Rotterdam, pp. 125-132.
- Corominas, J., Moya, J., Baeza, C., Carrera, J., Gili, J.A., Ledesma, A., Lloret, A., Rius, J. (1997), Progress national report June 1997 - UPC Group, in Programme NEWTECH (New Technologies for Landslide Hazard Assessment and Management in Europe).
- Corominas, J. (2000), Landslides and Climate, Keynote Lecture, In: *8<sup>th</sup> Int. Symp. on Landslides*, Cardiff, 33p.
- Corominas, J., Moya, J., Lloret, A., Gili, J.A., Angeli, M.G., Pasuto, A., Silvano, S. (2000), Measurement of landslide displacements using a wire extensometer. *Engineering Geology*, 55, pp. 149-166.
- Costa, J.E. (1984), *Physical geomorphology of debris flows*. Developments and Applications in Geomorphology, Springer-Verlag, pp. 268-317
- Costa, J.E., Wieczorek, G.F. (eds.) (1987), *Debris Flows/Avalanches: Process, Recognition and Mitigation. Reviews in Engineering Geology*, Vol. 7, Geological Society of America, Boulder, Colorado, 239p.
- Costet, J., Sanglerat, G. (1981), *Cours pratique de mécanique des sols*. 2 tomes, Dunod Ed., 3<sup>ème</sup> Edition, 321 p. et 464 p.
- Coulmeau, P. (1987), Quelques éléments sur la géomorphologie et les processus érosifs observés dans le bassin du Laval. Les bassins versants expérimentaux de Draix, Compte-Rendu de Recherche N°1 en Erosion et Hydraulique Torrentielle, Cemagref, Grenoble, 128p.
- Coussot, P. (1993), Rhéologie des boues et laves torrentielles. Etude de dispersions et suspensions concentrées. *Etudes Montagne*, vol. 5, Cemagref Grenoble, 415p.
- Coussot, P., Piau, J.M. (1993), L'écoulement des boues. *La recherche*, vol. 24, pp. 1084-1091.
- Coussot, P. (1994), Rhéologie des laves torrentielles. *Houille Blanche*, 3, pp. 32-37
- Coussot, P. (1996), *Les laves torrentielles. Connaissances de base à l'usage de l'ingénieur*, Collection Etudes du Cemagref 23, 385 p.

- Coussot, P., Meunier, M. (1996), Recognition, classification and mechanical description of debris flows. *Earth Science Review*, vol. 40, pp. 209-227.
- Coussot, P., Piau, J.M. (1994), On the behavior of fine mud suspensions. *Rheol. Acta.*, 33, pp. 175-184.
- Craig, D. (1981), Mudslide plug flow within channels, in *Engineering Geology* 17, pp. 273-281.
- Crozier, M.J. (1984), *Field Assessment of Slope Instability*. In: Brunsen, D., Prior, D.B. (eds.), *Slope Instability*, John Wiley & Sons, New York, pp. 103-142.
- Crozier, M.J. (1986), *Landslides: Causes, Consequences and Environment*. Croom Helm, London, 252p.
- Cruden, D.M., Brown, W.M. (1992), Progress towards the World landslide inventory. In: Proc. of 6<sup>th</sup> Int. Symp. on landslides, Christchurch, 1, pp. 59-64.
- Cruden, D.M., Varnes, D.J. (1996), Landslide Types and Processes. Chap. 3, in Turner, A.K., Schuster, R.L. (eds.), *Landslides : investigation and mitigation*. Transportation Research Board - National Research Council, Special Report 247, Washington, D.C., *National Academy Press*, pp. 36-75.
- Cummings, D., Clark, B.R. (1988), Use of seismic refraction and electrical resistivity surveys in landslide investigation. *Bull. Assoc. Ang. Geol.*, 25 (4), pp. 459-464.
- D'Ercole, R. (1994), Les vulnérabilités des sociétés et des espaces urbanisés : concepts, typologie, modes d'analyse. *Revue de Géographie Alpine*, n°4, tome LXXXII, pp. 87-97.
- Dai, F.F.C., Lee, C.F. (2002), Landslides characteristics and slope instability modeling using GIS, Lautau Island, Hong Kong. *Geomorphology*. 42 , pp. 231-228.
- Darve, F., Laouafa, F. (1999), Plane strain instabilities in soil. Application to slopes stability. in Pande, R., Pietruszczak, G., Schweiger, E. (eds): *Numerical Models in Geomechanics*, Balkema, Rotterdam, pp. 85-90.
- Dauphiné, A. (2001), Risques et catastrophes. Observer – Spatialise – Comprendre – Gérer. Collection U Géographie, Armand Colin Ed., 288p.
- De Vanssay, B. (1996), Risques naturels et planification préventive. Préventique-sécurité, Bordeaux, Groupe Préventique, n°29, sept.-oct., pp. 92-97.
- Del Claudio, V., Wasowski, J., Pierri, P., Macia, U., Calcagnile, G. (2000), Gravimetric study of a retrogressive landslide in Southern Italy. *Surveys in Geophysics*, Vol. 21, 4, pp. 391-406.
- Delacourt, C., Squarzonni C., et Allemand P. (2002), Spatial and temporal evolution of the La Valette landslide observed by SAR interferometry. *Soumis a Eng. Geology*.
- Delahaye, D., Levoy, F., Maquaire, O. (eds.) (2002), "Geomorphology: from expert opinion to modelling. A tribute to Professor Jean-Claude Flageollet", In *Proceedings of the Symposium 26-27 Avril*, Strasbourg. Publications Cerg, 381p.
- Descloîtres, M. (1998), *Les sondages électromagnétiques en domaine temporel (TDEM) : application à la prospection d'aquifères sur les volcans de Fogo (Cap Vert) et du Piton de la Fournaise (La Réunion)*, Thèse de doctorat, UPMC, Paris, 228 p.
- Desitter, A., Bates, P.D., Anderson, M.G., Hervouet, J.M. (2000), Development of one, two and three-dimensional finite element groundwater models within a generalized object-oriented framework. *Hydrological Processes*, 14, pp. 2245-2259.
- Di Gregorio, S., Rongo, R., Siciliano, C., Sorriso-Valvo, M., Spataro, W. (1999), Mt Ontake landslide simulation by the cellular automata model SCIDDICA-3. *Physics and Chemistry of the Earth*, 24 (2), pp. 97-100.
- Dikau, R., Brunnsden, D., Schrott, L., Ibsen, M. (eds.) (1996a), *Landslide recognition : identification, movement and causes*. Wiley, 251p.
- Dikau, R., Cavallin, A., Jäger, S. (1996b), Databases and GIS for landslide research in Europe. *Geomorphology, special issue*, 15, pp. 227-239.
- Dikau, R. (1999), The recognition of landslides, in R. Casale and C. Margottini (eds.), *Floods and landslides*, Berlin, Springer, pp. 39-44.
- Dixon, T.H. (1991), The Global Positioning System. *Review of Geophysics*, 29, pp. 249-276.
- Donati, L., Turrini, M.C. (2002), An objective method to rank the importance of the factors predisposing to landslide with the GIS methodology: application to an area of the Apennines (Valnerina, Perugia, Italy). *Engineering Geology*, 63, pp. 277-289.
- DRM (1990), Les études préliminaires à la cartographie réglementaire des risques majeurs. Délégation aux Risques Majeurs, La Documentation Française, 143p.
- Dubois-Maury, J. (2001), Les risques naturels : quelles réponses ? *Dossiers d'actualité mondiale Problèmes politiques et sociaux*, n°863, 21 septembre, La Documentation Française, Paris, 88p.
- Dumolard, B. (1984), Mise au point d'une technique d'étude et de mesure de l'altération des marnes dans les terres noires du Bathonien-Oxfordien, précédée d'une étude géologique des bassins-versants expérimentaux de Draix (Région de Digne, Basses Alpes, France). Rapp. Stage USMG, LIRIGM, CEMAGREF, 125p.
- Duranthon, J.-P. (2000), Application de la méthode GPS de localisation par satellite à la surveillance de sites naturels instables. *Bull. Liaison des Labo. des Ponts et Chaussées*, 228, pp. 47-57.

- Durville, J.-L., Serratrice, J.-F. (1997), Description des roches et des massifs rocheux, exploitation de deux bases de données, in *Bull. Liaison Labo. Ponts Chaussées*, N° 211, pp. 73-87.
- Einstein, H. (1988), *Landslide risk assessment procedure*. in Bonnard (ed), V<sup>th</sup> International Symposium on *Landslides*, Lausanne, Balkema, Vol. 2, pp. 1075-1090.
- Embleton, C., and Embleton C. (eds.) (1997), *Geomorphological Hazards of Europe. Developments in Earth Surface Processes 5*. Amsterdam : Elsevier, 524p.
- Engel, T., (1986), Nouvelles méthodes de mesure et d'analyse pour l'études des mouvements de sol en terrains instables. PhD Thesis Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), 108p.
- Enoki, M., Yagi, N., Yatabe, R. (1993), Shearing characteristics of landslide clay, in Novosad S. & Wagner P. (Editors) : *Proceedings of the VIIIth International Conference and Field Workshop on Landslides in Czech and Slovak Republics*, 28 August - 15 September 1993, Balkema, Rotterdam, pp. 123-130.
- EPFL (1985a), *Projet d'école. Détection et utilisation des terrains instables (DUTI). Rapport final, rapport général*. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, juin, 229 p. + annexes 36 p.
- EPFL (1985b), *Les travaux de mensuration en terrain instable. Projet d'école "Détection et Utilisation des Terrains Instables"*. DUTI. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), 27 pp.
- Evin, M. (1990), Le glissement de La Valette (Barcelonnette). *Bull. Assoc. Géogr. Franç.*, 2, Paris, pp. 149-158.
- Evin, M. (1997), *Géologie de l'Ubaye*. Sabença de la Valeia Ed., 30 p.
- Evrard, H., Léger, B., Spinnler, Y., (1990), Télésurveillance des falaises de l'autoroute A40. *Revue Générale des Routes et Aéroports*, 680, pp. 11-18.
- Fabre, D., Ritzenthaler, A., Maquaire, O., Ambroise, B., Thiery, Y., Truchet, E., Malet J-Ph., Monnet, J. (2002), Apport du pénétromètre dynamique léger à énergie variable pour la connaissance du manteau d'altérites de Terres Noires. In *Proceedings of the Symposium "Geomorphology: from expert opinion to modelling. A tribute to Professor Jean-Claude Flageollet"*, 26-27 Avril 2002, Strasbourg. Édité par D. Delahaye, F. Levoy et O. Maquaire. Publications Cerg, pp. 185-192.
- Fanthou, T., Kaiser, B. (1990), Évaluation des risques naturels dans les Hautes-Alpes et la Savoie : le recours aux documents d'archives et aux enquêtes. *Bull. Assoc. Géogr. Français*, 4, pp. 323-341.
- Fantucci, R., SorrisoValvo, M. (1999), Dendrogeomorphological analysis of a slope near Lago, Calabria (Italy)., *Geomorphology*, 30, 1-2, pp. 165-174
- Faure, R.M., Pham, M., Robinson, J.C., Jolly, P. (1996), *Three-dimensional slope stability by the Perturbation Method*, in *Proceedings of the VIIIth International Symposium on Landslides*, Trondheim, vol. 1, pp. 1207-1212.
- Filliat, G. (Ed.) (1981), *La pratique des sols et des fondations*. Ed. du Moniteur, 1392 p.
- Filliat, G., Camelan, J.C. (1982), Analyses et essais de sols en laboratoire. In : Filliat, G., *La pratique des sols et des fondations*. Ed. du Moniteur, pp. 157-197.
- Finlay, P.J., Fell, R. (1997), Landslides : risk perception and acceptance. *Can. Geotech. J.*, 34, pp 169-188.
- Fix, R.E., Burt, T.P., (1995), Global Positioning System : an effective way to map a small area or catchment. *Earth Surface Processes and Landforms*, 20, pp. 817-828.
- Flageollet, J. C. (1988), *Les mouvements de terrain et leur prévention*, Paris : Masson, 224p.
- Flageollet, J. C. (1995), Knowledge of landsliding for prevention and rescue, in T. Horlick-Jones, A. Amendola and R. Casale (eds.), *Natural risk and civil protection*,. London : E. & FN Spon, pp. 255-267.
- Flageollet, J. C. (1996), The time dimension in the study of mass movements, *Geomorphology*, 15, pp. 185-190.
- Flageollet, J.-C., Maquaire, O., Weber, D. (1996), The temporal stability and activity of landslides in Europe with respect to climatic change (TESLEC), Final National Report. In: Dikau R., et al. (Eds.), C.E.C. Environment Program, Contract EV5V-CT94-0454), 126-186.
- Flageollet, J.-C., Maquaire, O., Weber, D. (1996b), Evolutionship between landslides and climatic conditions. TESLEC, programme DG XII *Thematic Report*, pp. 49-58.
- Flageollet, J. C. (1999), Landslide hazard - a conceptual approach in risk viewpoint. In: R. Casale and C. Margottini (eds.), *Floods and landslides*, Berlin, Springer, pp. 3-18.
- 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, pp. 65-78.
- Flageollet, J.-C., Malet, J.-P., Maquaire, O. (2000), The 3-D structure of the Super-Sauze earthflow : a first stage toward modelling its behaviour. *Physics and Chemistry of the Earth*, Part B, n° 25, vol. 9, pp. 785-791.
- Follacci J.-P. (1999) - Seize ans de surveillance du glissement de La Clapière (Alpes-Maritimes). *Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, 220, 35-51.
- Frappa, M., Lebourg, T. (2001), Mesures géophysiques pour l'analyse des glissements de terrain. *Revue Française de Géotechnique*. N°95-96, 33-39-
- Fredlund, D.G., Rahardjo, H. (1993), *Soil mechanics for unsaturated soils*, Ed. J. Wiley & Sons, New-York, 517 p.

- Freeze, R.A. (1987), Modeling interrelationships between climate, hydrology and hydrogeology and the development of slopes In Anderson M.G. & Richards K.S. (Ed.) : Slope stability, J.Wiley & Sons, London, pp. 235-302.
- Freeze, R.A. (1987), *Modeling interrelationships between climate, hydrology and hydrogeology and the development of slopes*. In Anderson M.G. & Richards K.S. (Ed.) : Slope stability, Wiley & Sons, London.
- Fruneau, B., Achache, J., Delacourt, C. (1996), Observation and modelling of the Saint-Etienne-de-Tinée landslide using SAR interferometry. *Tectonophysics*, 265, pp. 181-190.
- Gallisson, L. (1997), *Auscultation topométrique du glissement de terrain de Barcelonnette par tachéométrie et GPS : Comparaisons des résultats*. Rapport de stage, ULP Strasbourg, 52 p. et 2 annexes.
- Gallisson, L. (1998), *Utilisation du GPS de précision pour la mesure de faibles déformations du sol*. Mémoire de D.E.A., ULP Strasbourg, 108 p. et 25 p. annexes.
- Gambin, M. (1979), Vingt ans d'usage du pressiomètre en Europe. VII<sup>ème</sup> Congrès Européen de Mécanique des Sols et des Travaux de Fondations, Brighton, 421 p.
- Garleff, K., Kugler, H., Poschinger, A. V., Sterr, H., Strunk, H., and VillWock, G. (1997), Germany, in C. Embleton and C. Embleton (eds.), *Geomorphological hazards of Europe*. Amsterdam : Elsevier, 147-177.
- Gasparetto, P., Mosselman, M., van Asch, T.W.J. (1996), The mobility of the Alverà landslide (Cortina d'Ampezzo, Italy). *Geomorphology*, 15, pp. 327-335.
- Genêt, J., Malet, J. Ph. (1997), *Détermination de la structure tridimensionnelle du glissement de terrain de Super Sauze par une investigation géotechnique*. Mémoire de maîtrise, ULP Strasbourg, 138 p. et annexes.
- Genrich, J.F., Bock, Y. (1992), Rapid resolution of crustal motion at short ranges with Global Positioning System. *Journal of Geophysical Research*, 96, pp. 3261-3269.
- GéoSlope (1994), *User's Manual SLOPE/W, SIGMA/W, SEEP/W*, Geo-Slope Ltd, Calgary.
- Gervaise, J., Mayoud, M., Beutler, G., Gurtner, W. (1985), Test of GPS in the CERN-LEP control network. In : Welsch, W.M., Lapine, L.A. (Eds). Proceedings of the International Federation of Surveyors, Doppler and GPS measurements for engineering surveys, Munich, pp. 337-358.
- Gili, J.A., Corominas, J., Rius, J., (2000), Using Global Positioning System techniques in landslide monitoring. *Engineering Geology*, 55, 167-192.
- Girard, G., Ledoux, E., Villeneuve, J.P. (1991), Le modèle couplé : simulation conjointe des écoulements de surface et des écoulements souterrains sur un système hydrologique, in *Cahiers de l'ORSTOM Série Hydrologie*, 9(4), pp. 35-52.
- Girault, F. (1992), *Auscultation de versant instables par imagerie numérique*. Thèse Ingénieur CNAM, Paris, 193 p.
- Girault, F. (1997), Auscultation du glissement du versant ouest de la montagne de Piniès dans la Drôme (France). *Revue Française de Géotechnique*, 79, pp. 13-18.
- Girault, F., Memier M. (1997), Quelle photogrammétrie pour l'auscultation de versants instables ?, *Bulletin de la Société Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, 145, pp. 24-32.
- Glade, T. (2000), Modeling Landslide Triggering Rainfall Tresholds at a Rande of Complexities. In: *Proc. 8<sup>th</sup> Int. Symp. on Landslides*, Cardiff, Telford, Vol. 2, pp. 633-640.
- Gökceoglu, C., Aksoy, H. (1996), Landslide susceptibility mapping of the slopes in the residual soils of the Mengen region (Turkey) by deterministic stability analysis and image processing techniques. *Engineering Geology*, 44, pp. 147-161.
- Goudie, A. (Ed.). (1990), *Geomorphological Techniques*, British Geomorphological Research Group, 570 p.
- Graham, R.W., Read, R.E. (1984), Small format aerial surveys from light and microlight platforms. *Journal of Photographic Science*, 32, 3, pp. 100-110.
- Grandjean, G., Bitri, A., Guillen, A. (2000), Least squared generalized inversion coupled with Metropolis optimization for estimating shear-wave velocity from Rayleigh wave measurements. 6<sup>th</sup> meeting EEGS, Bochum, Germany.
- Gross, Q. (1998), *Utilisation de la photographie aérienne basse altitude pour la réalisation de M.N.T. : Application au glissement-coulée de Poche (bassin de Barcelonnette)*. Rapport de stage, ULP Strasbourg, 52 p. et 2 annexes.
- Grunert, J. and Hardenbicker, U. (1997), The frequency of landsliding in the north Rhine area and possible climatic implications. in J. A. Matthews, D. Brunnsden, B. Frenzel, B. Gläser, and M. M. Weib (eds.) *Rapid mass movement as a source of climatic evidence for the Holocene*. Stuttgart : Gustav Fischer Verlag, 159-170.
- Guellec, P., Humbert, P., Ricard, A. (1976), *La méthode des éléments finis et le système ROSALIE*, *Bull. de Liaison des Laboratoire des Ponts et Chaussées*, 81, pp. 152-162.
- Guglielmi, Y., Bertrand, C., Compagnon, F., Follacci, J.P., Mudry, J. (2000), Acquisition of water chemistry in a mobile fissured basement massif : its role in the hydrogeological knowledge of the La Clapiere landslide (Mercantour massif, southern Alps, France). *Journal of Hydrology*, 229, pp. 138 - 148.

- Guglielmi, Y., Veengeon, J.M., Bertrand C., Mudry, J., Follacci, J.P. Giraud, A. (à paraître), Hydrogeochemistry : an investigation tool to evaluate infiltration into large moving rock masses (case study of La Clapière and Séchillienne alpine landslides). *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*.
- Guillon, J. (2001), *Interprétation morphologique de l'évolution du glissement-coulée de Poche et caractérisation physico-mécanique des matériaux marneux*. Mémoire de maîtrise, ULP Strasbourg, 118 p.
- Gulla, G., Nicolletti, P.G., Sorriso-Valvo, M. (1988), A portable device for measuring displacements along fractures. V<sup>th</sup> International Symposium on Landslides, Lausanne, Balkema, Vol. 1., pp. 423-426.
- Guzzetti, F. (2000), Landslide fatalities and the evaluation of landslide risk in Italy. *Engineering Geology*, 58, pp. 89-107.
- Hack, R. (2000), Geophysics for Slope Stability. *Surveys in Geophysics*, Vol. 21, 4, pp. 423-448.
- Hampelé, N. (1997), Cartographie géomorphologique adaptée à la gestion des risques mouvements de terrain dans le bassin de Barcelonnette. Mémoire de D.E.A., ULP Strasbourg, 77 p.
- Hancock, G.R., Willgoose, G.R. (2001), The interaction between hydrology and geomorphology in a landscape simulator experiment. *Hydrological Processes*, 15, pp. 115-133.
- Haneberg, W.C. (1995), Groundwater flow and the stability of heterogeneous infinite slopes underlain by impervious substrata, in Haneberg W.C. & Anderson S.A. (Editors) : Clay and shale slope instability : Boulder, Colorado, Geological Society of America Reviews in Engineering Geology, Vol. X, pp. 63-77.
- Hansen, A. (1984), Landslide hazard analysis. In: *Brunsdon, D., Prior, D.B. (eds), Slope Instability*, Wiley, New York, pp. 523-602.
- Hartlen et Viberg (1998),
- Heimes, F.J., Poole, P., Brechtken, R., Puruckherr R. (1993), *LEO : Local Earth Observation*, in Proceedings of the International Symposium "Operationalization of Remote-Sensing", ITC, Entschede, The Netherlands, pp. 56-64.
- Henry, J. B. (1999), *Modélisation numérique du glissement-coulée de Super Sauze par photogrammétrie aérienne à basse altitude*. Rapport de stage, ULP Strasbourg, 49 p.
- Henry, J.-B., Grussenmeyer, P., Malet, J.-P., Maquaire, O., (2001), Génération de MNT par photogrammétrie aérienne de petit format : application au versant instable de Super-Sauze. *Revue XYZ*, n°87, pp. 42-50.
- 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). Note technique. *Earth Surface Processes and Landforms*. (à paraître)
- Hernandez, E. (1996), *Développement d'un logiciel de traitement de données topométriques*. Rapport de stage, ULP Strasbourg, 35 p.
- Herrmann, D. (1997), *Recherche des caractéristiques physiques et géotechniques des Terres Noires du glissement de Super-Sauze (Alpes de Haute-Provence)*. Mémoire de maîtrise, ULP Strasbourg, 127 p.
- Hey, J.K., Thorne, G.H. (1983), Accuracy of surface samples from gravel bed material. *ASCE, Journal of Hydraulic Engineering*, 109(2), pp. 41-77.
- Heyse, I. (1997), Belgium, in C. Embleton and C. Embleton (eds.), *Geomorphological hazards of Europe*. Amsterdam : Elsevier, pp. 31-59.
- Higgit, D.L., Warbutton, J., (1999), Applications of differential GPS in upland fluvial morphology. *Geomorphology*, 29, pp. 121-134.
- Hiura, H., Sassa, K., Fukuoka, H. (1996), Monitoring system of a crystalline schist-landslide. Three dimensional displacement meters and underground erosion. VII<sup>th</sup> International Symposium on Landslides, Trondheim, Balkema, Vol. 3., pp. 1141-1146.
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., Collins, J., (1997), *GPS - Theory and practice*. 4<sup>th</sup> edn., Springer, Wien, New-York, 389 p.
- Horlick-Jones, T., Amendola, A., and Casale, R. (eds.) (1995), *Natural risk and civil protection*, Commission of the European Communities. London : E. & FN Spon, 554p.
- Hubert, G., Ledoux, B. (1999), *Le coût du risque. L'évaluation des impacts socio-économiques des inondations*, Paris, Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, pp. 50-52.
- Hudnut, K.W., Behr, J.A. (1998), Continuous GPS monitoring of structural deformation at Pacoima dam, California. *Seismological Research Letters*, 69 (4), pp. 299-308.
- Hungr, O. (1995), A model for the runout analysis of rapid flow slides, debris flows and avalanches, in *Canadian Geotechnical Journal* 32, pp. 610-623.
- Hungr, O., Evans, S.G., Bovis, M.J., Hutchinson, J.N. (2001), A review of the classification of landslides of the flow type. *Envir. & Eng. Geosc.*, 7, pp. 221-238
- Hutchinson, J.N. (1995), Landslide hazard assessment. In: *Proc. 6<sup>th</sup> Int. Symp. on Landslides*, Christchurch, Vol. 1, pp. 1805-1842.

- Hutchinson, J.N. (1986), A sliding-consolidation model for flow slides, in *Canadian Geotechnical Journal* 23, pp. 115-126.
- Iovine, G., Di Gregorio, S., D'Ambrosio, D., Lupiano, V. (2002), Debris flows and cellular automata : an example of simulation from the 1998 disaster of Sarno (Italy). In *Proceedings of the Symposium "Geomorphology: from expert opinion to modelling. A tribute to Professor Jean-Claude Flageolle"*, 26-27 Avril 2002, Strasbourg. Édité par D. Delahaye, F. Levoy et O. Maquaire. Publications Cerg, pp. 55-64.
- Irgens, F., Norem, H. (1996), A discussion of the physical parameters that control the flow of natural landslides, in *Proceedings of the VIIIth International Symposium on Landslides, Trondheim*, vol. 1, pp. 1251-1256.
- Iverson, R.M. (1997), Physics of debris flow. *Rev. Geophys*, 35, pp. 245-296
- Ives, J.D., Bovis, M.J. (1978), Natural hazard maps for land-use planning, San Juan Mountains, Colorado, USA. *Artic and Alpine Research*, 10, pp. 185-212.
- Jennings, P.J.; Siddle, H.J., Bentley, S.P. (1991), A comparative study of indirect methods of landslip potential assessment. In: *Proc. Conf. "Slope stability engineering developments and applications"*, 15-18 April, Isle of Wight, pp. 127-132.
- Jing, L., Hudson, J.A. (2002), Numerical methods in rock mechanics. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 39 (4), pp. 409-427.
- Joass, G.G. (1993), Stability monitoring on the West Wall of the Muja open cut. In : Szwedzicki, T. (Ed.). *Geotechnical Instrumentation and Monitoring in Open Pit and Underground Mining*. Balkema, pp. 283-291.
- Jung, E. (1998), *Evolution du climat et recherche d'indicateurs climatiques pour la prévision des mouvements de terrain dans le bassin de Barcelonnette (Alpes de Haute-Provence)*. Mémoire de maîtrise, ULP Strasbourg, 138p.
- Kaufmann, A.A., Keller, G.V. (1983), *Frequency and transient soundings*, Elsevier, Amsterdam, 686 p.
- Keaton, J.R., Degraaf, J.V. (1996), Surface Observation and Geologic Mapping. In: *Turner, Schuster (eds) "Landslides : investigation and mitigation"*. Transportation Research Board - National Research Council, Special Report 247, Washington, D.C., *National Academy Press*, pp. 178-230.
- Keefer, D.K., Johnson, A.M. (1983), Earth flows: morphology mobilization and movement, *Geol. Surv. Prof. Paper 1264*, US Govern. Print. Off. Washington, 56 p.
- Khoehle, G. (1994), *Cartographie géo-morphodynamique d'un versant instable, le bassin de Barcelonnette, Commune de Jausiers-secteur sud*, Mémoire de Maîtrise, ULP Strasbourg, 82 p. + annexes 17 p.
- Kienholz, H. (1978), Maps of Geomorphology and natural hazard of Grien delward, Switzerland, scale 1/10 000. *Artic and Alpine Research*, 10, pp. 169-184.
- Kim, D.S., Shin, M.K., Park, H.C. (2001), Evaluation of density in layer compaction using SASW method. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 21, pp. 39-46.
- Kimura, H., Yamaguchi, Y. (2000), Detection of landslide areas using satellite radar interferometry. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 66, 3, pp. 337-344.
- Kirchhoffer S., (1994), *Végétation arborée et mouvements de terrain dans le secteur de la Frache (Commune de Jausiers, Alpes de Haute-Provence)*, Mémoire de Maîtrise, ULP Strasbourg , 132 P.
- Kirkby, M.J. (1988), *Hillslope runoff processes and models*, in *Journal of Hydrology* 100, pp. 315-339.
- Klotz, S. (1998), *Recherches sur l'altérabilité et les caractéristiques géomécaniques des marnes noires de la coulée de Super Sauze*. Mémoire de maîtrise, ULP Strasbourg, 157 p et annexes.
- Klotz, S. (1999), *Caractéristiques physiques et mécaniques des marnes noires callovo-oxfordiennes : Application au glissement-coulée de Super-Sauze*. Mémoire de D.E.A., ULP Strasbourg, 161 p
- Klubertanz, G., Laloui, L., Vulliet, L. (1997), Numerical modelling of unsaturated porous media as a two and three phase medium: a comparison. In Yuan, G. (ed): *Computer Methods and Advances in Geomechanics*, Balkema, Rotterdam, pp. 1159-1164.
- Klubertanz, G., Laloui, L., Vulliet, L. (2000), Parameters governing debris-flow initiation. In Wieczorek, G. (ed): *proceedings of the Second international conference on Debris-Flow Hazard Mitigation*, Taipei, august 16-18, pp. 73-79.
- Koehle, G. (1994), *Cartographie géo-morphodynamique d'un versant instable. Le Bassin de Barcelonnette, Commune de Jausiers – Secteur Sud*. Mémoire de maîtrise, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 82 p.
- Kojima, H., Chung, F., Obayashi, S., Fabbri, A.G. (1998), Comparison of strategies in prediction modeling of landslide hazard zonation. *Proceeding of IAMG '98*. A. Buccianti, G. Nardi, R. Potenza (Eds). Isola d'Ischia, Naples. pp. 218-223.
- Kraus, K. Waldhäusl, P. (1998), *Manuel de photogrammétrie*, Traduction de P. Grussenmeyer et O. Reis, Editions Hermès Paris, 407 pp.
- Krauter, E., (1988), Applicability and usefulness of field measurements on unstable slopes. V<sup>th</sup> International Symposium on Landslides, Lausanne, Balkema, Vol. 1, pp. 367-373.
- Laigle, D., Coussot, P. (1997), Numerical modeling of mudflows, in *Journal of Hydraulic Engineering - ASCE* 123 (7), pp. 617-623.

- Lambe, T.W., Whitman, R.V. (1979), *Soil mechanics*, Wiley, New York, 553p.
- Lang, T. (1996), *Suivi de mouvements de terrain. Approche méthodologique. Applications aux glissements de Vars et de Super-Sauze. Alpes du sud*. Mémoire de maîtrise, ULP Strasbourg, 122 p.
- Larson, K.M., Agnew, D.C. (1991), Application of the Global Positioning System to crustal deformation measurement, 1. Precision and accuracy. *Journal of Geophysical Research*, 96, pp. 16547-16565.
- Lazzari, M., Salvaneschi, P. (1999), Embedding GIS in a decision support system for landslide hazard monitoring. *Natural Hazards*, 20, pp. 185-195.
- LCPC, (1994a), *Surveillance des pentes instables*. Guide Technique. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 125 p.
- LCPC, (1994b), *Télé-surveillance des ouvrages d'art et des sites*. Projet National ITELOS, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Ed. Kirk, 442 p.
- Le Mignon, G. (1999), *Glissements et coulées boueuses : analyse et modélisation. Application au cas de La Valette (Alpes-de-Haute-Provence, France)*. Mémoire de DEA "Géomatériaux", ENSMP-ENPC, Paris, 45 p.
- Ledoux, B. (1995), *Les catastrophes naturelles en France*, Paris : Payot et Rivages, 455p.
- Legchenko, A., Beauce, A., Guillen, A., Valla, P., Bernard, J. (1997), Natural variations in the magnetic resonance signal used in PMR groundwater prospecting from the surface, *European Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, Vol. 2, pp. 173-190.
- Legchenko, A., Shushakov, O. (1998), Inversion of surface NMR data, *Geophysics*, Vol. 63, n°1, pp. 75-84.
- Legchenko, A.V., Baltassat, J.M., Beauce, A., Makki, M.A., Al-Gaydi, B.A. (1998), Application of the surface proton magnetic resonance method for the detection of fractured granite aquifers: Proceedings of the IV Meeting of the Environmental and Engineering Geophysical Society (European Section), September 14-17, 1998, Barcelona (Spain), pp. 163-166.
- Légier, A. (1977), *Mouvement de terrain et évolution récente du relief dans la région de Barcelonnette (Alpes-de-Haute-Provence)*. PhD thesis, Grenoble I University, 163p.
- Leone, F. (1996), Concept de vulnérabilité appliqué à l'évaluation des risques générés par les phénomènes de mouvements de terrain. *Thèse de doctorat de l'Université Joseph Fourier, Grenoble I, Spécialité: Géographie, 274p*.
- Leone, F., Asté, J. P., Leroi, E. (1996), Vulnerability assessment of elements exposed to mass-movement : Working toward a better risk perception, in Senneset (ed), *Landslides*, Rotterdam, Balkema, pp. 263-269.
- Leroi, E. (1996), Landslide hazard - Risk maps at different scales : Objectives, tools and developments, in Senneset (ed), *Landslides*, Rotterdam, Balkema, pp. 35-51.
- Leroueil, S. (2001), Natural slopes and cuts: movement and failure mechanisms. *Géotechnique*, 51(3), pp. 197-243.
- Lo, K.Y., Lee, C.F. (1973), *Stress analysis and slope stability in strain softening materials*. *Geotechnique*, Vol. XXIII, 1, pp. 1-11.
- Locat, J., Demers, D. (1988), Viscosity, yield stress, remoulded strength and liquidity index relationships for sensitive clays. *Canadian Geotechnical Journal*, 25, pp. 799-806.
- Locat, J., (1997), Normalized rheological behaviour of fine muds and their flow properties in a pseudoplastic regime. Proceedings of the 1<sup>st</sup> International conference on Debris-Flow Hazards Mitigation, San Francisco, ASCE, pp. 260-269.
- Locat, J., Lee, H.J., Nelson, C.H., Schwab, W.C., Twichell, D.C. (1996), *Analysis of the mobility of far reaching debris flows on the Mississippi Fan, Gulf of Mexico*, in Proceedings of the VIIth International Symposium on Landslides, Trondheim, vol. 1, pp. 555-560.
- Lupini, J.F., Skinner, A.E., Vaughan, P.R. (1981), The drained residual strength of cohesive soils. *Geotechnique*, 31(2), 181-213.
- Luzi, L., Pergalini, F., Terlien, M.T.J. (2000), Slope vulnerability to earthquakes at subregional scale, using probabilistic techniques and geographic information systems. *Engineering Geology*, 58, pp. 313-336.
- MacCann, D.M., Forster, A. (1990), Reconnaissance geophysical methods in landslide investigations. *Eng. Geol.*, 29, pp. 59-78.
- MacDonald, M. G., Harbaugh, A. W. (1988), A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model, Scientific Software Group, US. Government, Washington DC., 528 p.
- Magnin, A., Piau, J.M. (1990), Cone-and-plate rheometry of yield stress fluids. Study of an aqueous gel. *J. Non-Newtonian. Fluid Mech.*, 36, pp. 85-108.
- Major, J.J., Pierson, T.C. (1992), Debris flow rheology : experimental analysis of fine-grained slurries. *Water Resour. Res.*, 28, 3, pp. 841-857.
- Malet, J. P. (1998), *Caractérisation et modélisation hydro-mécanique du glissement-coulée de Super Sauze dans l'optique de la gestion du risque*. Mémoire de D.E.A., ULP Strasbourg, 176 p. et annexes.

- Malet, J.-P., Hartig, S., Calais, E., Maquaire, O. (2000a), Apport du GPS au suivi en continu des mouvements de terrain. Application au glissement-coulée de Super-Sauze (Alpes de Haute-Provence, France). *C. R. Acad. Sc.*, Série Ila, 331, 12, pp. 175-182.
- Malet, J.-P., Maquaire, O., Klotz, S. (2000b), The Super-Sauze flowslide (Alpes-de-Haute-Provence, France). Triggering mechanisms and behaviour. In *Proceedings of the VIIIth International Symposium on Landslides*, 26-30 juin 2000, Cardiff, T. Telford, Vol. 2, 999-1004.
- Malet, J.-P., Remaître, A., Ancey, C., Locat, J., Meunier, M. et Maquaire, O., (2001), Caractérisation rhéologique des coulées de débris et laves torrentielles du bassin marneux de Barcelonnette. Premiers résultats. 36<sup>ème</sup> Colloque du Groupe Français de Rhéologie "Rhéologie, Génie civil et environnement", 10-12 octobre, Marne-la-Vallée, pp. 261-266.
- Malet, J.-P., Maquaire, O., Calais, E. (2002a), The use of Global Positioning System techniques for the continuous monitoring of landslides: application to the Super-Sauze earthflow (Alpes-de-Haute-Provence, France), *Geomorphology*, Volume 43, Issues 1-2, 1 February 2002, pp. 33-54.
- Malet, J.-P., Maquaire, O., Calais, E. (2002b), Le GPS en géomorphologie dynamique. Application à la surveillance de mouvements de terrain (Super-Sauze, Alpes du Sud, France). *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, n°2, pp. 165-180.
- Malet, J-Ph., van Asch, Th.W.J., van Beck, L.H., Maquaire, O. (2002), Distributed hydrological modelling of the Super-Sauze earthflow (South East France): implementation of the Starwars model. In *Proceedings of the Symposium "Geomorphology: from expert opinion to modelling. A tribute to Professor Jean-Claude Flageollet"*, 26-27 Avril 2002, Strasbourg. Édité par D. Delahaye, F. Levoy et O. Maquaire. Publications Cerg, pp. 185-192.
- Malet, J.-P., Auzet, A.-V., Maquaire, O., Ambroise, B., Descroix, L., Estèves, M., Vandervaere, J.-P., Truchet, E. Investigating the influence of soil surface characteristics on infiltration on marly hillslopes. Application to callovo-oxfordian black marls landslides in the Barcelonnette basin (Alpes-de-Haute-Provence, France). *Earth Surface Processes and Landforms*, (à paraître).
- Malet, J.-P., Remaître, A., Ancey, C., Locat, J., Meunier, M. et Maquaire, O. Caractérisation rhéologique des coulées de débris et des laves torrentielles du bassin marneux de Barcelonnette (Alpes-de-Haute-provence). Premiers résultats. *Journal de Rhéologie*, (à paraître).
- Manche, Y. (1996), Propositions pour la prise en compte de la vulnérabilité dans la cartographie des risques naturels. Programme fédérateur risques.. Sous-action 2.6 : Cartographie multirisque. Cemagref, Ministère de l'environnement, 47p.
- Manche, Y. (1997), Propositions pour la prise en compte de la vulnérabilité dans la cartographie des risques naturels prévisibles. *Revue de Géographie Alpine*, n°2, tome LXXXIII, pp. 49-62.
- 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, ULP Strasbourg, 149 p.
- Mantovani, F., Pasuto, A., Silvano, S., Zannoni, A. (1999), Collecting data to define future hazard scenarios of the Tessina landslide. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2(1), pp. 33-40.
- Mantovani, F., Soeters, R., van Westen, C.J. (1996), Remote sensing techniques for landslide studies and hazard zonation in Europe, *Geomorphology*, 15, pp. 213-225.
- Mao, A., Harrison, C.G.A., Dixon, T.H. (1999), Noise in GPS coordinate time series. *Journal of Geophysical Research*, 104, pp. 2796-2816.
- Maquaire, O., Levoy, F. (1987), La topométrie en géomorphologie dynamique. *Travaux du CREGEPE*, Université de Caen, Caen, Vol. 6, pp. 25-45.
- Maquaire, O. (1990), Les mouvements de terrain de la côte du Calvados. *Documents du BRGM n° 197*, Editions du BRGM, 431 p.
- Maquaire, O. (1997), The frequency of landslides on the Normandy coast and their behaviour during the present climatic regime. European Science Foundation. Project "European Palaeoclimate and man 12 : rapid mass movement as a source of climatic evidence for the Holocene", *ESF Special issue* : Burkhard et al. Ed.; 183-195.
- Maquaire, O. (2000), Effects of groundwater on the Villerville-Cricqueboeuf landslides. Sixteen years of survey (Calvados, France). In: *Proc. 8<sup>th</sup> Int. Symp. on Landslides*, Cardiff, Telford, Vol. 2, pp. 1005-1010.
- Maquaire, O., Flageollet, J.-C., Malet, J.-P., Schmutz, M., Weber, D., Klotz, S., Albouy, Y., Descloîtres, M., Dietrich, M., Guérin, R., et Schott, J.-J. (2001), Une approche multidisciplinaire pour la connaissance d'un glissement-coulée dans les marnes noires du Callovien-Oxfordien (Super Sauze, Alpes-de-Haute-Provence, France). *Revue Française de Géotechnique*, 95/96, pp. 15-32.
- Maquaire, O., Ritzenthaler, A., Fabre, D., Ambroise, B., Thiery, Y., Truchet, E., Malet, J.-P., Monnet, J. (2002), Caractérisation du manteau dégradé des Terres Noires Callovo-Oxfordiennes pour la définition des zones de stockage et de production d'eau et de sédiments. Application au bassin versant du Laval, Draix (Alpes-de-Haute-Provence, France). *C. R. Géosciences*, 334, pp. 835-841.
- Maquaire, O. (à paraître), Geomorphic hazards and natural risks, In: *The Physical Geography of Western Europe*, Eduard A. Koster, (ed.), Oxford University Press, chapitre 21, 15000 mots et 22 figures.

- Maquaire, O., Malet, J.-P., Remaître, A., Locat, J., Klotz, S., Guillon, J. Instability conditions of marly hillslopes, towards landsliding or gullying? The case of the Barcelonnette basin, South East France. (soumis en juin 2002 à Engineering Geology).
- Martin, B. (1996), *Les aléas naturels à Vars (Hautes-Alpes, France), le rôle des facteurs naturels et des facteurs anthropiques dans leur occurrence et leur évolution de 1800 à nos jours*. Thèse de Doctorat de Géographie, ULP, Strasbourg, 583 p.
- Martin, B., Weber, D. (1996), Vitesses de déplacement des mouvements de terrain à Vars (Hautes-Alpes, France) : le recours aux archives et à la topométrie. *Revue de Géographie Alpine*, 2, pp. 57-66.
- Martinet, G. (1993), *Contribution à la modélisation numérique des avalanches de neige dense et des laves torrentielles*, Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier de Grenoble, Laboratoire de Rhéologie, 274 p.
- Matthews, J. A., Brunsden, D., Frenzel, B., Gläser, B., et Weib, M. M. (eds.) (1997), *Rapid mass movement as a source of climatic evidence for the Holocene*, Stuttgart : Gustav Fischer Verlag, 444p.
- Mayoraz, F., Cornu, T., Vulliet, L. (1996), Using neural networks to predict slope movements. Proc. VII Int. Symp. Landslides, Trondheim, June, 1, pp. 295-300.
- McCullagh, M.J. (1998), Quality, use and visualization in terrain modeling. In Lane, S.N., Richards, K.S. and Chandler J.H. (Eds.), *Landform Monitoring, Modelling and Analysis*, Wiley, Chichester, pp. 95-117.
- McGuffey, V.C., Modeer, V.A., Turner, A.K. (1996), Subsurface exploration. In: *Turner, Schuster (eds) "Landslides : investigation and mitigation"*. Transportation Research Board - National Research Council, Special Report 247, Washington, D.C., *National Academy Press*, pp. 76-90.
- Menard, L. (1957), Mesures in situ des propriétés physiques des sols. *Annales des Ponts et Chaussées*, 258 p.
- Mendonça Santos, M.L., Guenat, C., Bouzelboudjen, M., Golay, F. (2000), Three-dimensional GIS cartography applied to the study of the spatial variation of soil horizons in a Swiss floodplain, *Geoderma*, 97, pp. 351-366.
- Meunier, M. (1991), *Éléments d'hydraulique torrentielle, Études Montagne, n°1*, Cemagref, 278p.
- Meunier, M., Carion, C. (1987), Etude méthodologique de la détermination des courbes granulométriques des lits des cours d'eau. Internal Report, Cemagref, Grenoble, 30 p.
- Michalowski, R.L. (1995), *Stability of slopes : limit analysis approach*, in Haneberg W.C. & Anderson S.A. (Editors) : Clay and shale slope instability : Boulder, Colorado, Geological Society of America *Reviews in Engineering Geology*, Vol. X, pp. 51-62.
- Mikkelsen, P.E., (1996), Field instrumentation. In : Turner, A.K., Schuster, R.L., (Eds.), *Landslides Investigation and Mitigation*, TRB Special Report 247, National Academy Press, Washington DC, pp. 278-316.
- Miramont, C. (1998), *Morphogenèse, activité érosive et détritisme alluvial holocènes dans le bassin de la moyenne Durance*. Thèse Doctorat, Univ. aix-Marseille, 286 p.
- Mohr, J.J., Reeh, N., Madsen, S.N. (1998), Three dimensional glacial flow and surface elevation measured with radar interferometry. *Nature*, 391 (6664), pp. 273-276.
- Mulder, H.F.H.M., Van Asch, T.W.J. (1988a), A stochastic approach to landslide determination in a forested area. Proceedings of the V<sup>th</sup> Internat. Symp. on Landslides, Lausanne, Balkema, Vol. 2, pp. 1207-1210.
- Newmann, A., Stein, S., Weber, J., Engeln, J., Mao, A., Dixon, T., 1999. Slow deformation and lower seismic hazard at the new Madrid seismic zone. *Science*, 284 (5414), pp. 619-621.
- Nguyen, V.V., Chowdhury, R.N. (1984), Probabilistic analysis of mining special piles – two techniques compared. *Int. J. Rock Mechanics and Min Science*, 21, pp. 303-312.
- Nguyen, V.V., Chowdhury, R.N. (1985), Risk analysis with correlated variables. *Geotechnique*, 35, pp. 47-59.
- Olivry, J.C., Quelennec, R.E., Hoorelbeck, J., Bufalo, M. (1988), Erosion des terres noires de la vallée du Buëch. CR Fin d'Etudes, BRGM - ORSTOM - PACA - MRT, 367p.
- Palacio-Prieto, J.L. López-Blanco, J. (1994), using video imagery for gully erosion evaluation, *Zeitschrift für Geomorphology*, 38, 1, pp. 33-43.
- Palmer, D.F., Weisgarder, S.L. (1988), Geophysical survey of the Stumpy Basin Landslide, Ohio. *Bull. of the Assoc. of Eng. Geologists*, 25 (3), pp. 363-370.
- 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*, special issue: Landslides in the European Union, 15, n°3-4, pp. 311-326.
- Parise, M. (2001), Landslide mapping techniques and their use in the assessment of the landslide hazard. *Physics and Chemistry of Earth, C*, 26, (9), pp. 697-703.
- Pasuto, A., Silvano, S. (1996), Rainfall as a triggering factor of mass movement. Proc. of XXI General Assembly of European Geophysical Society. The Hague, The Netherlands, 6-10 May, pp. 45-56.
- Peler, Y., Kahle, H.G., Coccard, M., Veis, G., Felekis, S., Paradissis, D. (1998), Establishment of a continuous GPS network accross the Kephallonia fault zone, Ionian Islands, Greece. *Tectonophysics*, 294 (3-4), pp. 253-260.
- Phan, T.S.H. (1993), *Propriétés physiques et caractéristiques géotechniques des Terres Noires du Sud-Est de la France*. PhD Thesis, Grenoble I University, 246p.

- Philipponnat, G., (1987), *Fondations et ouvrages en terre*. Eyrolles Ed., 402 p.
- Phillips, C.J., Davies, T.R.H. (1991), Determining rheological parameters of debris flows. *Geomorphology*, 4, pp. 101-110.
- Pierre, S. (2000), *Analyse méthodologique pour la cartographie du risque "mouvements de terrain" à l'aide d'un S.I.G. Applications au bassin de Barcelonnette*. Mémoire de D.E.A., ULP Strasbourg, 99 p.
- Pierre, S., Remaître, A. (1999), *Etude des mécanismes d'initiation et de contribution des laves torrentielles. Exemple du torrent de Faucon. Bassin de Barcelonnette*. Mémoire de maîtrise, ULP Strasbourg, 158 p.
- Pingue, F., Troise, C., DeLuca, G., Grassi, V., Scorpa, R. (1998), Geodetic monitoring of Mt. Vesuvius Volcano, Italy, based on EDM and GPS surveys. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 82 (1-4), pp. 151-160.
- Pissart, A. et Closson, D. (1999), The importance and the problems of cartography- an example : the cartography of natural constraints on a territory of 74km<sup>2</sup> in Belgium (the Sprimont territory). In R. Casale and C. Margottini (eds.), *Floods and landslides*, Berlin, Springer, 125-132.
- Polloni, G., Aleotti, P., Baldelli, P., Noretto, A., Casavecchia, K. (1996), Heavy rain triggered landslides in the Alba area during November 1994 flooding event in the Piemonte Region (Italy). In: *Proc. 7<sup>th</sup> Int. Symp. Landslides*, Trondheim, Balkema, Vol. 3, pp. 1955-1960.
- Potherat, P., Doridot, M., Chahine, M. (1999), L'utilisation de la photo-interprétation dans l'établissement des plans de prévention des risques liés aux mouvements de terrain. Guide technique. Collection Environnement, Les risques naturels, Lab. Central Ponts et Chaussées, 128 p.
- Powers, P.S., Chiarle, M. (1996), A digital photogrammetric method to measure horizontal surficial movements on the Slumgullion landslide, Hinsdale County, Colorado. *U.S. Geological Survey Bulletin*, 2130, pp. 51-55.
- Powers, P.S., Chiarle, M., Savage, W.Z. (1996), A digital photogrammetric method for measuring horizontal surficial movements on the Slumgullion earthflow, Hinsdale County, Colorado, *Computers and Geoscience*, 22, 6, pp; 651-663.
- Pragère, A. (1996), Optimisation des paramètres dans le traitement des données GPS d'une courte ligne de base (1.37km). Rapport de Stage, Géosciences Azur, 15 pp.
- Pugh, R.S., Bromhead, E.N. (1985), Design of seepage control measures for an embankment dam using the finite element method, in *Comptes Rendus du Quinzième Congrès des Grands Barrages*, Lausanne, 1985, pp. 1167-1183.
- Pyle, C.J., Chandler, J.H. Richards, K.S. (1997), Digital photogrammetric monitoring of river bank erosion. *Photogrammetric Record*, 15, pp. 753-764.
- Quintlé, L. (1995), *Repérages d'anciens glissements de terrain dans le bassin de Barcelonnette d'après la photo-interprétation, l'étude des cartes...vérification sur le terrain*, Mémoire de Maîtrise, Université Louis Pasteur de Strasbourg, pp.95 + 6 cartes.
- Quintlé, L. (1996), *Essai de méthodologie sur le repérage d'anciens glissements de terrain : Application à la moyenne Ubaye (sud de la commune de Jausiers)*, Mémoire de DEA, Université Louis Pasteur de Strasbourg, pp. 76 + un annexe + huit cartes.
- Raetzo, H., Lateltin, O., Bollinger, D., Tripet, J.P. (2002), Hazard assessment in Switzerland – Codes of practice for mass movements. *Bull. Eng. Geol. Env.*, 61, pp. 263-268.
- Raulin, P., Rouques, G., Toubol, A. (1974), *Calcul de la stabilité des pentes en rupture non circulaire*, Rapport de Recherche du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 36, 106 p.
- Remaître, A. (2000), *Détermination des zones d'initiation et de contribution des laves torrentielles dans les bassins marneux : applications au bassin de Barcelonnette*. Mémoire de D.E.A., ULP Strasbourg, 153 p.
- 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*, n°1, pp. 71-84.
- Reynolds, J.M. (1997), An introduction to applied and environmental geophysics. *Wiley Ed.*, 796p.
- Rezig, S., Favre, J.L., Leroi, E. (1996), The probabilistic evaluation of landslide risk. In *Landslides*, Senneset Eds, pp. 351-355.
- 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. Actes Colloque Draix-Le Brusquet-Digne, Ed. Cemagref, pp. 11-28.
- Ritzenthaler, A. (2000), *Ravinement, météorisation et instabilité des marnes noires callovo-oxfordiennes (Bassins versants de Draix et de Barcelonnette, Alpes-de-Haute-Provence)*. Mémoire de maîtrise, ULP Strasbourg, 132 p. et annexes.
- 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., ULP Strasbourg, 125 p.
- Rivière, A. (1977), *Méthodes granulométriques*. Masson, Paris, 177p.

- Rochet, L., (1992), Auscultation-Diagnostic-Surveillance. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 45, 43-57.
- Röthlisberger, H., Aellen, M., (1970), Bewegungsregistrierung an des Zunge des Siétogletschers. *Schweizerische Bauzeitung*, 88 Jahrgang, 43, pp. 33-36.
- Rowe, J.P., Warner, T.A., Dean, D.R., Egan, A.F. (1999), A remote sensing strategy for measuring logging road system length from small-format aerial photography, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 65, 6, pp 694-703.
- Salomé, A.I., Beukenkamp, P.C. (1988), Geomorphological mapping of a high-mountain area, in black and white marls. *Z. Geom.*, 33, 1, pp. 119-123.
- Sassa, K., (1984), Monitoring of a cristalline schist landslide. Compressive creep affected by "underground erosion". *Proceedings of the IV<sup>th</sup> International Symposium on Landslides, Toronto, Vol. 1.*, pp. 356-360.
- Sautrey, V. (2002), *Analyse et évaluation quantitative de la vulnérabilité d'une commune en région de montagne (Bassin de Barcelonnette)*. Mémoire de maîtrise, ULP Strasbourg, 150 p
- Savage, W.Z., Smith, W.K. (1986), A model for the plastic flow of landslides, in *U.S. Geological Survey Professional Paper 1385*, 55 p.
- Schlemmer, H., (1982), Drahtextensometer zur Registrierung von horizontalen Bodenbewegungen über grössere Entfernungen. *Amtliche Vermessungs Nachrichten*, 1, pp. 2-21.
- Schlosser, F., (1988), *Eléments de mécanique des sols*. Presses de l' E.N.P.C., 276 p.
- Schmutz, M. (1995), *Prospection géophysique sur le glissement de Poche*. Mémoire de Maîtrise, ULP, Strasbourg : 74 p.
- Schmutz, M. (1996), *Détermination de la substructure du glissement de Super-Sauze par des méthodes géophysiques*. Mémoire de DEA, ULP, Strasbourg : 75 p. et annexes.
- Schmutz, M., Guérin, R., Maquaire, O., Descloîtres, M., Schott, J.-J., Albouy, Y. (1999), Apport de l'association des méthodes TDEM (Time-Domain Electromagnetism) et électrique pour la connaissance de la structure interne du glissement-coulée de Super Sauze (Bassin de Barcelonnette, Alpes de Haute Provence, France). *C. R. Acad. Sc., Série Ila, n° 328*, 797-800.
- Schmutz M., Albouy Y., Guérin R., Maquaire O., Vassal J., Schott J.J., Descloîtres, M. (2000), Joint electrical and time domain electromagnetism (TDEM) data inversion applied to the Super-Sauze earthflow (France). *Surveys in Geophysics*, Vol. 21, n°4, pp. 371-390.
- 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 de l'Université Louis Pasteur, Strasbourg I, 230 p.
- Schmutz, M., Guérin, R., Maquaire, O., Descloîtres, M., Schott, J-J. et Albouy, Y., (2000b). Geophysical method contribution to the Super Sauze (South France) flowslide knowledge. In *Proceedings of the VIIIth International Symposium on Landslides*, 26-30 juin 2000, Cardiff, T. Telford., Vol. 3, pp. 1321-1326.
- Schmutz, M., Guérin, R., Andrieux, P., Maquaire, O., (2001). Apport de la méthode Slingram à l'étude du glissement-coulée de Super Sauze (Alpes-de-Haute-Provence, France. 3<sup>ème</sup> Colloque Geofcan, Orléans, 25-26 septembre, pp. 141-144.
- Schrott, L. and Pasuto, A. (eds.), (1999), Temporal stability and activity of landslides in Europe with respect to climatic change (Teslec), *Geomorphology, special issue*, 30, pp. 1-211.
- Schuster, R.L. (1996), Socio-economic significance of landslides. In: *Turner, Schuster (eds) "Landslides : investigation and mitigation"*. Transportation Research Board - National Research Council, Special Report 247, Washington, D.C., *National Academy Press*, pp. 12-35.
- Senneset, K. (ed.) (1996), Landslides, *Proc. 7<sup>th</sup> Int. Symp. on Landslides*, Trondheim, Norvège, Balkema, Rotterdam, Netherlands, 3 volumes, Balkema, 1495p.
- Serratrice, J.-F. (1978), *Contribution à l'étude du comportement mécanique des marnes*. PhD Thesis, Grenoble I University, 205 p.
- Serratrice, J.-F. (1995), Essais de laboratoire à haute pression sur des marnes. *Colloquium Mondanum, Bruxelles*, Vol. 1, pp. 61-70.
- Sheperd, J.B., Herd, R.A., Jackson, P., Watts, R. (1998), Ground deformation measurements on the Souffriere Hills Volcano, Montserrat. II : Rapid static GPS measurements June 96 - June 97; *Geophysical Research Letters*, 25 (18), pp. 3413-3416.
- Sjoberg, L.E., Pan, M., Asenjo, E., Erlingsson, S. (2000), Glacial rebound near Vatnajökull, Iceland, studied by GPS campaigns in 92 and 96. *Journal of Geodynamics*, 29 (1-2), pp. 63-70.
- Skempton, A.W., DeLory, F.A., (1957), Stability of natural slopes in London clay. *Proceedings IV<sup>th</sup> International Conference on soil Mechanics and Foundation Engineering, Mexico*, Vol. 2, pp. 378-381.
- Skubiwescki, T. (2000), *Tentative de détermination de structures pluviométriques par l'étude de séries de précipitations à pas de temps fin*. Mémoire de maîtrise, ULP Strasbourg, 113 p.

- Soeters, R., van Westen., C.J. (1996), Slope instability recognition, analysis and zonation. In: Turner, Schuster (eds) "Landslides : investigation and mitigation". Transportation Research Board - National Research Council, Special Report 247, Washington, D.C., National Academy Press, pp. 129-177.
- Soldati, M. (ed.), (1996), Landslides in the European Union, *Geomorphology, special issue*, 15, n°3-4, pp. 183-364.
- Sommen, Y. (1995), *Tendance évolutive climatique dans le bassin de Barcelonnette*. Mémoire de maîtrise de géographie physique. ULP Strasbourg, 115 p.
- Sommen, Y. (1997), *Analyse des structures climatiques et définitions d'indices climatiques favorables au déclenchement des mouvements de terrain. Application au Bassin de Barcelonnette (Alpes de Hautes Provence)*. Mémoire de D.E.A., ULP Strasbourg, 54 p.
- Sorriso-Valvo, M., Agnesi, V., Gulla, G., Meranda, L., Antronico, L., Di Maggio, C., Filice, E., Petrucci, O., Tansi, C. (1994), Temporal and spatial occurrence of landsliding and correlation with precipitation time series in Montalto Uffugo (Calabria) and Imera (Sicilia) areas. In: Casale, R., Fantechi, R., Flageollet, J.C. (Eds.), *The Temporal Occurrence and Forecasting of Landslides in the European Community*, Science Research Development, European Commission, 2, pp. 825-869.
- Suhayda, J.N., Prior, D.B. (1978), *Explanation of submarine landslides morphology by stability analysis and rheological models*, in *Proceedings of the Xth Annual Offshore Technology Conference, Houston, Texas*, Vol. 1, pp. 31-73.
- Swaminathan, C.G. (ed.) (1980), *Landslides, Proc. 3<sup>rd</sup> Int. Symp. on Landslides*, Sarita Prakastan, New Delhi, India, 3 volumes, 927p.
- Tacnet, J.M., Gotteland, P., Bernard, A., Mathieu, G., Deymier, C. (2000), Mesures des caractéristiques géotechniques des sols grossiers. Applications aux sols de torrent. Proceedings of the Interpraevent Symposium, Villach, Vol.3, pp. 307-319.
- Takahashi, T. (1991), Debris flows, *IAHR Monograph series*, Balkema, Rotterdam, 174 p.
- Tapponnier P., de Voogd, B., Hirn, A. (1999), Géologues et sismologues au Tibet, *Sciences Actualités* 99, 9, pp. 104-126.
- Terzaghi, K. (1950), Mechanism of landslides. *Geol. Soc. Of America*. Berkey Volume, 83-123.
- Theakstone, W.H., Jacobsen, F.M., Knudsen, N.T. (1999), Changes of snow cover thickness measured by conventional mass balance methods and by global Positionning System surveying. *Geografiska Annaler Series A - Physical geography*, 81A (4), pp. 767-776.
- Tianchi, L., (1989), Landslides: extent and economic significance in China. In: Brabb, E.E., Harrod, B.L. (Eds), *Landslides: Extent and Economic Significance. 28<sup>th</sup> International Geological Congress Symposium on Landslides*, Washington, DC, 17 July 1989. Balkema, Rotterdam, pp. 271-287.
- Truchet, E. (2000), Caractérisation physique et hydrodynamique des formations superficielles du B.V.R.E. du Laval, Draix (Alpes-de-Haute-Provence, France). Mémoire de maîtrise, ULP Strasbourg, 129p.
- 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 D.E.A., ULP Strasbourg, 99 p
- Turner, A.K., Schuster, R.L. (eds.), (1996), *Landslides : investigation and mitigation*. Transportation Research Board - National Research Council, Special Report 247, Washington, D.C., National Academy Press, 673p.
- Turner, B.A. (1978), *Man Made Disaster*, Londres, Wykeham Publications, 325p.
- Van Asch T.W.J., (1984), Landslides : the deduction of strength parameters of materials from equilibrium analysis. *Catena*, Vol. 11, pp. 39-49.
- Van Asch, Th. W. J., Nieuwenhuis, J. D. (1994), Results on landslide mobility investigations on the recent time scale. Temporal occurrence and forecasting of landslides in the European Community, European Commission, Science Research Development, practical information and programs, Final Report, vol. II, EUR 15805 EN Bruxelles, pp. 565-608.
- Van Asch, T.W.J. (1997), The study of hydrological systems to understand changes in the temporal occurrence of landslides related to climatic changes. The temporal stability and activity of landslides in Europe with respect to climatic change (TESLEC)", In: Dikau R., et al. (Eds.), C.E.C. Environment Program, Contract EV5V-CT94-0454), pp. 69-86.
- Van Asch, T.W.J., Buma, J.T. (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.*, n° 22, vol. 2, 131-141.
- Van Asch, Th.W.J., Van Beek, R., Bonomi, T., Buma, J., Cavallin, A., Collison, A., Corominas, J., Ledesma ,A., Wad,e S. (1997), Recent developments in hydrological modeling of landslides, in New technologies for landslide hazard assesment and management in Europe, European Commision, Science Research Development, practical information and programms, Programme NEWTECH ENV-CT96-0248, Bruxelles, vol. 1, pp. 56-70.
- Van Beek, L.P.H., Van Asch Th.W. J. (1996), The mobility characteristics of the Valette landslide, in *Landslides Proceedings of the VII ISL, Trondheim*, Balkema, Rotterdam, vol. 2, pp. 1417 - 1421.

- Van Beek, R. (2002), Assessment of the influence of changes in land use and climate on landslide activity in a Mediterranean environment., PhD thesis, Netherlands Geographical Studies, 294, 363 p.
- Van Westen, C.J. (1993), Application of Geographical Information Systems to landslide hazard zonation. ITC-Publication, 15, Enschedé, 56 p.
- Van Westen, C.J. (1997), GIS in landslide hazard zonation: a review, with examples from the Andes of Colombia. In: Price, M., Heywood, D.I. (eds), Mountain environments and geographic information systems. Taylor and Francis, pp. 135-165.
- Van Westen, C.J. (2000), The modelling of landslide hazards using GIS, *Surveys in Geophysics*, 21, 241-255.
- Varnes, D.J. (1978), Slope Movement Types and Processes. In: Schuster, R.L., Krizek, R.J. (eds.) "Landslides: Analysis and Control". Transportation Research Board - National Research Council, Special Report 176, Washington, D.C., National Academy Press, pp. 11-33.
- Varnes, D.J. (1984), Landslides hazard zonation : a review of principles and practice. *Natural hazard*, 3, 63p.
- Velcin, S. (1997), Approche hydrogéologique du mouvement de terrain de Super Sauze (mai 1996 à avril 1997). Mémoire de maîtrise, ULP Strasbourg, 113 p. et annexes.
- Veyret-Mekdjian, Y. (2001), Géographie des risques naturels. Le dossier, documentation photo-graphique, octobre, n°8023, *La Documentation Française*, 64p.
- Vibert, C. (1987), Apport de l'auscultation de versants instables à l'analyse de leur comportement: les glissements de Lax-en-Roustit (Aveyron) et St-Etienne-de-Tinée (Alpes-Maritimes). Thèse École des Mines de Paris, 206 p.
- Vogt, J. (1979), Les trmblements de terre en France. Mémoire BRGM, 96, 220 p.
- Vulliet, L. (1997), Three families of models to predict slowly moving landslides. In Yuan, G. (ed): Computer Methods and Advances in Geomechanics, Balkema, Rotterdam, pp. 277-284.
- Vulliet, L., Bonnard, Ch. (1996), The Chlöwena Landslide : Prediction with a Viscous Model. Proc. VIIth Int. Symp. on Landslides, Trondheim, Vol. 1, pp. 397-402.
- Vulliet, L., Desai, C.S. (1989), Viscoplasticity and finite-element for landslide analysis. Proceedings of the 12<sup>th</sup> International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Rio de Janeiro, Brazil, Volume 2, pp. 801-806.
- Vulliet, L., Hutter, K. (1988a), A continuum model for natural slops in slope movement. *Geotechnique*, 38(2), pp. 199-217.
- Vulliet, L., Hutter, K. (1988b), Set of constitutive models for soils under slow movement. *Journal of Geotechnical division*, ASCE, 114 (9), pp. 1022-1041.
- Vulliet, L., Hutter, K. (1988c), Viscous-type sliding laws for landslides. *Canadian Geotechnical Journal*, 25, pp. 467-477.
- Vulliet, L., Hutter, K. (1988d), A multi-layer, multi-sliding surface model for three-dimensional creeping slopes. In Bonnard, C. (eds): Proceedings of the 5th International Symposium on Landslides, Lausanne, Volume 1, pp. 793-797.
- Vulliet, L., Samtani, N., Desai, C.S. (1991), material parameters for an elasto-viscoplastic law. Proceedings of the 10<sup>th</sup> European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Firenze, Italy, Volume 1, pp. 281-284.
- Wachal, D.J., Hudak, P.F. (2000), Mapping landslide susceptibility in Travis County, Texas, USA. *Geojournal*, 51, pp. 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, pp. 2259-2268.
- Wang, X.C. (1993), Modélisation numérique des problèmes avec localisation de la déformation en bande de cisaillement. Thèse de doctorat, Université de Liège, Belgique, 182 p.
- Waschkowski, E. (1983), Le pénétromètre dynamique. Bull. Lab. P. et Chauss. 125, pp. 95-103.
- Wasowski, J., Del Gaudio, V. (2000), Foreword to the Special Issue of the Symposium on Geophysical Investigation of Landslides and Unstable Slopes. *Surveys in Geophysics*, Vol. 21, 4, pp. 329-331.
- Webb, E.K. (1995), Simulation of braided channel topology and topography. *Water Resources Research*, 31, 10, pp. 2603-2611.
- Weber, D. (1992), *Préparation à une étude cinématique et géotechnique du glissement de terrain de Super-Sauze (Commune d'Enchastrayes, Alpes-de-Haute-Provence)*. Mémoire de Maîtrise, ULP, Strasbourg : 130 p.
- Weber, D. (1993), *Projet de recherche sur l'évolution des mouvements de terrain dans le bassin de Barcelonnette*. Mémoire de DEA, ULP, Strasbourg, 68 p.
- 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, ULP, Strasbourg I, 311p. et annexes.

- Weber, D., Herrmann, A. (2000), Contribution de la photogrammétrie numérique à l'étude spatio-temporelle de versants instables : l'exemple du glissement de terrain de Super-Sauze (Alpes-de-Haute-Provence, France). *Bulletin de la Société Géologique de France*, 171, 6, pp. 637-648.
- Welch, R; and Jordan, T.R. 1983. Analytical non-metric close range photogrammetry for monitoring stream channel erosion, *Photogrammetric engineering and Remote Sensing*, **49** (3), 367-374.
- Westaway, R.M., Lane, S.N., Hicks, D.M. (2001), Airborne remote sensing of clear water, shallow, gravel-bed rivers using digital photogrammetry and image analysis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 67, pp. 1271-1281.
- Wieczorek, G.F. (1984), Preparing a detailed Landslide-Inventory Map for Hazard Evaluation and Reduction. *Bull. of the Assoc. of Engineering Geologists*, Vol. 21, n°3, pp. 337-342.
- Wieczorek, G.F. (1996), Landslide triggering mechanisms. In: *Turner, Schuster (eds) "Landslides : investigation and mitigation"*. Transportation Research Board - National Research Council, Special Report 247, Washington, D.C., *National Academy Press*, pp. 76-90.
- Wilkinson, P., 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, pp. 2003-2017
- WP/WLI (1990), A Suggested Method for reporting a Landslide. Bulletin of the IAEG, n°41, pp. 5-12.
- WP/WLI (1991), A Suggested Method for a Landslide Summary. Bulletin of the IAEG, n°43, pp. 101-110.
- WP/WLI (1993a), A Suggested Method for Describing the Activity of a Landslide. Bulletin of the IAEG, n°47, pp. 53-57.
- WP/WLI (1993b), Multilingual Landslide Glossary. Bitech Publishers, Richmond, British Columbia, Canada, 59p.
- Wu, T.H. (1996), Soil strength properties and their measurement. In: *Turner, Schuster (eds) "Landslides : investigation and mitigation"*. Transportation Research Board - National Research Council, Special Report 247, Washington, D.C., *National Academy Press*, pp. 319-336..
- Yagi, N. (1988), Consideration on mechanical characteristics of landslide clay. *5e Symposium Int. sur les glissements de terrain*, Lausanne, pp. 361-364.
- Yanai, S., Usui, G. (1987), The evaluation of slopes stability by tephrochronology in Central Hokkaido, Japan. *Landslide 87, 5<sup>th</sup> ICFL*, Conference Proceedings, pp. 165-169.
- Zaruba, Q., Mencl., V. (1982), *Landslides and Their Control*. 2<sup>nd</sup> Ed., Elsevier, Amsterdam, Netherlands, 324p.
- Zhang, J., Bock, Y., Johnson, H., Fang, P., Williams, S., Genrich, J., Wdowinski, J., Behr, J. (1997), Southern California Permanent GPS geodetic array : error analysis of daily position estimates and site velocities. *Journal of Geophysical Research*, 102, pp. 18038-18055.
- Zhang, X., Phillips, C. et Marden, M. (1992), Internal deformation of a fast-moving earthflow, Raukumara Peninsula, New Zealand. *Geomorphology*, vol. 4, pp. 145-154.
- Zhou, S. (1997), Caractérisation des sols de surface à l'aide du pénétromètre dynamique léger à énergie variable type PANDA, Thèse Doct., UBP, Clermont II, 179p.



## *Tables :*

Table des figures

Table des tableaux

Table des photographies

Table des matières



# Table des figures

|  |     |
|--|-----|
| Figure 1.1 : Localisation des principales régions soumises aux mouvements de terrain en Europe de l'Ouest.....   | 15  |
| Figure 1.2 : Répartition des communes soumises à l'aléa « mouvements de terrain » avec enjeux humains définis ou non en France (d'après Prim.net, le 4 octobre 2002).....  | 21  |
| Figure 2.1 : Répartition des phénomènes hydro-gravitaires et domaines de comportement (in Meunier, 1991).....  | 31  |
| Figure 2.2 : Déplacement au cours du temps d'un mouvement de terrain pour différents stades d'activité (in Cruden et Varnes, 1996) .....   | 37  |
| Figure 2.3 : Les différents stades d'activité des mouvements de versants (in Dikau et al., 1996a) .....  | 38  |
| Figure 2.4 : Répartition de l'activité d'un mouvement de versant (in Dikau et al., 1996a).....   | 39  |
| Figure 2.5 : Morphologie d'un mouvement de versant (in Dikau et al., 1996a) .....  | 40  |
| Figure 2.6 : Définition de la vitesse d'un mouvement de versant et des types de réaction et des impacts significatifs en terme de vies humaines ou de dégâts aux constructions (in Cruden et Varnes, 1996) .....                         | 41  |
| Figure 2.7 : Quelques types de mouvements de terrain (in Maquaire, à paraître) .....   | 46  |
| Figure 3.1 : Principales approches disponibles pour la modélisation d'un versant et pour l'évaluation et la cartographie de l'aléa à l'échelle d'un bassin-versant (Malet, thèse en cours) ..  | 51  |
| Figure 3.2 : Facteurs, classes de valeurs, pondération dans le cas d'un modèle heuristique (in Wachal et Hudack, 2000) .....   | 57  |
| Figure 3.3 : Etapes d'un modèle déterministe d'évaluation de l'aléa (in Gökceoglu et Aksoy, 1996) ..   | 59  |
| Figure 3.4 : Les différentes couches de données dans le modèle déterministe d'évaluation de l'aléa (in Gökceoglu et Aksoy, 1996).....  | 59  |
| Figure 4.1 : les différents modes acquisitions de photographies et précision finale des MNT produits à partir de ces photographies (in Henry et al., à paraître) .....   | 70  |
| Figure 5.1 : Morpho-structure du bassin de Barcelonnette : (a) les principaux traits morphologiques ; (b) extension des marnes noires en France ; (c) coupe géologique d'après Flageollet, non publiée (in Maquaire et al., soumis)..... | 89  |
| Figure 5.2 : Localisation des mouvements de terrain actifs et latents dans le bassin de Barcelonnette (in Maquaire, à paraître).....   | 93  |
| Figure 5.3 : Morphologie du glissement-coulée de Super-Sauze : (a) en 1999 ; (b) extension de la coulée sur la paléotopographie du bassin torrentiel des Roubines de 1956 (in Maquaire et al., 2001).....                                | 97  |
| Figure 5.4 : Vue aérienne du glissement-coulée : (a) en 1991 ; (d) en 2000 ; (b, c) l'escarpement principal (in Maquaire et al., 2001) .....   | 98  |
| Figure 5.5 : Vues perspectives du bassin torrentiel des Roubines en 1956, 1978, 1982 et 1995. Exploitations quantitatives des traitements photogrammétriques numériques - profils multi-temporels (in Weber, 2001) .....                 | 100 |
| Figure 6.1 : Les dispositifs de surveillance des déplacements de surface de la coulée de Super-Sauze et précisions respectives : (a-c) réseau topométrique, (d-h) extensomètre et (i-l) système GPS (in Malet et al., 2002a).....        | 111 |
| Figure 6.2 : Morphologie du glissement-coulée de Super-Sauze et localisation des sites de mesures (in Malet et al., 2000) .....  | 112 |
| Figure 6.3 : Evolution de la précision selon la durée de la session de mesure (in Malet et al., 2000) ..   | 113 |

|  |     |
|--|-----|
| Figure 6.4 : Déplacements mesurés par GPS, extensomètre et tachéométrie en octobre 1999 (in Malet et al., 2002a) .....   | 114 |
| Figure 6.5 : Vol photographique à Super-Sauze : (a) lignes de vol, (b) paliers d'altitude de vol, (c) cliché de la bande 3 avec les repères de fond de chambre notés A1-A4, B1-B4, C1-C4, D1-D4 (in Henry et al., à paraître) .....  | 119 |
| Figure 6.6 : Représentation 3D des MNT de la coulée de Super-Sauze : (a) photogramétrique, (b) tachéométrique, (c) carte des différentes d'altitude entre les deux MNT (d'après Henry et al., à paraître) .....  | 121 |
| Figure 6.7 : Principe d'interprétation des pénétrogrammes, organisation du manteau d'altérites et profil de résistance associé : (a) étalonnage, (b) validation (in Maquaire et al., 2002) .....   | 129 |
| Figure 6.8 : Transect longitudinal du site 7 (bassin versant du Laval, Draix), 29 avril 2000 : (a) photographie du site; (b) tableau comparatif des épaisseurs des couches déduites des pénétrogrammes et observées dans les fosses de validation, (c) coupe verticale estimée par pénétrométrie (in Maquaire et al., 2002) .....                                | 130 |
| Figure 7.1 : Courbes efforts-déformations (cisaillement direct consolidé drainé – CD-) des marnes remaniées de la coulée de Poche (in Guillon, 2001) .....   | 137 |
| Figure 7.2 : Valeurs de la cohésion apparente ( $c'$ ) et de l'angle de frottement effectif ( $\phi'$ ) en fonction de la teneur en eau ( $w_L$ ) obtenues avec l'appareil de cisaillement annulaire de Bromhead modifié pour les coulées de (a) la Valette, (b) Super-Sauze et (c) Poche (in Maquaire et al., soumis) .....                                     | 138 |
| Figure 7.3 : Courbes granulométriques des matériaux des coulées : (a) Relation entre la masse totale sèche de l'échantillon et le pourcentage d'argiles et de limons ; (b) Courbes granulométriques moyennes pour cinq formations ; (c) Fuseaux granulométriques pour trois coulées (in Maquaire et al., soumis) .....   | 140 |
| Figure 7.4 : Droites de Mohr-Coulomb : (a) pour les formations des coulées et (b) pour les formations dégradées des marnes in situ (in Maquaire et al. soumis) .....   | 142 |
| Figure 7.5 : Relation Viscosité (Herschel-Bulkley) – Concentration volumique pour tous les matériaux (in Malet et al., à paraître) .....   | 143 |
| Figure 8.1 : Structure interne de la coulée dans la zone d'accumulation (localisation des profils sur la Figure 5.3) (in Maquaire et al., 2001) .....  | 148 |
| Figure 8.2 : Comportement cinématique et mécanique de la coulée de Super-Sauze : (a) carte morphologique et déplacements, (b) vitesses moyennes maximales (juin 1996 – août 2000), (c) compartimentage de la partie amont de la coulée (in Malet et al., 2002b) .....  | 150 |
| Figure 8.3 : Exemple de pénétrogramme (in Maquaire et al., 2001) .....   | 151 |
| Figure 8.4 : Interprétation jointe de cinq couples de sondages TDEM-électrique avec sondages géotechniques sur le secteur est du transect C (in Schmutz et al., 2000) .....  | 153 |
| Figure 8.5 : Structure interne de la coulée de débris dans la zone d'ablation : (a), schéma interprétatif du suivi des inclinomètres entre 1996 et 2000, (b) extrait des orthophotographies de 1956 et 1995 et position des sondages, (c) vecteurs-déplacement des têtes de tubage, (d) profil vertical de vitesse de la coulée (in Maquaire et al., 2001) ..... | 154 |
| Figure 8.6 : Profil en long sur la coulée de Poche : l'escarpement s'appuie sur le flanc d'une échine fossilisée (in Guillon, 2001) .....  | 155 |
| Figure 9.1 : Précipitations annuelles et nombre de références de mouvements de terrain dans le bassin de Barcelonnette de 1928 à 1994 (in Flageollet et al., 1999) .....   | 160 |
| Figure 9.2 : Précipitations mensuelles et mouvements de terrain dans le bassin de Barcelonnette de 1954 à 1995 (in Flageollet et al., 1999) .....  | 161 |
| Figure 9.3 : Evolution morphologique, cinématique et mode de rupture par glissement structural dans une échine marneuse en place (in Malet et al., 2000) .....   | 164 |
| Figure 9.4 : Déplacements mesurés par extensométrie, précipitations journalières efficaces et pressions interstitielles entre juin et novembre 1999 (in Malet et al., 2002a) .....   | 165 |

|  |     |
|--|-----|
| Figure 9.5 : Relations Pluie-Nappe-Déplacements pour les sites GPS en mai 1999 : (in Malet et al., 2002a).....   | 166 |
| Figure 9.6 : Relations entre les pressions interstitielles et la vitesse des déplacements (in Malet et al., 2002a).....  | 167 |
| Figure 9.7 : Relations entre l'angle de pente $\beta$ et le facteur de sécurité $F_s$ , pour deux valeurs de $m$ et pour les caractéristiques mécaniques résiduelles des glissements-coulées de la Valette (VAL), Super-Sauze (SAU) et Poche (POC) (in Maquaire et al., soumis).....                                     | 168 |
| Figure 9.8 : Schéma de principe de l'évolution à long terme : (a) de la résistance au cisaillement, (b) du facteur de sécurité $F_s$ (in Maquaire et al., soumis).....   | 169 |
| Figure 9.9 : Relations entre la résistance au cisaillement non drainée reconstitué (remoulded) $C_{ur}$ et l'indice de liquidité $I_L$ pour différents matériaux de coulées et de marnes in-situ (in Maquaire et al., soumis).....   | 170 |
| Figure 9.10 : Modèle conceptuel d'évolution du glissement-coulée de Super-Sauze (in Malet et al., 2000).....   | 171 |
| Figure 9.11. Evolution pluriannuelle des glissements de Villerville-Cricqueboeuf (Calvados, France) en relation avec les données piézométriques et climatiques entre 1974 et 2001 : (a) précipitations annuelles efficaces à St Gatien-des-Bois, (b) variations piézométriques à Danestal (in Maquaire, à paraître)..... | 173 |



# Table des tableaux

|   |     |
|---|-----|
| Tableau 1.1 : Evaluation du niveau de risque par combinaison d'un niveau d'aléa et d'un niveau de vulnérabilité.....  | 25  |
| Tableau 1.2 : Les différentes échelles d'analyse retenues dans l'étude de l'aléa mouvements de terrain.....   | 29  |
| Tableau 2.1 : Classification des mouvements de versants (adaptée de Dikau et al., 1996a).....   | 34  |
| Tableau 2.2 : Définition de l'activité d'un mouvement de versant (in Cruden et Varnes, 1996 ; Dikau et al., 1996).....  | 37  |
| Tableau 2.3 : Prise en compte de l'état d'activité dans la cartographie des mouvements de terrain (in Flageollet, 1996).....  | 44  |
| Tableau 3.1 : Avantages et inconvénients des différentes approches d'évaluation de l'aléa à différentes échelles (adapté d'Aleotti et Chowdhury, 1999).....   | 61  |
| Tableau 3.2 : Inventaire des données d'entrée nécessaires pour l'étude des mouvements de terrain : types de données, méthodes utilisées et possibilité de collecte en fonction des échelles analyse retenues (d'après Soeters et Van Westen, 1996)..... | 63  |
| Tableau 4.1 : Comparaison des spécifications des images spatiales (in Soeters et Van Westen, 1996).....   | 71  |
| Tableau 4.2 : Caractéristiques des principales méthodes de suivi des déplacements (in Malet et al., 2002a).....   | 72  |
| Tableau 4.3 : Tentative d'indications des possibilités des méthodes géophysiques (in Hack, 2000)...   | 75  |
| Tableau 5.1 : Répartition des forages, essais et équipements sur la coulée de Super-Sauze par transect d'investigation (état en novembre 1999).....   | 103 |
| Tableau 5.2 : Dispositif de mesure du glissement-coulée de Super-Sauze (mis à jour : juillet 2002).   | 105 |
| Tableau 6.1 : MNT de la coulée de Super-Sauze : comparaison des résultats sur différentes zones morphologiques obtenus par photogrammétrie numérique et par tachéométrie. ....  | 120 |
| Tableau 7.1 : Classes granulométriques sur la fraction 0-20 mm et indices de consistance pour des matériaux marneux in situ et issus des coulées de débris (in Maquaire et al., soumis). ....   | 139 |
| Tableau 7.2 : Synthèse des caractéristiques mécaniques obtenus par différents essais de cisaillement : fosses proches du replat E de la coulée de Super-Sauze (d'après Klotz, 1998, 1999 et Guillon, 2001) .....  | 141 |
| Tableau 7.3 : Caractéristiques de cisaillement pour des matériaux marneux in situ et issus des coulées de débris (in Maquaire et al., soumis).....  | 141 |



# Table des photographies

|   |    |
|---|----|
| <i>Photo 1.1 : Ecoulement et lac de barrage ainsi créé, Valpola, juillet 1987 (Italie).....</i>   | 16 |
| <i>Photo 1.2 : Ecoulement (rock avalanche), Valpola, juillet 1987 (Italie). Vue de dessus.....</i>  | 16 |
| <i>Photo 1.3 : Ecoulement de grande ampleur (rock avalanche) de Randa en avril et mai 1991 (Suisse). (Cliché : B. Holl, 1995).....</i>                                | 17 |
| <i>Photo 1.4 : Le versant de la Clapière à Saint-Etienne-de-Tinée (Alpes-Maritimes) en 1976. ....</i>   | 18 |
| <i>Photo 1.5 : Le versant de la Clapière à Saint-Etienne-de-Tinée (Alpes-Maritimes) en 1994. ....</i>   | 18 |
| <i>Photo 1.6 : Carrière dans le tuffeau (Tours). Risque d'effondrement en raison de la dégradation du pilier (1989).....</i>  | 19 |
| <i>Photo 1.7 : Carrière dans le tuffeau (Tours). Risque d'effondrement en raison du foudroyage du pilier (1989).....</i>  | 20 |
| <i>Photo 2.1 : Glissement-coulée de la Valette dans le bassin de Barcelonnette (France), déclenché en 1982 (Cliché : Malet, 2000).....</i>                            | 35 |
| <i>Photo 2.2 : Glissement-coulée de Poche dans le bassin de Barcelonnette (France) déclenché au cours du 19<sup>ème</sup> siècle. (Cliché : Gross, 1998).....</i>     | 35 |
| <i>Photo 2.3 : Ecoulement de surplomb d'une corniche calcaire dans le Bessin, Calvados, France (1989).....</i>  | 36 |
| <i>Photo 2.4 : Glissement de blocs (Block slide) près d'Alba Piemonte, Italie (Cliché : L. Schrott, 1995).....</i>  | 36 |
| <i>Photo 2.5 : Ecoulement rocheux d'un volume de 5 000 m<sup>3</sup> sur une voie ferrée près de Kreuzberg, Rheinland-Pfalz, Allemagne (Cliché : E. Krauter).....</i> | 36 |
| <i>Photo 2.6 : Basculement corniche calcaire lié au fluage des marnes sous-jacentes, falaises du Bessin, Calvados (1983).....</i>                                     | 36 |
| <i>Photo 2.7 : Basculement d'un campanile lié au tassement par consolidation de terrains compressibles, Bologne, Italie (1997). ....</i>                              | 36 |
| <i>Photo 2.8 : Lézardes d'un pavillon liées au retrait du sol argileux en période de sécheresse, Orléans, France (1993).....</i>                                      | 36 |
| <i>Photo 4.1 : Fissuromètre à fil Invar de part et d'autre de fractures ouvertes le long des falaises du Cap Blanc Nez, Pas-de-calais, France.....</i>                | 73 |
| <i>Photo 4.2 : Fissuromètre : système de mesure de précision à vis micrométrique de l'allongement de la base de mesure. ....</i>                                      | 73 |
| <i>Photo 5.1 : Secteur raviné entre Villard-de-Faucon et Pont Long. Vue vers le Sud depuis Bouzoulières, juillet 2002.....</i>  | 90 |
| <i>Photo 5.2 : Secteur raviné du torrent de Bourre face à Sauze. Vue vers l'Est depuis Gaudessart, juillet 2002.....</i>  | 90 |
| <i>Photo 5.3 : Barrages de correction torrentielle dans le Riou Bourdoux, Barcelonnette, 1987.....</i>  | 92 |
| <i>Photo 5.4 : Deux barrages de correction dans le torrent de Faucon de Barcelonnette, juillet 2002.....</i>  | 92 |
| <i>Photo 5.5 : Morphologie bosselée caractéristique d'un glissement latent sur le versant de La Frache, vue vers le Sud, juillet 2002. ....</i>                       | 92 |
| <i>Photo 5.6 : Escarpement principal du glissement de Bois Noir. Vue vers le Sud, juillet 2002. ....</i>  | 92 |
| <i>Photo 5.7 : Bassin torrentiel raviné en bad-lands de Super-Sauze Vue vers le Sud depuis Faucon de Barcelonnette (Cliché : Malet, 1998). ....</i>                   | 95 |
| <i>Photo 5.8 : Torrent du Sauze (vue vers le Sud, juillet 2002).....</i>  | 96 |

|   |     |
|---|-----|
| <i>Photo 5.9 : Hélicoptage de la sondeuse Nuzi sur le profil C (juillet 1996).</i>  | 102 |
| <i>Photo 5.10 : Sondeuse Nuzi en place sur le profil A. Vue vers l'Est (juillet 1996).</i>  | 102 |
| <i>Photo 5.11 : Essai préssiométrique : contrôleur pression-volume et foreuse Nuzi (juillet 1996).</i>  | 102 |
| <i>Photo 5.12 : Sonde inclinométrique et tube rainuré en place dans un forage.</i>  | 102 |
| <i>Photo 5.13 : Vibropercuteur à gouges sur le profil B (Cliché : Malet, mai 1998).</i>   | 102 |
| <i>Photo 5.14 : Vibropercuteur à gouges sur le replat E (mai 1997).</i>   | 102 |
| <i>Photo 5.15 : Fosse manuelle réalisée à la pelle et à la pioche sur le replat E : prélèvement d'échantillons (Cliché : Malet, mai 1999).</i>                      | 103 |
| <i>Photo 5.16 : Essais au scissomètre dans une fosse manuelle sur le replat E (Cliché : Malet, mai 1999).</i>   | 103 |
| <i>Photo 5.17 : Pénétrromètre dynamique lourd DL 30 et accessoires. Vue vers le Nord sur l'adroit de Faucon de Barcelonnette (juillet 1996).</i>                    | 104 |
| <i>Photo 6.1 : Prospection Slingram avec un appareil EM 31 sur la coulée de Super-Sauze, octobre 1998.</i>  | 124 |
| <i>Photo 6.2 : Profil de mesure géophysique situé à l'aval de l'échine centrale (visible en haut à droite du cliché) de la coulée de Super-Sauze, octobre 1998.</i> | 125 |
| <i>Photo 9.1 : Petit glissement structural sur une échine située sur le flanc à l'Ouest de la coulée de Super-Sauze (octobre 1997).</i>                             | 163 |

# Table des matières

|   |           |
|---|-----------|
| <b>SOMMAIRE</b> .....   | <b>1</b>  |
| <b>AVANT-PROPOS</b> .....   | <b>3</b>  |
| <b>INTRODUCTION GENERALE</b> .....  | <b>5</b>  |
| <b>PREMIERE PARTIE : LES MOUVEMENTS DE TERRAIN : POSITION DU PROBLEME ET ETAT DE L'ART</b> .....            | <b>11</b> |
| <b>CHAPITRE 1 : CONTEXTE ET CADRE GENERAL DES RECHERCHES SUR LES MOUVEMENTS DE TERRAIN</b> .....            | <b>13</b> |
| 1.1. LA REPARTITION GEOGRAPHIQUE DES CATASTROPHES ET DES ZONES A RISQUES<br>« MOUVEMENTS DE TERRAIN » ..... | 13        |
| 1.1.1. <i>Distribution des mouvements de terrain en Europe de l'Ouest</i> .....                             | 14        |
| 1.1.2. <i>Mouvements de terrain en France : inventaire et enjeux humains</i> .....                          | 17        |
| 1.2. INDEMNISATION ET PREVENTION : DEUX REPOSES OPPOSEES DES SOCIETES FACE AUX RISQUES NATURELS .....       | 21        |
| 1.2.1. <i>Indemnisation</i> .....   | 21        |
| 1.2.2. <i>Prévention</i> .....  | 22        |
| 1.2.3. <i>Le recours à l'expropriation</i> .....  | 23        |
| 1.3. CONCEPTS DE BASE POUR L'EVALUATION ET LA CARTOGRAPHIE DES RISQUES .....                                | 24        |
| 1.3.1. <i>Catastrophe naturelle et risque naturel</i> .....   | 24        |
| 1.3.2. <i>Vulnérabilité</i> .....   | 25        |
| 1.3.2.1. <i>vulnérabilité analytique et comptable</i> .....   | 26        |
| 1.3.2.2. <i>vulnérabilité synthétique</i> .....   | 26        |
| 1.3.2.3. <i>mesure de la vulnérabilité</i> .....  | 27        |
| 1.3.3. <i>Aléa et susceptibilité</i> .....  | 27        |
| 1.3.4. <i>Des échelles adaptées aux objectifs des études envisagées</i> .....                               | 29        |
| 1.4. CONCLUSION .....   | 30        |
| <b>CHAPITRE 2 : CLASSIFICATION DES MOUVEMENTS DE TERRAIN : VARIETE ET ACTIVITES</b> .....                   | <b>31</b> |
| 2.1. INTRODUCTION .....   | 31        |
| 2.2. CLASSIFICATIONS DES MOUVEMENTS DE TERRAIN .....  | 32        |
| 2.2.1. <i>Types de mouvement (mécanismes)</i> .....   | 32        |
| 2.2.2. <i>Types d'activité</i> .....  | 37        |
| 2.2.2.1. <i>L'état d'activité (state of activity)</i> .....   | 37        |
| 2.2.2.2. <i>Répartition de l'activité (distribution of activity)</i> .....                                  | 39        |
| 2.2.2.3. <i>Morphologie (style of activity)</i> .....   | 40        |
| 2.2.3. <i>Vitesse des déplacements</i> .....  | 40        |
| 2.2.4. <i>Discussion</i> .....  | 41        |
| a) <i>signification différente des termes utilisés</i> .....  | 41        |
| b) <i>rythme d'évolution</i> .....  | 42        |
| c) <i>déroulement au cours du temps</i> .....   | 42        |
| d) <i>moyens d'observation et de mesures</i> .....  | 43        |
| e) <i>synthèse</i> .....  | 43        |
| 2.2.5. <i>Classification pour l'aléa et le risque</i> .....   | 44        |
| 2.3. CONCLUSION .....   | 47        |

## **CHAPITRE 3 : DE LA MODELISATION DU MOUVEMENT DE TERRAIN A LA CARTOGRAPHIE DE L'ALEA ..... 49**

|   |    |
|---|----|
| 3.1. CONCEPTS DE BASE .....   | 49 |
| 3.2. MODELISATION A L'ECHELLE D'UN VERSANT.....                           | 50 |
| 3.2.1. <i>Stabilité d'un versant : analyse à la rupture</i> .....         | 50 |
| 3.2.2. <i>Déformation d'un versant</i> .....                              | 52 |
| 3.2.3. <i>Modèle rhéologique</i> .....                                    | 53 |
| a) propagation avec frottement.....                                       | 53 |
| b) propagation fluide .....   | 54 |
| 3.2.4. <i>Couplage Forçage (interne, externe) / Cinématique</i> .....     | 54 |
| 3.3. EVALUATION ET CARTOGRAPHIE DE L'ALEA A L'ECHELLE D'UN BASSIN .....   | 56 |
| 3.3.1. <i>Le zonage qualitatif : méthodes « expert »</i> .....            | 56 |
| 3.3.1.1. L'approche « géomorphologique » .....                            | 57 |
| 3.3.1.2. La synthèse basée sur la combinaison de cartes d'index .....     | 57 |
| 3.3.2. <i>Zonage statistique</i> .....                                    | 58 |
| 3.3.3. <i>Zonage géotechnique</i> .....                                   | 58 |
| 3.3.4. <i>Zonage dynamique</i> .....                                      | 60 |
| 3.4. DISCUSSION.....  | 60 |
| 3.5. DONNEES D'ENTREE POUR LES DIFFERENTS MODELES .....                   | 62 |
| 3.5.1. <i>Les données d'entrée en fonction de l'échelle choisie</i> ..... | 62 |
| 3.5.2. <i>Gestion des données : collecte, stockage et sélection</i> ..... | 64 |
| 3.6. CONCLUSION .....   | 65 |

## **CHAPITRE 4 : ETAT DE L'ART DES OUTILS ET METHODES DE COLLECTE DES DONNEES D'ENTREE ..... 67**

|   |    |
|---|----|
| 4.1. METHODES DE CARTOGRAPHIE ET DE SURVEILLANCE DES MOUVEMENTS DE TERRAIN... 67                | 67 |
| 4.1.1. <i>Cartographie morphologique et génération de MNT</i> .....                             | 68 |
| 4.1.1.1. Cartographies topo-morphologique.....  | 69 |
| 4.1.1.2. Photogrammétrie numérique .....  | 69 |
| 4.1.1.3. Imagerie spatiale optique .....  | 71 |
| 4.1.2. <i>Mesure et suivi des déplacements et déformations de surface</i> .....                 | 71 |
| 4.1.2.1. Mesures au sol.....  | 72 |
| 4.1.2.2. Photogrammétrie terrestre et aérienne : Imagerie optique .....                         | 74 |
| 4.1.2.3. Imagerie spatiale : Radar .....  | 74 |
| 4.2. METHODES D'AUSCULTATION ET DE SUIVI EN PROFONDEUR .....                                    | 75 |
| 4.2.1. <i>Les méthodes géophysiques</i> .....   | 75 |
| 4.2.1.1. Méthodes sismiques .....   | 76 |
| a) Sismique réfraction - Tomographie sismique - Ondes de surface - Mesure de bruit de fond..... | 76 |
| b) Spectral Analysis of Surface Waves (SASW) .....  | 76 |
| 4.2.1.2. Méthodes électriques et électromagnétiques.....  | 77 |
| a) Electrique .....   | 77 |
| b) Electromagnétisme en domaine temporel (TDEM).....  | 77 |
| c) Georadar .....   | 77 |
| 4.2.1.3. En guise de conclusion .....   | 77 |
| 4.2.2. <i>Les méthodes géotechniques</i> .....  | 77 |
| 4.2.2.1. Investigation et prélèvements d'échantillons .....                                     | 78 |
| 4.2.3. <i>Mesures hydriques et hydrodynamiques</i> .....  | 79 |
| 4.2.3.1. Résonance Magnétique Protonique (RMP).....   | 79 |
| 4.2.3.2. Traçage physico-chimique : naturel et artificiel.....                                  | 79 |

|  |            |
|--|------------|
| a) Traçage naturel.....  | 80         |
| b) Traçage artificiel.....   | 80         |
| 4.3. CONCLUSION.....   | 81         |
| <b>CONCLUSION : POSITION DE RECHERCHE.....</b>   | <b>83</b>  |
| <b>SECONDE PARTIE : MES PROPRES RECHERCHES : APPLICATIONS ET RESULTATS.....</b>                | <b>85</b>  |
| <b>CHAPITRE 5 : ZONES ET SITES DE RECHERCHES : DESCRIPTION ET EQUIPEMENT.....</b>              | <b>87</b>  |
| 5.1. INTRODUCTION.....   | 87         |
| 5.2. LE BASSIN DE BARCELONNETTE : ZONE D'ETUDES.....   | 88         |
| 5.2.1. <i>Une morphologie variée</i> .....   | 88         |
| 5.2.2. <i>Un substrat géologique favorable à l'instabilité</i> .....                           | 90         |
| 5.2.3. <i>Le remodelage glaciaire et les formations superficielles</i> .....                   | 91         |
| 5.2.4. <i>Un climat montagnard agressif</i> .....  | 91         |
| 5.2.5. <i>Des aléas nombreux et divers</i> .....   | 91         |
| 5.2.6. <i>Une présence humaine forte</i> .....   | 93         |
| 5.2.7. <i>De nombreux acquis de recherches antérieures</i> .....                               | 94         |
| 5.2.5. <i>Conclusion</i> .....   | 94         |
| 5.3. LE SITE D'ETUDE PRINCIPAL : LE GLISSEMENT-COULEE DE SUPER-SAUZE.....                      | 95         |
| 5.3.1. <i>Morphologie et évolution</i> .....   | 96         |
| 5.3.2. <i>Réseau de surveillance</i> .....   | 101        |
| 5.3.2.1. <i>Auscultation par forages</i> .....   | 101        |
| a) <i>Contraintes et stratégies d'investigation</i> .....                                      | 101        |
| b) <i>forages, essais et équipements</i> .....   | 103        |
| 5.3.2.2. <i>Le dispositif de mesures</i> .....   | 104        |
| 5.4. SITES DE RECHERCHES CONNEXES.....   | 107        |
| 5.5. BILAN ET PERSPECTIVES.....  | 108        |
| <b>CHAPITRE 6 : LES DEVELOPPEMENTS METHODOLOGIQUES.....</b>                                    | <b>109</b> |
| 6.1. SUIVI EN CONTINU DES DEPLACEMENTS PAR GPS ET EXTENSOMETRIE.....                           | 109        |
| 6.1.1. <i>Extensomètre : Système à câble et roue potentiométrique</i> .....                    | 110        |
| 6.1.2. <i>Système de positionnement global : GPS en continu</i> .....                          | 112        |
| 6.1.2.1. <i>Position du problème</i> .....   | 112        |
| 6.1.2.2. <i>Le dispositif et l'équipement</i> .....  | 113        |
| 6.1.2.3. <i>Précision des mesures et durée optimale des sessions</i> .....                     | 113        |
| 6.1.2.4. <i>Validation GPS / Extensométrie / Topométrie</i> .....                              | 113        |
| 6.1.2.5. <i>Discussion : stratégies de traitements et précautions d'usage du GPS</i> .....     | 114        |
| 6.1.3. <i>Conclusion et perspectives</i> .....   | 115        |
| 6.2. GENERATION DE MNT PAR PHOTOGRAMMETRIE AERIENNE DE PETIT FORMAT.....                       | 117        |
| 6.2.1. <i>Position du problème</i> .....   | 117        |
| 6.2.2. <i>Méthodologie</i> .....   | 118        |
| 6.2.3. <i>Application à Super-Sauze</i> .....  | 118        |
| 6.2.4. <i>Discussion et perspectives</i> .....   | 120        |
| 6.3. INVESTIGATION DES COULEES PAR PROSPECTION GEOPHYSIQUE MULTIMETHODES.....                  | 123        |
| 6.3.1. <i>La prospection géophysique engagée</i> .....   | 124        |
| 6.3.2. <i>Les principaux résultats</i> .....   | 125        |
| 6.3.2.1. <i>Vérification de la possibilité d'une interprétation 1-D des données TDEM</i> ..... | 125        |
| 6.3.2.2. <i>L'inversion jointe des données électriques et TDEM</i> .....                       | 125        |
| 6.3.3. <i>Conclusion et perspectives</i> .....   | 126        |

|  |            |
|--|------------|
| 6.4. CARACTERISATION DES FORMATIONS SUPERFICIELLES PAR PENETROMETRIE DYNAMIQUE .....   | 127        |
| 6.4.1. Principe et méthodologie .....  | 128        |
| 6.4.2. Les principaux résultats .....  | 129        |
| 6.4.3. Conclusion et perspectives .....  | 131        |
| 6.5. CONCLUSION DU CHAPITRE 6 .....  | 132        |
| <b>CHAPITRE 7 : CARACTERISATION DES FORMATIONS SUPERFICIELLES MARNEUSES AU LABORATOIRE .....</b>                                   | <b>133</b> |
| 7.1. PROBLEMATIQUE.....  | 133        |
| 7.2. DEMARCHE.....   | 134        |
| 7.3. METHODES DE LABORATOIRE.....  | 135        |
| 7.3.1. Texture des formations hétérogènes : protocole adopté.....  | 135        |
| 7.3.1.1. Choix et représentativité de la fraction à analyser .....   | 135        |
| 7.3.1.2. Volume d'échantillon représentatif.....   | 135        |
| 7.3.1.3. Voie sèche ou voie humide ?.....  | 136        |
| 7.3.1.4. Un protocole adapté aux formations marneuses hétérogènes .....  | 136        |
| 7.3.2. Les caractéristiques géomécaniques.....   | 136        |
| 7.3.2.1. Les essais de cisaillement direct.....  | 136        |
| 7.3.2.2. Les essais de cisaillement annulaires (Ring shear test).....  | 137        |
| 7.3.3. RHEOLOGIE .....   | 138        |
| 7.4. LES PRINCIPAUX RESULTATS .....  | 139        |
| 7.4.1. Les textures.....   | 139        |
| 7.4.2. Les caractéristiques mécaniques : une grande dispersion des résultats .....   | 140        |
| 7.4.3. Les paramètres rhéologiques .....   | 142        |
| 7.5. SYNTHÈSE ET DISCUSSION .....  | 143        |
| 7.6. BILAN ET PERSPECTIVES.....  | 146        |
| <b>CHAPITRE 8 : LA STRUCTURE 3D DE LA COULEE DE SUPER-SAUZE .....</b>  | <b>147</b> |
| 8.1. POSITION ET FORME DE LA PALEOTOPOGRAPHIE.....   | 147        |
| 8.2. COMPARTIMENTAGE DE LA COULEE .....  | 149        |
| 8.3. LA STRUCTURE INTERNE DE LA COULEE DE DEBRIS.....  | 151        |
| 8.3.1. Dans la zone d'accumulation.....  | 151        |
| 8.3.2. Dans la zone d'ablation.....  | 153        |
| 8.4. BILAN ET PERSPECTIVES.....  | 155        |
| <b>CHAPITRE 9 : DECLENCHEMENT ET EVOLUTION DES MOUVEMENTS DE TERRAIN .....</b>   | <b>157</b> |
| 9.1. MOUVEMENTS DE TERRAIN ET CONDITIONS DE DECLENCHEMENT DANS LE BASSIN DE BARCELONNETTE .....                                    | 158        |
| 9.1.1. Contexte.....   | 158        |
| 9.1.2. Inventaire des mouvements de terrain .....  | 158        |
| 9.1.3. Les types de situations climatiques déclenchantes.....  | 158        |
| 9.1.3.1. Forte intensité de pluie sur courte période avec déclenchement immédiat... ..   | 159        |
| 9.1.3.2. Pluies cumulées au cours d'une période antécédente de durée variable avec établissement d'un seuil de déclenchement ..... | 159        |
| 9.1.3.3. Pluies cumulées au cours d'une période antécédente de durée variable sans identification d'un seuil de déclenchement..... | 159        |
| 9.1.3.4. Pas de relation évidente.....   | 161        |
| 9.1.4. Conclusion.....   | 162        |
| 9.2. EVOLUTION DU GLISSEMENT-COULEE DE SUPER-SAUZE .....   | 162        |

|   |            |
|---|------------|
| 9.2.1. Déclenchement par glissements structuraux.....   | 162        |
| 9.2.2. Dynamique pluri-annuelle de la coulée.....   | 165        |
| 9.2.3. Dynamique saisonnière de la coulée.....  | 165        |
| 9.2.4. Evolution à long terme.....  | 167        |
| 9.3. MODÈLE CONCEPTUEL D'ÉVOLUTION DU GLISSEMENT-COULEE.....  | 170        |
| 9.4. BILAN ET PERSPECTIVES.....   | 172        |
| <b>TROISIEME PARTIE : PERSPECTIVES ET PROGRAMMES DE RECHERCHE.</b>  | <b>175</b> |
| <b>CHAPITRE 10 : PERSPECTIVES ET PROGRAMMES DE RECHERCHE.....</b>   | <b>177</b> |
| 10.1. CADRE INSTITUTIONNEL DE MA RECHERCHE.....   | 177        |
| 10.1.1. Insertion au sein de l'Institut de Physique du Globe de Strasbourg.....                                     | 177        |
| 10.1.2. Projet de réseau d'excellence européen dans le cadre du 6 <sup>ème</sup> PCRDT.....                         | 177        |
| 10.2. THEMATIQUES DE RECHERCHE.....   | 178        |
| 10.2.1. Bases de données.....   | 178        |
| 10.2.1.1. Bases de données « événementielles ».....   | 179        |
| 10.2.1.2. Site de recherche (observatoire) et développements méthodologiques.....                                   | 179        |
| 10.2.2. Caractérisations physiques, géomécaniques et rhéologiques des marnes.....                                   | 180        |
| 10.2.3. Modélisation.....   | 181        |
| 10.2.4. Rythmes et volumes de production de sédiments par mouvements de masse dans les petits bassins versants..... | 181        |
| 10.2.5. Cartographie : de l'aléa au risque.....   | 181        |
| <b>EN GUISE DE CONCLUSION GENERALE.....</b>   | <b>183</b> |
| une rapide intégration dans une équipe dynamique.....   | 183        |
| de nombreux étudiants et chercheurs.....  | 184        |
| de nombreuses collaborations.....   | 184        |
| des financements importants.....  | 184        |
| <b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....</b>   | <b>185</b> |
| <b>TABLES :.....</b>  | <b>205</b> |
| <b>TABLE DES FIGURES.....</b>   | <b>207</b> |
| <b>TABLE DES TABLEAUX.....</b>  | <b>211</b> |
| <b>TABLE DES PHOTOGRAPHIES.....</b>   | <b>213</b> |
| <b>TABLE DES MATIERES.....</b>  | <b>215</b> |