



INTERREG III – ALCOTRA - Projet n° 023



**Développement d'outils méthodologiques pour la détection et
l'étude de la propagation des éboulements de masse**

Rapport final

Les Partenaires



Région autonome Vallée d'Aoste
Assessorat du territoire,
de l'environnement et des ouvrages publics
Regione autonoma Valle d'Aosta
Assessorato del territorio,
ambiente e opere pubbliche



Cofinanceurs



Bundesamt für Wasser und Geologie **BWG**
Office fédéral des eaux et de la géologie **OFEG**
Ufficio federale delle acque e della geologia **UFAEG**
Uffizi federal per aua e geologia **UFAEG**
Federal Office for Water and Geology **FOWG**



En collaboration avec



Pôle Grenoblois
Risques Naturels



Centre de recherche sur l'environnement alpin
Zentrum für alpine Umweltforschung
Centre of research on the alpine environment

SOMMAIRE

Description du projet	pag. 1
Action A: Catalogue des éboulements historiques	
1. Introduction	pag. 3
2. Synthèse bibliographique des éboulements de masse	pag. 3
3. BD "Badaboum"	pag. 3
4. Perspectives	pag. 6
5. Conclusion	pag. 6
Action B: Modélisation géométrique et détermination des volumes instables	
1. Introduction	pag. 8
2. Le relevé à distance	pag. 8
3. Définition analytique des plans interpolant un nuage de points	pag. 9
4. Modèles numériques 3D accouplés à des images photographiques	pag. 13
5. Modélisation géométrique	pag. 16
6. Analyse de stabilité	pag. 17
7. Modélisation du comportement mécanique	pag. 17
8. Contenus du CD	pag. 18
Action C: Etude et modélisation de la propagation	
1. Bibliographie	pag. 21
2. Description des méthodes numériques	pag. 23
3. La Modélisation physique	pag. 27
4. Modélisation numérique de deux éboulements documentés	pag. 32
5. Discussion et conclusion	pag. 34
Action D: Actions de promotion et communication	
1. Workshop Rockslidetec – 1 ^{er} décembre 2004	pag. 35
2. Workshop de conclusion du projet Rockslidetec – 13 avril 2006	pag. 35
3. Rapport final	pag. 38

Progetto n. 023
Développement d'outils méthodologiques pour la détection et l'étude de la propagation des éboulements de masse - « ROCKSLIDETEC »
Partenariato

Capofila:

**Direzione Tutela del Territorio
Assessorato Territorio,
Ambiente e Opere Pubbliche
Regione Autonoma
Valle d'Aosta**

Partner Transfrontaliero:

**Université
Joseph Fourier
de Grenoble**
**Université
de Savoie**
**Canton du
Valais**

Localisation Géographique

Région autonome Vallée d'Aoste	Région Rhône-Alpes (Haute-Savoie, Savoie)
Canton du Valais	Territoires adjacents : Département de l'Isère

Objectifs du projet

Ce projet vise à mettre à disposition des spécialistes en dangers naturels des outils méthodologiques développés et validés dans le cadre d'une étroite collaboration transfrontalière. Il s'agit d'une part de mieux cerner les indices d'instabilité et les signes avant-coureurs de déclenchement des éboulements potentiels et d'autre part de déterminer l'aire d'extension des avalanches rocheuses qui en résultent.

L'objectif final du projet est le développement d'un outil intégré pour l'évaluation de la dangerosité des falaises, mis au point sur des sites communs, et applicable à l'ensemble de l'arc alpin

Impact transfrontalier du projet

La coopération entre les partenaires va consister à échanger les informations archivées sur banques de données, croiser les expériences méthodologiques et appliquer les outils développés sur des sites communs. Les institutions associées à ce projet ont chacune des compétences spécifiques en matière d'auscultation de falaise, de détection des éboulements potentiels et de modélisation de propagation des débris rocheux. Il y a lieu de rassembler, comparer et valider ces connaissances pour fournir aux spécialistes qui dressent les cartes de danger des outils performants et reconnus par l'ensemble des partenaires

Description du projet

La détection des zones d'éboulement potentiel et l'évaluation de leur probabilité de rupture nécessitent une approche empirique basée sur l'analyse des principaux éboulements qui ont affecté l'arc alpin au cours des derniers siècles. La détermination du volume mobilisable et de la zone de propagation s'appuie sur des modèles géométriques du site étudié et sur des analyses mécaniques du déclenchement et de la propagation du phénomène.

Activités	Synthèse
A. <i>Constitution d'un catalogue des principaux éboulements historiques</i>	Ce catalogue doit permettre d'une part de connaître les conditions dans lesquelles les éboulements peuvent se produire et d'autre part de valider les méthodes d'analyse mécanique de leur déclenchement et de leur propagation.
B. <i>Modélisation géométrique et détermination des volumes instables</i>	Le projet fait appel à des techniques photogrammétriques numériques et à la technologie laser pour mettre au point une méthode de relevé spécifique. Ces relevés sont utilisés pour la modélisation géométrique de l'amas rocheux. La détermination du volume mobilisable est réalisée sur la base d'analyses cinématiques et mécaniques du déclenchement.
C. <i>Etude et modélisation de la propagation</i>	Différentes méthodes de modélisation de la propagation ont été développées. Les méthodologies résultantes ont été appliquées sur des sites communs aux partenaires pour comparaisons croisées.
D. <i>Actions de promotion et communication</i>	Plusieurs actions destinées à faire connaître ce projet, notamment aux Elus et Services techniques des Collectivités Territoriales, et à promouvoir l'échange entre scientifiques et praticiens confrontés à la gestion de ces risques étaient programmées: 2 workshop ont été réalisés, le présent rapport final du projet et un CD recueillant les documents plus détaillés réalisés par les partenaires dans le cadre du projet.

Action A : Catalogue des éboulements historiques

1 Introduction

Les éboulements de masse sont des phénomènes relativement rares. L'extrapolation faite à partir d'un traitement statistique des paramètres contenus dans une banque de données (BD) bien étoffée est déterminante pour établir la période de retour de ce type de phénomène. Cette période de retour (ou la fréquence) sera bien entendu différente selon le contexte géologico-structural et géomorphologique du site comme d'ailleurs de son histoire climatique. Cette extrapolation permettra peut-être aussi de préciser les lois régissant les conditions de pré-rupture, la rupture et le mode de propagation de l'éboulement dans la pente. Vu la rareté de ces phénomènes, le catalogue servant de base à ce traitement statistique doit forcément couvrir un périmètre très étendu. Dans l'esprit des initiateurs du projet, l'idée de vérifier ce postulat en l'appliquant dans un premier temps à leur territoire commun devait être la première pierre d'un projet qui aurait pu être étendu par la suite à l'ensemble de l'arc alpin de la France à la Slovénie. La complexité de la tâche liée aussi bien au choix des paramètres destinés à figurer dans le catalogue qu'à la construction d'une BD informatisée performante a pesé de façon non négligeable sur les résultats de l'action. Le manque de données pertinentes existantes telles que celles fournies par l'application systématique de méthodes modernes d'auscultation des falaises (MATTEROCK, RHAP, LPC [Programme Interreg IIc « Prévention des mouvements de versants et des instabilités de falaises »]) ainsi que le manque de pratique dans le calcul de propagation des éboulements de masse (voir action C) ont passablement handicapé ce test à l'échelle du territoire des trois partenaires.

La définition d'une période de retour pour les éboulements de masse et, à terme, une certaine prévision sur le type d'environnement favorable aux futurs éboulements de masse – objectif affirmé par les initiateurs du projet – s'appuient sur l'hypothèse que le passé et le présent sont les clés du futur (Varnes, 1984). En d'autres termes, les événements futurs se produiront de manière préférentielle dans des conditions similaires à celles qui ont prévalu lors des ruptures passées. L'analyse et la compréhension des mécanismes à l'origine des événements passés sont par conséquent primordiales et c'est dans cette idée que s'inscrit l'action A. Il s'agissait, à partir des éboulements récents et historiques les plus remarquables de France, Italie et Suisse de poser les bases d'une BD qui, couplée à un mode de traitement statistique, devrait permettre d'atteindre l'objectif affirmé au moment où un nombre critique de cas auront été implémentés.

L'action A se subdivise comme suit :

- synthèse bibliographique des principaux éboulements historiques ;
- observations complémentaires sur certains sites pour compléter les informations ;
- mise en forme du catalogue sur une interface du type base de données (BD) et développement du support informatique sous le nom provisoire de BADABOUM ;
- exploitation des données implémentées dans la BD (hiérarchisation, régionalisation, quantification et validation).

2 Synthèse bibliographique des éboulements de masse

Il existe dans la littérature plusieurs inventaires d'éboulements de masse dont certains incluent également des phénomènes tels que les glissements de terrain, les coulées de boues, les laves torrentielles, voire les éboulements glaciaires. Les inventaires les plus connus sont l'œuvre de Montandon (1933), Strele (1936), Abele (1974), Eisbacher and Clague (1984), Erisman and Abele (2001). Selon les auteurs ils rassemblent des événements de volume supérieur à 10^6 ou 3×10^6 m³. Des événements de taille plus modeste ayant causé des victimes ou dégâts importants y sont aussi répertoriés.

Ces inventaires ont systématiquement été triés puis complétés par des cas issus des BD BdMvt du BRGM (France) et InfoSlide du BAFU (Suisse). Sur les 500 événements recensés, plus de 200 sont des éboulements de masse au sens moderne du terme, à savoir des écroulements ou glissements rocheux de falaises. Il va sans dire que les informations disponibles dans ces inventaires sont avant tout descriptives et ne peuvent pas en l'état être utilisées dans un but prédictif.

3 BD « Badaboum »

3.1 Philosophie et étapes de réalisation

Cette BD a été développée sur support informatique dans l'optique de pouvoir y faire un traitement statistique des données implémentées. Elle est en langue anglaise pour permettre une large diffusion et, en cas de succès, faciliter une utilisation dépassant le cadre des partenaires du projet. Les travaux ont été réalisés en plusieurs étapes :

- définition des besoins ;
- réalisation d'une version bêta ;
- tests et modifications en conséquence (pas d'outil d'analyse à ce stade de développement) ;
- implémentation des données relatives aux événements de volume supérieur à 10^5 m^3 .

Cette limite inférieure de $100'000 \text{ m}^3$ a été dictée par la nécessité d'obtenir rapidement un jeu de données suffisamment étoffé pour travailler sur la période de retour. En effet, à défaut d'informations pertinentes sur les événements historiques de gros volume, seule l'utilisation des données de cas récents plus petits mais bien documentés autorise cet exercice.

3.2 Aspects techniques de la BD

BADABOUM a été développée par un géologue informaticien pour les besoins du projet. Il s'agit d'une base de données compatible avec MS Access 2000, pilotée via le moteur MS JetEngine 4.0 et l'interface objet MS-DAO 3.6. Ce choix a été imposé par le standard Microsoft Windows XP commun à tous les partenaires. L'interface utilisateur a été développée sous Delphi 7.

La structure de la base repose sur 38 tables contenant 305 champs. Elle s'articule autour de la table relative aux informations générales sur chaque éboulement – *Rockfall* – qui est subordonnée à la table contenant les données régionales: *Valley wall*. Cinq tables sont subordonnées à la table *Rockfall*: *Initial slope*, *Discontinuities*, *Failure*, *Post-failure slope* et *Deposit*. En outre, la table *Schemas* contient les liens sur tous les fichiers graphiques servant d'illustration à chaque cas. Cette structure reflète l'organisation des fiches telle que présentée dans l'interface « utilisateur » (figure 1).

La saisie des informations se fait dans la mesure du possible par *cases à cocher* et *listes déroulantes* afin de garantir la cohérence des informations entre les différents utilisateurs. L'interface présente les habituelles barres de menu, d'outils et d'état (figure 2). Chaque fenêtre correspond à une fiche subdivisée en plusieurs volets accessibles par des onglets afin d'agencer logiquement les informations.

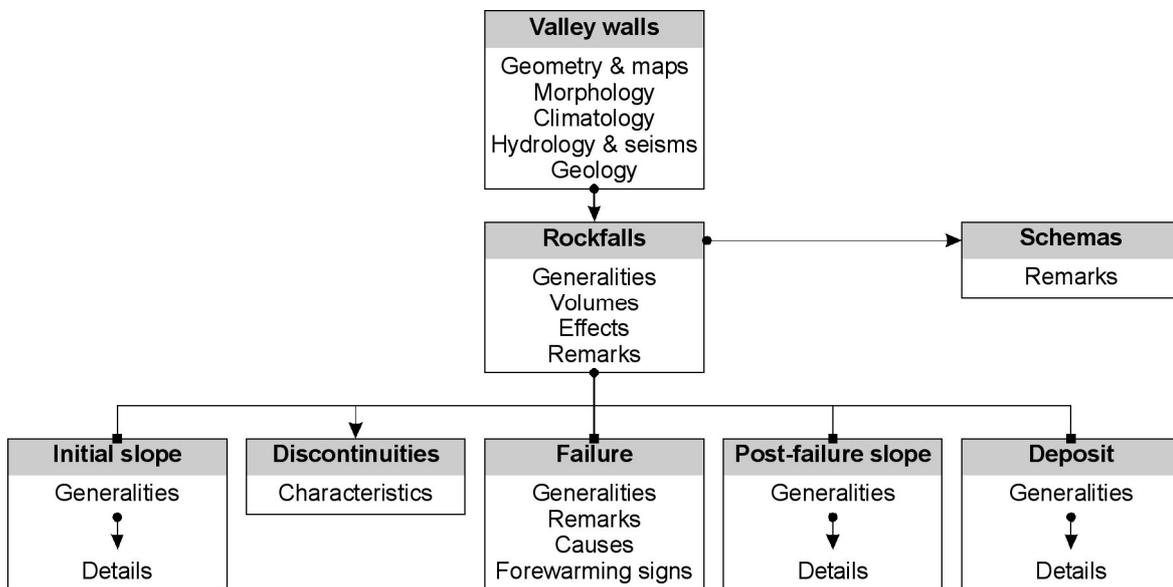


Figure 1 : organisation des fiches de la BD Badaboum.

Un volet d'exploration permet une navigation rapide entre les cas implémentés et une barre d'outils dédiée aux fiches autorise un accès rapide aux rubriques.

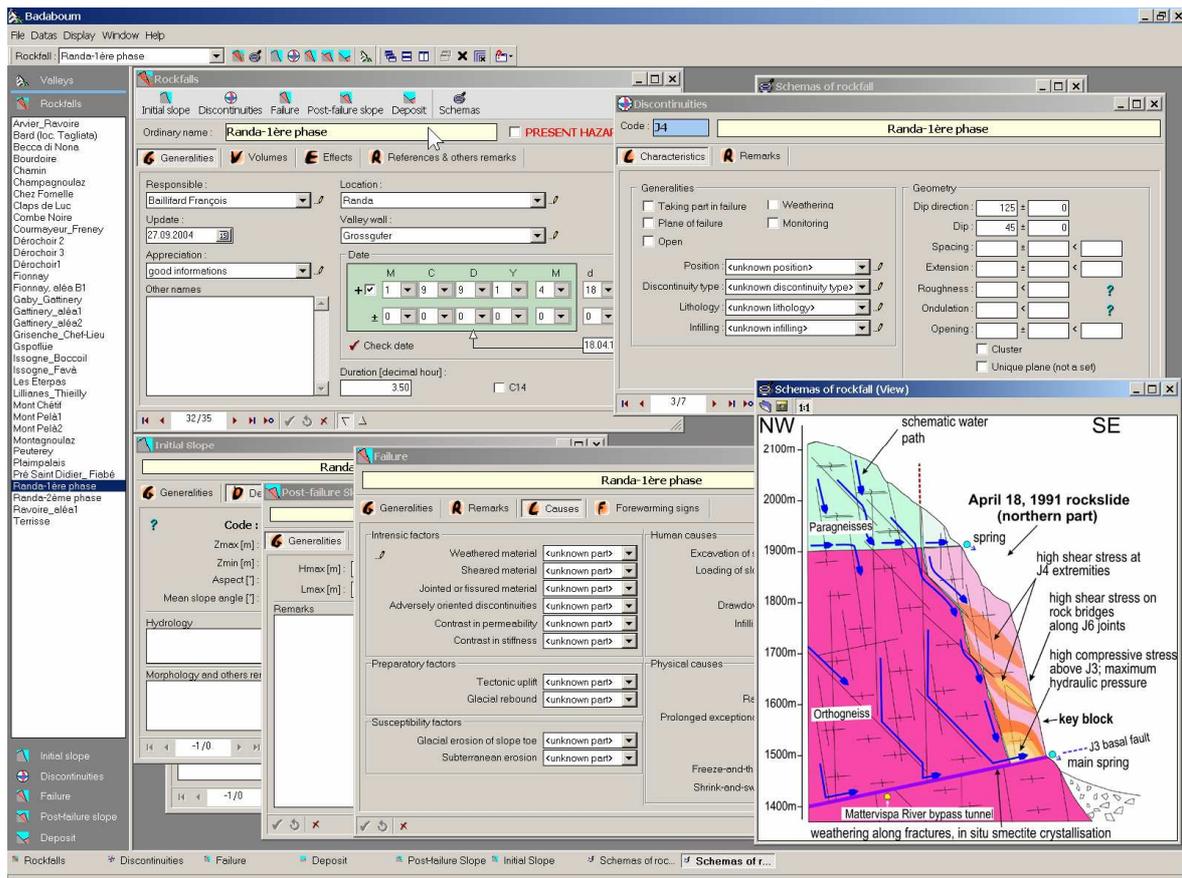


Figure 2 : interface « utilisateur » de la BD Badaboum.

3.3 Description des fiches

Seule une brève description des différentes fiches de BADABOUM et de leur contenu est donnée ci-après :

- la fiche *valley wall* décrit le versant à partir duquel s'est détaché l'éboulement. Elle donne des informations basiques (géométrie, géologie, hydrologie, hydrogéologie, sismicité) ainsi que les conditions météorologiques qui régnaient lors de la rupture.
- la fiche *Rockfall* décrit l'événement (localisation, date, volume, dégâts) selon le principe d'une fiche par événement. Elle donne aussi des informations sur l'auteur de la fiche et une estimation de la qualité de l'information.
- la fiche *Initial slope* donne l'état du profil topographique avant l'éboulement. Les divers tronçons homogènes de ce profil sont traités dans le cadre de sous-fiches.
- la fiche *Discontinuités* contient les informations structurales et géomécaniques du massif. Les différentes familles de discontinuités sont traitées dans le cadre de sous-fiches.
- la fiche *Failure* décrit le mécanisme de rupture. Elle consigne aussi les causes de celle-ci et ses signes précurseurs.
- la fiche *Post-failure slope* correspond à la fiche *Initial slope* mais après l'éboulement.
- la fiche *Deposit* caractérise le dépôt de l'éboulement. La géométrie et la granulométrie des différentes zones homogènes composant le dépôt sont traitées dans des sous-fiches.

3.4 Cas répertoriés dans BADABOUM

Au 31 mars 2006 la BD BADABOUM répertorie 58 événements d'éboulement (Tableau 1) dont 34 de volume $\geq 10^6$ m³. Quarante-sept de ces éboulements se sont produits au cours du dernier millénaire (entre 1132 et 2004). Parmi ceux-ci on en compte quinze dans la Vallée d'Aoste, douze en Valais et sept en Région Rhône-Alpes. Quelques cas remarquables sont situés en dehors du territoire des partenaires du projet.

Une première analyse limitée au territoire du projet révèle que six éboulements de volume $\geq 10^7$ m³ se sont produits en 800 ans et huit de volume $\geq 10^6$ m³ durant le 20^{ème} siècle. Ces chiffres permettent de se faire une première idée sur la période de retour de ce type d'événement.

4 Perspectives

Une fois que la BD contiendra une masse critique de cas et comprendra l'outil de traitement statistique, son exploitation permettra :

- de dégager la fréquence de mobilisation des éboulements situés dans des contextes similaires dans l'espace et le temps ;
- à partir de là, de mieux estimer l'évolution temporelle de la dangerosité (ou susceptibilité) d'instabilités de masse reconnues et de leur appliquer des méthodes, telle celle «*Historique – Géomécanique – Probabiliste*» (Programme Interreg IIc «Prévention des mouvements de versants et des instabilités de falaises»), qui permettent de mieux cerner leur probabilité de rupture.

Pour ce faire, il sera nécessaire de rajouter à BADABOUM des outils permettant de faire des requêtes prédéfinies. Il sera aussi intéressant d'implémenter dans la BD des cas reconnus comme instables mais non encore éboulés, comme cela avait été initialement prévu par les initiateurs du projet. Quoi qu'il en soit, il serait intéressant, pour certains cas historiques, de pouvoir reconstituer la morphologie du profil de pente avant éboulement et d'utiliser ces données pour faire une prédictibilité a posteriori de la probabilité de rupture et du mode de propagation des blocs.

Comme cela avait aussi été prévu, BADABOUM sera mise sur le Web avant la fin 2006 afin de pouvoir être consultée en ligne et implémentée à distance de façon à l'enrichir rapidement.

5 Conclusions

Les travaux réalisés dans le cadre de cette action ont démontré l'intérêt de construire une base de données informatisée où est rassemblé un maximum de données relatives au contexte géologique, structural, géomorphologique et météo-climatique des sites inventoriés. Ils ont aussi confirmé ce que les initiateurs du projet supputaient fortement, à savoir qu'un tel traitement ne peut être intéressant scientifiquement que lorsqu'il est pratiqué à une grande échelle.

Même si l'objectif visé par le projet - à savoir obtenir grâce à BADABOUM un outil de prédictibilité abouti en matière d'éboulements de masse potentiels - n'est pas atteint, la voie est toute tracée pour poursuivre ce travail transfrontalier dans le cadre d'un autre projet comme par exemple un programme Interreg IV. La BD est aujourd'hui construite et les nombreux tests réalisés au cours des trois ans impartis au projet ont permis d'atteindre un bon niveau de fiabilité (suppression de bugs). Pour pouvoir l'exploiter dans le sens souhaité par les initiateurs du projet, il faudra encore lui rajouter les outils de traitement statistique et l'enrichir avec au moins une cinquantaine de sites d'éboulements connus. Ces sites devront surtout avoir été étudiés avec les mêmes méthodes d'auscultation, ou du moins celles fournissant des résultats comparables en matière de quantification. En effet, la surprise la plus pénalisante pour le projet a été le très faible taux de sites d'éboulement bien documentés. A raison d'une vingtaine de jours/H par site (sans investigation autre que du lever de terrain), les études nécessaires représentent un coût important. Chaque partenaire doit poursuivre ses efforts dans ce sens et avec ses moyens propres, en attendant de pouvoir retrouver les autres au sein d'un projet bis dans le cadre, par exemple d'Interreg IV.

N°	Date	Volume (x 10 ⁶ m ³)	Nom	Commune	Dép/Rég/Cant	Pays
1	10000 BP	9000	Flims	Flims	Grisons	CH
2	1248	500	Granier	Myans	Savoie	F
3	1963	270	Vajont	Erto e Casso	Friuli-Venezia Giulia	I
4	Préhistorique	52	Cusy	Cusy	Savoie	F
5	1749	50	Derborence 2	Conthey	Valais	CH
6	5000 BP	50	Lauvitel	Bourg d'Oisans	Isère	F
7	1806	40	Goldau	Goldau	Schwyz	CH
8	1987	40	Val Pola	Valdisotto (SO)	Lombardie	I
9	Préhistorique	34	Plaimpalais	St-François de Sales	Savoie	F
10	1991	22.5	Randa 1	Randa	Valais	CH
11	1751	20	Dérochoir – Fiz	Passy	Haute-Savoie	F
12	1564	15	Becca France	Sarre	Val d'Aoste	I
13	Préhistorique	10	Saint-Même	St-Pierre d'Entremont	Isère	F
14	1717	10	Triolet	Courmayeur	Val d'Aoste	I
15	1881	10	Elm	Elm	Glaris	CH
16	1991	7	Randa 2	Randa	Valais	CH
17	1946	6	Six des Eaux Froides	Anzère	Valais	CH
18	Préhistorique	5	Pellaud	Rhêmes Notre Dame	Val d'Aoste	I
19	1920	4	Brenva	Courmayeur	Val d'Aoste	I
20	1925	3	Cima d'Ersa	Valtournanche	Val d'Aoste	I
21	Moyen-âge	2	Fodan	Bonneval-sur-Arc	Savoie	F
22	Moyen-âge	2	Valgrisenche	Valgrisenche	Val d'Aoste	I
23	1248	2	Nances	Nances	Savoie	F
24	2004	2	Cima Thurwieser	Santa Caterina Valfurva	Lombardie	I
25	1996	1.75	Sandalp 2	Linthal	Glaris	CH
26	1442	1.5	Claps de Luc	Luc-en-Diois	Drôme	F
27	1997	1.5	Brenva	Courmayeur	Val d'Aoste	I
28	Moyen-âge	>1	Brenva	Courmayeur	Val d'Aoste	I
29	1767	>1	Brenva	Courmayeur	Val d'Aoste	I
30	2500 BP	>1	Brenva	Courmayeur	Val d'Aoste	I
31	1132	1	Bourdoire	St-Pierre de Chartreuse	Isère	F
32	1602	1	Tête Noire	Sixt-Fer-à-Cheval	Haute-Savoie	F
33	1952	1	Becca di Luseny	Bionaz	Val d'Aoste	I
34	2000	1	Bosmatto	Gressoney SJ	Val d'Aoste	I
35	1901	0.8	<i>Fletschhorn</i>	<i>Simplon</i>	<i>Valais</i>	<i>CH</i>
36	1985	0.8	<i>Les Crêtaux</i>	<i>Riddes</i>	<i>Valais</i>	<i>CH</i>
37	1922	0.62	<i>Arvel</i>	<i>Villeneuve</i>	<i>Vaud</i>	<i>CH</i>
38	1982	0.5	<i>Fiernaz</i>	<i>Antey St-André</i>	<i>Val d'Aoste</i>	<i>I</i>
39	1996	0.45	<i>Sandalp</i>	<i>Linthal</i>	<i>Glaris</i>	<i>CH</i>
40	1996	0.45	<i>Sandalp 1</i>	<i>Linthal</i>	<i>Glaris</i>	<i>CH</i>
41	1988	0.3	<i>Tschierva</i>	<i>Samedan</i>	<i>Grisons</i>	<i>CH</i>
42	1988	0.3	<i>Piz Scerscen</i>	<i>Samedan</i>	<i>Grisons</i>	<i>CH</i>
43	1943	0.24	<i>Matterhorn</i>	<i>Cervinia</i>	<i>Val d'Aoste</i>	<i>I</i>
44	1936	0.2	<i>Felik</i>	<i>Ayas</i>	<i>Val d'Aoste</i>	<i>I</i>
45	1986	0.2	<i>Combal - Miage</i>	<i>Courmayeur</i>	<i>Val d'Aoste</i>	<i>I</i>
46	1911-1912	0.16	<i>Liéron</i>	<i>Bard</i>	<i>Val d'Aoste</i>	<i>I</i>
47	1937	0.15	<i>Jungfrau</i>	<i>Fieschertal</i>	<i>Berne</i>	<i>CH</i>
48	1996	0.1	<i>Pic de Bure</i>	<i>St-Etienne en Dévoluy</i>	<i>Hautes-Alpes</i>	<i>F</i>
49	2002	0.1	<i>Meidji</i>	<i>St-Niklaus</i>	<i>Valais</i>	<i>CH</i>
50	2000	0.1	<i>Mättenberg</i>	<i>Grindelwald</i>	<i>Berne</i>	<i>CH</i>
51	2002	0.1	<i>Gruben</i>	<i>Saas Balen</i>	<i>Valais</i>	<i>CH</i>
52	1987	0.07	<i>Druesberg</i>	<i>Muotathal</i>	<i>Schwyz</i>	<i>CH</i>
53	1975	0.05	<i>Gspoflüe</i>	<i>Staldenried</i>	<i>Valais</i>	<i>CH</i>
54	2004	0.03	<i>Les Pics</i>	<i>Collomey-Muraz</i>	<i>Valais</i>	<i>CH</i>
55	1990	0.025	<i>Aiguille de Tronchey</i>	<i>Courmayeur</i>	<i>Val d'Aoste</i>	<i>I</i>
56	?	0.01	<i>Dégioz</i>	<i>Valsavaranche</i>	<i>Val d'Aoste</i>	<i>IT</i>
57	1714	?	<i>Derborence 1</i>	<i>Conthey</i>	<i>Valais</i>	<i>CH</i>
58	1906	?	<i>Haut-de-Cry</i>	<i>Chamoson</i>	<i>Valais</i>	<i>CH</i>

Tableau 1 : liste des 58 événements d'éboulement figurant dans la BD Badaboum au 31.3.2006
(en italique : les éboulements de volume < 10⁶ m³)

Action B : Modélisation géométrique et détermination des volumes instables

1 Introduction

Pour évaluer le degré de dangerosité que présente une falaise potentiellement sujette à des phénomènes d'avalanches détritiques il faut étudier les phases de décollement des blocs de roche affleurants sur la falaise, du déclenchement du mouvement puis de l'évolution du phénomène le long de la falaise.

Les phénomènes appelés « avalanches rocheuses » intéressent souvent de très gros volumes qui peuvent dévaler la pente à grande vitesse. L'analyse du développement de ces phénomènes le long de la falaise dépend du volume d'éboulis mobilisé, qui doit donc être estimé de manière appropriée pour évaluer la dangerosité du phénomène.

Dans le cadre de cette action on se propose de traiter surtout la phase de décollement des blocs et d'enclenchement des phénomènes d'avalanche, en prenant en compte plus particulièrement l'estimation du maximum de volume potentiellement impliqué.

Le but de la recherche est en effet la mise au point d'une méthode permettant d'estimer sur la base de relevés sur le site et de modélisations numériques le volume potentiel qui peut globalement évoluer en phénomène d'avalanche rocheuse.

Pour déterminer les conditions de stabilité d'une falaise il faut tout d'abord déceler les blocs qui ont la possibilité cinématique de se mettre en mouvement. Les conditions de stabilité de la falaise sont fortement influencées par l'orientation, l'espacement et la persistance des discontinuités.

Étant donnée l'importance attribuée à la nature discontinue des roches examinées, il est indispensable de préparer des relevés structuraux exhaustifs en ce qui concerne à la fois la position, la longueur et l'orientation des discontinuités présentes. Ces relevés, conduits sur des affleurements rocheux, servent à caractériser les discontinuités et ainsi éviter toute erreur majeure pouvant compromettre l'interprétation de l'amas de blocs.

Dans le cadre de cette recherche, des méthodes alternatives au relevé traditionnel ont été étudiées en s'appuyant sur les techniques photogrammétriques et la technologie laser.

L'orientation et la localisation dans l'espace des discontinuités ainsi relevées donnent une cartographie des conditions de discontinuité et une reconstruction ponctuelle de l'amas de blocs avec l'exacte position des blocs affleurants sur la falaise.

Les blocs affleurants peuvent ensuite être classés en blocs infinis et finis, les blocs finis en éliminables et non éliminables, les blocs éliminables en potentiellement instables et non, au moyen d'analyses géométriques et du calcul à l'équilibre limite pour l'évaluation de la stabilité. On arrive ainsi à apprécier le volume global impliqué susceptible d'évoluer en un phénomène d'avalanche rocheuse.

En voulant procéder à une estimation plus élaborée du degré de stabilité de l'amas de blocs fragmenté pour diverses configurations de forces externes appliquées, on a pensé qu'il convenait de recourir à des méthodes capables de reproduire le comportement tension-déformation de l'amas de blocs, telles que la méthode des éléments distincts.

La méthode mise au point comporte donc les phases suivantes:

- le relevé des parois rocheuses avec l'application de méthodes photogrammétriques numériques et de la technologie laser;
- des enquêtes complémentaires telles que sondages géognostiques et tests géophysiques;
- la reconstruction géométrique de l'amas de blocs fragmenté sous forme d'ensemble de blocs;
- l'étude des conditions de stabilité de la falaise selon des considérations géométriques et l'analyse à l'équilibre limite;
- l'analyse du comportement mécanique de la masse rocheuse avec la méthode des éléments distincts.

2 Le relevé à distance

Bien que la demande de techniques efficaces, rapides et si possible peu onéreuses ne cesse d'augmenter, les techniques de relevé géométrique des amas de blocs ne se sont pas adaptées aux besoins. Actuellement, le relevé s'effectue sur le site, en accédant directement à l'amas de blocs, à l'aide d'un équipement portatif composé d'une boussole et d'un niveau à eau. Mais cette opération peut parfois être difficilement réalisable, pour plusieurs raisons:

- les amas de blocs peuvent être difficiles à atteindre, une partie de la roche affleurante peut arriver jusqu'à une certaine altitude ou avoir des formes géométriques qui rendent l'accès malaisé, si ce n'est impossible, et dans ce cas l'acquisition de données peut être un processus long et souvent coûteux;

- les amas de blocs très fragmentés, non supportés par des ouvrages de soutènement, peuvent comporter des risques pour qui effectue le relevé;
- le choix d'éléments d'interprétation significatifs peut être compliqué à faire sur le site. De retour au bureau il faudra interpréter et élaborer les mesures en cherchant à reconstruire le scénario original sans ambiguïté.

Dans la pratique courante la collecte des données nécessaires au relevé structural s'effectue au moyen d'étirements dits *scanlines* ou, de manière plus fine, avec l'examen exhaustif de fenêtres d'observation (figure 1).

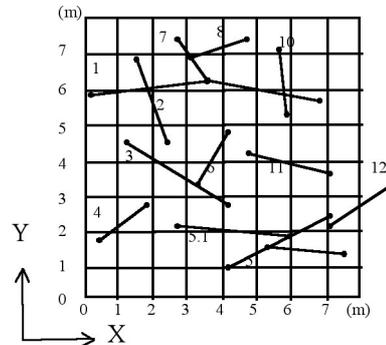


Figura 1 - Acquisition des données par fenêtre d'observation

En outre, dans bien des cas les méthodes de relevé traditionnelles ne permettent pas de saisir certains aspects du système de fragmentation, indispensables pour analyser la stabilité d'un amas de blocs. En particulier, les relations existant entre les familles de discontinuités (définies par la hiérarchie des systèmes de fragmentation), et qui sont mises en évidence par le type d'interruption des systèmes de fragmentation, peuvent être très importantes du point de vue du comportement mécanique d'ensemble de l'amas.

Pour obtenir des informations de ce type, une bonne méthode consiste à réaliser des images représentatives de l'amas, à partir desquelles on pourra effectuer une analyse exhaustive de celui-ci.

Pour pouvoir procéder à la réalisation d'un modèle géométrique 3D de la masse rocheuse il est nécessaire de disposer d'informations topographiques concernant la paroi et d'informations de type structural relatives au système de fragmentation de l'amas de blocs.

Pour réaliser ce type de modèle on a suivi 2 démarches différentes:

1. la première se base sur des techniques photogrammétriques numériques stéréoscopiques;
2. la seconde fait appel à la technologie laser.

La première démarche utilise des instruments simples et conserve les informations liées à l'image, la seconde permet d'acquérir des milliers de points dans des temps très réduits.

3 Définition analytique des plans interpolant un nuage de points

Normalement les méthodes de relevé topographique à distance ne fournissent que la position des points dans l'espace: un nuage de points. Les images et les scansions sont collimées et orientées dans l'espace en se rapportant à une référence relative et absolue. Le résultat de l'élaboration des données nous fournit comme output un fichier avec les coordonnées des points qui appartiennent à la maille du MNT.

Pour obtenir les informations nécessaires à la réalisation du modèle géométrique de l'amas rocheux fracturé, la démarche successive doit être de passer à la définition des plans interpolant la pente et des plans moyens de discontinuités. Un nuage de points représente une donnée trop grossière pour obtenir les informations de type géostructurel sur la disposition de ces plans. La procédure de sous division en groupes des points appartenant au MNT, qui puissent former des superficies approximativement planes, prend le nom de segmentation géométrique du MNT (Roncella, 2004).

Dans le chapitre 5 seront illustrées les méthodes mises au point pour isoler les points appartenant à un unique plan, ou à un ensemble de plans, à l'intérieur MNT représentatif d'un amas rocheux fracturé dans sa totalité. En supposant avoir isolé une portion de MNT, il faut estimer les équations analytiques, dans la forme $AX + BY + CZ + D = 0$, qui déterminent l'orientation et la position dans l'espace des plans interpolant le nuage de points examiné. Une fois les paramètres A, B, C et D de chaque plan connus, il est ensuite possible de passer à la définition des angles de *Dip* et *Dip Direction*.

Les méthodes mises au point pour isoler les points appartenant à un plan unique, ou à un ensemble de surfaces planes, à l'intérieur du MNT représentatif d'un amas rocheux fracturé dans son ensemble seront illustrés au paragraphe 4.

Quand on utilise une station totale pour la mesure de la discontinuité, un grand nombre de points qui ne gisent pas sur le même plan bien qu'appartenant à la superficie de discontinuités affleurante sont pris comme échantillon. A cet effet il est nécessaire de définir le plan qui interpole au mieux la superficie de discontinuités, en tenant compte des points relevés sur la superficie même.

Pour déterminer correctement l'orientation du plan interpolant un nuage de points il faut donc mettre au point des codes de calcul spécifiques. Il existe en outre des codes de calcul en mesure non seulement d'estimer de façon optimale un plan qui interpole un nuage de points, mais également d'en effectuer la segmentation, si nécessaire, en la sous divisant en groupes de points correspondant à des superficies planes distinctes et en estimant les relatives caractéristiques .

3.1 Estimation avec la méthode des moindres carrés

En se rapportant au cas d'une portion de MNT correspondant à une unique superficie plane, il est plutôt usuel d'utiliser la méthode des moindres carrés pour estimer l'équation d'un seul plan interpolant un nuage de points .

L'équation du plan interpolateur, dans la forme $Z = aX + bY + c$, est calculée en utilisant la théorie des moindres carrés linéaires.

Les coordonnées x, y et z de chaque point connues , on peut écrire:

$$\begin{aligned} z_1 &= ax_1 + by_1 + c \\ z_2 &= ax_2 + by_2 + c \\ z_i &= ax_i + by_i + c \\ &\dots \\ z_n &= ax_n + by_n + c \end{aligned}$$

Sous forme matricielle:

$$[Z] = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & 1 \\ \dots & \dots & \dots \\ x_n & y_n & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix}$$

On opère donc avec la matrice G appelée Data Kernel Matrix et le paramètre de modèle m :

$$Z = G \cdot m$$

$$(G^T \cdot G)^{-1} \cdot G^T \cdot Z = [(G^T \cdot G)^{-1} \cdot G^T \cdot G] \cdot m$$

$$m = (G^T \cdot G)^{-1} \cdot G^T \cdot Z$$

Si l'on connaît les paramètres a, b et c , la disposition du plan trouvé est connue, tandis que pour en déterminer la position dans l'espace il est suffisant de calculer le point barycentrique du nuage de points examiné.

Il est à noter que les techniques classiques pour l'estime des paramètres, telle que la méthode des moindres carrés, optimisent le modèle en considérant tout le set de données ; cette méthode n'a aucun type de mécanisme interne permettant de déterminer et de refuser les erreurs grossières, surtout présentes quand on traite des données expérimentales. Ces méthodes se basent sur l'hypothèse que la déviation maximale attendue d'une donnée du modèle assumé soit en fonction de la dimension du set de données considéré, en supposant qu'il y ait toujours un nombre suffisant de données valables de façon à permettre d'adapter le modèle choisi au set de données sans donner trop d'importance à l'éventuelle présence d'erreurs grossières. Dans notre cas le risque est celui d'avoir dans le set de points initial à interpoler des points appartenant à un autre plan : ces points peuvent être considérés comme erreurs grossières dans les mesures. On risque donc d'avoir un haut pourcentage d'erreurs grossières non compensées qui peuvent invalider la validité du modèle assumé.

On peut facilement démontrer comment une simple erreur grossière au milieu d'une série de données privée d'erreurs peut miner la validité du modèle assumé. Analysant le cas reporté dans la figure 2, on voit comme six des sept points donnés sont valables et peuvent être rapprochés de la ligne rouge

En employant l'approximation aux moindres carrés, c'est à dire en éliminant les points ayant un résidu maximum, et en terminant après quatre interactions, on remarque que parmi les points restants c'est le numéro sept qui est une erreur grossière.

On conclut donc que les techniques de *moyenne* ne sont pas particulièrement adaptées au set de données expérimentales non vérifiées, c'est à dire affectées d'erreurs grossières.

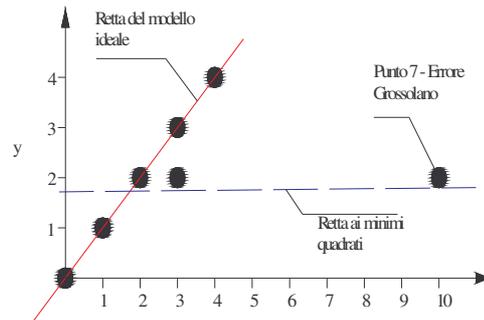


Figura 2 – L'échec de la réduction aux moindres carrés pour l'estime de données affectés d'erreurs grossières

3.2 Algorithme RANSAC (Fischler & Bolles, 1981)

Dans le cas d'une portion de MNT correspondant à un ensemble de plans, l'algorithme décrit dans ce paragraphe permet de déterminer les différents plans et d'estimer les relatives équations caractéristiques, même en présence d'un pourcentage important d'erreurs grossières. RANSAC est employé dans l'analyse d'images et dans la cartographie automatisée pour rechercher un ensemble de données expérimentales dans un modèle prédéfini.

On peut distinguer deux types d'erreurs: de classification et de mesure. Les erreurs de classification se vérifient quand sont identifiées des portions d'images comme erreurs du modèle; au contraire, les erreurs de mesure se vérifient quand on commet des erreurs au moment du tarage des paramètres bien qu'en ayant correctement identifié le modèle. Les erreurs de mesure suivent normalement une distribution normale tandis que celles de classification peuvent être identifiées comme erreurs grossières: ces dernières influencent dans une plus grande mesure la validité du modèle assumé et, comme on l'a déjà vu, ne peuvent pas être éloignées par des opérations de moyenne.

La procédure suivie par l'algorithme est totalement différente de celle employée dans les méthodologies d'estime normales: au lieu d'employer initialement le plus grand nombre possible de données pour obtenir une solution de départ, à partir de laquelle distinguer ensuite les points non valables, RANSAC utilise le plus petit nombre possible de données initiales pour créer le modèle, en essayant par la suite d'élargir ce set avec des données cohérentes au modèle, si possible. En partant du cas bidimensionnel d'une droite on fournit ci-après les étapes du procédé qui est à la base de l'algorithme afin de mieux l'illustrer.

Recherche d'un modèle prédéfini dans un ensemble de données testées contenant un pourcentage même très élevé d'erreurs grossières (figure 3.a):

- Des tests sont effectués en un nombre adéquat de tests i :
 - o on extrait de façon aléatoire 2 données (le minimum indispensable pour définir le modèle);
 - o on évalue les écarts par rapport au modèle: on sélectionne les points en dessous d'un seuil prédéfini (en vert) et on exclut les autres (en rouge).
- L'ensemble qui contient le plus grand nombre de données représente le modèle cherché:
 - o le modèle retenu est réestimé aux moindres carrés en utilisant tous les points classés comme inliers.

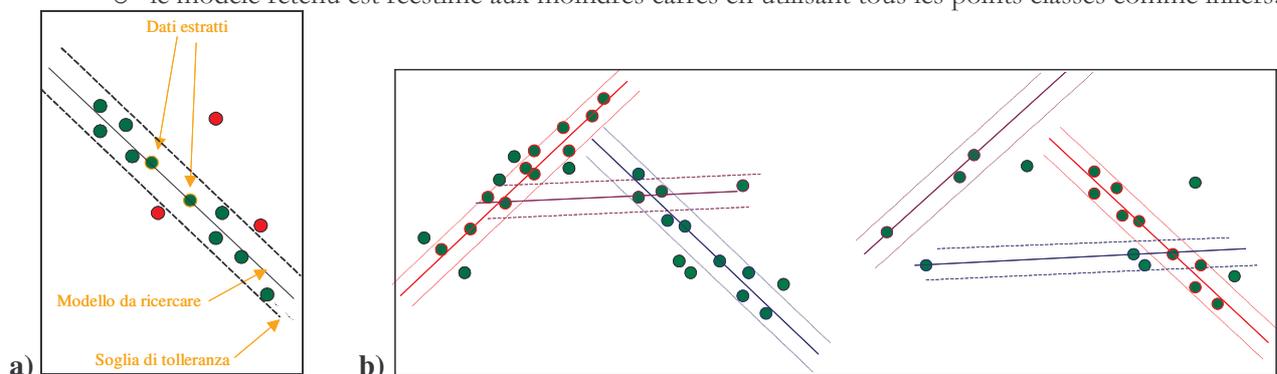


Figura 3 – a) reconnaissance de la droite interpolante dans le cas d'un seul ensemble de données
b) reconnaissance de la droite interpolante dans le cas de plusieurs sous-ensembles cohérents de données (plusieurs droites)

En répétant le procédé par i fois on obtiendra les ensembles de points, chacun d'entre eux étant généré par un choix entre les 2 points initiaux. Pour une valeur appropriée de i , on peut affirmer ici avec une probabilité déterminée p qu'au moins un des couples de points initiaux ne comprend pas une seule donnée aberrante (*outlier*).

Si on est en présence de plusieurs sous-ensembles cohérents de données (figure 3.b), l'algorithme élimine tous les points appartenant à la droite qui réunit le plus grand consensus (en rouge) et répète la procédure de recherche de la droite qui s'approche le plus des points restants.

Pour chacun des cas pratiques examinés dans le cadre du projet il a été nécessaire de quantifier le paramètre de seuil correct pour le problème d'estimation appliqué aux surfaces d'amas de blocs fragmentés. Parmi les paramètres dont dépend le fonctionnement de l'algorithme, c'est le seul qui requiert une analyse scrupuleuse. Il faut une certaine précision dans l'évaluation car une valeur trop basse tend à segmenter excessivement la surface, tandis qu'une valeur trop élevée porte à l'agrégation de portions une disposition différente des couches. Des tests ont ainsi été réalisés pour chaque modèle sur diverses portions de DTM afin d'arriver à la bonne valeur de seuil indépendamment de la taille moyenne des portions, de la rugosité et de l'ondulation de la paroi.

3.3 Détermination des angles d'inclinaison et d'immersion

Les angles d'inclinaison et de direction du plan approximateur d'une surface de discontinuité peuvent être déterminés une fois connus les paramètres euclidiens de son équation caractéristique.

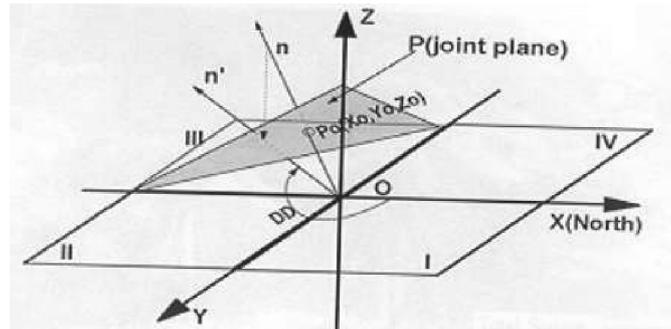


Figura 4 - Détermination de l'angle d'immersion et d'inclinaison

Le plan X – Y est considéré plan horizontal dans le système de coordonnées cartésiennes. L'angle ψ d'inclinaison peut être obtenu par le produit scalaire des verseurs normaux aux deux plans, n_h (normal au plan horizontal) et n (normal au plan approximateur). Les composantes du vecteur n peuvent être définies par les coefficients de l'équation du plan de discontinuité $A \cdot X + B \cdot Y + C \cdot Z + D = 0$.

Les coefficients A, B, C sont les composantes le long des axes X, Y, Z d'un vecteur générique perpendiculaire au plan avec point d'application dans l'origine du système cartésien.

Le produit scalaire des vecteurs $N=(A, B, C)$, et $n_h = (0, 0, 1)$ est:

$$n_h \cdot N = |n_h| |N| \cos \varphi$$

L'angle ψ entre ces deux plans résulte être:

$$\cos \psi = \frac{|n_h \cdot N|}{|n_h| |N|} = \frac{|C|}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}}$$

La DIP résulte donc:

$$DIP = \arccos \left| \frac{C}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}} \right|$$

L'angle k entre le composant horizontal du vecteur normal au plan de discontinuité et la direction positive de l'axe x est définie comme:

$$\cos(k) = \frac{A}{\sqrt{A^2 + B^2}}$$

Toutefois cette équation ne peut pas être utilisée pour déterminer directement la direction d'immersion du plan de discontinuité pour les raisons suivantes:

- la direction d'immersion est définie dans le champ 0 – 360 degrés mais l'équation ci-dessus peut déterminer des angles seulement dans le champ 0 – 180;
- du point de vue mathématique, le vecteur normal à un plan peut être soit dirigé vers le haut soit dirigé vers le bas.

Ceci dépend de la position du plan dans le système cartésien tridimensionnel. La convention de mécanique des roches est celle de choisir le vecteur normal au plan de discontinuité dirigé vers le haut pour la détermination de la direction d'immersion.

Pour avoir une définition correcte de l'angle de direction d'immersion il est nécessaire d'utiliser les cosinus directeurs du vecteur normal au plan de discontinuité définis de la façon suivante:

$$\cos(\alpha) = \frac{A}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}} \quad \cos(\beta) = \frac{B}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}} \quad \cos(\gamma) = \frac{|C|}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}}$$

Où α est l'angle entre la direction positive de l'axe x et le vecteur normal n, β est l'angle entre la direction positive de l'axe y et le vecteur normal n, γ est l'angle entre la direction positive de l'axe z et le vecteur normal n. Dans le cas où l'équation caractéristique du plan de discontinuité fournit une valeur du paramètre C négative, on se reconduit au cas $C > 0$.

La direction d'immersion DIP DIRECTION (DD) sera définie par:

$$\begin{aligned} \text{DD} &= \arccos(k) \text{ se } \cos(\gamma) \geq 0 \text{ e } \cos(\beta) \geq 0 ; & \text{DD} &= 180^\circ + \arccos(k) \text{ se } \cos(\gamma) < 0 \text{ e } \cos(\beta) \geq 0 ; \\ \text{DD} &= 360^\circ - \arccos(k) \text{ se } \cos(\gamma) \geq 0 \text{ e } \cos(\beta) < 0 ; & \text{DD} &= 180^\circ - \arccos(k) \text{ se } \cos(\gamma) < 0 \text{ e } \cos(\beta) < 0 . \end{aligned}$$

4 Modèles numériques 3D accouplés à des images photographiques

La finalité de ce travail était celle d'obtenir des modèles numériques tridimensionnels sous forme numérique (MNT) de l'amas rocheux accouplés à des images de l'amas en obtenant donc des images photographiques sur lesquelles il est possible de lire directement les coordonnées de chaque point visible de la pente pour procéder à la réalisation d'un modèle géométrique 3D de la masse rocheuse.

Les deux méthodologies mises au point portent donc à la réalisation d'un modèle numérique 3D des points relevés sur la paroi (MNT), sous forme de nuage de points localisés dans l'espace, accouplés à des images de l'amas rocheux et permettent donc non seulement de remonter à la topographie de la falaise, mais également de localiser les fractures présentes, de calculer l'orientation des plans de fracturation en partie exposés, d'effectuer des mesures d'espacement entre les traces des fractures, et d'interpréter les relations existantes avec les familles de discontinuités pour déterminer la hiérarchie de la fracturation .

En disposant de ces modèles, par rapport à un relevé géostructurel classique:

- on peut avoir accès à un plus grand nombre d'informations spatiales;
- il est possible de relever des pentes non accessibles;
- il y a une réduction du caractère suggestif de l'échantillonnage étant donné que le modèle peut être consulté même au cours des phases successives à l'exécution du relevé.

4.1 Méthodologie photogrammétrique

La méthodologie photogrammétrique mise au point se base avant tout sur la réalisation d'un relevé photogrammétrique moyennant l'emploi d'une caméra numérique, suivie de l'élaboration d'un modèle stéréoscopique moyennant le logiciel Virtuzo, pour obtenir le modèle numérique 3D des points du terrain. Etant donné que l'on dispose du nuage de points qui décrit la géométrie superficielle de l'amas rocheux fracturé, on veut déterminer une décomposition de cette superficie en entités géométriques plus ou moins planes. Il faut donc introduire au sein de la procédure une méthode pour l'extraction de portions plus ou moins planes du MNT, appelée procédure de segmentation de la géométrie du MNT, qui permette la détermination des plans interpolant la pente et des plans moyens de discontinuités.

On a donc élaboré, en collaboration avec le groupe de recherche de topographie et photogrammétrie de « l'università degli studi » de Parme, en particulier avec le professeur Gianfranco Forlani et l'ingénieur Riccardo Roncella, un logiciel spécifique qui permet, en sélectionnant des zones de la paroi rocheuse de façon interactive sur les mêmes images que celles utilisées pour la création du nuage de points, d'isoler les portions de MNT correspondantes et d'en effectuer la segmentation.

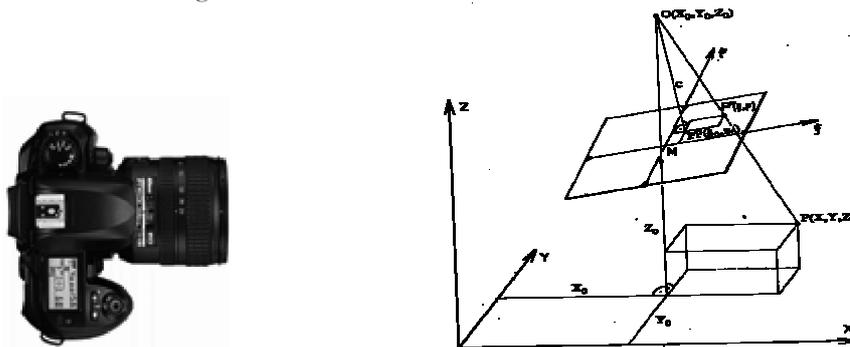


Figura 5 – Camera digitale Nikon D100 – Relation entre le système de repère des points image et le système de repère des points objet

En réalité, il existe dans le commerce différentes applications en mesure d'effectuer l'extraction d'une portion de superficie numérique, mais beaucoup de ces applications ont des coûts élevés et la définition des portions se fait normalement directement sur le modèle numérique tridimensionnel. Toutefois, de cette façon, si on n'applique pas de texture photographique, ce qui est une opération plutôt laborieuse, on perd toutes les informations liées aux images et l'identification des zones d'intérêt résulte peu intuitive. En outre, étant donné que dans le domaine de la méthodologie examinée l'extraction de portions de MNT est un passage intermédiaire d'une procédure plus complexe, l'introduction d'une ou de plusieurs applications extérieures peut rendre la méthodologie beaucoup plus complexe.

4.1.1 ESP

L'instrument spécialement développé a été appelé ESP (extraction de superficies planes) et permet plus exactement de:

- connaître les coordonnées du point correspondant du MNT en sélectionnant un point sur l'image ;
- calculer la distance entre deux points de la paroi rocheuse sélectionnés sur l'image et donc d'effectuer des scanlines fictifs sur l'image pour déterminer l'espacement entre les fractures;
- sélectionner sur l'image une portion de MNT correspondant à une ou plusieurs superficies planes.

Le software a été testé et mis au point avec l'application au site pilote situé dans la commune de Arnad, dans la basse Vallée d'Aoste, pour lequel étaient disponibles les données relatives à deux études géostructurales effectuées selon techniques traditionnelles : la première effectuée par le géologue Alessandro Bellini et la deuxième par le géologue Dario Tosoni.



Figura 6 – Selection sur l'image de portions de mnt – Site pilote de Arnad en Vallée d'Aoste

Les équations des plans interpolant le nuage de points correspondant à la zone sélectionnée sont estimées moyennant l'algorithme de segmentation RANSAC.

Enfin, à partir de l'équation caractéristique de chaque plan, ESP fournit les paramètres d'orientation dip et dip correspondants et les coordonnées de son point barycentrique dans un fichier de texte.

Le programme a spécialement été développé afin de s'interfacer avec Virtuozo: l'entrée des informations se fait donc rapidement et facilement ce qui permet à l'utilisateur de procéder à la détermination des zones d'intérêt en quelques secondes.

L'algorithme, actuellement développé en milieu MatLab, demande à l'utilisateur de spécifier le fichier contenant les coordonnées du nuage de points, un fichier image d'une vue quelconque de la superficie en question, le fichier de calibrage de la caméra avec les relatifs paramètres de distorsion et un fichier contenant les paramètres d'orientation (point de prise de vue et d'orientation) du photogramme sélectionné. Une fois tous les paramètres connus, le programme projette les points du nuage sur le plan du photogramme : en d'autres mots, il produit sur le plan du photogramme l'image des points du MNT.

Une fois obtenue la projection du nuage de points sur l'image il est possible de définir de façon interactive sur le photogramme les zones que l'on veut isoler: l'algorithme procède à la détermination des points du MNT qui sont effectivement projetés dans la région indiquée par l'utilisateur.

4.2 Méthodologie Laser

Les *scanners* 3D acquièrent généralement les informations tridimensionnelles sous forme de nuages de points (*Points clouds*). Pour chacun d'eux on connaît les valeurs de réflectivité, les coordonnées spatiales et, si l'on associe au laser également une caméra numérique à haute résolution, l'information radiométrique (R,G,B).

La première forme pour laquelle l'on peut utiliser ces données est le modèle tridimensionnel à points de l'objet relevé. Celui-ci, entré dans des *softwares* appropriés (Rapidform, Geomagic...), peut être utile à l'analyse de type structurel.

Toutefois, en réalité, à cause de la difficile interprétation, les informations recueillies avec le laser scanner sont peu utilisées si elles sont présentées sous cette forme.

Un produit plus facilement utilisable dans le but de l'enquête tridimensionnelle du nuage de points s'obtient moyennant la modélisation solide (effectuée avec un software semblable à Rapidform, Rhinoceros, Polyworks...). Ces *softwares*, en outre généralement très coûteux, permettent d'obtenir un modèle à surfaces, à partir du nuage de points au moyen de techniques de triangulation ou de création de NURBS (Non Uniform Rational B-Spline).

Il est possible d'obtenir des sections, des profils et des volumes de ces modèles au moyen des plateformes habituellement employées pour le dessin (Autocad, Microstation). Les modèles tridimensionnels à surfaces ainsi créés, résultent être beaucoup plus intuitifs et naturels et permettent un emploi plus immédiat par rapport aux modèles 3D à points, mais pour le relever la fracturation la qualité de l'information visuelle n'est pas encore suffisante : il est nécessaire accoupler aux modèles 3D à points la correspondante image de l'amas rocheux.

Une ultérieure élaboration possible des données fournies par le laser scanner, est l'image solide, qui permet d'obtenir une image bidimensionnelle contenant toutes les informations recueillies par le *scanner* 3D. Dans ce cas encore il est possible d'effectuer des mesures directes d'angles, de distances, de surfaces et, chose particulièrement intéressante dans le domaine de la géomécanique, il est possible d'extraire l'équation du plan moyen d'un nuage de points quelconque, simplement en sélectionnant la surface d'image solide.

Cette dernière technique résulte très intéressante, en particulier pour les mesures que l'on se propose d'effectuer. Il est en effet beaucoup plus simple et moins problématique d'effectuer des mesures directes sur une photographie que sur un modèle solide, en milieu tridimensionnel.

Une image numérique normale est généralement formée de trois matrices à l'intérieur desquelles sont contenues les composantes radio métriques R, G et B (rouge, vert et bleu). L'image solide est définie comme une image numérique classique à laquelle est ajoutée une matrice supplémentaire, ayant les mêmes dimensions que les matrices RGB (en termes de lignes et de colonnes), contenant les valeurs de distance D déduites du MNT. Si l'on dispose d'une seule image il n'est toutefois pas possible de déterminer la position spatiale, dans les coordonnées X Y Z, de l'objet représenté. Pour ce faire, en effet, il faut utiliser au moins deux images auxquelles sont appliqués les principes de la photogrammétrie. Une alternative à l'emploi des deux images peut être la connaissance, pour chaque *pixel* (donc pour chaque direction dans l'espace), de la distance de chaque point appartenant à l'objet représenté par le centre de projection de la perspective centrale. Il est en effet possible de reconstruire la position de chaque point de l'image en en connaissant les coordonnées sphériques (deux angles qui définissent une direction et une distance le long de cette direction) au moyen de simples équations géométriques.

Vu les avantages et les simplifications offertes par l'emploi de l'image solide, on a décidé d'expérimenter cette technique afin d'évaluer les paramètres qui caractérisent les fracturations dans les amas rocheux.

La méthode de relevé mise au point, en collaboration avec le laboratoire de photogrammétrie et laser du Polytechnique de Turin, commence donc avec la réalisation d'acquisitions au moyen de laser accouplées à des images numériques prises au moyen d'un appareil photo monté sur l'instrument grâce à un bras calibré. Les données résultantes sont traitées moyennant des softwares commerciaux spécifiques pour obtenir le modèle numérique 3D des points de la paroi. Pour procéder ensuite à la réalisation de l'image solide et pour consentir à l'opérateur d'effectuer les mesures de type géostructural de façon interactive, le groupe de recherche de photogrammétrie et laser du Polytechnique de Turin a développé un software spécifique: LSR2004.

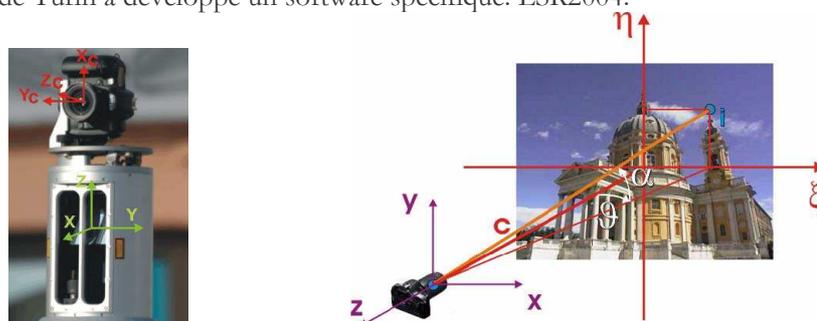


Figura 7 – Laser scanner LMS Z420 Riegl – Relation entre le système de repère des points image et le système de repère des points objet

4.2.1 LSR2004

Il s'agit d'un software spécialement conçu pour le traitement des données laser scanner terrestres, tous les algorithmes utilisés ont été étudiés par des chercheurs de l'université, ont fait l'objet de tests et ont été présentés à l'occasion du Congrès international de topographie, photogrammétrie et télé relevé. Ce software fait encore l'objet d'intégrations et d'améliorations selon les nouvelles techniques d'acquisition laser proposées sur le marché et se propose de réussir à utiliser les données laser dans toute leur complexité.

En ce qui concerne l'application au relevé géostructural de parois rocheuses, en collaboration avec le professeur Fulvio Rinaudo et l'ingénieur Leandro Bornaz, des fonctions spécifiques ont été mises au point dans le software

LSR2004 afin d'obtenir les paramètres géotechniques nécessaires à la réalisation du modèle géométrique de l'amas rocheux fracturé, selon la forme spécialement demandée pour l'emploi dans le domaine de la mécanique des roches, et on a effectué différents tests sur l'application du programme afin de déterminer ses potentialités et afin d'évaluer ses prestations. En particulier, le software a été testé et calibré dans l'application au cas de la paroi rocheuse "Falaise des Trappistes" dans le canton du Vallais, pour lequel il existait des informations dérivant d'un relevé géostructurel exécuté selon les techniques traditionnelles fournies par le centre de recherche CREALP de Sion.



Figura 8 – Calage du software LSR 2004 sur la paroi rocheuse "Falaises des Trappistes"

Le software LSR2004 permet:

- de lire directement, dans une fenêtre appropriée, les coordonnées de chaque point visible de la pente en déplaçant simplement le curseur de l'image ;
- d'effectuer des scanlines fictives sur l'image pour déterminer l'espacement entre les fractures;
- de sélectionner sur l'image une portion de MNT correspondant à un plan. LSR fournit l'estimation aux moindres carrés de l'équation caractéristique du plan et enfin les valeurs correspondantes des paramètres d'orientation dip et dip direction du plan et les coordonnées de son point barycentrique.

5 Modélisation géométrique

Dans la modélisation d'amas rocheux fracturés il est possible de distinguer deux phases :

- la modélisation géométrique ;
- la modélisation mécanique.

La fiabilité d'une simulation du comportement mécanique du modèle fracturé dépend de la précision avec laquelle est défini l'amas rocheux; la modélisation mécanique dépend donc des résultats de la modélisation géométrique .

En outre, pour une correcte modélisation d'un amas rocheux fracturé, même s'il est indispensable de disposer, en plus d'un relevé topographique du versant, d'un relevé structurel exhaustif exécuté avec soin, l'aspect le plus significatif est son interprétation correcte. Il est en effet fondamental de comprendre comment interagissent entre elles les caractéristiques structurelles relevées et quelles sont les plus importantes du point de vue du comportement mécanique globale de l'amas rocheux.

Le modèle géométrique auquel on se rapporte est celui proposé par Héliot (1988), qui décrit l'amas rocheux sous forme d'ensemble de blocs en se basant sur le concept de *hiérarchie du système de fracturation* traité dans le chapitre 1, en observant que les relations entre les systèmes de discontinuités comportent par exemple l'interruption de quelques fractures en correspondance d'autres ou des déplacements relatifs entre les structures et qu'elles sont très importantes du point de vue du comportement mécanique d'ensemble de l'amas. Ces relations traduisent l'intervention d'une succession de phénomène de rupture: les premiers créent en général un ou plusieurs systèmes de discontinuités, tandis que les derniers se limitent en général à agir sur des fractures préexistantes.

Dans le domaine de cette recherche le code de calcul Resoblok pour la modélisation d'amas rocheux fracturés, sous forme d'ensembles de blocs a été utilisé. Il s'agit d'un outil intégré, élaboré à l'origine par Héliot [1988], utilisé et développé dans le domaine des activités du laboratoire LAEGO, Laboratoire Environnement Géomécanique & Ouvrages (INPL – INERIS), auprès de l'École de Mines de Nancy.

Resoblok permet l'introduction déterministe des fractures observées sur place mais également la simulation stochastique des systèmes de discontinuités. L'objectif est d'obtenir des modèles tridimensionnels qui contiennent les discontinuités pouvant être observées sur place et qui étendent l'état de fracturation, de façon stochastique mais en respectant la hiérarchie, aux zones où l'observation directe n'est possible. Pour reconstruire la géométrie de la fracturation en trois dimensions et pour pouvoir mieux interpréter les relations entre les différentes familles de

discontinuités, il est opportun d'essayer d'obtenir des informations sur l'état de la fracturation au sein de la masse rocheuse . A cet effet, il est nécessaire de disposer d'enquêtes complémentaires comme par exemple de sondages géognostiques, d'essais géophysiques, d'observations sur des front exposés avec différentes orientations ou en galeries, là où c'est possible.

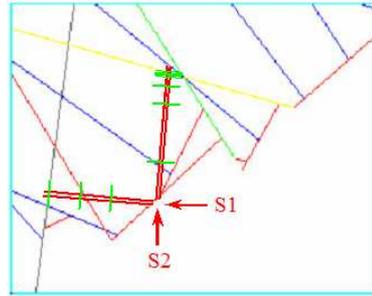


Figure 9 – Section horizontale avec simulation des sondages – Site d'Arnad

La modélisation sous forme d'ensemble blocs, c'est à dire avec fractures complètement persistantes outre à nous mettre en condition de sécurité, est nécessaire pour le passage au code de calcul utilisé pour la modélisation du comportement mécanique de la paroi d'Arnad, 3DEC, qui prend en considération seulement des blocs complètement définis.

6 Analyse de stabilité

L'instrument utilisé dans le domaine de cette recherche pour l'analyse de la stabilité de l'amas rocheux fracturé de Arnad est le module B.S.A. (Block Stability Analysis) de Resoblok, qui en partant des conditions géométriques obtenues par l'ensemble de blocs généré avec le module *bg*, nous fournit des indications concernant la stabilité de chaque bloc créé par les intersections des discontinuités (ou par les travaux d'excavation) qui ont au moins une face libre. L'algorithme employé par ce software se base sur la méthode de Warburton, et il est appliqué à chaque bloc considéré instable.

B.S.A. effectue l'analyse de stabilité des blocs qu'il considère instables en exploitant l'équation de l'équilibre limite; par default il considère comme blocs à analyser tous ceux qui ont au moins une face libre. L'exécution du programme se divise en trois étapes: la préparation des données, le calcul et la restitution des résultats.

En partant des données élaborées au moyen du module *bg* de Resoblok, B.S.A. il permet de déterminer quels blocs sont instables autour du contact avec l'excavation, de calculer leur facteur de sécurité et de les visualiser.

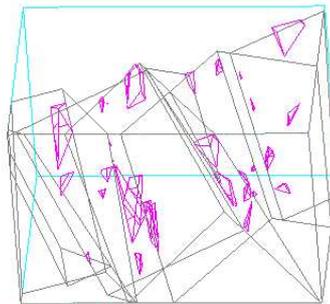


Figure 10 – Visualisation des blocs instables à la première itération - Site d'Arnad

L'analyse en question peut se poursuivre pour de nombreuses itérations: les blocs qui résultent instables sont éliminés et une nouvelle analyse est effectuée. Pour réduire le nombre de blocs instables il est également possible d'introduire des oeuvres de soutien comme les boulons.

B.S.A utilise comme données d'entrée le fichier résultant de l'étude effectuée avec Resoblok. Au fichier scénario original, celui utilisé par le module *bg* de Resoblok, on ajoute les caractéristiques physiques de l'amas rocheux: poids spécifique, cohésion et angle de frottement.

L'introduction de ces paramètres, qui n'est pas nécessaire pour la génération du modèle géométrique, devient fondamentale pour pouvoir procéder à l'analyse de la stabilité de l'amas rocheux fracturé.

7 Modélisation du comportement mécanique

En plus des analyses des conditions de stabilité, effectuées moyennant la méthode de l'équilibre limite à partir des modèles numériques créés avec Resoblok, décrites dans le chapitre précédent, on a retenu opportun de procéder à l'élaboration d'un modèle tridimensionnel à même de reproduire le comportement tensio-déformatif de l'amas

rocheux fracturé du site pilote d'Arnad. On a plus particulièrement utilisé la méthode des éléments distincts, moyennant le code de calcul 3DEC développé par Itasca Group Inc., pour analyses tridimensionnelles.

La géométrie initiale de l'ensemble de blocs est encore celle définie dans le modèle géométrique réalisée avec Resoblok, acquise par 3DEC à l'aide de l'interface Resoblok-3DEC spécifique, mise au point par le Prof. T. Korini dans le domaine de l'activité du laboratoire LAEGO.

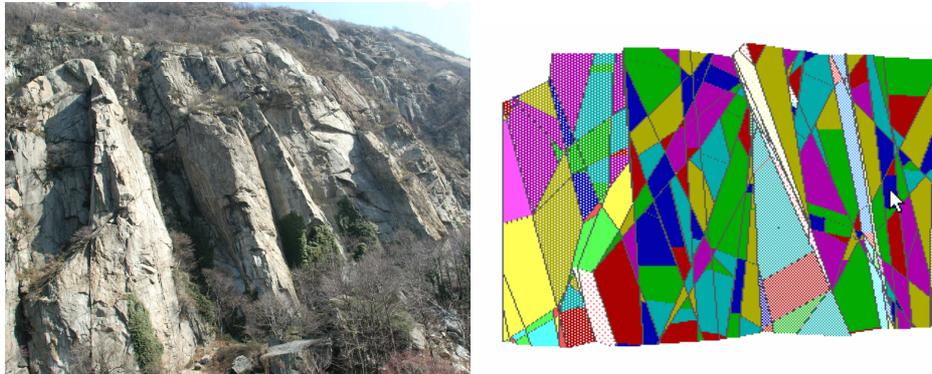


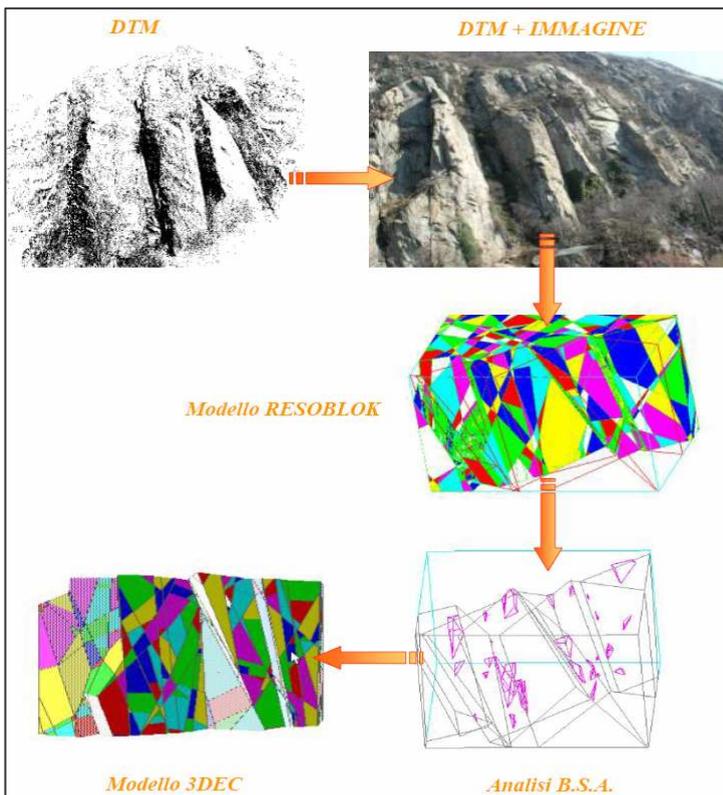
Figura 11 – Versant objet d'étude / Modèle 3DEC – Site d'Arnad

8 Contenus du CD

En annexe, dans le CD, les détails des études effectuées sur 4 sites sont disponibles.

SITE 1 ARNAD

La méthode photogrammétrique a été mise au point sur le site pilote situé dans la commune d'Arnad en basse Vallée d'Aoste, sur le versant hydrographique gauche de la Doire Baltée près du fond de vallée. Il s'agit d'une paroi rocheuse qui s'étend sur environ 150 m en largeur et 90 m en hauteur, constituée de gneiss et intéressée par des phénomènes occasionnels de chute de pierres.



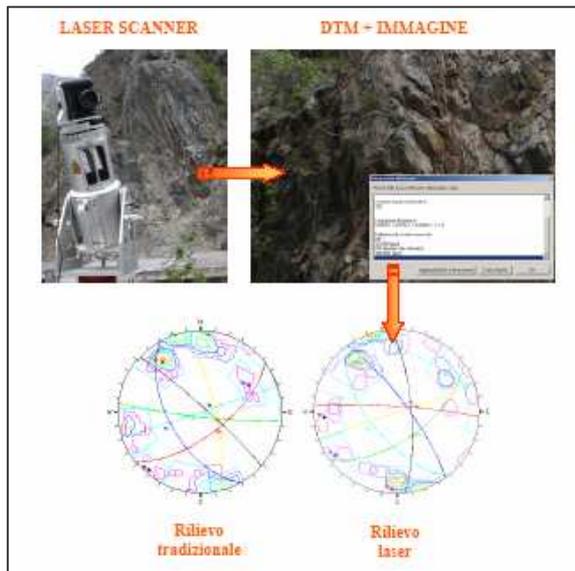
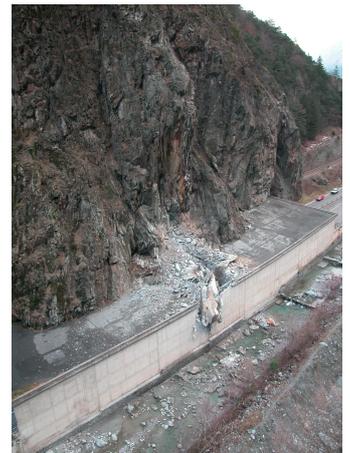
L'étude de ce site a comporté les phases suivantes, qui sont décrites en détail dans le CD :

- 1.1 L'encadrement géologique
- 1.2 Le relevé traditionnel
 - 1.2.1 Les résultats obtenus avec des techniques de relevé classiques
- 1.3 Le relevé photogrammétrique
 - 1.3.1 Le modèle stéréoscopique
 - 1.3.2 La reconnaissance des plans
- 1.4 La comparaison entre le relevé structural classique et la méthode mise au point
- 1.5 Le modèle Resoblok de la paroi rocheuse d'Arnad
- 1.6 L'analyse de stabilité de la paroi rocheuse d'Arnad
- 1.7 Le modèle 3DEC de la paroi rocheuse d'Arnad
- 1.8 Résultats et comparaison avec B.S.A.

SITE 2 FALAISE DES TRAPPISTES

La méthode Laser a été mise au point sur la paroi rocheuse constituée de gneiss dénommée Falaise des Trappistes, située à la hauteur du tunnel para-avalanche de la Monnaie, dans lequel passe la route internationale du Grand-Saint-Bernard (commune de Sembrancher, canton du Valais).

La paroi en question est traversée par un tunnel ferroviaire, avec au pied de la paroi un tunnel routier para-avalanche, dimensionné pour empêcher que la chaussée ne soit envahie par des masses de neige provenant du versant opposé. Ce dernier tunnel a été détruit pendant l'hiver 2003 sur une section d'une longueur d'environ 20 m par le basculement d'un bloc rocheux d'environ 600 m³.



L'étude de ce site a comporté essentiellement l'application de la méthode Laser pour le relevé géostructural de la paroi et la comparaison avec le relevé effectué avec des techniques traditionnelles. Les phases d'étude suivantes sont décrites en détail dans le CD :

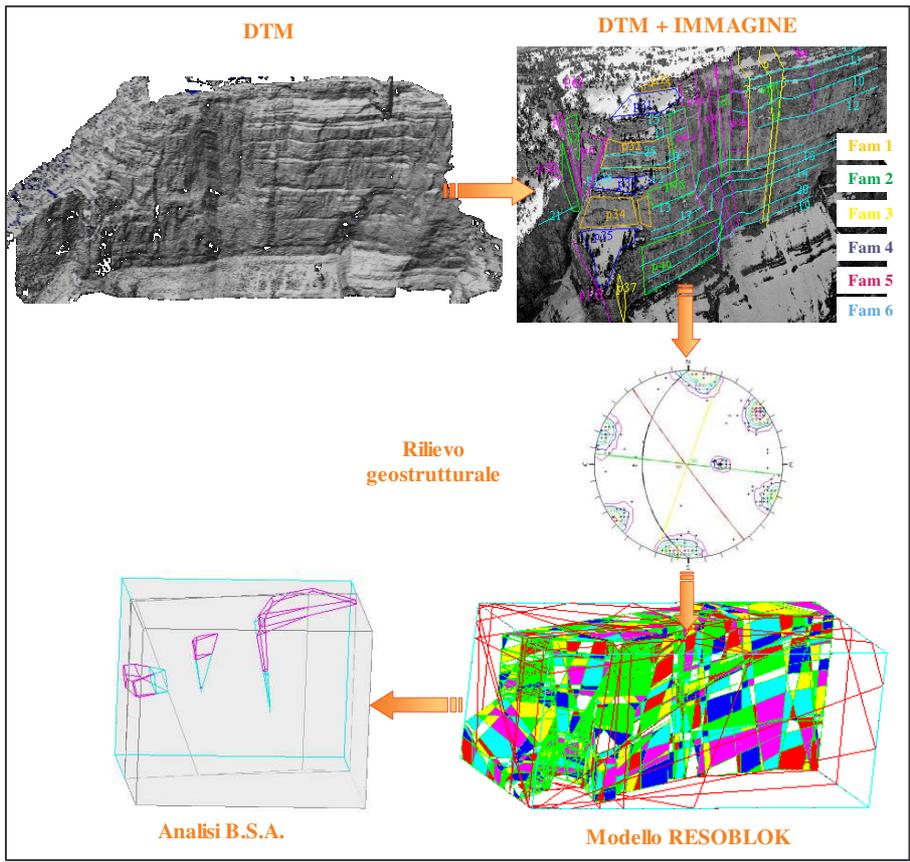
- 2.1 Le relevé traditionnel
- 2.2 Le relevé Laser
 - 2.2.1 Les résultats
- 2.3 La comparaison

SITE 3 MONT GRANIER

Le Mont Granier forme l'éperon Nord du massif de la Chartreuse et se trouve à la limite entre les départements de l'Isère et de la Savoie, dans la commune de Chambéry, en France.

En novembre 1248, un effondrement d'un volume de 300-500 millions de mètres cubes selon les estimations se produisit à partir de la face Nord du Mont Granier. Aujourd'hui, le Mont Granier forme un bastion de masse calcaire aux parois verticales qui repose sur des niveaux marno-calcaires, formant une pente de 15° vers le Sud-Est.



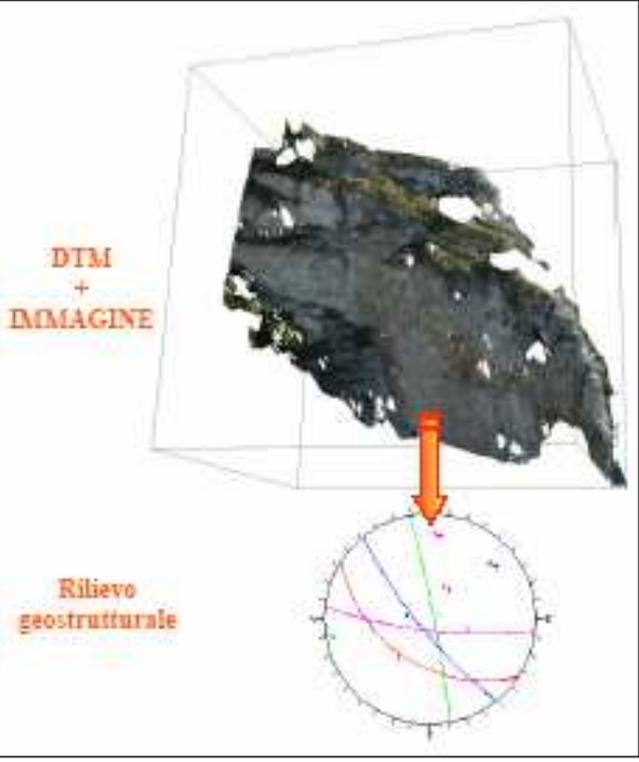
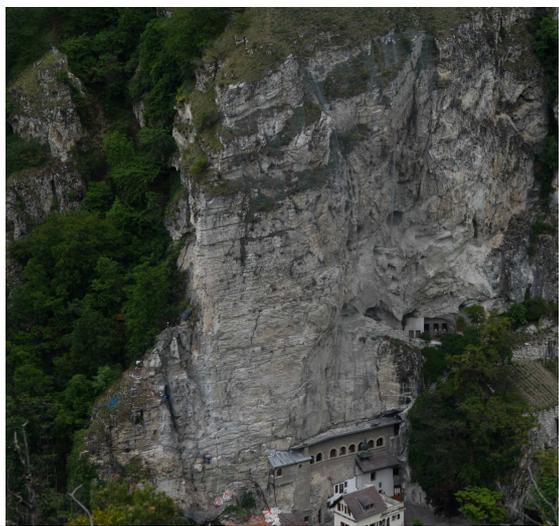


L'étude de ce site a comporté essentiellement l'application de la méthode photogrammétrique en travaillant à partir d'images numérisées d'un précédent relevé photogrammétrique effectué avec caméra métrique de l'hélicoptère. Les phases d'étude suivantes sont décrites en détail dans le CD :

- 3.1 La situation géographique et la description du site
- 3.2 Le modèle stéréoscopique
- 3.3 La reconnaissance des plans
- 3.4 Les résultats

SITE 4 LONGEBORGNE

L'amas de blocs analysé est situé dans la commune de Bramois, dans le canton du Valais en Suisse. Il s'agit de l'amas de blocs qui surplombe l'Ermitage de Longeborgne, situé entre les Alpes cernoises et le Alpes pennines, qui ces dernières décennies a subi de nombreux phénomènes de décollement représentant un risque élevé pour les édifices situés en contrebas.



L'étude de ce site a comporté essentiellement l'application de la méthode photogrammétrique numérique en conditions non optimales pour l'acquisition des images à cause des difficultés d'accès à la paroi; la grande distance et l'impossibilité de réaliser des prises de vue suffisamment amples limitent la capacité d'obtenir des géométries de bloc favorables. Par conséquent l'analyse a été limitée pour le moment à la paroi Ouest, de dimensions plus contenues et d'accès plus facile. Les phases d'étude suivantes sont décrites en détail dans le CD :

- 4.1 La situation géographique et la description du site
- 4.2 Le relevé photogrammétrique
- 4.3 La reconnaissance des plans

Action C : Etude et modélisation de la propagation

1 Bibliographie

1.1 Modélisation physique (V. Labiouse, I. Manzella)

Classification des références les plus significatives sur la modélisation physique d'écoulement granulaire et de blocs, structurée selon les conditions d'essais afin de donner au lecteur la possibilité de découvrir rapidement le genre d'étude expérimentale qui l'intéresse (on retrouve la liste complète des références dans le CD).

				Material, Diameter [mm]	Amount	Height [cm]	Slope	Reference
Granular material	2D	Steady flow	Small scale	Glass beads D=0.3	<7.2Kg/s/m	<130	<40°	Ancey et al (1997)
				Steel beads D=3	1200-1700 particles/s	~60<h<~80	18°-24°	Azanza et al (1997)
				Quartz sand D=0.035		50<h<90	33°	Bagnold (1954)
				Plastic spheres D=6	2230,1280 particles/s	~250 cm	42.75°	Drake (1990 and 1991)
				Sand, rock flour, polystyrene beads	200 Kg/s	400<h<700	28.4°,33.6°	Hungr, Morgesten (1984)
		Glass beads D=0.5,1.3,1.15		<100	20°-28°	Pouliquen (1999)		
		Glass, Vestolen, Quartz, marmor beads 2.5<D<5	1.5, 3 1	~ 200	Curved	Greve, Hutter (1993)		
		Chick peas D=10	15000, 16000 peas	~90<h<~165	20°-50°	Bouid (1999 and 2001)		
		Debris?	V,1/19V			Broilli (1976)		
		Gravel density=2650 kg/m ³	~9,~18dm ³	~200<h<350	27°-44°	Chu et al (1995)		
	Silica sand D ₅₀ =0.19, gravel D ₅₀ =2	0.1-1-10-1000 1	~100<h<150	35°, 45°	Davies, McSaveney (1999) Davies et al (1999)			
	Fine silica D=0.19	1.8 1	H _{CM} =14,21,35	45°	Davies, McSaveney (2002 and 2003)			
	Glass, Vestolen, Quartz, marmor beads 2.5<D<5	1.5,2.5,3 1	~200	curved	Hutter, Koch (1991)			
	Plastic particles D=4, glass beads D=3	500 to 5000gr		40°-60°	Hutter, Savage (1988)			
	Glass, alumina, zirconia beads D=14	100 to 600 part.	~50<h<100	15°,25°	Okura et al (2000 and 2001)			
	Ticino sand D=0.6	22.5 dm ³	~170	25°	Valentino et al (2004)			
	3D	Unsteady flow	Small scale	Chick peas D=10	15000, 16000 peas	~90<h<~165	20°-50°	Bouid (1999)
				Glass, Vestolen, Quartz, marmor beads 2.5<D<5	<3dm ³	~200	20°-60°	Greve et al (1994)
				Silt, dry ice (also oil, bentonite, thixotropic flow)	<160 cm ³	~60	41°	Hsü (1975)
				Dry quartz sand D=0.5	290 cm ³	~19.5	31.4°	Denlinger, Iverson (2001)
Glass beads D=0.5				62,231,524 g	<100	19°-24°	Pouliquen, Fortierre (2002)	
Vestolen beads D=2-3.5, marble chips D=2-4, quartz chips D=4-5				<3 dm ³	~180	40°	Wieland et al (1999)	
Large scale			Water saturated sand and gravel	10 m ³	~5000	31°	Denlinger, Iverson (2001)	
Blocks	3D	Unsteady flow	Small scale	Jointed mass, block of 36x36x110	~2dm ³		20°,28°, 36°	Reik, Hesselmann (1976)
				Jointed mass, block of 120x120x30, 120x30x30	~2dm ³		35°, 40°	Rengers, Müller (1970)
		Large scale	Square block	0.001 to 1 m ³	290	35° and 20°	Okura et al (2000 and 2002)	

1.2 Modélisation numérique des écoulements de grande masse (M. Naaim)

Dans l'objectif de décrire les avalanches rocheuses, plusieurs *modèles numériques* ont été développés et utilisés. Mais avant toute chose, il faut rappeler qu'un modèle n'est qu'une *représentation* de la réalité, plus ou moins simplifiée en fonction des hypothèses retenues, qui doit rendre compte de phénomènes complexes, le plus souvent concomitants et en interaction plus ou moins forte entre eux. Donc tout modèle numérique intègre une partie empirique, sorte de "boîte noire" plus ou moins en relation avec la physique. Elle permet de caler une certaine réalité physique (déduite d'expérimentations en modèles réduits ou d'hypothèses physiques) sans se soucier totalement des mécanismes physiques sous-jacents et des lois d'échelles.

1.2.1 Représentation du terrain

Le terrain sur lequel se produit l'avalanche est représenté dans une modélisation par une discrétisation de l'espace qui n'est autre qu'un maillage de l'espace qui consiste à représenter le site par une série de segments ou surfaces. Chacun de ces éléments spatiaux est caractérisé par la pente moyenne, l'orientation, la longueur ou la surface, et les éléments voisins. Cette représentation est une des clefs de la réussite de la simulation numérique. Pour que les calculs soient précis il faut veiller à ce que les caractéristiques principales du site soient intégrées dans cette représentation. Il faut veiller en particulier aux ruptures de pentes et aux thalwegs.

1.2.2 Représentation de la masse en mouvement

Discret ou continu ?

Il existe au moins deux modes de représentation de la masse en mouvement. Soit on se place dans le cadre de la mécanique des milieux discrets ou dans le cadre formel de la mécanique des milieux continus. La première description est très adaptée au écoulement de petite taille où il est possible de décomposer la masse en « grains » élémentaires représentatifs des éléments constitutifs de la masse. La seconde représentation est adaptée au cas des grands mouvements de terrain. Dans ce cas la taille des grains élémentaires est négligeables devant la taille de l'écoulement ce qui rend possible de considérer la masse comme un milieu continu déformable et lui appliquer le formalisme classique des milieux continus.

Principe de conservation et loi de comportement

Quelque soit la représentation choisie, la dynamique de la masse est régie par deux classes d'équations. La première classe correspond aux principes fondamentaux de conservation à savoir la conservation de la masse, la conservation de la quantité de mouvement et la conservation de l'énergie. En plus des termes inertiels et de forces extérieures, ces équations rendent compte des dissipations internes et à l'interface avec le substratum. Cette dissipation nécessite la détermination empirique ou le choix d'une formulation théorique des équations d'état dites aussi lois de comportement.

Modélisation discrète

L'approche discrète permet de calculer la cinématique (champ de vitesse) d'un ensemble de particules rigides reliées entre elles par des lois de frottement, tenant compte des forces de contact (friction, cohésion, collision), des forces de volume (pesanteur) et des conditions aux limites (force, déplacement, accélération). A chaque incrément de temps, la solution des équations de la dynamique est calculée de façon implicite pour l'ensemble des particules, grâce à une méthode itérative dont le résultat converge vers une solution unique. Cette méthode permet d'analyser des systèmes constitués de plusieurs milliers de particules en un temps de calcul raisonnable sur une station de travail de puissance modérée. Elle est particulièrement bien adaptée à l'étude de problèmes de propagation de mouvement de terrain composés d'un nombre limité de blocs.

Modélisation continue

L'approche continue permet de calculer la dynamique (champ de vitesse et d'épaisseur) d'une masse déformable représentée par une discrétisation spatiale (projection sur un maillage), une loi de comportement, des forces de volume (pesanteur) et des conditions aux limites.

Trois formes d'équations sont utilisées. Sans hypothèses supplémentaires, il est possible de résoudre les équations de conservation complète appelé équations de Navier Stokes. Des codes généralistes tels que Fluent, Star CD, Flows 3D, offrent des possibilités de simulation de grands glissements. La complexité, le temps et le coût des calculs rendent dérisoire l'exploitation de ce type de logiciel dans l'étude des mouvements de terrain. D'ailleurs, aucun modèle de ce type n'a été exploité dans ce projet. Il est par contre possible, moyennant des hypothèses objectives de simplifier les équations et d'obtenir des outils de simulation plus simples:

- Soit en supposant que la longueur de l'écoulement est grande devant son épaisseur ce qui rend légitime l'intégration sur l'épaisseur et réduire ainsi d'une dimension la complexité du système à résoudre. C'est ce qui est

appelé formalisme d'onde longue ou formalisme de Saint Venant. Dans ce projet trois modèles exploitant ce formalisme ont été utilisés : RASH3D (Politecnico de Turin/IPGP), DAN (Politecnico de Turin/Hungr) et le modèle du Cemagref.

- Soit en supposant que la déformation de l'éroulement est négligeable devant la distance parcourue, ce qui permet de considérer l'éroulement comme un bloc indéformable et de résoudre une équation de mouvement d'un bloc glissant sur un plan incliné, c'est le modèle de Voellmy.
- Soit en décomposant le glissement en volumes élémentaires et en étudiant la trajectoire de chaque élément en interaction avec ses voisins, avec dissipation de l'énergie par frottement. C'est le modèle du CETE Méditerranée, Epan3D.

A chaque incrément de temps, la solution des équations de la dynamique est calculée de façon explicite ou implicite pour l'ensemble des éléments du maillage, grâce à une méthode itérative. Cette méthode permet d'accéder au champ de vitesse et de hauteur pour des éroulements de grande masse. Dans le cas de calcul de type trajectographie, les calculs se font par segments élémentaires sans forcément avoir recours à un maillage plus fin que la représentation initiale. Par contre les modèles de type Saint Venant, nécessitent en général un raffinement de la représentation initiale par la génération d'un maillage de calcul plus fin. La précision, mais aussi la taille et la durée de la simulation dépendent du niveau de finesse retenu. Il est possible de réaliser un calcul avec une précision raisonnable sur une station de travail de puissance modérée en adoptant des maillages compris entre 1 et 10 m de pas d'espace. Cette méthode est très adaptée à l'étude de la propagation de grands mouvements de terrain.

Tableau récapitulatif des modèles de simulations des éroulements de grandes masses:

Code	Représentation de la masse en mouvement	Lois de comportement	Paramètres	Volume (m ³)	Représentation du terrain	Résultats attendus
PFC2d/3d	Discrète	Loi de contact entre grains, frottement, collision, cohésion	Coefficient de frottement inter granulaire, coefficient de restitution, coefficient de dumping	<10000	1D ou 3D	Cinématique des grains, extension de l'éroulement
Saint Venant : DAN, DAN3D, Cemagref RASH ^{3D}	Continue	Loi de frottement : Mohr-Coulomb Voellmy Hershel Bulkley Granulaire (de Bagnold à Pouliquen)	Coefficient de frottement (Mohr-Coulomb, Voellmy,)	>100000	1D 2D	Champs de vitesse moyennes et hauteurs, extension
EBMAS/ EPAN3D	Discret et continue	idem	idem	idem	idem	Extension

2 Description des méthodes numériques

2.1 Description des méthodes

Quatre méthodes développées ou utilisées par les partenaires du projet sont brièvement présentées dans cette section. Sur le CD, ces méthodes sont présentées en détail par chacun des auteurs.

2.1.1 Méthode du CETE Aix : modèle EPAN3D (Serratrice)

La méthode de calcul par épandage a pour objectif de simuler la propagation le long d'un versant montagneux puis l'accumulation et l'étalement dans la vallée d'un amas rocheux volumineux. Le calcul s'appuie sur la topographie du site définie à trois dimensions par un modèle numérique de terrain précis (MNT). Le volume rocheux instable est discrétisé en petits éléments de volume. Après déclenchement du mouvement, ces éléments se déplacent sur le

MNT et les uns par rapport aux autres en glissant, jusqu'à trouver un équilibre en fond de vallée où ils s'accumulent et s'étaient. Pendant le mouvement, la morphologie du versant est mise à jour à chaque pas de calcul en intégrant l'ensemble des éléments glissants.

Après discrétisation du volume rocheux instable en petits éléments, le calcul par épandage s'effectue par pas de temps successifs. A un instant donné, la trajectoire d'un élément glissant au sein de l'amas rocheux est déterminée par l'équation dynamique du mouvement appliquée au plan tangent local couvert par l'élément. Le modèle comporte une vingtaine de paramètres au total. Huit d'entre eux sont des paramètres mécaniques qui gouvernent la propagation. Les autres paramètres sont dédiés à la discrétisation et l'exécution du calcul numérique (nombre d'éléments, volume élémentaire, pas de temps, tests de convergence, etc.).

La dissipation de l'énergie est produite essentiellement par frottement des éléments glissants entre eux et sur la surface du versant. Une loi définit le frottement $\mu = \text{tg}\phi$ comme une fonction de la vitesse instantanée v de chaque élément glissant (quatre paramètres ϕ_0, ϕ_1, v_0, v_1) :

$$\begin{array}{lll} v \leq v_0 & \mu = \mu_0 & \mu_0 = \text{tg}\phi_0 \\ v > v_0 & \mu = \mu_0 + (\mu_1 - \mu_0) [1 - \exp(-(v - v_0)/v_1)] & \mu_1 = \text{tg}\phi_1 \end{array}$$

Une autre loi traite de l'évolution de la forme et du volume de chaque élément glissant dans son parcours. Chaque volume élémentaire prend la forme d'un paraboloïde de section circulaire (a rayon de la base, e a hauteur, e étalement). Le poids volumique initial de la roche est γ . Le volume élémentaire V et de son étalement e évoluent en fonction de l'abscisse curviligne s de l'élément (trois paramètres s_0, r_f, r_e) :

$$f(s) = \exp(-s/s_0) \quad V = V_0 [1 + r_f (1 - f(s))] \quad e = 1 + r_e (1 - f(s))$$

Les huit paramètres mécaniques du modèle sont donc :

γ	poids volumique initial de la roche (kN/m ³)	
ϕ_0, ϕ_1	paramètres de frottement (°)	$\phi_0 < \phi(v) < \phi_1$
v_0, v_1	vitesse caractéristiques	
s_0	distance caractéristique de propagation (m)	
r_f	coefficient de foisonnement ()	$r_f > 0$
r_e	coefficient d'étalement ()	$r_e > 0$

Le poids volumique γ est donné par le massif rocheux. Le foisonnement r_f rend compte de l'augmentation du volume de la roche en mouvement. Les paramètres ϕ_0 et ϕ_1 gouvernent la dissipation d'énergie. Le paramètre r_e participe aussi à la dissipation, car des éléments bombés (faible étalement) dissipent plus d'énergie que des éléments plats (grand étalement). Tous les autres paramètres sont plus ou moins indexés sur la dimension du site, en particulier v_0 et s_0 . Enfin, $v_1 \approx 5 v_0$. La modélisation des quatre cas documentés a consisté principalement à ajuster les paramètres de dissipation de l'énergie, qui possèdent le plus de poids dans les calculs. Mais la discrétisation du volume initial instable apparaît comme un facteur au moins aussi fondamental et déterminant que ces paramètres.

2.1.2 Méthode du CETE Lyon : modèle EBMAS (Effendiantz)

La propagation des éboulements de grand volume (supérieur à 0.5hm³) fait intervenir un effet de masse qui entraîne une réduction des mécanismes de dissipation d'énergie au sein des matériaux en mouvement et accentue la propagation de ceux-ci. L'influence du volume total mis en jeu simultanément dans un éboulement de grande masse est déterminante pour la propagation et l'extension du phénomène.

Le modèle de propagation applicable aux éboulements indépendants (PROPAG) a été transposé aux éboulements en grande masse. Indépendamment des aspects mécaniques spécifiques, l'importance des volumes en cause impose la prise en compte de l'effet 3D. Les points principaux de la méthode sont résumés ci-après :

- extension du concept de fonction de transfert qui caractérise la dissipation d'énergie dans le cas de la propagation d'un bloc élémentaire en mode indépendant;
- calcul par incréments de volumes successifs prenant en compte la modification continue du profil du versant par le processus d'éboulement;
- calcul effectué par tranches juxtaposées selon des couloirs d'éboulement définis manuellement par l'utilisateur. Le calcul prend en compte les interactions en fonction de la géométrie des couloirs voisins et des volumes affectés.

Ces trois volets sont intégrés dans un modèle global qui permet de simuler de manière homogène et continue la réalisation de l'ensemble de l'éboulement en prenant en compte l'effet de l'interaction mutuelle entre couloirs.

Le calage du modèle a été effectué sur de grands éboulements historiques (cf. écroulement du Mont Granier) pour les très grands volumes et à l'autre extrémité de la gamme par référence aux éboulements classiques pour lesquels on dispose de nombreuses validations.

2.1.3 Méthode du Cemagref (Naaim)

Dans le cadre de ce projet, le Cemagref a développé un modèle numérique pour l'analyse de la dynamique des écoulements rapides d'avalanches de débris. Le modèle est construit dans le cadre de la mécanique des milieux continus et exploite le cadre formel de Saint Venant. Il exploite les lois de comportements des milieux granulaires issues des derniers progrès dans la rhéologie des milieux divisés.

Les principales caractéristiques de ce modèle sont les suivantes :

- Capacité à simuler l'écoulement sur un terrain complexe tridimensionnel,
- Capacité à prendre en compte l'anisotropie du champ de pression.

L'algorithme de résolution des équations sous leur forme conservative, utilise des schémas numériques de type volumes finis très adaptés à l'hydrodynamique. Le modèle a été testé en analysant une série d'expériences de laboratoire avec des matériaux granulaires en écoulements permanents ou transitoires. Le modèle a, par la suite, permis de reconstituer de manière réaliste les cas d'avalanches retro analysés dans ce projet.

2.1.4 Méthode du Politecnico de Turin: modèles DAN et RASH3D (C. Scavia, M. Pirulli)

La simulation du flux d'une masse est réalisée par le Politecnico de Turin en utilisant une méthodologie qui prévoit la combinaison de deux modèles, un modèle simple bidimensionnel (DAN, Hungr 1995), et un modèle tridimensionnel plus complexe (RASH^{3D}, Pirulli 2005). On utilise d'abord DAN pour déterminer rapidement l'intervalle de variation des paramètres rhéologiques; puis, pour obtenir des résultats plus complets et réalistes, on utilise les valeurs provenant de DAN pour caler le modèle tridimensionnel.

Les deux modèles sont construits dans le cadre de la mécanique des milieux continus et permettent d'utiliser une rhéologie simplifiée, par exemple par frottement (type "frictional") dans laquelle les seuls paramètres à déterminer sont l'angle de frottement à la base de la masse en mouvement (ϕ) et, quand on suppose l'anisotropie des contraintes, l'angle de frottement interne du matériel (ϕ).

Le logiciel **DAN** (Hungr, 1995) réalise une solution de Lagrange monodimensionnelle des équations du mouvement. Il permet de choisir entre des rhéologies différentes (plastique, de frottement, Newton, turbulent, Bingham, visqueux de Coulomb, Voellmy) qui peuvent changer aussi bien le long du parcours qu'à l'intérieur de la masse.

Les principales données qu'il faut fournir au code sont le profil de la pente et de la masse instable. Pour réaliser des analyses pseudo tridimensionnelles on doit définir la largeur de l'écoulement au niveau de chaque point du profil de la pente en tenant compte du fait que toute la largeur déterminée sera occupée par la masse en mouvement. Ce problème est facilement résolu si l'on effectue une rétro-analyse car les limites latérales de l'espace occupé par la masse en mouvement sont alors connues. Mais la représentation de cas de "splitting" de la masse (séparation en plusieurs chenaux d'écoulement) reste impossible.

Les principaux résultats obtenus sont: la distance de propagation, la remontée sur le versant qui se trouve en face de la zone instable, la vitesse du mouvement, les limites de la zone de propagation et l'épaisseur de la masse arrêtée. L'utilisation du modèle nécessite une formulation très simple de la topographie, bien que celle-ci soit souvent complexe. Cette limitation rend les résultats forcément approximatifs, mais elle permet une grande rapidité dans la simulation numérique de cas réels.

Le logiciel tridimensionnel **RASH^{3D}** (Pirulli, 2005), utilise une approche de type Eulerian, qui résout les équations du mouvement en utilisant un schéma par volumes finis (Audusse et al. 2001, Bristeau et al. 2001, Mangeney et al. 2003). Le modèle permet de choisir entre une rhéologie de type "frictional" et une rhéologie de type Voellmy. La rhéologie peut changer le long du parcours de la masse en mouvement.

Les principales données de géométrie qu'il faut fournir au code sont le modèle digital de terrain avant éboulement (MNT) et la géométrie du volume potentiellement instable. La géométrie du parcours de propagation de la masse ne doit pas être déterminée par avant mais elle se détermine automatiquement en fonction de la topographie pendant l'analyse de propagation. Le code est aussi capable de simuler le comportement de la masse en cas de "splitting" (séparation en plusieurs chenaux d'écoulement).

Les fichiers créés par RASH^{3D} fournissent tous les informations nécessaires pour réaliser, avec un outil graphique (ex. Surfer), une représentation tridimensionnelle sur topographie réelle des limites de propagation de la masse et d'obtenir l'épaisseur le long du parcours par exemple sur une coupe quelconque.

Dans le cadre du projet Rockslidetec, les analyses avec DAN et RASH^{3D} ont été réalisées en utilisant une rhéologie de type "frictional" qui est la rhéologie qui nécessite le plus petit nombre de paramètres. Ce choix est

justifié du fait que la valeur des paramètres rhéologiques est difficile à déterminer à priori. Il est ainsi de limiter au mieux le nombre de paramètres à utiliser.

2.2 Synthèse – comparaison pour l'utilisateur

Parmi les des codes utilisés dans ce projet, deux sont diffusés : DAN sous licence et le code Cemagref gratuitement. Ce dernier bénéficie de possibilités de maintenance. RASH3D est en cours de développement et n'est pas encore utilisable par des tiers. Les autres codes sont des outils propres aux organismes qui les ont développés à fin d'expertise.

Les temps d'utilisation mentionnés correspondent au temps estimé pour une étude de propagation à partir de l'instant où la commande est formulée et les données disponibles (MNT et scénarios de déclenchement).

Modèle / partenaire	Propriétaire / contact	Modalité d'utilisation	Type de validation
DAN (Politecnico Torino)	University of British Columbia Contact : Oldrich Hungr Department of Earth and Ocean Sciences University of British Columbia 6339 Stores Rd., Vancouver, B.C., V6T 1Z4, Canada Tel : 001 604 8228471 ohungr@eos.ubc.ca	Licence / utilisation + Prestation	Publications scientifiques Hungr, 1995 Hungr & Evans, 1996 Hungr & Evans, 1997 Hungr, 1997
RASH 3D (Politecnico Torino)	Politecnico di Torino/Institut de Physique du Globe de Paris/INRIA Contact : Marina Pirulli Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica Corso Duca degli Abruzzi, 24 10129 TORINO Tel : 0039 011564 4823 marina.pirulli@polito.it	Prestation	Publications scientifiques : Pirulli, 2005
Cemagref	Cemagref Contact : Mohammed Naaim Division ETNA 2 rue de la Papeterie BP 76 38 402 saint Martin d'Hères Cedex Tel : 00 33 4 76 76 27 22 mohamed.naaim@cemagref.fr	Gratuit / utilisation + Prestation	Publications scientifiques
EPAN 3D (CETE Méditerranée)	CETE Méditerranée Contact : Jean-François Serratrice Pôle d'activités d'Aix en Provence CS 70499 13593 Aix en Provence cedex 3 Tel : 04 42 24 78 52 jean-francois.serratrice@equipement.gouv.fr	Prestation	Interne Ministère Equipement
EBMAS (CETE Lyon)	Rochet Consultants (R&R) Contact Louis Rochet 4 rue Clément Ader 69500 Bron Tel : 00 33 4 72 37 13 96 rr.consultants@wanadoo.fr	Prestation (R&R)	Interne R&R

Modèle / partenaire	Rétro analyse	Analyse prédictive ?	Temps (avec MNT)	Perspectives d'évolution
DAN (Politecnico Torino)	Oui	Déjà utilisé (Ceppo Morelli)	4 jours	Extension au tridimensionnel (voir McDougall and Hungr, 2004)
RASH 3D (Politecnico Torino)	Oui	Pas encore utilisé	6,5 jours	Créer une interface "user friendly"
Cemagref	Oui	Pas encore utilisé	2,5 jours	Ouvert aux collaborations / transferts vers des utilisateurs
EPAN 3D (CETE Méditerranée)	Oui	Déjà utilisé (Sechilienne)	6 jours	
EBMAS (CETE Lyon)	Oui	Déjà utilisé (Sechilienne)	15 jours	Amélioration de la prise en compte des propagations déconnectées du pied de versant et des morphologies de dépôts complexes (contre-pentes, lacunes de dépôts..)

3 La Modélisation physique (I. Manzella, V. Labiouse)

3.1 Description des essais

Une campagne expérimentale a été menée sur un modèle géométriquement simple (figure ci-dessous) constitué d'une boîte fixée sur un plan incliné à 45° ainsi que d'un plan horizontal. Du matériau granulaire contenu dans cette boîte et représentant la masse instable est soudainement libéré et sa propagation filmée au moyen d'une caméra numérique à acquisition rapide. Les essais ont été menés afin de mettre en évidence l'influence sur la propagation de la masse et la morphologie du dépôt (longueur, largeur, hauteur) des paramètres suivants :

- la nature du matériau : sable d'Hostun (0.315-0.8 mm) et gravier d'aquarium (1-4 mm) ;
- la hauteur de lâcher (1 et 2 m) ;
- le volume de matériau (entre 10 et 40 litres) ;
- la séquence de lâcher (p.ex. 30 litres en une fois ou en trois fois 10 litres) ;
- la géométrie de départ de la masse lâchée.

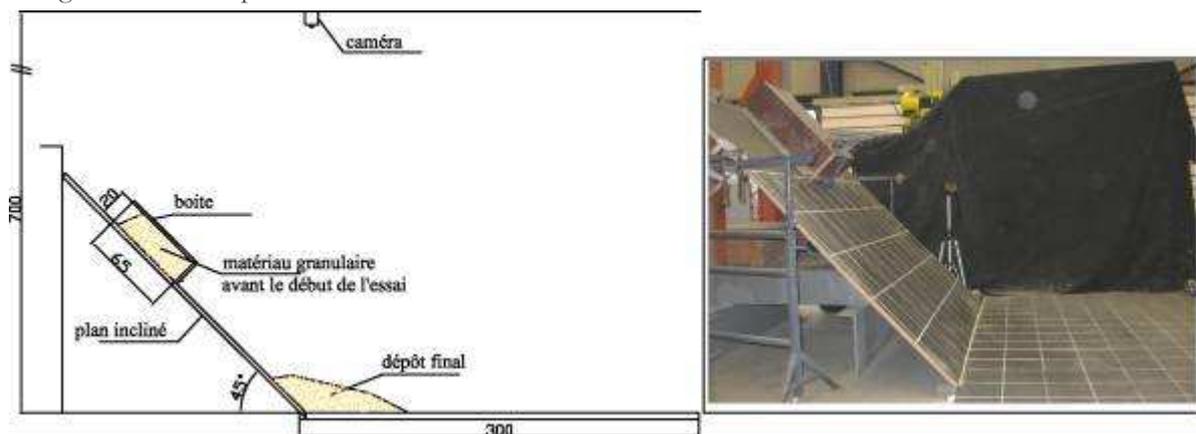


Figure 1: Dispositif d'essai

Paramètres		Matériau			Hauteur (m)		Volume (l)				Nombre de lâchers				Géométrie de départ hauteur (cm) * largeur (cm)				
		Hs	Gr2	Gr4	1	2	10	20	30	40	1	2	3	4	20*20	20*30	20*40	8.5*40	
Séries	1 ^{er} modèle	1A		Gr2	1		10	20	30	40	1							20*40	
		1B		Gr2	1			20	30	40	1	2	3	4				20*40	
		2A	Hs			1		10	20	30		1						20*40	
		2B	Hs			1				30		1	2	3				20*40	
	3A		Gr2		1		10	20			1							8.5*40	
	3B		Gr2		1			20			1	2						8.5*40	
	2 ^e	4A		Gr2		1			20	30	40	1						20*40	

	4B		Gr2		1				40	1	2			20*40
	5	Hs			1		20	30		1				20*40
	6A		Gr2		2		20	30	40	1				20*40
	6B		Gr2		2				40	1	2			20*40
	7	Hs			2			30		1				20*40
	8			Gr4	2			30		1				20*40
	9		Gr2		2		20			1		20*20		
	10		Gr2		2		20	30		1			20*30	
	11		Gr2		2		20			1				20*40 plat

La distance parcourue par la masse sur le plan horizontal (runout) ainsi que les longueur, hauteur et largeur du dépôt final ont été mesurées manuellement après chaque essai. La vitesse du front de la masse a été évaluée à partir des films en utilisant le logiciel d'analyse d'images WINalyze. Le volume et la morphologie du dépôt sont étudiés au moyen d'une nouvelle technique métrologique basée sur la projection de franges.

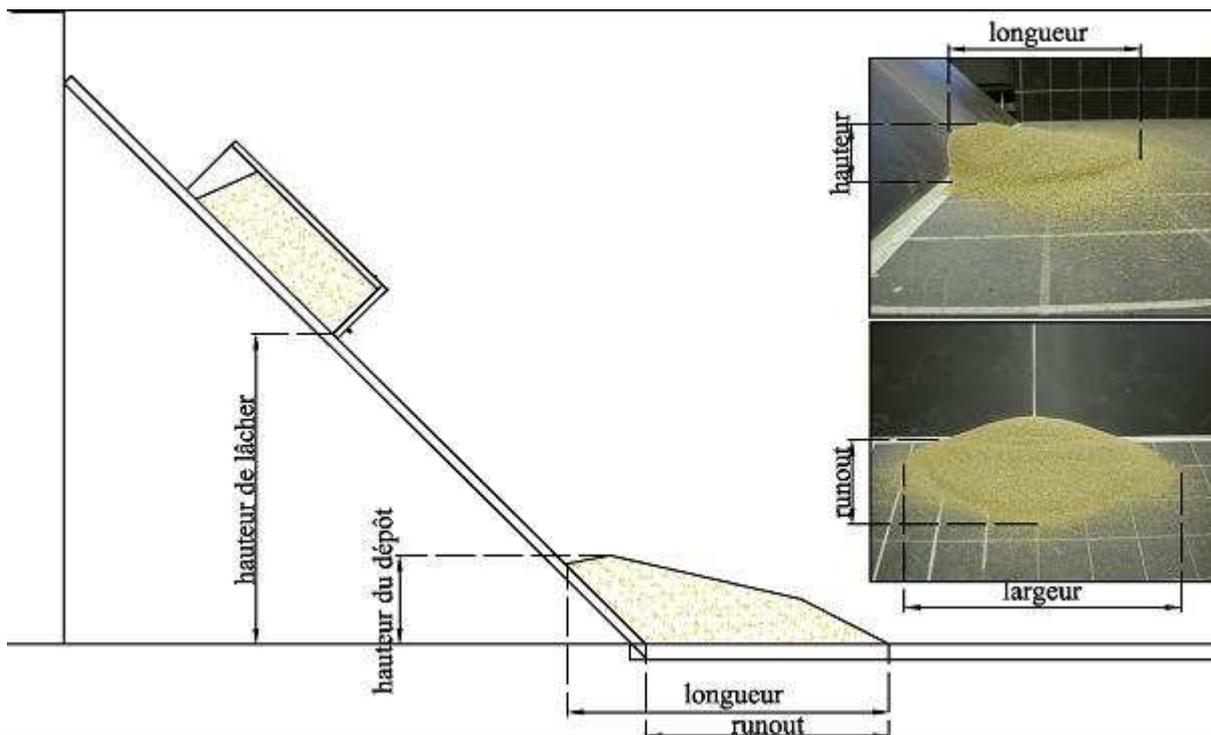


Figure 2: Caractéristiques du dépôt

Le tableau ci-dessous résume qualitativement l'influence d'une augmentation des paramètres étudiés (lignes) sur les caractéristiques du dépôt (colonnes).

Paramètres	Runout	Largeur	Hauteur	Longueur	Morphologie	Vitesse
Matériaux De Hs à Gr2	↗	↗	↘↘	↗	Différence significative	↗
Volume	↗	↗	↗	↗	↔	↗ À la fin
Hauteur de lâcher	↗ Faible	↗	↘	↗ Faible	Formes différentes	↗ Même allure
Largeur de la masse au départ	↔	↗ Faible	Variable	Variable	↔	↔
Nombre de lâchers	↘	Variable	↗↗	↗	Evolution vers un cône	-
Lâchers successifs	↔	↗	↗↗	↗	-	-

Une nette différence de morphologie de dépôt est notée entre les deux matériaux granulaires testés. La configuration du dépôt de sable est conforme aux nombreuses expériences décrites dans la littérature (Hutter, Savage, Bagnold...), tandis que la morphologie du dépôt avec le gravier d'aquarium présente des discontinuités

angulaires bien marquées (zone centrale à faible pente, mais fronts avant, arrière et latéraux fortement inclinés) que l'on retrouve sur le site du Six des eaux froides (Valais, cf. 4.1) et sur d'autres sites d'avalanches rocheuses (tel que Frank Slide, selon les dires du Professeur Oldrich Hungr). Cette différence de morphologie résulte probablement plus de l'allongement et de l'angularité des grains que de l'étalement de la granulométrie. Ce point reste néanmoins à éclaircir à l'avenir.

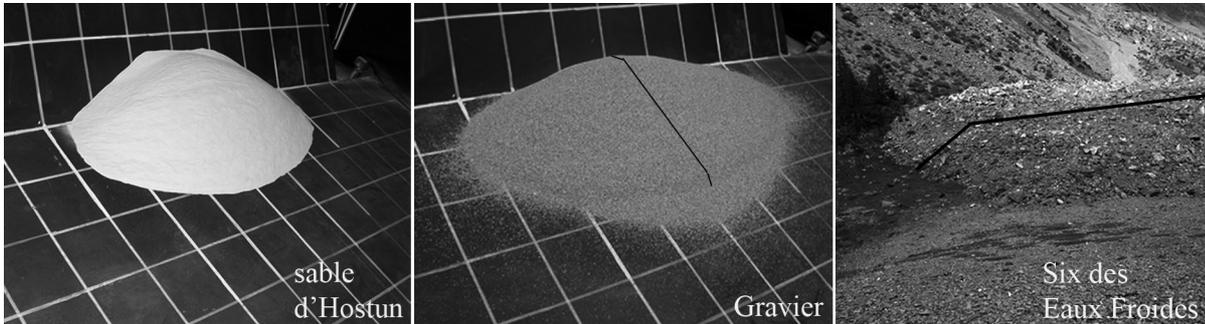


Figure 3: Comparaison des morphologies des dépôts de sable, gravier et dans le cas de Six des Eaux Froides

La morphologie du dépôt s'est par ailleurs avérée être très dépendante de la séquence de lâcher de la masse. Lorsque celle-ci est libérée en plusieurs fois, on observe un dépôt relativement conique, à l'instar de l'éboulement de Randa ou de l'écoulement dans un sablier, tandis qu'un lâcher unique se marque par une distance de propagation beaucoup plus longue, mais des largeur et hauteur de dépôt réduites.

Une analyse du dépôt associé à des lâchers uniques de la masse (événements réels aux conséquences les plus catastrophiques) met en évidence le rôle prépondérant du volume et secondaire de la hauteur de départ sur la distance de propagation de la masse (runout). Ces constats sont conformes à des propositions faites par Legros (2002) et contredisent les théories basées sur le concept d'un angle de frottement équivalent (Fahrbohung).

Finalement, la morphologie du dépôt final semble dépendre légèrement de la géométrie de la masse au départ et plus particulièrement de sa largeur.

3.2 Comparaison des différents modèles numériques sur un essai « test ».

Un lâcher de 20 litres de gravier Gr2 ($\phi_i=33^\circ$, $\phi_b= 32^\circ$) depuis 1 m de hauteur a fait l'objet d'une attention particulière, notamment en terme métrologique, afin de constituer une base de comparaison expérimentale pour les modèles numériques des partenaires.

La création du modèle numérique du terrain représentant la géométrie du modèle (un plan incliné à 45° et un plan horizontal) ainsi que la définition de la zone de départ (boite de 0.25 m x 0.20 m x 0.4 m remplie de 20 l de matériau granulaire) ont été effectuées par chacune des équipes, mais ne devraient pas constituer une source de différences dans les résultats. Par contre, quelques données sont particulières aux modélisations de chacun des partenaires :

- Le Cemagref a utilisé son code d'avalanche avec un modèle du type "frictional" et un coefficient de frottement de 0.62 pris égal à la tangente de l'angle de frottement à la base ($\phi_b= 32^\circ$). Aucune procédure de calage n'a été effectuée.
- Pour le modèle EPAN3D la masse lâchée a été discrétisée en 1911 volumes élémentaires disposés selon un réseau cubique en sept couches. Une rétro-analyse de l'essai physique a permis un calage des paramètres du modèle de comportement développé. Le jeu finalement retenu est :

γ (kN/m ³)	ϕ_0 ($^\circ$)	ϕ_1 ($^\circ$)	v_0 (m/s)	v_1 (m/s)	s_0 (m)	r_f ($^\circ$)	g_0 ($^\circ$)	r_g ($^\circ$)	e_0 ($^\circ$)	r_e ($^\circ$)
16.5	11	44.5	0.1	0.5	0.05	0.05	1	0	1	-0.96

- L'application du modèle RASH3D est également basée sur un modèle du type "frictional". L'angle à la base a été fixé à 42° , après calage sur les résultats de l'essai de laboratoire.

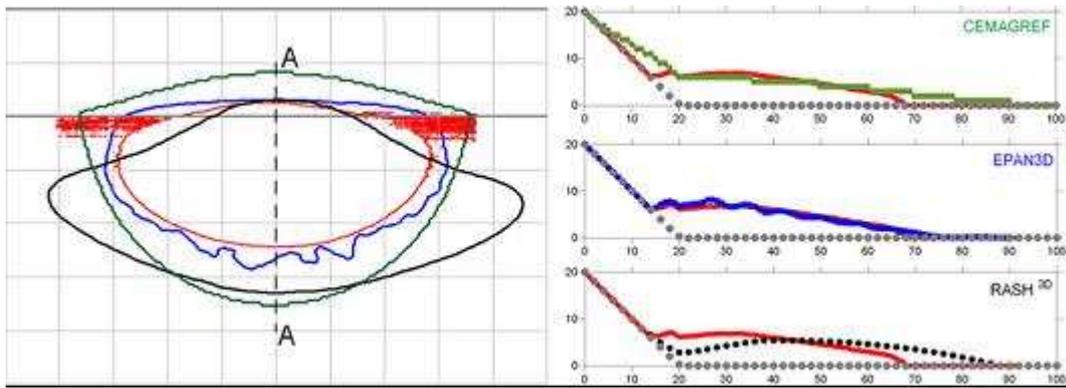


Fig. 4. Etalement du dépôt consécutif au lâcher de 20 litres de gravier depuis 1 m de hauteur. Comparaison des mesures (en rouge) et des modélisations numériques : Cémagref en vert, Cete en bleu et Politecnico en noir. Ces contours sont tracés pour une épaisseur de dépôt de 5 mm, afin de ne pas englober les grains de gravier ($D_{max} = 4$ mm) projetés en dehors du dépôt principal. Coupe longitudinale du dépôt observé (rouge) et des dépôts modélisés, selon l'axe AA

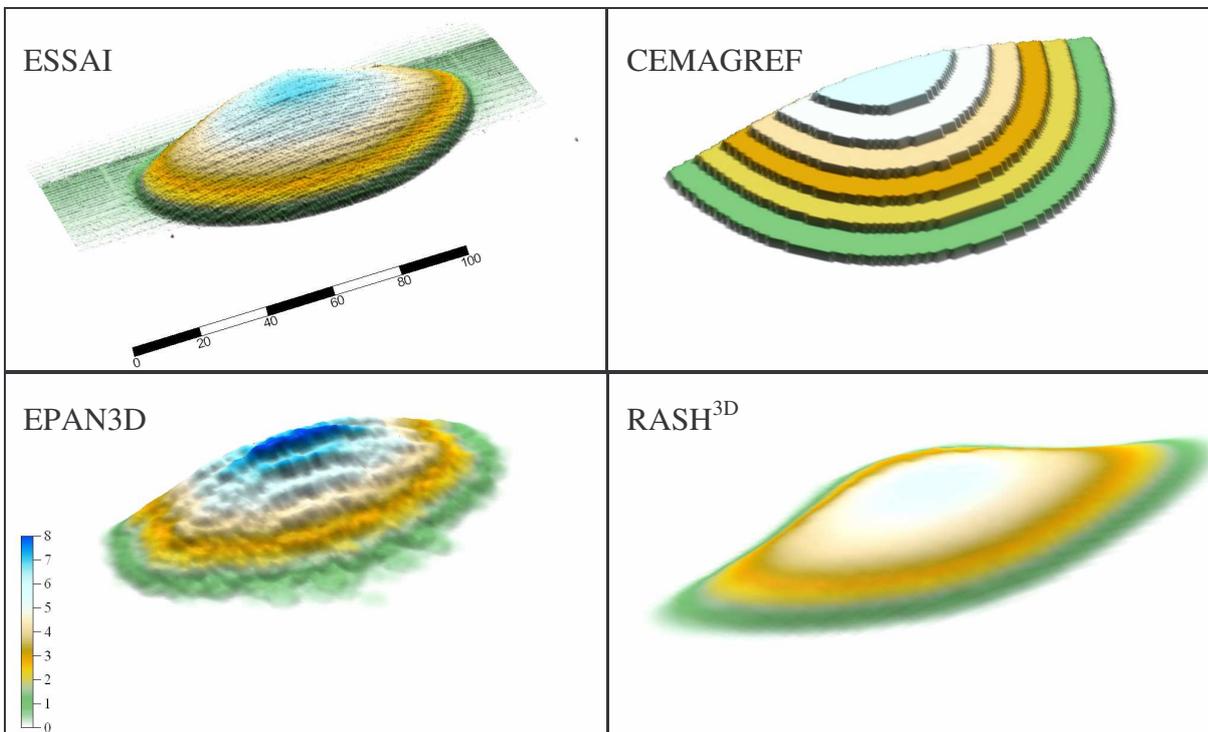


Fig. 5. Vue 3D du dépôt observé et des dépôts modélisés par les trois partenaires.

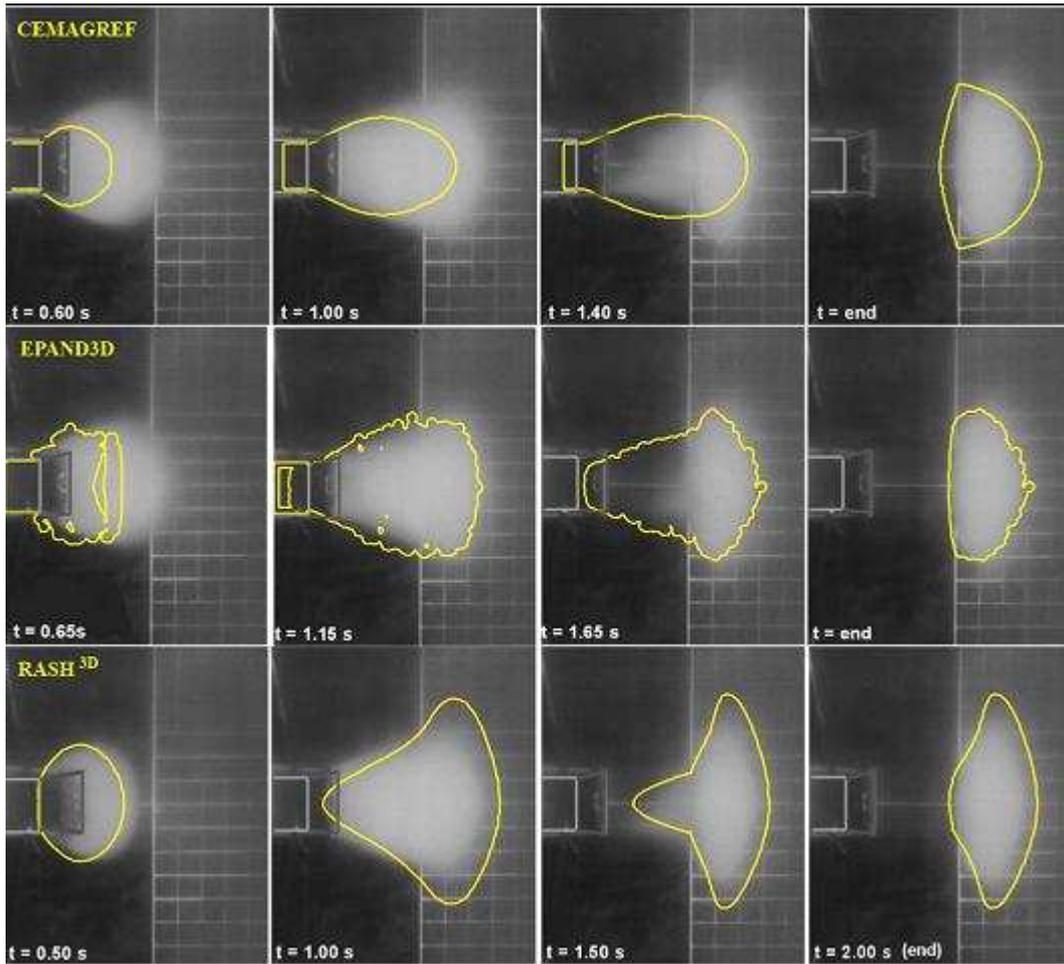


Fig. 6. Comparaison de la propagation de la masse telle qu'observée en laboratoire (images en arrière-plan) et modélisée par les trois programmes de calcul. Le contour représenté en jaune est relatif à une épaisseur de 1 mm.

Le tableau ci-dessous compare qualitativement les prédictions des trois modélisations numériques aux observations faites lors de l'essai physique. Les symboles +, +/- et - signifient respectivement une bonne, moyenne, imparfaite adéquation, pour la caractéristique indiquée en tête de colonne.

	Modèle	Analyse	Propagation		Dimensions du dépôt			Morphologie du dépôt		
			Runout	Vitesse	Extension longitudinale	Extension latérale	Hauteur	Forme générale	Front avant	Front arrière
Cemagref	'frictional'	Sans calage	+/-	-	-	+/-	+/-	-	-	-
EPAN3D	à 11 paramètres	Rétro-analyse	+	-	+	+	+	+	+/-	+
RASH^{3D}	'frictional'	Rétro-analyse	+/-	+	+/-	-	+/-	-	+/-	-

Bien que relativement éloignés des observations faites sur l'extension et la morphologie du dépôt de gravier, les résultats obtenus par le Cemagref semblent tout à fait pertinents en terme de distance d'atteinte (runout), si l'on garde à l'esprit qu'aucun calage de paramètre n'a été effectué. En regard des prédictions faites par les autres partenaires, les résultats obtenus par le modèle EPAN3D ressortent comme les meilleurs, mais résultent d'une rétro-analyse de l'essai et du calage de non-moins de 11 paramètres, dont certains sans signification physique. Le calcul effectué par RASH^{3D} reproduit bien la vitesse de propagation des fronts avant et arrière de la masse, mais moins bien le dépôt, en particulier dans la direction transversale. Par ailleurs, les angles de frottement choisis sont éloignés des valeurs expérimentales.

Une seul lâcher ayant servi de base à ce travail de comparaison avec les codes de calcul, il est indispensable de relativiser les constats susmentionnés. Seule une comparaison des prédictions numériques pour plusieurs configurations d'essais (volume, hauteur, pente...) permettrait une véritable appréciation de l'adéquation entre modèles de calcul et modélisation physique.

4 Modélisation numérique de deux éboulements documentés

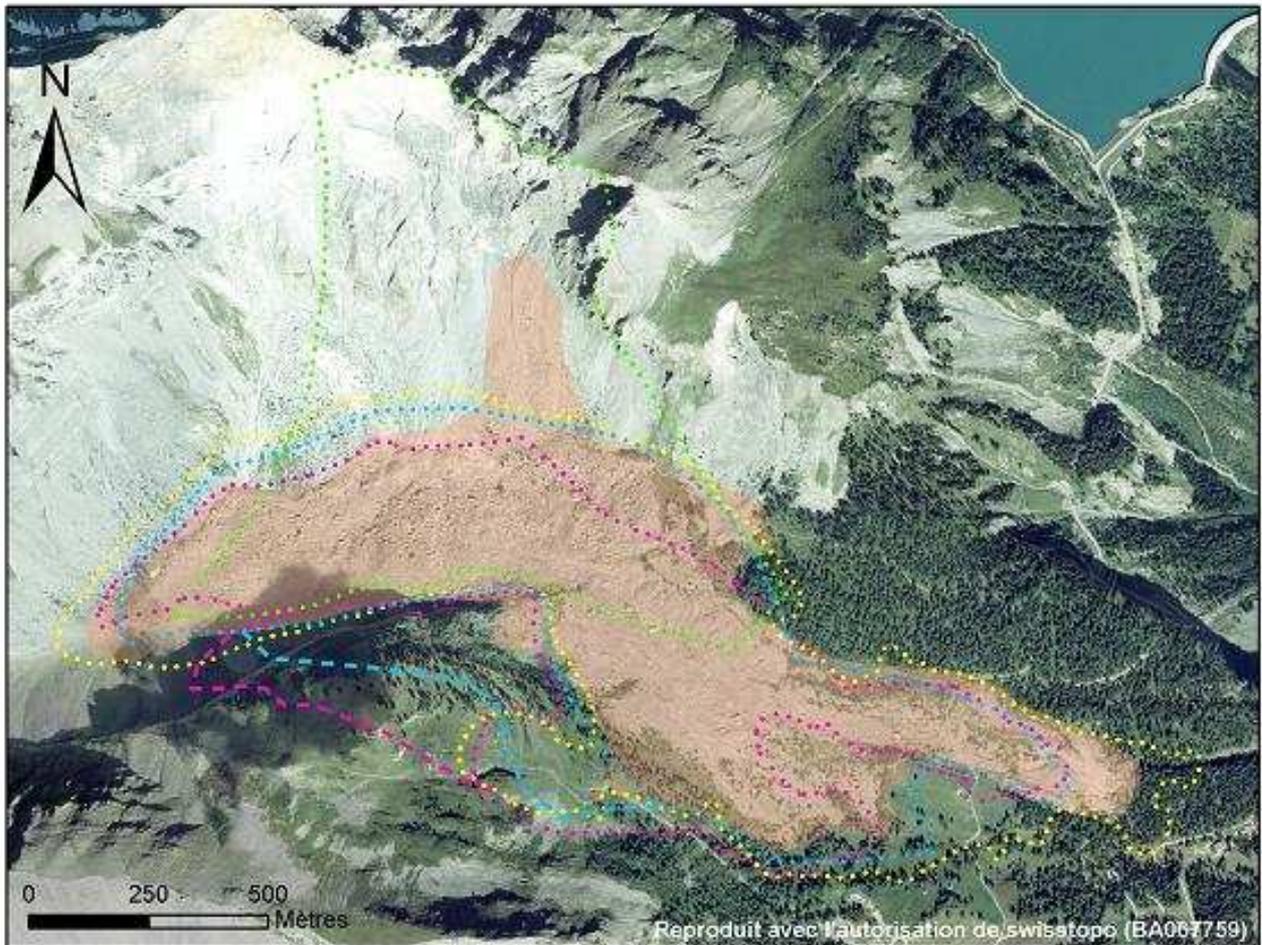
Dans cette section, les partenaires ont utilisé leur méthode de simulation numérique pour reproduire des cas d'éboulements connus. Il s'agit d'un processus de calage ("rétro-analyse") et non de modélisations prédictives "à l'aveugle" puisque les partenaires disposaient des informations suivantes pour caler leurs modèles :

- Description : géologie, volume
- Modèles Numériques de Terrain (MNT) avant et après l'éboulement.

4.1 Six des Eaux Froides

Description du site :

- Nom du site, département, pays : Six des Eaux Froides, Valais, Suisse
- Date de l'évènement : 30 mai 1946
- Facteur déclenchant : tremblement de terre
- Lithologie : calcaires et marnes
- Volume au départ : 5.8 mio m³
- Volume du dépôt : 9 mio m³
- Distance horizontale max. de propagation : : 2.1 km



Principaux paramètres de simulation (spécifiques à chaque modèle) :

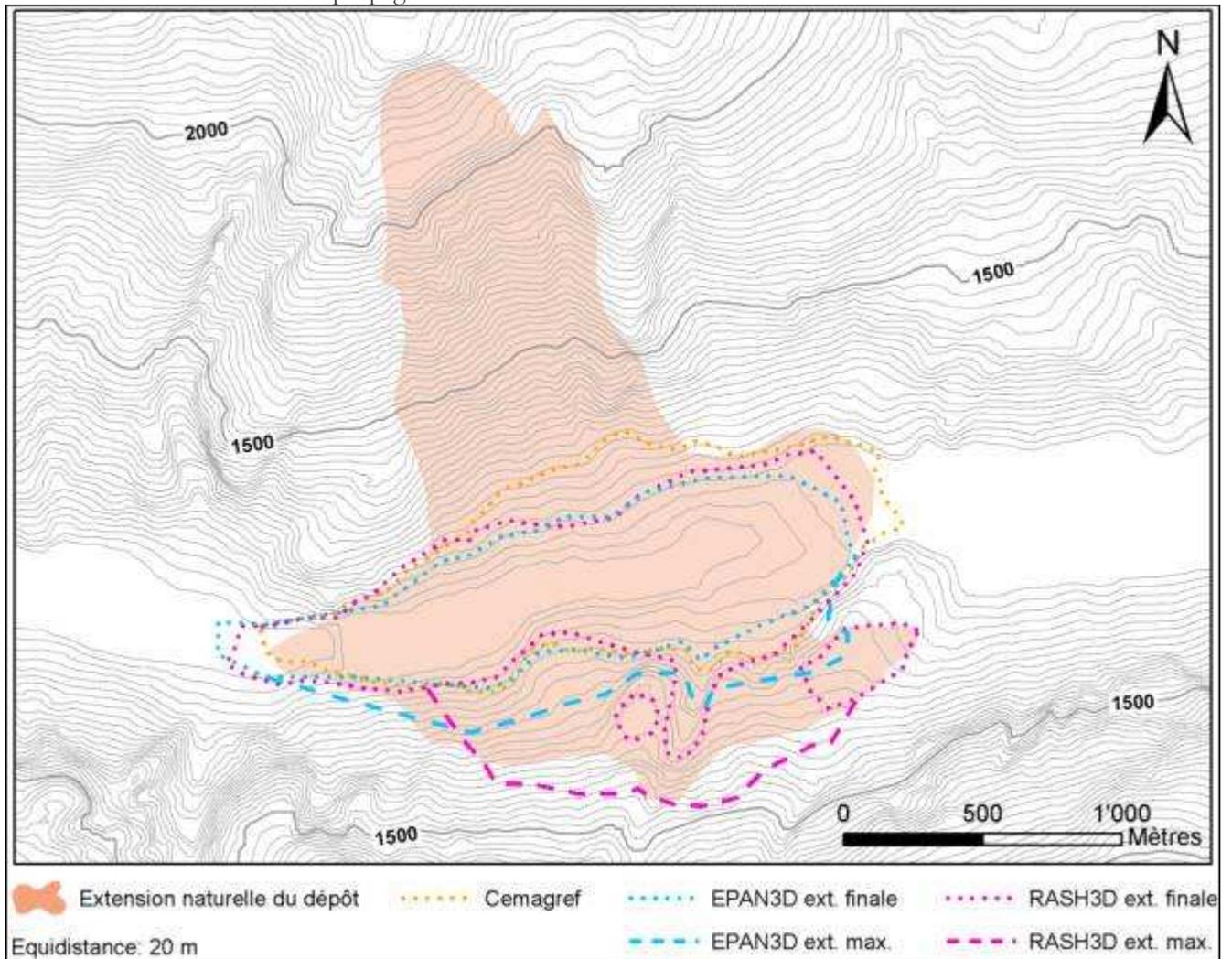
- Cemagref : coefficient de frottement statique : $\mu = 0.22$
- EBMAS: pente limite de dépôt : 26.2°
- EPAN3D: poids volumique initial de la roche : $\gamma = 24,5$ [kN/m³]
paramètres de frottement : $\phi_0 = 10^\circ$; $\phi_1 = 27^\circ$

- | | | |
|------------------------|--|--------------------------------------|
| | vitesses caractéristiques | : $v_0 = 5$ [m/s] ; $v_1 = 50$ [m/s] |
| | distance caractéristique de propagation | : $s_0 = 50$ [m] |
| | coefficients de foisonnement et d'éclatement | : $r_f = 0.25$; $r_e = -0.96$ |
| ▪ DAN : | angle de frottement à la base de la masse | : $\varphi = 17^\circ$ |
| | angle de frottement interne du matériel | : $\phi = 35^\circ$ |
| ▪ RASH ^{3D} : | angle de frottement à la base de la masse | : $\varphi = 17^\circ$ |

4.2 Val Pola

Description du site :

- | | |
|--|---------------------------------|
| - Nom du site, pays | : Val Pola, Italie |
| - Date de l'évènement | : 28 juillet 1987 |
| - Facteur déclenchant | : orage |
| - Lithologie | : diorite, gabbro et paragneiss |
| - Volume au départ | : 30 mio m ³ |
| - Volume du dépôt | : 40 mio m ³ |
| - Distance horizontale max. de propagation | : 2.4 km |



Principaux paramètres de simulation (spécifiques à chaque modèle) :

- | | | |
|----------|---|--|
| Cemagref | : coefficient de frottement statique | : $\mu = 0.4$ |
| EBMAS | : pente limite de dépôt | : 23° |
| EPAN3D | : poids volumique initial de la roche | : $\gamma = 24,5$ [kN/m ³] |
| | paramètres de frottement | : $\phi_0 = 8^\circ$; $\phi_1 = 30^\circ$ |
| | vitesses caractéristiques | : $v_0 = 7.55$ [m/s] ; $v_1 = 37.5$ [m/s] |
| | distance caractéristique de propagation | : $s_0 = 100$ [m] |

	coefficients de foisonnement et d'éclatement	: $r_f = 0.25$; $r_e = -0.90$
DAN	: angle de frottement à la base de la masse	: $\varphi = 18^\circ$
	angle de frottement interne du matériel	: $\phi = 35^\circ$
RASH ^{3D}	: angle de frottement à la base de la masse	: $\varphi = 18^\circ$

5 Discussion et conclusions

La simulation numérique d'avalanches rocheuses est, et restera encore longtemps, un challenge très difficile à relever. Les travaux effectués dans le cadre de l'action C du projet Rockslidetec montrent que les modèles actuels sont loin d'être utilisables comme outil de prévention, ce qui reste pourtant l'objectif principal de leur développement. Toutefois les résultats obtenus sont d'un grand intérêt parce qu'ils permettent d'identifier les problèmes et d'entrevoir les directions à prendre pour la poursuite de la recherche. Parmi les difficultés rencontrées, il convient de relever la grande difficulté à trouver des cas suffisamment documentés et les limites d'application des modèles en fonction du mode de représentation retenu.

L'acquisition des données: les simulations ne peuvent être effectuées qu'en connaissant la topographie du site avant et après l'évènement, que celui-ci soit passé (rétro-analyse) ou potentiel. Les cas d'avalanches rocheuses répertoriées pour lesquels la topographie avant évènement est connue sont peu nombreux, ce qui limite le nombre de sites qui peuvent être étudiés. Dans le domaine de la prédiction, ce sont souvent les données géologiques, en particulier structurales, qui font défaut. Enfin, on a pu constater que les modèles numériques de terrain à haute résolution ne couvrent que rarement les sites d'étude.

Les limites d'application des modèles: un fait important relevé au cours de ce projet est l'influence du volume de l'instabilité. A partir de quel volume peut-on avoir une avalanche rocheuse ? En d'autre terme, à partir de quand faut-il passer d'un modèle en milieu "discret" à un modèle en milieu "continu". Les essais effectués à l'EPFL et l'application des divers logiciels de simulation ont montré qu'il ne faut certainement pas se limiter à l'estimation du volume des évènements, mais que la granulométrie est également cruciale. Il a été intéressant de relever que le nombre estimé de grains du gravier utilisé dans les essais physiques a le même ordre de grandeur que le volume de l'avalanche du Six des Eaux Froides divisé par la taille moyenne des blocs. Simple coïncidence ? En tout cas la comparaison des dépôts montre des similitudes frappantes, alors que ça n'est pas du tout le cas pour les essais effectués avec les sables d'Hostun dont la taille des grains est beaucoup plus petite. Dans le débat entre l'approche "discrète" ou "continue", il semble que le seuil ne soit pas établi uniquement en fonction du volume, mais aussi en fonction du rapport entre le volume et la granulométrie moyenne.

Que faut-il donc faire pour améliorer les modèles existants ? L'expérience acquise au cours du projet Rockslidetec montre qu'il est essentiel de multiplier le nombre de rétro-analyses pour mieux caler les programmes de simulation et mieux contrôler leur paramétrage. Du fait du nombre relativement limité de sites suffisamment documentés, le confrontation entre les modèles numériques et les résultats des essais physiques en laboratoire, tels que pratiqués à l'EPFL et au Cemagref paraît comme une direction de développement particulièrement prometteuse.

La simulation des avalanches rocheuses n'en est donc qu'à ses premiers balbutiements, mais les résultats obtenus dans le cadre du projet Rockslidetec sont encourageants. Il est essentiel de poursuivre la collaboration et la discussion constructive entre les partenaires du projet."

Action D : Actions de promotion et communication

1 Workshop Rockslidetec – 1^{er} décembre 2004

A la fin de la deuxième année d'activité un premier workshop adressé aux techniciens, aux scientifiques et aux gestionnaires du territoire, avec la participation d'experts de renommée internationale, s'est tenu à Aoste le 1^{er} décembre 2004.

1.1 Objectifs du workshop

1. Etablir un "state of the art" non exhaustif en matière de :
 - a) détermination de volumes instables par modélisation géométrique et du comportement mécanique des amas rocheux ;
 - b) modélisation de la propagation d'avalanches rocheuses ;
2. Etat des lieux de l'action A (mise en place d'une BD éboulement) ;
3. Evaluer l'état d'avancement des travaux menés dans le cadre des actions B et C de Rockslidetec et l'applicabilité des méthodes développées ; identifier les verrous scientifiques et les programmes existants qui auraient déjà solutionné les problèmes soulevés ;
4. Coordonner les modélisations numériques et physiques pour valoriser les apports de ces dernières.

Liste des intervenants

CERISE Alberto	Regione autonoma Valle d'Aosta– Aosta, I
PASQUALOTTO Massimo	Regione autonoma Valle d'Aosta– Aosta, I
ROUILLER Jean-Daniel	CREALP - Centre de Recherche sur l'Environnement – Sion, CH
LEROI Eric	URBATER – Urbanisme-Aménagement du Territoire-Evaluation des Risques, Roquevaire - F

Intervenants scientifiques

DERSHOWITZ Bill	Golder Associates - Washington , USA
FERRERO Anna Maria	Università di Parma - Parma, I
HARRISON John	Imperial College of London - Londres, UK
HUNGR Oldrich	University of British Columbia – Vancouver, CAN
HUTTER Kolumban	Institut für mechanik, Technische Universität – Darmstadt, D
LABIOUSE Vincent	EPFL-ENAC-ICARE-LMR – Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne - LausanneCH
MANZELLA Irene	EPFL-ENAC-ICARE-LMR – Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne - Lausanne, CH
MAYORAZ Raphaël	CREALP - Centre de Recherche sur l'Environnement Alpin - Sion, CH
NAAIM Mohamed	CEMAGREF – Unité de Recherche ETNA - Grenoble, F
PASTOR Manuel	ETS de Ingenieros de Caminos, UPM – Madrid, E
PIRULLI Marina	Politecnico di Torino – Torino, I
SCAVIA Claudio	Politecnico di Torino – Torino, I
VOYAT Iris	Politecnico di Torino – Torino, I

2 Workshop de conclusion du projet Rockslidetec – Aoste 13 avril 2006

Un deuxième workshop, de conclusion du projet, s'est tenu à Aoste le 13 avril 2006, dont on reporte le document de synthèse produit par l'animateur.

2.1 Objectifs du workshop

Les objectifs du workshop qui s'est tenu à Aoste le 13 avril 2006 étaient les suivants :

- Réaliser une synthèse finale et présenter les travaux menés dans le cadre du projet Rockslidetec ;
- Mettre en contact les techniciens et les utilisateurs afin de vérifier l'adéquation entre l'offre et la demande, et le cas échéant, afin d'évaluer le travail à réaliser pour répondre aux besoins ;

- Identifier, en complément du point précédent, les besoins non satisfaits et les problèmes scientifiques non résolus, les hiérarchiser pour définir les axes de collaboration futurs.

Ce workshop fait suite à un workshop organisé en 2004 avec la participation d'experts internationaux (O. Hungr, M. Pastor, K. Hutter, B. Dershowitz, J. Harrisson), et dont la vocation était plus scientifique.

2.2 Organisation

Le workshop était organisé en trois temps :

- présentation par chacune des équipes du projet des résultats acquis, des incertitudes et des besoins ;
- mise en place d'un débat entre les scientifiques et les utilisateurs ; il s'agissait d'une part d'engager un débat scientifique sur chacune des actions du projet, mais d'autre part d'ouvrir la discussion aux applications opérationnelles avales ;
- positionnement du projet et des résultats dans la problématique générale de la gestion des risques et de la prise en compte des risques dans l'aménagement du territoire, et définition des perspectives.

Introduit par Monsieur A. Cerise, Assesseur au Territoire, à l'Environnement et aux Ouvrages Publics, qui a rappelé l'importance de ces travaux et le lien étroit avec l'urbanisme et le développement, puis par Monsieur M. Pasqualotto, chef de file du projet, Directeur de la Protection du Territoire, qui a présenté les différents partenaires et actions du projet, le workshop a permis d'engager un débat animé avec de nombreuses réactions ; il a sur ce point totalement répondu aux attentes des organisateurs.

Afin d'ouvrir l'analyse aux applications opérationnelles, deux présentations complémentaires réalisées par des professionnels externes se sont tenues sur le module B (modélisation géométrique et détermination des volumes instables).

Concernant le module C (étude et modélisation de la propagation), un questionnaire avait été envoyé préalablement au workshop, à l'ensemble des partenaires, afin de disposer d'informations complémentaires et comparatives sur les modélisations ; les points suivants étaient abordés :

- cadrage : propriétaire, concepteur, caractéristiques de dissémination et de mise à disposition ;
- description du logiciel : type de modélisation, lois et paramètres d'entrée, paramètres de sortie, données nécessaires, méthodes de calage utilisées, possibilité ou non d'une utilisation prospective, temps de modélisation, limites du logiciels, modèles équivalents, perspectives de développement.

L'analyse des réponses a permis d'alimenter le débat tant sur les résultats scientifiques que sur l'adéquation aux besoins des utilisateurs et des gestionnaires des risques.

2.3 Analyse et synthèse des résultats

Action A : constitution d'un catalogue des principaux éboulements

Il s'agit d'une nouvelle base de données dans un domaine qui en est déjà largement pourvu ; ses spécificités et son organisation informatique devraient lui garantir une pérennité, sous réserve qu'une structure porteuse opérationnelle en assure la maintenance et l'administration, au-delà d'une utilité de principe qui devrait lui être reconnue dans le cadre projet Interreg PRINAT.

Les évolutions envisagées à terme, notamment le passage sous Internet, poseront les questions classiques auxquelles les bases de données sont confrontées, notamment :

- qui contrôle et valide les informations acquises, que ce soit sur le contenu ou sur la redondance des événements ?
- quelle protection de la base par rapport à des accès Internet ?
- y a-t'il des limitations dans les accès aux informations ?

Avec 38 tables et 305 champs, le choix s'est porté vers l'exhaustivité des données. Pour autant, les champs et les informations sont-ils en adéquation avec les besoins des scientifiques pour les modélisations, qu'il s'agisse de la morphologie, de l'état de fracturation, de la lithologie ou des caractéristiques géotechniques.

Pour ce qui est de l'exploitation statistique de la base afin de fournir, à terme, des lois « fréquence » associées aux différents types de mouvements répertoriés, la difficulté réside, au-delà de la masse critique d'informations à recueillir, dans la capacité à définir des typologies discriminantes et des conditions similaires de rupture et de propagation. Quand bien même serait-on capable de définir des séries typologiques similaires, la question de leur stabilité temporelle sera posée, et avec elle l'approche quantitative du risque mouvements de terrain.

Quoi qu'il en soit, cette base de données représente une première étape structurée vers une démarche intégrée de prévention des risques de mouvements en grande masse. Sa maintenance doit être définie dans le cadre d'une coopération transfrontalière large, en abordant les ressources financières nécessaires et son exploitation opérationnelle.

Action B : modélisation géométrique et détermination des volumes instables

Cette action n'a été réalisée que par une seule personne dans le cadre du projet ; la synthèse qui en a été faite représente toutefois une structuration claire et complète de la problématique. Il s'agit incontestablement d'un domaine d'innovation fort du projet Rockslidetec, avec des perspectives intéressantes sur le plan opérationnel.

Les présentations externes témoignent de l'intérêt des outils utilisés, qu'il s'agisse de la modélisation détaillée de l'état de surface, de la détermination des discontinuités en surface, ou de la stabilité des massifs rocheux. Si les outils d'acquisition de données (laser) restent onéreux, donc peu diffusés, l'exploitation des données est désormais relativement bien maîtrisée.

Quelques verrous scientifiques demeurent dans la chaîne complète, depuis la modélisation géométrique jusqu'à la détermination de l'état d'instabilité voire le déclenchement du mouvement en masse :

- si les informations surfaciques sont connues avec une précision importante, l'extrapolation au sein du massif reste sujette à caution ; quelles méthodes complémentaires utiliser pour garantir une pertinence des masses instables calculées et de leur granulométrie ;
- au-delà de la connaissance géométrique des discontinuités et des modélisations de type Resoblock, comment évaluer l'état de stabilité réelle en intégrant des informations sur les ponts rocheux et les circulations des fluides ?

S'il est indéniable que la résolution des informations permet d'appréhender avec beaucoup plus de précision l'état de surface des massifs rocheux (une telle précision est-elle d'ailleurs nécessaire pour des mouvements en grande masse ?), elle permet également de réaliser un suivi temporel de ces massifs et donc de mettre en œuvre des moyens de surveillance permettant d'accéder à un champ continu (dans l'espace) des déplacements et des déformations.

Beaucoup reste à faire dans ce domaine pour valoriser une information importante et de qualité. Différentes applications opérationnelles ont déjà été développées, mais le lien avec la modélisation de la propagation reste à consolider, non seulement pour l'évaluation de la masse potentiellement mobilisable, mais pour le déclenchement de la rupture, et pour la détermination de la granulométrie attendue.

Action C : Etude et modélisation de la propagation

Le projet Rockslidetec présentait l'intérêt d'offrir une palette de modélisation très large, comme ont pu en témoigner les présentations lors du workshop : entre la modélisation expérimentale et la modélisation numérique bien sûr, mais également au sein de la modélisation numérique même, depuis les approches fortement théoriques jusqu'aux approches plus pragmatiques et proches du terrain. Rares toutefois sont les modélisations qui se sont fortement appuyées sur les conditions spécifiques de site en terme de géologie, fracturation et connaissance de l'histoire du mouvement.

Comme cela a été rappelé dans le rapport final, et au cours de la présentation de synthèse, beaucoup reste à faire pour disposer d'une modélisation prospective opérationnelle. Les étapes franchies dans le cadre du projet Rockslidetec sont importantes, et la bonne adéquation avec la modélisation expérimentale le montre. Quelques points particuliers méritent d'être rappelés :

- Qu'en est-il de l'efficacité des modélisations dans le cadre d'une démarche prospective ; peu de résultats ont été fournis en la matière ;
- Si l'on excepte les résultats obtenus en modélisation expérimentale sur la granulométrie, les diverses modélisations, faute de temps et d'échanges suffisants, n'ont pas permis de définir des « lois » génériques ou des caractéristiques spécifiques des éboulements, qui permettraient d'engager une approche prospective ;
- Aucune incertitude ou calcul d'erreur ne sont fournis dans les estimations des distances de propagation ; pas plus que des probabilités. Or de telles informations permettraient d'aborder le risque sur la base d'une approche quantitative avec des critères d'acceptabilité ; les incidences sur les zonages, les moyens de protection et les ressources financières à mobiliser sont pourtant majeures.
- Les évaluations des temps nécessaires à une modélisation opérationnelle restent très largement sous estimées par les modélisateurs, et témoignent d'une interaction insuffisante avec la modélisation géométrique des volumes instables et avec sa caractérisation lithologique et structurale.

De nombreux verrous scientifiques demeurent pour aboutir à une modélisation prospective, parmi lesquels on peut citer la détermination du déclenchement de l'instabilité, et les changements de lois de comportement au cours de la propagation, ...

Les présentations, ainsi que les débats qui ont suivi, ont clairement exposé le travail réalisé, avec un échange certes encore insuffisant entre les différentes modélisations, mais avec la mise en place d'un socle commun de travail et d'analyse qu'il conviendra de pérenniser.

La modélisation expérimentale a permis de faire un lien avec l'ensemble des modélisations, encore doit-elle prouver tout son apport pour la mise à disposition d'information de base sur les caractéristiques à intégrer a priori dans les modélisations numériques, et ce à des fins prospectives.

Analyse globale des résultats

Au-delà des résultats obtenus au niveau de chacune des actions et qui constituent l'acquis majeur de ce projet, il faut souligner l'insuffisance d'interactions entre les différents modules ; pour ne souligner que deux points significatifs :

- les informations stockées dans la base de données sont-elles pertinentes et utilisables pour la modélisation ?
- quel lien entre la caractérisation géométrique de la falaise et les caractéristiques de modélisation de la propagation, en terme de volume et de granulométrie notamment ?

Le projet était ambitieux, et il a permis, au-delà des résultats spécifiques de chaque action, de poser les bases d'une structure commune d'analyse et de modélisation de la propagation en grande masse des éboulements. L'organisation mise en place doit désormais être consolidée pour aboutir à une modélisation, si ce n'est totalement, du moins partiellement prospective, et définir, sur la base d'un cahier des charges rigoureux, un mode opératoire commun afin de déterminer les champs de pertinence des modèles présentés, à l'instar de l'inventaire réalisé sur les modélisations expérimentales.

Par ailleurs, la modélisation doit constamment conserver comme ligne directrice les attentes et les besoins tant de la société que des gestionnaires des risques. Face à une société qui demande de plus en plus des comptes, y compris sur le plan de la responsabilité, et qui souhaite des investissements publics si ce n'est rentabilisés, tout au moins optimisés, les modélisations doivent être en mesure d'apporter des résultats dans le cadre d'une approche globale de gestion (prévention et réduction) des risques naturels ; elles doivent notamment associer les résultats à des probabilités de survenance (temporelles) et spatiales afin que les décisions soient prises sur la base de critères quantifiés de risque acceptable.

2.4 Perspectives et propositions

Sur la base du travail important réalisé dans le cadre du projet Rockslidetec et des résultats présentés lors du workshop du 13 avril 2006 à Aoste, plusieurs éléments peuvent être rappelés pour commencer à structurer un programme Interreg qui permettra de valoriser les acquis :

- les investissements importants qui ont été consentis pour mettre en place une collaboration fructueuse sur un thème complexe et difficile, doivent être reconduits voire pérennisés ; il convient toutefois d'ouvrir cette collaboration, afin de l'enrichir, et de bénéficier d'expériences et de compétences avancées sur le sujet ;
- le prochain programme devra mettre l'accent sur les liens entre les trois modules afin de disposer d'une chaîne d'analyse et de traitement intégrée ; les liens avec les programmes en cours sur des thématiques complémentaires (surveillance, calcul de stabilité, déclenchement des instabilités, caractérisation des discontinuités à l'intérieur des massifs rocheux) devront être renforcés, ou à défaut, les thématiques pourront être intégrées au nouveau programme ;
- un protocole rigoureux de la modélisation devra être mis en place suivant une logique de « blind test », l'objectif n'étant pas d'exclure des modèles, mais de leur associer des domaines de pertinences au regard des typologies et des conditions de site rencontrées ;
- les questions touchant à l'évaluation quantitative du risque devront être associées à la modélisation scientifique et technique, non seulement pour faire le lien entre les modélisateurs et les gestionnaires des risques, mais pour faire le lien essentiel entre le calcul et la prise de décision, c'est-à-dire pour assurer la transcription de l'incertitude scientifique en choix opérationnel et politique, sur la base d'une prise de responsabilité.

3 Rapport final

Un rapport final de synthèse des activités réalisés et des résultats obtenus à été imprimé.

En outre un CD recueillant tous les documents réalisés par les partenaires dans le cadre du projet à été réalisé.

Pour toute information sur le projet et sur le CD consulter les sites internet suivants :

www.regione.vda.it

www.crealp.ch

www.fondazionemontagnasicura.org

www.risknat.org