



<http://massa.geoazur.eu>



MASSA

Medium and Small Size rock fall hazard Assessment

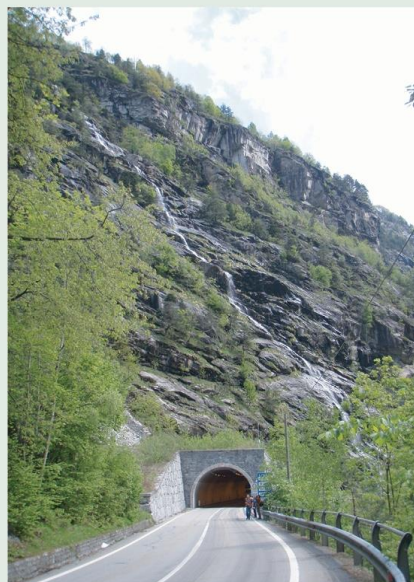
“Evaluation de l'aléa chutes de blocs et éboulements de volumes intermédiaires”

Janvier 2010 - Janvier 2013

Evaluation de l'aléa

Prévention du risque

Gestion de crise



MASSA est un projet de recherche à visée opérationnelle du programme Interreg de COopération TRANsfrontalière Alpes Latines, ALCOTRA



crealp Centre de recherche sur l'environnement alpin





alcotra
Ensemble au-delà les frontières
Insieme oltre i confini 2007-2013



FEDER
Fonds Européens pour le Développement
Régional
FESR
Fondo Europeo di Sviluppo Regionale



A la mémoire de Vincent Bestagno,
Géologue au Conseil général des Alpes-Maritimes ...



alcotra
Ensemble au-delà les frontières
Insieme oltre i confini 2007-2013



FEDER
Fonds Européens pour le Développement
Régional
FESR
Fondo Europeo di Sviluppo Regionale



Participation au projet MASSA

Coordination scientifique du projet MASSA

Thomas Lebourg¹

Coordination administrative du projet MASSA

Marion Pierini²

Participants à l'Action 1 :

Responsable Action 1 : Daniele Bormioli³

Participants : Daniele Bormioli³, Marta Castelli⁸, Davide Damato³, Anne Girard⁴, Luca Lanteri³, Nathalie Marçot⁴, Christian Mathon⁴, Michele Morelli³, Jean-Bruno Pasquier⁵, Rocco Pispico³, Jean-Daniel Rouiller⁵, Dario Tosoni⁵ con i contributi di Paolo Allasia⁷, Marco Baldo⁷, Stefano Campus⁹, Connie Contrafatto⁶, Anselmo Cucchi³, Furio Dutto⁶, Daniele Giordan⁷, Giorgio Lollino⁷, Marie Malascrabes¹¹, Andrea Manconi⁷, Patrice Maurin¹¹, Jean-Louis Pérez¹¹, Rolando Pozzani⁴, Mauro Tararbra³, Carlo Troisi⁹

Participants à l'Action 2 :

Responsable Action 2 : Denis Jongmans¹⁰

Participants : Laurent Baillet¹⁰, Pierre Bottelin¹⁰, Marta Chiarle¹⁴, Velio Coviello¹⁴, Didier Hantz¹⁰, Denis Jongmans¹⁰, Thomas Lebourg¹, Clara Lévy¹, Olivier Lunghini¹⁴, Umberto Morra di Cella¹⁴, Cristina Occhiena⁸, Marina Pirulli⁸, Claudio Scavia⁸, Julien Turpin¹⁰, Paolo Pogliotti¹⁴, Maurin Vidal¹ avec la participation de Jean-Marc Bouclier¹⁷, Héloïse Cadet¹⁶, Anne Lescurier¹⁸, Lionel Lorier¹⁶, Marie Malascrabes¹¹, Patrice Maurin¹¹, Philippe Mourot¹⁵, Jean-Louis Pérez¹¹, Jean-Daniel Rouiller⁵, Carlo Troisi⁹

Participants à l'Action 3 :

Responsable Action 3 : Vincent Labiouse¹³

Participants : Steven Cuervo¹², Dominique Daudon¹², Vincent Labiouse¹³, Guilhem Mollon¹², Marina Pirulli⁸, Vincent Richefeu¹², Jean-Daniel Rouiller⁵, Claire Sauthier¹³, Claudio Scavia⁸, Pascal Villard¹² avec la participation de Marion Bost¹⁹, Gabriele Pisani⁸, Jean-François Serratrice¹¹

1 Laboratoire Géoazur

2 INDURA – Infrastructures Durables Rhône-Alpes

3 Arpa Piemonte – Dipartimento Tematico Geologia e Dissesto

4 BRGM – Bureau de Recherches Géologiques et Minières – Direction Régionale PACA

5 Canton du Valais - CREALP – Centre de Recherche sur l'Environnement Alpin

6 Protezione Civile della Provincia di Torino

7 CNR – Consiglio Nazionale delle Ricerche

8 Politecnico di Torino

9 Regione Piemonte

10 Laboratoire ISterre

11 CETE Méditerranée

12 Laboratoire 3SR

13 EPFL-LMR

14 Regione Valle d'Aosta

15 Myotis

16 Sage, Société Alpine de GEotechnique

17 Conseil général des Alpes-Maritimes

18 Conseil Général de Savoie

19 IFSTTAR



alcotra
Ensemble au-delà les frontières
Insieme oltre i confini 2007-2013



FEDER
Fonds Européens pour le Développement
Régional
FESR
Fondo Europeo di Sviluppo Regionale



Table des matières

Présentation du projet MASSA	9
---	----------

VOLET 1 – Action 1 : Comparaison et analyse critique des méthodes expéditives d'évaluation de l'aléa « chute de blocs » - Confronto ed analisi di metodi speditivi per la valutazione della pericolosità da « caduta massi »	13
---	-----------

I. INTRODUZIONE	15
II. DESCRIZIONE DEI 3 METODI – DESCRIPTION DES 3 METHODES	16
II.1. Il metodo Proviaalp	16
II.2. Il metodo BRGM – La méthode BRGM	20
II.3. Il metodo Matterock short/light – La méthode Matterock short/light	24
III. SVOLGIMENTO DELLE ATTIVITÀ – DÉROULEMENT DES ACTIVITÉS	28
III.1. Presentazione dei tre assi stradali studiati	28
III.2. Sintesi dell'applicazione delle metodologie di studio delle pareti rocciose Proviaalp, BRGM, Matterock short/light sul versante pilota di « Iselle-dogana » – Synthèse de l'application commune des méthodologies d'évaluation de l'aléa chute de blocs Proviaalp, BRGM, Matterock short/light sur le site pilote « Iselle-douane »	30
IV. APPLICAZIONE DEI METODI	31
IV.1. Attività di rilievo di terreno	32
IV.2. Tempistica di applicazione delle metodologie	38
IV.3. Trattamento dei dati	41
IV.4. Confronto dei prodotti finali	41
V. CONFRONTO TRA I METODI – CONFRONTATION DES METHODES	46
VI. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	64
VII. ALLEGATI - ANNEXES	65
Allegato 1 : Lessico tecnico – Annexe 1 : Lexique technique	65
Allegato 2 : Applicazione delle tre metodologie sul sito pilota di Iselle-dogana – Annexe 2 : Application des trois méthodologies sur le site pilote d'Iselle-douane	68
Allegato 3 : Prodotti realizzati da Arpa Piemonte	81
Allegato 4 : Rilevamento e monitoraggio in ambito emergenziale	87

VOLET 2 : Détection, caractérisation et surveillance des aléas d'éboulements de volume intermédiaire (10^3 m^3 - 10^5 m^3) - Individuazione, caratterizzazione e monitoraggio della pericolosità da crollo di taglia intermedia (10^3 m^3 - 10^5 m^3)	93
--	-----------

Action 2 : Ecoute géophysique des sites reconnus instables - Monitoraggio geofisico delle instabilità rocciose	93
---	-----------

I. OBJECTIFS DE L'ACTION 2	95
II. CHOIX DES SITES	96
II.1. Site de Rubi	97
II.2. Site de la Suche	98
II.3. Site de la Praz	98
II.4. Site du Cervin	100
II.5. Site des Arches	101
II.6. Site de Madonna del Sasso	102
II.6. Conclusion sur les sites instrumentés	104
III. INSTRUMENTS UTILISES	104
III.1. Sismologie	104
III.2. Extensométrie	105
III.3. Clinométrie	106



III.4. Station météorologique.....	107
III.5. Lidar.....	107
IV. METHODES.....	108
IV.1. Détection d'évènements.....	108
IV.2. Extraction de la réponse dynamique.....	109
IV.3. Direction du mouvement.....	110
IV.4. Suivi temporel.....	110
IV.5. Intercorrélation avec les autres données.....	110
V. RESULTATS.....	110
V.1. Site de Rubi.....	111
V.2. Site de La Praz.....	112
V.3. Site de la Suche.....	113
V.4. Site du Cervin.....	114
V.5. Site des Arches.....	116
V.6. Site de Madonna del Sasso.....	118
VI. BILAN OPERATIONNEL.....	119
VII. CONCLUSIONS SCIENTIFIQUES.....	120
VIII. RÉFÉRENCES.....	121
IX. ANNEXES : LISTE DE PUBLICATIONS ISSUES DU PROJET MASSA.....	122

VOLET 2 : Détection, caractérisation et surveillance des aléas d'éboulements de volume intermédiaire (10^3 m^3 - 10^5 m^3) - Individuazione, caratterizzazione e monitoraggio della pericolosità da crollo di taglia intermedia (10^3 m^3 - 10^5 m^3).....	123
---	------------

Action 3 : Etude de la propagation - Studio della propagazione.....	123
--	------------

I. CONTRIBUTION DU LMR-EPFL A L'ACTION 3 DU PROJET MASSA.....	125
I.1. Introduction.....	125
I.2. Modélisation physique de la propagation de masses granulaires.....	125
I.3. Modélisations numériques d'essais de laboratoire.....	130
I.4. Conclusions.....	139
I.5. Remerciements.....	140
I.6. Bibliographie.....	140
II. ATTIVITÀ SVOLTA DAL POLITECNICO DI TORINO.....	141
II.1. Descrizione del modello numerico.....	141
II.2. Proves di laboratorio EPFL.....	144
II.3. Applicazione del codice di calcolo ai risultati sperimentali dell'EPFL.....	145
II.4. Confronto POLITO - 3SR risultati energia.....	154
II.5. Applicazione a dei casi reali.....	159
II.6. Conclusioni.....	162
II.7. Pubblicazioni realizzate nell'ambito del progetto MASSA.....	163
II.8. Bibliografia.....	163
III. CONTEXTE DES TRAVAUX REALISES AU LABORATOIRE 3SR.....	164
III.1. Description du modèle numérique.....	165
III.2. Procédure de calibration des paramètres.....	166
III.3. Confrontation du code de calcul avec les résultats expérimentaux de l'EPFL.....	167
III.4. Etude paramétrique.....	170
III.4. Application à des cas réels.....	178
III.5. Conclusion.....	179
III.6. Publications effectuées dans le cadre du projet MASSA.....	180
IV. CONCLUSION ACTION 3.....	180

Conclusions du Projet MASSA.....	183
---	------------



Présentation du projet MASSA

Le projet MASSA, Medium and Small Size rockfall hazard Assessment, projet de recherche à visée opérationnelle, a été retenu dans le cadre du programme Interreg ALCOTRA 2007-2013 « Coopération TRAnsfrontalière Alpes Latines ».

Le CNRS, Délégation Côte d'Azur est le chef de file de ce projet (Laboratoire Géoazur, Unité mixte de recherche / Sophia-Antipolis / UNS, CNRS-INSU, OCA, IRD), initié en janvier 2010, et qui s'est terminé en janvier 2013.

Au cours des vingt dernières années, la très forte augmentation du trafic aussi bien routier que ferroviaire dans les Alpes, a progressivement mis en évidence la forte vulnérabilité des infrastructures de transport aux risques naturels. En effet, moins que l'augmentation des événements naturels, c'est avant tout l'accroissement de ce trafic qui a multiplié les risques affectant les axes économiques transalpins.

Les mouvements gravitaires, qui vont de la simple chute de blocs à l'éboulement rocheux de plusieurs millions de m³, restent parmi les événements naturels les plus imprévisibles et les plus fréquents de l'arc alpin. Les ouvrages linéaires (routes, voies de chemin de fer, canalisations) et les populations installées dans ces régions sont particulièrement visés.

Les versants alpins, pour leur diversité géologique, leurs fortes pentes et les multiples facteurs de dégradation (gel-dégel, pluviométrie, séismes) qui les affectent, nécessitent des mesures de protection souvent onéreuses et des procédures de gestion du risque, qui doivent être activées en permanence. C'est pourquoi il est indispensable d'agir au niveau de la prévention. Cela implique une excellente connaissance de la nature et du comportement des phénomènes gravitaires à l'origine de l'aléa¹. L'instabilité rocheuse² naît de la dégradation progressive de la roche en profondeur sous l'action des agents naturels. Elle est difficilement détectable à partir de la surface et peut à tout instant couper les diverses voies de communication. La détection des compartiments rocheux instables nécessite l'application de méthodes d'identification, dont certaines ont déjà fait l'objet d'études dans le cadre de projets Interreg II et III (méthodes Matterock et Proviaalp).

Les récentes chutes de blocs qui ont coupé les rampes d'accès aux tunnels du Gothard (2006) et du Mont-Blanc (2007), ainsi qu'au col du Simplon (2008), et interrompu le trafic international pendant plusieurs semaines, ont montré les conséquences brutalement pénalisantes du point de vue autant économique qu'environnemental (déviation du trafic, concentration en d'autres points...). Ces événements ont démontré que les critères scientifiques et administratifs à la base des décisions de *fermeture-réouverture* des axes routiers coupés par un éboulement rocheux, n'étaient pas les mêmes de part et d'autre de la frontière. Les méthodes d'évaluation de l'aléa demandent à être comparées et rendues plus expéditives pour une gestion plus efficace dans les régions frontalières.

Le projet MASSA est organisé autour de trois volets dont deux volets techniques divisés en 3 actions :

Le volet 1, Action 1 : Comparaison des méthodes expéditives d'évaluation de l'aléa « chute de blocs », française (méthode BRGM), italienne (méthode Proviaalp, Arpa Piemonte), suisse (méthode Matterock, CREALP), vise à comparer des méthodes rapides et opérationnelles d'identification et d'évaluation de l'aléa « chutes de blocs » utilisées en Italie, en Suisse et en France, c'est-à-dire les trois pays impliqués dans le projet, et à les appliquer de manière croisée sur des sites communs. Cette action a eu pour objectif d'harmoniser le mode d'évaluation de l'instabilité rocheuse et de comparer les critères de prise en compte de l'aléa qui en découle.

Les résultats obtenus pourront être utilisés dans le cadre du projet stratégique RISKMAT et confrontés avec les procédures de décision administratives nationales qui prévalent dans chaque région en matière de *fermeture-réouverture* d'un axe après éboulement rocheux.

Le volet 2 s'intéresse aux éboulements de volumes intermédiaires (entre 10³ et 10⁵ m³) qui posent un problème aigu et permanent aux décideurs et organismes opérationnels. Moins fréquents que les chutes de blocs, ces événements se caractérisent par un pouvoir destructeur élevé qui rend les moyens de protection habituellement utilisés peu efficaces. En cas d'instabilité avérée, ces



compartiments doivent en conséquence faire l'objet d'une surveillance. Les techniques classiques de surveillance des sites potentiellement instables sont basées sur la mesure de déplacements et consistent à mettre en place des extensomètres dans des fissures ouvertes, des stations GPS permanentes, ou un système de mesures de déplacement à distance. Les points faibles de ce type de surveillance sont que les mesures ne donnent que l'évolution du déplacement à la surface et ne fournissent pas d'information sur la dégradation du massif en profondeur. De plus, ces mesures dédiées à la surveillance permanente des instabilités présentent de nombreuses dérives encore mal comprises et liées aux effets météorologiques, à la fois sur les capteurs et sur le milieu rocheux des versants.

Le premier objectif du volet 2, Action 2 : Ecoute géophysique des sites reconnus instables, est de développer une nouvelle méthode de reconnaissance et de surveillance à partir d'un réseau permanent de capteurs multiples (déformation, température, ..), couplés à de l'écoute sismique.

Ces capteurs ont été branchés sur la même centrale d'acquisition afin de suivre l'évolution de la rupture des ponts rocheux. Cette nouvelle méthodologie a été testée sur trois sites expérimentaux choisis dans un répertoire de sites potentiels établi dans le cadre de la phase préparatoire du projet, jugés particulièrement instables après une étude géotechnique et instrumentale préliminaire (étude de reconnaissance). L'accent a été mis sur la compréhension des effets météorologiques sur l'endommagement des volumes rocheux intermédiaires.

Le second objectif du volet 2, Action 3 : Etude de la propagation, concerne le développement et la validation de techniques numériques de calcul de la propagation de tels éboulements, pour lesquels les méthodes trajectographiques, adaptées pour les chutes de blocs isolés, ne peuvent pas être utilisées. Actuellement, les modélisations utilisées couramment ne prennent pas correctement en compte les instabilités de volumes intermédiaires (compris entre 1 000 et 100 000 m³). Deux méthodes numériques permettant de simuler la propagation sur des topographies complexes sont employées pour modéliser les chutes de blocs : méthode des éléments discrets et en milieu continu. Ces méthodes ont été comparées et validées sur des essais de lâcher de particules en laboratoire.

Le lien entre les volets 1 et 2 est étroit sur le plan de la gestion du risque. Les zones détectées comme présentant une forte activité d'éboulement sont susceptibles de générer aussi bien des chutes fréquentes de petits volumes, que des éboulements plus rares de volumes intermédiaires aux conséquences plus fortes.

De ce fait, les méthodes appliquées dans le premier volet peuvent être aussi utilisées comme outils pour identifier, à l'échelle d'un territoire, les zones propices à la déstabilisation de volumes intermédiaires et ainsi servir à définir une stratégie de surveillance de ces volumes.

Par ailleurs, le volet 2 a pour objectif d'évaluer l'évolution vers l'instabilité de volumes intermédiaires sur des sites choisis. Cette évolution peut se faire soit par l'éboulement de l'ensemble du volume considéré, soit par une succession de chutes de blocs. Ainsi, mieux comprendre le mécanisme d'instabilité des volumes intermédiaires peut permettre d'améliorer les stratégies de gestion de l'aléa de chutes de blocs étudiées dans le volet 1.

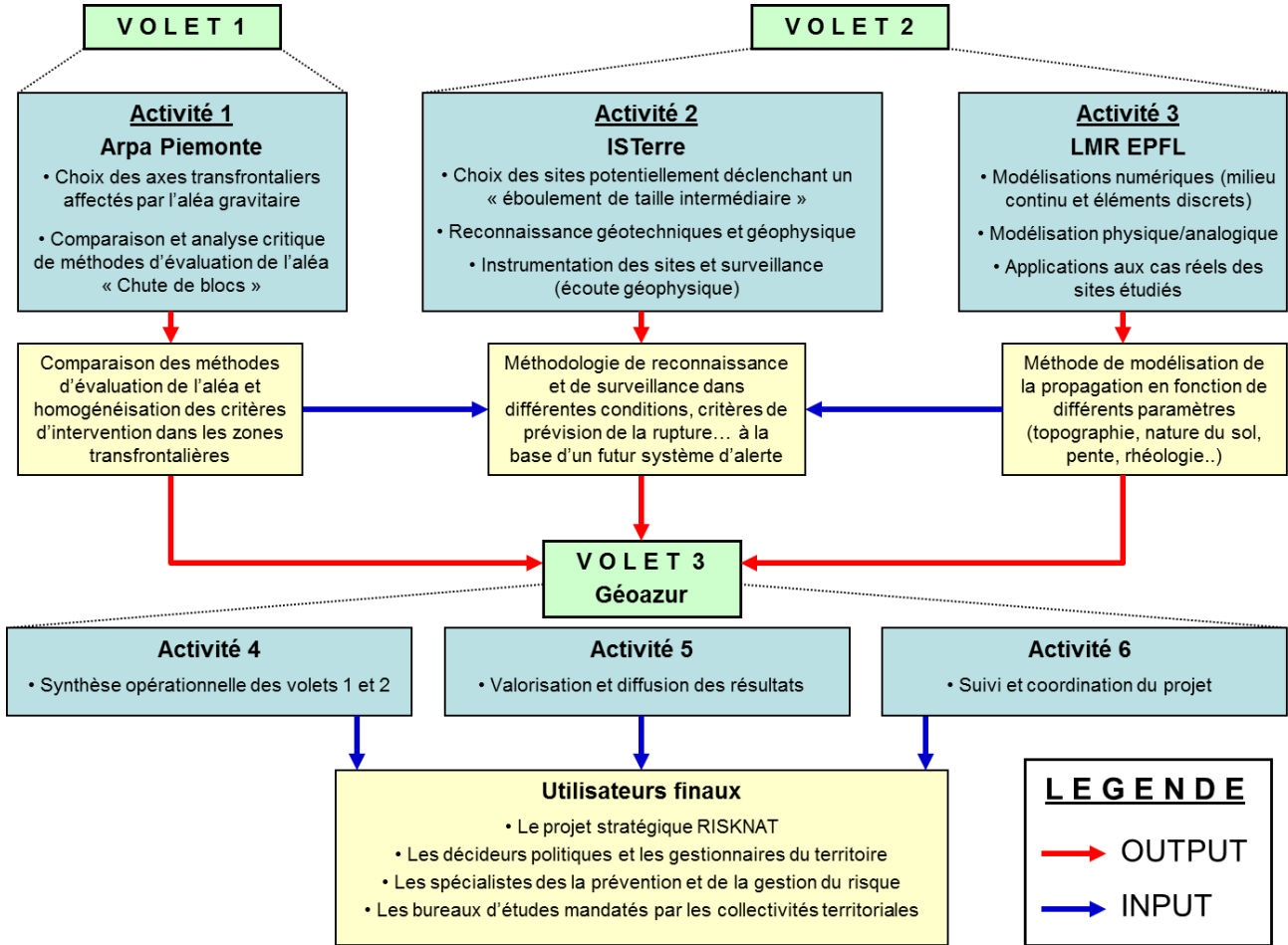
La cohérence entre les deux volets est renforcée par le choix de sites expérimentaux pour le volet 2, le long des itinéraires routiers étudiés dans le volet 1.

Dans le cadre du projet MASSA, un troisième volet de synthèse des résultats et de diffusion était prévu. Ce volet a permis de synthétiser les résultats du projet sous la forme de fiches techniques, largement distribuées aux praticiens, de mettre en place des actions de communication avec la réalisation d'une plaquette de présentation, d'un site web dédié au projet (<http://massa.geoazur.eu>) et l'organisation d'une journée de diffusion. L'objectif était d'atteindre un vaste public, impliqué dans la prévision et la gestion du risque.

Ce document de restitution du projet MASSA, présente les comptes rendus scientifiques des travaux réalisés par les partenaires dans le cadre des Actions 1, 2 et 3.

¹ Aléa est pris ici au sens français. Il correspond au terme danger utilisé par la Suisse.

² La dénomination instabilité rocheuse (F) correspond à l'aléa (CH) lorsqu'elle a été reconnue et caractérisée.





alcotra
Ensemble au-delà les frontières
Insieme oltre i confini 2007-2013



FEDER
Fonds Européens pour le Développement
Régional
FESR
Fondo Europeo di Sviluppo Regionale



VOLET 1 – Action 1 : Comparaison et analyse critique des méthodes expéditives d'évaluation de l'aléa « chute de blocs »

- Confronto ed analisi di metodi speditivi per la valutazione della pericolosità da « caduta massi »

Coordinateur : Daniele Bormioli (ARPA Piemonte)





Action 1: Comparaison et analyse critique des méthodes expéditives d'évaluation de l'aléa « chute de blocs » - Confronto ed analisi di metodi speditivi per la valutazione della pericolosità da « caduta massi »

I. INTRODUZIONE	15
II. DESCRIPTIONE DEI 3 METODI – DESCRIPTION DES 3 METHODES	16
II.1. Il metodo ProviaIp	16
II.2. Il metodo BRGM – La méthode BRGM	20
II.3. Il metodo Matterock short/light – La méthode Matterock short/light	24
III. SVOLGIMENTO DELLE ATTIVITÀ – DÉROULEMENT DES ACTIVITÉS	28
III.1. Presentazione dei tre assi stradali studiati	28
III.2. Sintesi dell'applicazione delle metodologie di studio delle pareti rocciose ProviaIp, BRGM, Matterock short/light sul versante pilota di «Iselle-dogana» – Synthèse de l'application commune des méthodologies d'évaluation de l'aléa chute de blocs ProviaIp, BRGM, Matterock short/light sur le site pilote «Iselle-douane»	30
IV. APPLICAZIONE DEI METODI	31
IV.1. Attività di rilievo di terreno	32
IV.2. Tempistica di applicazione delle metodologie	38
IV.3. Trattamento dei dati	41
IV.4. Confronto dei prodotti finali	41
V. CONFRONTO TRA I METODI – CONFRONTATION DES METHODES	46
VI. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	64
VII. ALLEGATI - ANNEXES	65
Allegato 1 : Lessico tecnico – Annexe 1 : Lexique technique	65
Allegato 2 : Applicazione delle tre metodologie sul sito pilota di Iselle-dogana – Annexe 2 : Application des trois méthodologies sur le site pilote d'Iselle-douane	68
Allegato 3 : Prodotti realizzati da Arpa Piemonte	81
Allegato 4 : Rilevamento e monitoraggio in ambito emergenziale	87



I. INTRODUZIONE

I fenomeni franosi di crollo, che vanno dalla semplice caduta massi sino ai distacchi in massa di parecchi milioni di metri cubi, rappresentano una delle tipologie di fenomeno franoso più diffusa e problematica nell'arco alpino. La grande estensione delle pareti rocciose che possono costituire zone di distacco, l'elevata velocità dei blocchi in caduta, la vastità delle possibili zone di invasione fanno sì che tale tipologia di fenomeno rappresenti una reale e costante minaccia per molte vallate alpine ed in particolare per gli assi viari. Le condizioni di rischio associate a tale tipo di fenomeno, inoltre, aumentano sensibilmente con lo sviluppo delle reti viarie, con l'aumento del traffico e con l'aumento dei volumi turistici.

I recenti crolli che hanno interrotto l'accesso al tunnel del Gottardo nel 2006, del Monte Bianco nel 2007 e del Sempione nel 2008, causando l'interruzione del traffico internazionale per parecchie settimane, hanno avuto gravi conseguenze sia dal punto di vista economico che ambientale (deviazione del traffico, concentrazione dello stesso in altri punti ecc.). Questi eventi hanno dimostrato che i criteri scientifici e amministrativi che determinano le decisioni di apertura-chiusura degli assi viari bloccati da frane non sono gli stessi da una parte e dall'altra delle frontiere.

Gli enti pubblici francesi, svizzeri ed italiani hanno messo a punto proprie metodologie di valutazione speditiva della pericolosità da caduta massi lungo gli assi viari che, se da un lato, dimostrano la necessità comune di questi paesi di gestire il rischio legato alla caduta massi, dall'altro sono di fatto tra loro indipendenti e rendono la gestione degli assi viari delle regioni frontaliere poco efficaci.

Tali metodi sono:

- 1) il *metodo Proviaip* sviluppato in Italia da Arpa Piemonte nell'ambito dell'interreg IIIa Alcotra n. 165 e applicato in cinque assi vallivi dell'arco alpino occidentale; comprende e combina sia aspetti di valutazione di tipo geomeccanico in parete ed aspetti di propagazione dei blocchi con modelli traiettografici;
- 2) il *metodo BRGM* sviluppato in Francia dal Bureau de Recherches Géologiques et Minières ed applicato sulla valle della Roya (Alpi Occidentali); consente essenzialmente di ottenere valutazioni speditive delle zone di invasione attraverso modellazioni, previa valutazione speditiva delle possibilità di distacco in parete;
- 3) il *metodo Matterock short/light*, sviluppato dal CREALP (Centre de Recherche sur l'Environnement Alpin) ed applicato in Svizzera; riguarda essenzialmente la valutazione speditiva delle possibilità di distacco in falesia e non comporta di solito valutazioni di tipo traiettografico; è stato pensato soprattutto come metodo di stima del pericolo lungo un tratto di strada molto lungo come il Sempione svizzero, ma permette anche la valutazione rapida della situazione subito dopo un evento di crollo.

L'insieme dei tre metodi copre una completa gamma di possibilità applicative quali:

- valutazione rapida, in fase di emergenza, delle condizioni di pericolosità in parete, spesso necessaria a seguito di crolli verificatisi;
- valutazione speditiva su lunghi tratti di rete viaria per l'identificazione di settori critici da sottoporre ad analisi di dettaglio;
- valutazione speditiva su lunghi tratti delle condizioni di pericolosità da crollo a fini di pianificazione delle opere di protezione.

Sulla base di quanto sopra descritto nasce quindi l'esigenza di confrontare i differenti metodi e di tentare di armonizzare le tecniche di valutazione della pericolosità tra i paesi transfrontalieri, come esplicitamente richiesto dalla Convenzione delle Alpi*.

* La Convenzione per la protezione delle Alpi è una convenzione quadro intesa a salvaguardare l'ecosistema naturale delle Alpi e a promuovere lo sviluppo sostenibile in quest'area, tutelando gli interessi economici e culturali delle popolazioni residenti nei Paesi aderenti; fu firmata da tutti i paesi alpini il 7 novembre del 1991.

II. DESCRIZIONE DEI 3 METODI – DESCRIPTION DES 3 METHODES

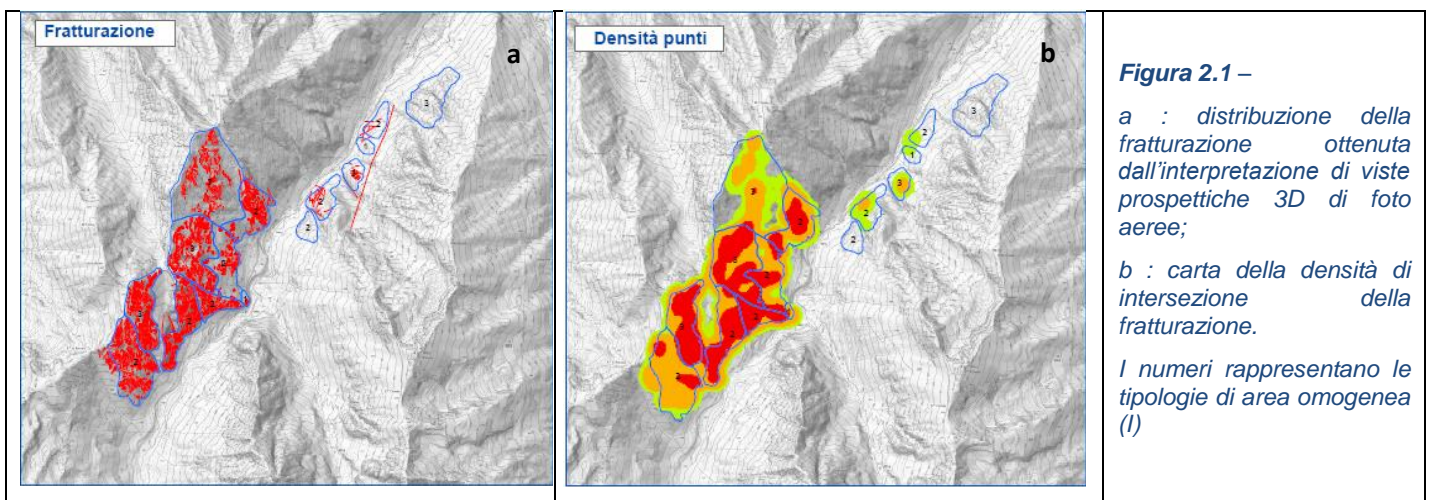
Vengono di seguito brevemente descritti i tre metodi di valutazione speditiva della pericolosità da caduta massi adottati dai partner del progetto. Ciascuna metodologia è caratterizzata da un lessico specifico che comprende termini che, come ad esempio “aléa”, sono utilizzati con significati diversi dal partner francese e svizzero. E’ parso perciò opportuno riportare in **ALLEGATO 1** il lessico proprio di ciascuna metodologia. Ogni termine è riportato nella lingua originale con accanto la sigla del paese di riferimento (I per l’Italia, F per la Francia, CH per la Svizzera).

II.1. Il metodo Proviarp

Il metodo Proviarp nasce dalla collaborazione tra Arpa Piemonte e il Cemagref di Grenoble nell’ambito del progetto Interreg IIIa Alcotra n. 165 PROVIALP (Protezione della Viabilità Alpina) sviluppato tra il giugno 2005 e il dicembre 2007. Il progetto ha riguardato l’asse 2, misura 2.1 “*Mobilità e sistema dei trasporti*”, tipologia d’azione B2-1 “*Migliorare, integrare (...) e mettere in sicurezza le infrastrutture di trasporto (strade, linee ferroviarie, marittime e aeree) di interesse transfrontaliero*”. A tal fine Arpa Piemonte ha sviluppato in collaborazione con il Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica del Politecnico di Torino una proposta metodologica di valutazione speditiva della *suscettibilità (I)* da crollo ovvero della probabilità di accadimento di questo tipo di fenomeni franosi in una data area.

La metodologia messa a punto si basa su una serie di azioni collegate tra di loro:

1. **ricerca bibliografica** di archivio sui fenomeni franosi di crollo verificatisi nell’area di studio; questo primo passo permette di definire una ricorrenza spazio-temporale dei fenomeni di crollo e un loro inquadramento tipologico (tipi di instabilità prevalenti e dimensioni più frequenti);
2. **analisi geomorfologica e strutturale** ottenuta dall’interpretazione di foto aeree, rivolta all’identificazione di *aree omogenee (I)* ove applicare in seguito l’indagine di terreno. Le *aree omogenee (I)* vengono individuate integrando gli elementi geomorfologici (orientazione e pendenze del fronte, grado di esposizione ecc..) e morfometrici (altezza, lunghezza del fronte, ecc..) con lo stato di fratturazione dell’ammasso roccioso ottenuto dall’analisi geostatistica delle intersezioni delle fratture (figura 2.1). Le *aree omogenee (I)* sono classificate in 3 categorie: di tipo 1 se il rilievo può essere condotto agevolmente a ridosso della parete; di tipo 2 se il rilievo viene effettuato a distanza; di tipo 3 se non è possibile realizzare un rilievo speditivo affidabile a causa dell’eccessiva lontananza delle pareti e/o della complessità strutturale. La perimetrazione delle *aree omogenee (I)* viene affinata nel corso dei rilievi di terreno;



- rilievo geologico-strutturale speditivo** lungo gli assi vallivi, che comporta per ciascuna *area omogenea (I)* la caratterizzazione di alcuni elementi geomorfologici generali, l'analisi dei principali sistemi di fratturazione che interessano l'ammasso roccioso supportata dall'esame della distribuzione e della orientazione dei sistemi di fratture individuate su foto aeree (figura 2.2), il censimento dei *cinematismi (I)* (scivolamenti planari, scivolamenti a cuneo, ribaltamenti) e la realizzazione di riprese fotografiche panoramiche e di dettaglio.

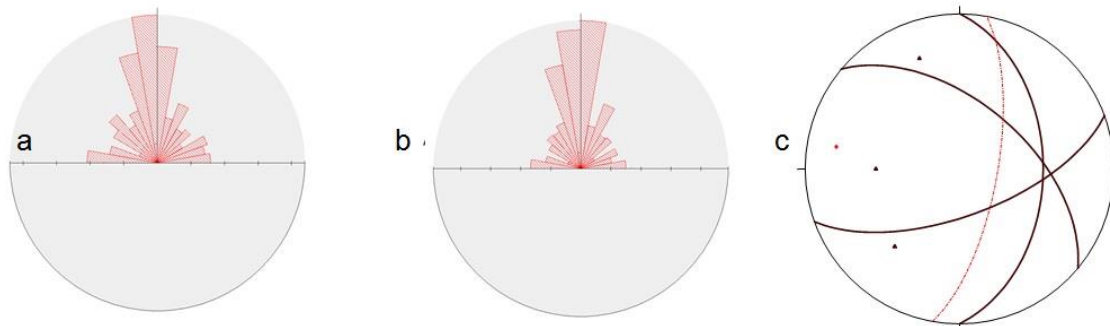


Figura 2.2 – Esempio di confronto tra le misure strutturali derivate a scale differenti (esempio di un'area omogenea del Vallone di S. Anna); a e b: diagrammi a rosa della frequenza azimutale e delle lunghezze cumulative delle fratture individuate su viste prospettiche in 3D di foto aeree; c: diagrammi strutturali di terreno (proiezione stereografica equiangolare emisfero inferiore); le ciclografiche indicano i sistemi di discontinuità misurati sul terreno (linee nere) e l'orientazione del fronte (linea rossa tratteggiata)

L'insieme dei dati rilevati viene direttamente acquisito su *tablet pc* attraverso un *database* (figura 2.3) espressamente dedicato ai dissesti per crollo e un *software* libero sviluppato per il rilevamento di terreno (BeeGis);

Figura 2.3 – Esempio di maschera a schede del database

- analisi probabilistica** delle condizioni di rottura in parete dei *cinematismi (I)* individuati. Il metodo adottato è basato sull'approccio dell'equilibrio limite e della tecnica probabilistica di Monte Carlo, a partire dalle distribuzioni statistiche semplificate dei dati strutturali rilevati, senza prendere in considerazione la variabile tempo. I risultati sono stati ottenuti mediante l'applicazione dei seguenti programmi di calcolo:

- **Plasmon** (Pisani, 2005): cinematismo per scivolamento planare;
- **Wintam** (Major et al., 1974): cinematismo per scivolamento a cuneo;
- **Toppling Stones** (Allodi e Castelli, 2007): cinematismo per ribaltamento a blocchi.



Per ciascun *cinematismo (I)* sono state effettuate 1000 estrazioni di Monte Carlo. Gli unici parametri forniti in senso statistico sono quelli relativi alla giacitura dei piani coinvolti. Ad essi viene associata una distribuzione di frequenza uniforme corrispondente all'intervallo di variazione fornito dal rilievo speditivo. Il risultato per ogni *area omogenea (I)* è un *indice di distacco (I)*, funzione della *probabilità di rottura (I)* di ogni meccanismo e del relativo volume medio (tabella 2.1);

Area omogenea	Cinematismo	PR (%)	Vol (m3)	ID (-)
1	01P01	11.30	0.5	0.0565
5	05P01	1.40	1.5	0.021
8	08P01	0.40	2.25	0.027
	08P02	0.80	2.25	
9	09P01	42.90	0.25	0.107
10	10P01	23.60	1.5	0.354
11	11C01	8.50	3	0.255
18	18P01	9.30	1.05	0.377
	18P02	9.30	3	
27	27P01	3.80	12	0.456
35	35P01	56.90	0.5	0.491
	35P02	41.30	0.5	

Tabella 2.1 – Risultati dell'analisi probabilistica (PR=probabilità di rottura; Vol=volume rappresentativo; ID=indice di distacco)

3. **analisi traiettografica (I)** con il programma di simulazione tridimensionale Rotomap che consente di valutare le zone di invasione. L'analisi di propagazione con modello tridimensionale viene effettuata sulla base di un metodo *lumped mass* che considera cioè la massa del blocco concentrata in un punto e ne analizza il moto lungo il pendio in funzione delle fasi di volo libero, rimbalzo e rotolamento secondo i principi della cinematica; i dati di ingresso sono rappresentati dalla massa valutata attraverso i rilievi di terreno, dall'*indice di distacco (I)* derivante dall'analisi probabilistica e dai parametri di restituzione attribuiti al terreno su cui i blocchi in caduta impattano. Il risultato più importante è rappresentato dall'*indice di suscettibilità (I)* dato dal prodotto dell'energia cinetica calcolata per la *probabilità di rottura (I)* che permette di evidenziare le zone a maggiore pericolosità relativa spaziale.

Dall'applicazione del metodo Proviaalp derivano una serie di prodotti sia di tipo tabellare che cartografico.

In particolare per ciascuna *area omogenea (I)* individuata vengono forniti :

- un *report* automatico, derivante dal *database* di raccolta dei dati, che contiene le caratteristiche generali dell'area, le caratteristiche delle discontinuità principali e lo stereogramma relativo, le caratteristiche delle instabilità rilevate, le fotografie panoramiche e di dettaglio (figura 2.4);
- i risultati dello studio probabilistico che comprendono le analisi cinematiche, costituite da tabelle e stereogrammi, e le analisi probabilistiche in forma tabellare.

PROGETTO MASSA
 Scheda di rilevamento di terreno

Dati Generali

Codice: 1055 Località: Iselle ovest Data: 19/05/2011 Ora: 09:00

Tipo Area Omogenea: Tipo 1 Tipo 2 Tipo 3 Punto Osservazione: opposto Orientazione parete: dip otr: 120 aS
dip: 90aS

Descrizione:
Area test con svizzeri e francesi. Settore di parete a ovest dell'abitato di Iselle. In destra litografica rispetto ad una marcata incisione definita da un piano di faglia: il settore si articola in 5 fasce principali. Sul fronte principale i cernamioni diffusi sono generalmente di piccole dimensioni. Alla base della parete, sulla scarpata soprastante la strada nazionale, sono presenti blocchi di maggiori dimensioni conseguenti al crollo di grosse instabilità probabilmente provenienti dalla parte alta del versante all'interno del canale generato dalla faglia; attualmente è evidente un grande blocco staccato a tergo posizionato sul fronte locale 230/05 definito dal piano di faglia stesso.

Litologia:
f. metamorfiche poco o nulla foliate

Tipologia Ammasso <input checked="" type="radio"/> Massivo <input type="radio"/> Bloccoso <input type="radio"/> Tabulare <input type="radio"/> Colonnare <input type="radio"/> Irregolare <input type="radio"/> Frantumato	Grado di fratturazione <input type="radio"/> Sana <input checked="" type="radio"/> Fratturata <input type="radio"/> Rilasciata <input type="radio"/> Disarticolata	Grado di alterazione <input type="radio"/> Inalterata <input checked="" type="radio"/> Debolmente ait. <input type="radio"/> Moderatamente ait. <input type="radio"/> Fortemente ait. <input type="radio"/> Completamente ait.	Resistenza <input type="radio"/> Estremamente debole <input type="radio"/> Molto debole <input type="radio"/> Debole <input type="radio"/> Mediamente debole <input checked="" type="radio"/> Resistente <input type="radio"/> Molto Resistente <input type="radio"/> Estremamente resistente
---	---	--	---

<input checked="" type="checkbox"/> Blocchi in parete Forma Blocchi: <input type="radio"/> Prismatica <input type="radio"/> Irregolare <input checked="" type="radio"/> Tabulare <input type="radio"/> n.d. max: 2,5 med: 0,5	<input checked="" type="checkbox"/> Blocchi Alla base Forma Blocchi: <input type="radio"/> Prismatica <input type="radio"/> Irregolare <input checked="" type="radio"/> Tabulare <input type="radio"/> n.d. max: 2,5 med: 0,5
--	--

Dati Strutturali

Equal area projection, lower hemisphere

Figura 2.4 – Pagina iniziale del report automatico generato a partire dal database di rilevamento

A scala dell'intero settore vallivo studiato sono fornite le seguenti cartografie:

- carta dei rilievi di terreno (aree omogenee (I), instabilità ubicate (I), ubicazione fotografie)
- carta dei risultati desunti dall'applicativo Rotomap
- carta della suscettibilità (I)

Inoltre, nel corso del progetto MASSA è stato sviluppato da Arpa Piemonte un metodo agile di analisi della suscettibilità da frane di crollo in parte già adottato nell'ambito del progetto Proviaalp. Si tratta di un metodo che integra il modello di *run-out* dello "shadow angle" o "metodo dei coni" (qui implementato e modificato in ambiente GIS con il nome di PROTO <http://www.adaptalp.org>) con la distribuzione spaziale della densità di intersezione della fratturazione dell'ammasso roccioso. Questo metodo ha lo scopo di vincolare il modello di *run-out* al contesto strutturale dell'area in studio in base al presupposto che le rocce caratterizzate da un'elevata densità di fratturazione e quindi da uno stato di deformazione elevato, siano soggette, a parità di altre condizioni, ad una maggiore predisposizione all'instabilità da crollo (ALLEGATO 3).



II.2. Il metodo BRGM – La méthode BRGM

a) Objectifs de la méthode

La méthodologie que le BRGM propose d'appliquer dans le cadre du projet MASSA, a pour objectif d'évaluer l'*aléa chute de blocs (F)* de façon rapide sur un tronçon routier d'une dizaine de kilomètres, en se basant sur une caractérisation à dire d'expert et d'une interprétation à l'aide d'outils d'aide à la cartographie. L'objectif est de cartographier les zones d'*aléa chute de blocs (F)*, c'est-à-dire les zones où la probabilité d'occurrence d'une chute de blocs varie de faible à très forte en fonction des paramètres du site, et ce, qu'il s'agisse de petits volumes (quelques dm^3) ou de volumes plus importants plusieurs m^3 .

En effet, le BRGM a considéré que la circulation sur une route peut être coupée par un événement chute de blocs, même si le/les blocs éboulés a/ont un faible volume. Or, la probabilité d'avoir des chutes de blocs de faibles volumes est nettement plus forte que celle de grandes masses instables pouvant ensuite se disloquer en blocs de plusieurs dizaines de m^3 . Par conséquent, il a été décidé d'évaluer dans cette méthode un *aléa chute de blocs (F)* dit «diffus», c'est-à-dire considérant la déstabilisation de blocs de volumes compris entre 0,5 et 4-5 m^3 . Seuls les blocs de faibles volumes seront donc pris en compte, les masses potentiellement instables de plusieurs dizaines voire centaines de m^3 ne seront donc pas identifiées expressément dans le présent rapport. L'*aléa chute de blocs (F)* ainsi cartographié tiendra compte d'une intensité relative à des volumes n'excédant pas 5 m^3 , et à une période de retour relativement courte (annuelle à bi annuelle).

b) Démarche du BRGM

La méthodologie que le BRGM propose d'appliquer dans le cadre du projet MASSA se base sur l'analyse «à dire d'expert» pour tout ce qui concerne la phase observations de terrain, puis elle est complétée dans un deuxième temps par l'utilisation d'outils d'aide à la cartographie de la propagation (*trajectographie (F)*) déterministe et probabiliste, mais également empirique) afin d'affiner les limites des différents niveaux d'*aléa chute de blocs (F)*.

c) Intérêts de la méthode

Cette méthodologie permet d'une part un relevé d'indices sur le terrain relativement rapide à réaliser, par un géologue qualifié, puis une analyse et interprétation des données elle aussi rapide à mettre en œuvre, avec finalement peu d'outils nécessaires: un logiciel SIG, un logiciel de *trajectographie (F)* et un outil d'aide à la cartographie de type BORA.

d) Application sur la Vallée du Simplon (It/Ch) et du Col de la Lombarde (It/Fr)

La démarche adoptée pour cartographier de manière «rapide» l'*aléa chute de blocs (F)* sur les deux vallées a suivi la méthodologie décrite ci-dessus, à savoir:

- Division du secteur à étudier en *zones homogènes (F)* du point de vue géomorphologique;
- Description générale de la falaise ou de l'affleurement rocheux pour chaque zone ainsi déterminée, puis description détaillée des éléments remarquables (blocs susceptibles de se détacher, niches relativement fraîches);
- Description du glacis (s'il existe) comme zone de réception, et zone potentiellement susceptible de produire des blocs au pied de la zone de production principale : éboulis présents, tailles des blocs situés sur le glacis, présence d'eau...;
- Analyse structurale par des mesures en pied de falaise ou à vue et évaluation de la fracturation en distinguant des familles de fractures (dont on détermine la fréquence, l'ouverture et la persistance si c'est possible).

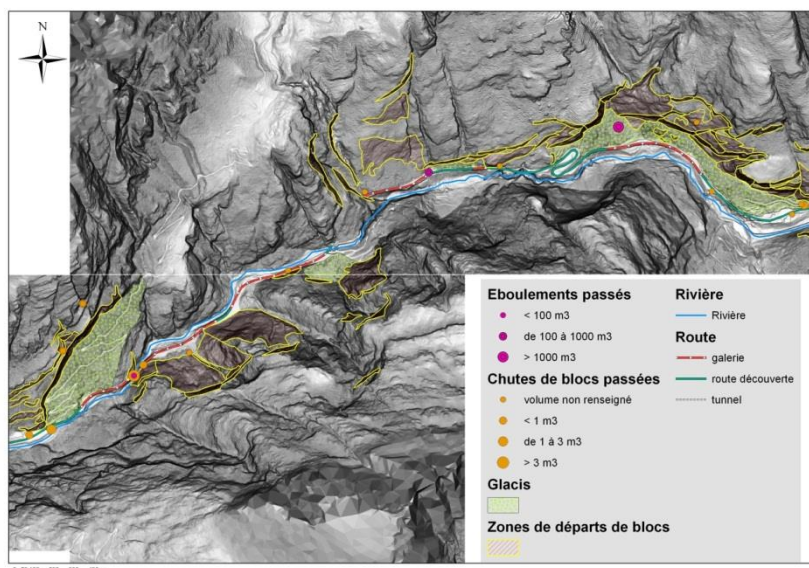


Figure 2.5 – Synthèse cartographique des éléments utiles à l'évaluation de l'aléa chute de blocs (F) sur fond de MNT rasterisé, sur la Vallée du Simplon côté Suisse

e) Evaluation de la susceptibilité de départ

La *susceptibilité de départ (F)* a été évaluée à partir de critères, qui, mis à part les critères déduits des mesures de la fracturation, sont qualitatifs et évalués à dire d'expert. Chaque critère est décliné en trois intensités qui vont permettre d'attribuer une note arbitraire à chaque zone de production de blocs.

- Critères morphologiques et d'expertise (pente moyenne, hauteur moyenne, aspect général de la falaise, état du surplomb, présence d'eau dans la fracturation...);
- Critères structuraux (familles de fractures, dièdres et plans instables).

La *susceptibilité de départ (F)* finale correspond à la somme pondérée des scores de chaque critère (figure 2.6). Elle a ensuite été retranscrite sous la forme d'une cartographie (figure 2.7).

Critères	Coefficients de pondération
Pente de la falaise	C1=3
Hauteur de la falaise	C2=2
Aspect de la falaise	C3=3
Etat du glissement bancs sur bancs (si existence)	C4=2
Etat des surplombs (si existence)	C5=2
Présence d'eau dans la fracturation	C6=1
Nombre de dièdres et plans instables	C7=3
Aléa de départ = C1*(Note-Pente falaise) + C2*(Note-Hauteur falaise) + C3*(Note-aspect falaise) + C4*(Note-glissement bancs sur bancs) + C5*(Note-Présence surplombs) + C6*(Note-eau) + C7*(Note-plans défavorables)	

Figure 2.6 – Synthèse des critères morphologiques et structuraux sur la Vallée du Simplon

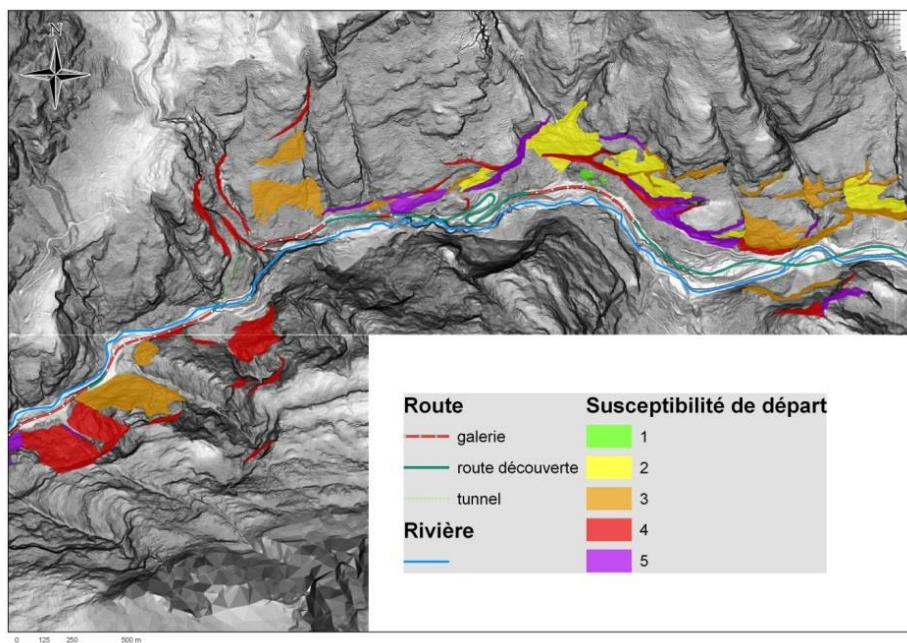


Figure 2.7 – Cartographie de la susceptibilité de départ (F) sur le tronçon du Simplon côté Suisse

f) Etude de propagation et de la trajectographie (F)

L'aléa final de chute de blocs (F) prend en compte la susceptibilité de départ (F) et les éventuelles atténuations d'aléa liées à la propagation et par conséquent au relief. Cette propagation est prise en compte avec un logiciel empirique: BORA, développé par le BRGM pour un usage interne. Il ne s'agit pas d'un outil de modélisation mais bien d'aide à la cartographie: il permet de tracer des zones qui pourraient potentiellement être atteintes par des blocs (figure 2.8).

Le logiciel de propagation BORA a été créé sur des bases empiriques et ne peut par conséquent pas rendre compte de l'extension exacte du phénomène chute de blocs. En effet, il ne prend pas en considération des paramètres physiques liés à la pente (rugosité, coefficient de frottement et de restitution...) ou aux blocs (volume, taille, forme). Le logiciel BORA ne tient pas compte non plus des rebonds potentiels des blocs qui peuvent faire varier leur point d'arrêt.

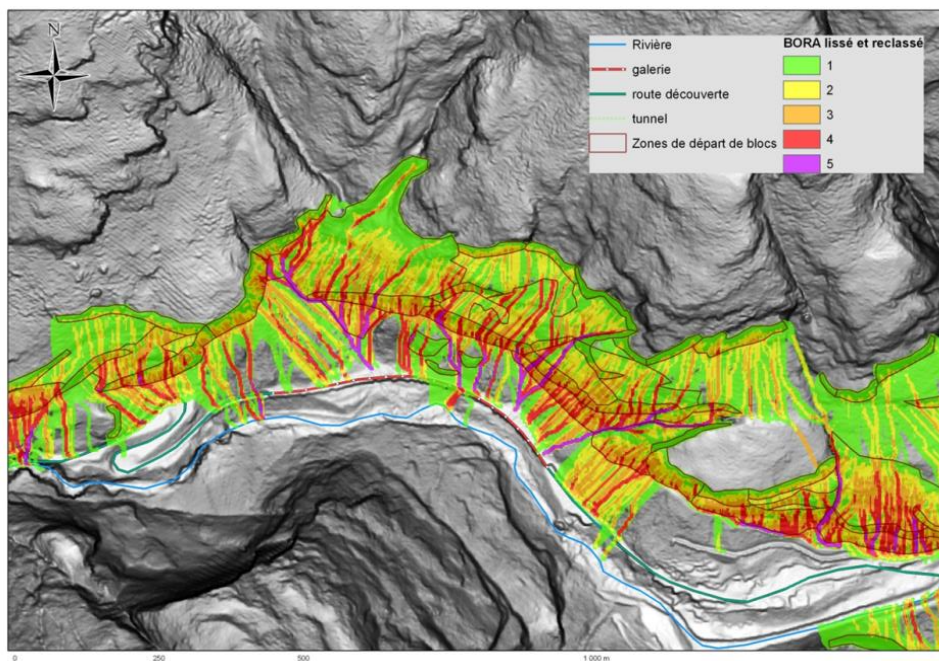


Figure 2.8 – Cartographie de l'aléa de propagation (F) correspondant aux résultats bruts de BORA reclassés en 5 classes et lissés (cas du Simplon Suisse)

C'est pourquoi il est apparu nécessaire dans la démarche de cartographie de l'aléa chute de blocs de compléter l'analyse par des évaluations de *trajectographie* (F) à l'aide des logiciels classiques (déterministes/probabilistes): Pierre 98 2D et 3D (figure 2.9).

L'objectif dans l'utilisation du Pierre98 2D est de pouvoir déterminer de façon plus précise l'extension en aval du phénomène chute de blocs. Pierre98 2D est un logiciel de *trajectographie* (F) qui permet de modéliser le comportement (rebonds, vitesse, points d'arrêt...) d'un bloc le long d'un profil topographique. Le logiciel Pierre98 3D a ensuite été utilisé dans l'objectif d'obtenir une meilleure visualisation et meilleure idée de la propagation des blocs. En effet, Pierre98 3D est un logiciel qui permet de visualiser en 3D les trajectoires d'un bloc tombé à partir d'un point donné. L'algorithme de base est le même que celui de Pierre 2D, mais les blocs ne se propagent plus sur des segments mais sur des facettes. Il utilise donc un MNT d'altitudes sur lequel doit être drapée une grille dont les cellules sont identiques aux facettes du MNT mais auxquelles on attribue les «paramètres sols» ad'hoc.

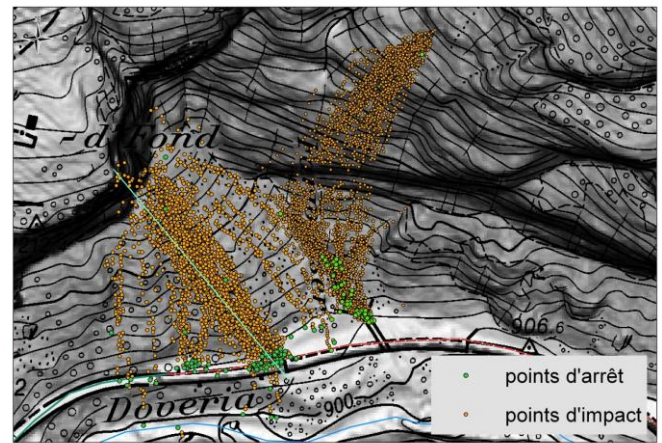
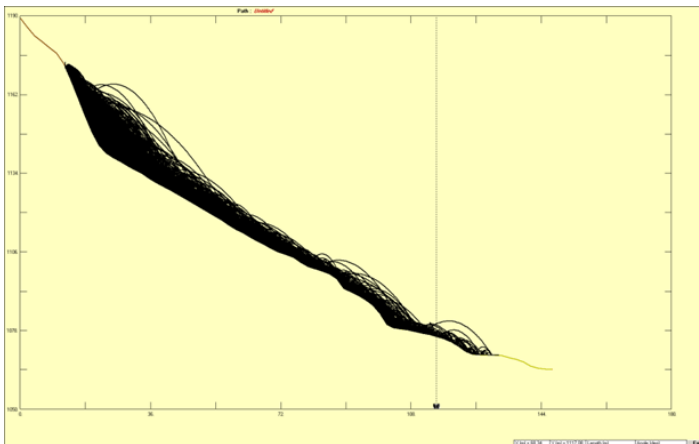


Figure 2.9 – Représentation sur un diagramme des résultats issus de Pierre98 2D (à gauche) et en SIG des simulations sur Pierre98 3D représentant la répartition des points d'impacts et des points d'arrêts des blocs (à droite)

g) Evaluation de l'aléa final

Le zonage de l'aléa *final de chute de blocs* (F) est tracé à dire d'expert à partir des zones de propagation déterminées avec le logiciel BORA, des résultats des simulations réalisées sur Pierre98 2D et 3D, et des observations de terrain.

Les résultats obtenus sur BORA permettent de visualiser les directions préférentielles empruntées par les blocs et donc les zones de probabilité d'atteinte plus ou moins fortes. Ils sont utiles également pour donner des probabilités d'atteinte des blocs relatives à chaque zone.

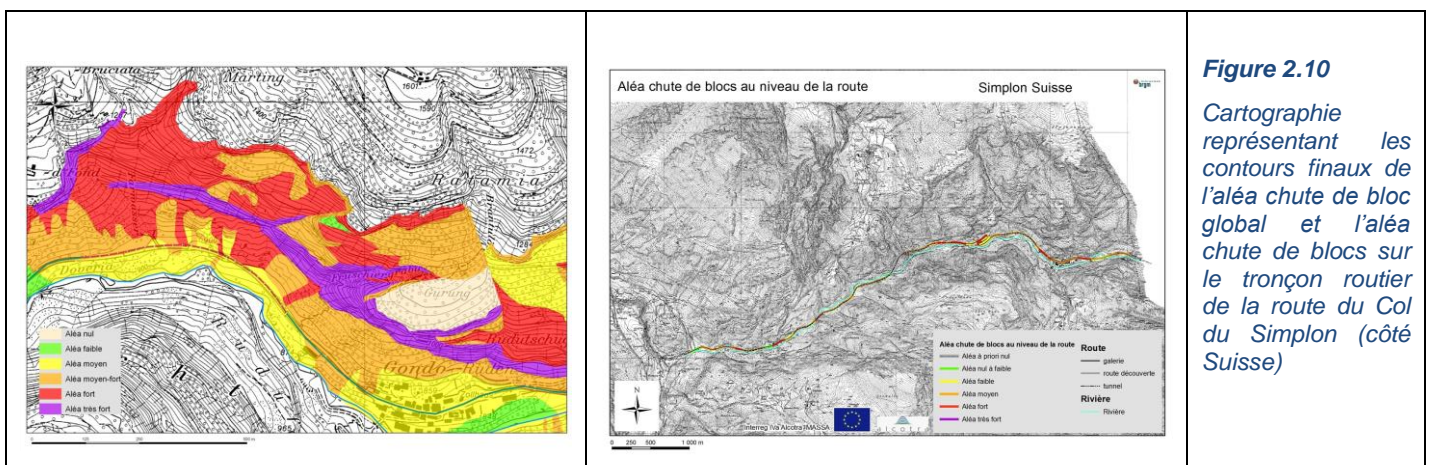


Figure 2.10
Cartographie représentant les contours finaux de l'aléa chute de bloc global et l'aléa chute de blocs sur le tronçon routier de la route du Col du Simplon (côté Suisse)



II.3. Il metodo Matterock short/light – La méthode Matterock short/light

La méthode Matterock utilisée dans le canton du Valais en Suisse se décline en plusieurs niveaux d'étude en fonction de l'échelle de l'analyse et de la précision requise: «complete» pour une étude détaillée, «short» pour une étude régionale et «light» pour une étude expéditive. Pour répondre aux impératifs du projet MASSA, une variation de la méthode, appelée «MATTEROCK SHORT/LIGHT», a été proposée. Les différentes étapes et les travaux réalisés sont présentés dans les chapitres qui suivent.

a) Travaux préparatoires

Avant de débiter la campagne de terrain, les travaux préparatoires suivants sont réalisés:

- Synthèse des documents géologiques existants (cartes géologiques, rapports d'étude).
- Etablissement du cadastre des événements afin de cibler les zones qui devront être analysées en priorité.
- Préparation des cartes topographiques (si possible échelle 1: 5'000 ou 1:10'000), des orthophotos et du matériel de terrain (boussole, altimètre, jumelles, appareil photos).

b) Travaux de terrain

L'acquisition des données sur le terrain constitue la **phase la plus importante de la méthode** et peut représenter près du tiers du temps consacré à l'étude. Des données incomplètes ou approximatives se répercutent sur l'ensemble de l'analyse et influencent négativement la qualité des résultats. Les relevés de terrain se déroulent en 2 temps.

Une **première campagne** de reconnaissance est effectuée, au cours de laquelle il s'agit de :

- Rechercher des points d'observation à distance des falaises, en principe depuis le bas ou le versant opposé.
- Subdiviser la zone d'étude en secteurs homogènes en fonction de la morphologie, de l'orientation des falaises, des points d'observation et des accès.
- Réaliser des photos panoramiques des falaises qui serviront à positionner les aléas¹ lors de la deuxième campagne de terrain.

Au cours de la **deuxième campagne** de terrain, les travaux suivants sont réalisés :

- Etablissement de l'agencement structural des falaises, par tronçon homogène, après identification et description des principales familles de discontinuité.
- Identification et caractérisation des *aléas (CH)*, dont on définit les mécanismes d'instabilité, les volumes instables, la taille des blocs et la *dangerosité (CH)*. Des *aléas ponctuels (CH)* facilement identifiables et des *aléas diffus (CH)* sont distingués. Différents scénarios de rupture sont souvent distingués pour les *aléas diffus (CH)*.
- Evaluation de la *probabilité d'atteinte (CH)* de la route pour chaque *aléa (CH)* et chaque scénario de rupture, sur la base d'un bloc ou d'un volume de dimensionnement et selon des critères morphologiques (pente du versant, nature et rugosité du terrain, couvert forestier, activité).
- Dans le cadre spécifique du projet MASSA, cette deuxième campagne de terrain a été réalisée par une équipe de 2 géologues expérimentés, ce qui, en plus d'avantages pratiques et sécuritaires, a permis d'améliorer la qualité des relevés. Les falaises ont été étudiées principalement à distance, puis les observations validées et complétées sur les affleurements présents le long des axes routiers analysés.

¹ L'aléa est pris au sens valaisan comme un volume de roche potentiellement instable. Synonyme: instabilité

c) Evaluation du danger

La méthode MATTEROCK SHORT/LIGHT suit les recommandations fédérales suisses, selon lesquelles le degré de *danger (CH)* d'un site menacé par des chutes de blocs est proportionnel à l'intensité du choc et à la probabilité d'occurrence de l'impact. Le *danger (CH)* est ainsi évalué au moyen d'un diagramme à deux entrées "*intensité (CH) – probabilité d'occurrence (CH)*" (Figure 2.11).

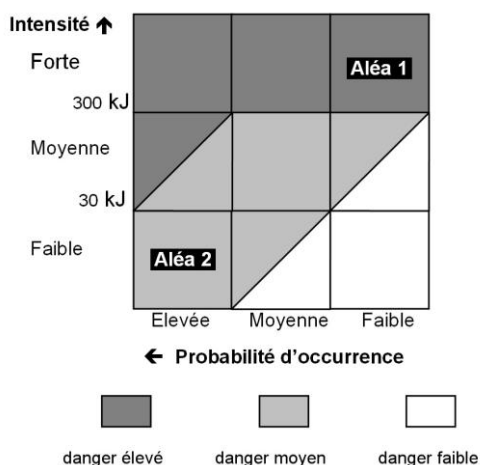


Figure 2.11 – Diagramme intensité (CH) – probabilité d'occurrence (CH) caractérisant le danger de chutes de blocs

La *probabilité d'occurrence (CH)* est la probabilité qu'un bloc qui se détache d'une paroi atteigne l'objet ou le périmètre menacé (*probabilité d'atteinte (CH)*), pondérée par la *dangérosité (CH)* du bloc (= probabilité de rupture ou de mobilisation), (Figure 2.12). La fréquence des événements observables est un autre critère qui, lorsqu'il peut être évalué, pondère également la *probabilité d'occurrence (CH)*.

La *probabilité d'occurrence (CH)* d'un événement, comme la *dangérosité (CH)* d'un aléa, est qualifiée de:

- Elevée = période de retour entre 1 et 30 ans,
- Moyenne = période de retour entre 30 et 100 ans,
- Faible = période de retour entre 100 et 300 ans.

Probabilité d'occurrence		Probabilité de rupture (= dangérosité de l'aléa)		
		Elevée	Moyenne	Faible
Probabilité d'atteinte	Elevée	Elevée	Moyenne	Faible
	Moyenne	Moyenne	Faible	-
	Faible	Faible	-	-

Figure 2.12 – Matrice d'évaluation de la probabilité d'occurrence (CH) en fonction de la dangérosité (CH) ou probabilité de rupture et de la probabilité d'atteinte (CH)

La *probabilité d'atteinte (CH)* des aléas est évaluée en priorité sur le terrain selon des critères morphologiques. Les limites d'atteinte utilisées sont les suivantes:

- Elevée: 20 – 100% d'atteinte des blocs.
- Moyenne: 2 – 20% d'atteinte des blocs.
- Faible: 0 – 2 % d'atteinte des blocs.

Des simulations trajectographiques 3D monoblocs, avec prise en compte de la forêt, ont été réalisées sur certains tronçons significatifs à l'aide du logiciel Rockyfor3D de l'association EcorisQ. Elles permettent de valider les estimations faites sur le terrain et surtout de modéliser la propagation latérale des blocs.

L'**intensité (CH)** est définie par l'énergie cinétique des blocs et est exprimée en kJ. Elle a été calculée à l'aide de la formule « $E_{cin} = mghf$ » faisant intervenir la masse m , la gravité g , la hauteur de chute h et un facteur de perte d'énergie f appelé "facteur de chute". Ce facteur qui dépend de la morphologie du versant varie généralement entre 1 et 0.01 (Figure 2.13). Pour les *aléas diffus (CH)*, la hauteur moyenne de la falaise et le volume moyen des aléas ou des blocs instables ont été utilisés pour les calculs. Les modélisations 3D effectuées ponctuellement permettent de valider les calculs réalisés avec le facteur de chute. Pour les tronçons concernés, l'énergie moyenne des blocs a été considérée.

L'**intensité (CH)** est classée en 3 degrés:

- Elevée= énergie cinétique > 300 kJ
- Moyenne= énergie cinétique entre 30 et 300 kJ
- Faible= énergie cinétique < 30 kJ

A/ Falaise sans versant		Facteur de chute f
1	Falaise très raide ou verticale avec chute libre sur la route	f = 0.9 - 1
2	Falaise très raide ou verticale avec chute libre sur la route et rebonds et impacts en haut	f = 0.6 - 0.9
3	Falaise inclinée à 45-60° avec rebonds	f = 0.4 - 0.6
B/ Falaise avec versant		Facteur de chute f
4	Blocs sautent	f = 0.1 - 0.4
5	Blocs roulent	f = 0.01 - 0.1
6	Cas n°4 ou 5 avec petite falaise le long de la route	f = 0.4 - 0.6

Figure 2.13

Tableau d'estimation du facteur de chute en fonction de la morphologie du terrain

Pour l'estimation des *probabilités d'atteinte (CH)* et pour le calcul des énergies, des blocs ou des volumes de dimensionnement ont été définis pour chaque aléa:

- **Bloc de dimensionnement:** taille du bloc considéré pour les *aléas diffus (CH)* et les *aléas ponctuels (CH)* éloignés de la route;
- **Volume de dimensionnement:** volume considéré dans le cas d'aléas ponctuels pouvant s'effondrer en une seule masse sur la route ou pour les éboulements de gros volume.

A chaque aléa est attribuée une **classe de danger (CH)** potentiel, basée sur le diagramme *intensité (CH) - probabilité d'occurrence (CH)* (Figure 2.14).

A	B	C
D1 D2	E	F1 F2
G	H1 H2	J

Figure 2.14 : Classes de danger (CH) de chute de blocs

La réduction du danger due aux mesures de protection existantes le long de la route (filets parepierres, ancrages) n'est pas prise en compte dans la qualification du degré de *danger* (CH).

d) Résultats

Les résultats de l'analyse du *danger* (CH) de chute de blocs selon la méthode MATTEROCK SHORT/LIGHT sont consignés dans un rapport technique, qui contient pour chaque secteur homogène du tronçon routier analysé, les tableaux suivants:

- Stéréogramme des discontinuités principales;
- Caractéristiques structurales des discontinuités principales (azimut/pendage, persistance, espacement + autres indications);
- Caractéristiques principales des aléas (type, mécanisme de mobilisation, volume mobilisable, taille des blocs, *dangerosité* (CH) appelé aussi probabilité de rupture);
- Evaluation de la *probabilité d'atteinte* (CH) des blocs;
- Evaluation de l'énergie cinétique des blocs;
- Evaluation du *danger* (CH).

Les rapports sont accompagnés d'annexes (Figure 2.15):

- Fiches d'identification et de description des aléas;
- Analyses trajectographiques 3D (pas systématiques);
- Cartes des aléas, des événements et du *danger* (CH) de chute de pierres/blocs et éboulements au niveau de la route.

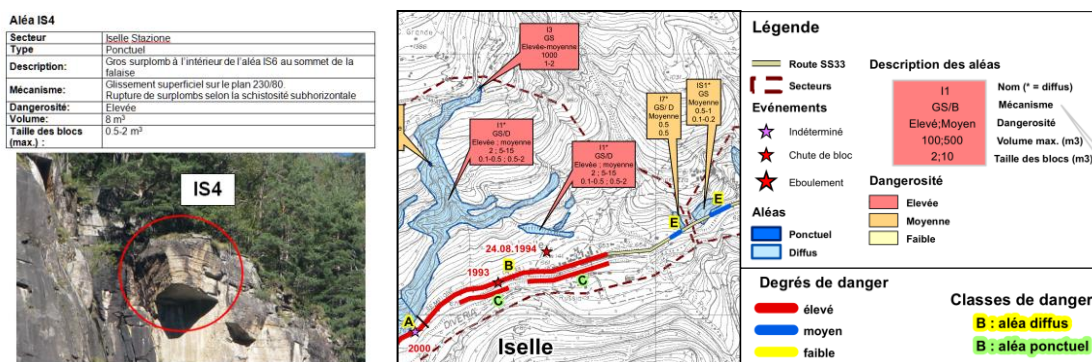


Figure 2.15 – Exemple de la fiche d'identification et de description de l'aléa IS4 et extrait de la carte des aléas, des événements et du danger (CH) au niveau de la route du Col du Simplon côté italien

e) Avantages et limites de la méthode

L'application de la méthode MATTEROCK SHORT/LIGHT aux trois axes routiers étudiés dans le cadre du projet MASSA permet de relever les avantages et les limites de la méthode.

Points forts de la méthode :

- Une échelle d'analyse à options;
- L'identification d'instabilités reconnues sur site (*aléas ponctuels* (CH));

- L'identification d'instabilités de gros volume;
- Une 1^{ère} estimation du *danger* (CH) obtenue rapidement;
- La possibilité de positionner et dimensionner des écrans adaptés aux aléas;
- Une analyse qui prend en compte la notion de temps (période de retour);
- Un diagnostic post-événement rapide et précis (analyse de la niche).

Points faibles de la méthode :

- Résultats fortement assujettis aux conditions d'observation in situ (météo et accessibilité des stations d'observation propices);
- Peu adaptée pour les chutes de pierres de petite taille;
- Peu adaptée pour évaluer sommairement de grands axes routiers.

III. SVOLGIMENTO DELLE ATTIVITÀ – DÉROULEMENT DES ACTIVITÉS

Il progetto MASSA si è sviluppato essenzialmente attraverso attività di terreno, effettuate sia separatamente sia congiuntamente dal personale dei 3 enti, e attività di discussione con la finalità di comprendere a fondo le caratteristiche di ciascun metodo in vista di una loro possibile integrazione.

Il fulcro delle attività realizzate direttamente sul territorio ha comportato l'analisi di 3 siti pilota corrispondenti a tre ambiti vallivi dove ciascun ente ha applicato il proprio metodo di studio per la valutazione della pericolosità da crollo (figura 3.1). La finalità del lavoro era quella di acquisire un bagaglio di dati articolato, fondamentale per poter effettuare un confronto dei metodi utilizzati non solo in modo teorico ma anche pratico.

III.1. Presentazione dei tre assi stradali studiati

Le aree di studio sono localizzate in tre differenti contesti geologici e morfologici del settore centrale ed esterno delle Alpi nord-occidentali e sono caratterizzate da una marcata valenza transfrontaliera.



Figura 3.1 – Ubicazione dei siti prescelti per il confronto tra i metodi speditivi di valutazione della pericolosità dei fenomeni di crollo



1. Asse viario francese della strada dipartimentale D6204 del colle di Tenda (1871 m s.l.m.)

Il tratto stradale preso in considerazione è parte della strada dipartimentale che attraversa la Valle Roya che permette il collegamento tra la costa ligure e, per mezzo del tunnel del Colle di Tenda, il territorio della provincia di Cuneo. Il settore studiato, caratterizzato da uno sviluppo complessivo di 18 km, è compreso tra l'uscita settentrionale del tunnel a sud di Saorge e il piede del Mont Branegue, circa 1 km a monte dell'abitato di Tenda; dal punto di vista amministrativo il territorio considerato appartiene ai comuni di Tende, Fontan e Saorge.

La valle Roya si sviluppa su arenarie e peliti del Permiano, arenarie e carnirole del Trias, e su calcari e dolomie del Giurassico; gli elementi tettonici più rilevanti che controllano la morfologia della valle Roya hanno direzione N20°-40° e N140°.

2. Asse viario italiano della strada provinciale SP255 del colle della Lombarda (2350 m s.l.m.)

Lo studio è stato effettuato in relazione ad un tratto stradale di circa 7 km che si sviluppa tra le quote di 1120 m e 1700 lungo il Vallone di S. Anna, ubicato in destra idrografica della Valle Stura di Demonte e appartenente al territorio del comune di Vinadio. Questa strada, seppure percorribile solo da maggio/giugno fino a ottobre in funzione delle condizioni di innevamento, rappresenta un importante e frequentato asse turistico sia per la presenza del noto santuario di S. Anna di Vinadio sia per il collegamento che realizza tra la valle italiana della Stura di Demonte e la valle francese della Tinée.

Il Vallone di S. Anna si sviluppa nel dominio tettonico dell'Argentera che rappresenta un basamento cristallino pre-alpino costituito da gneiss migmatitici e granitoidi attraversati da zone di taglio en echelon ad orientazione N120°-140°.

3. Asse viario italiano della strada statale SS33 e della strada nazionale svizzera N9 del passo del Sempione (2005 m s.l.m.)

Il tratto stradale studiato corrisponde ad una porzione della strada che corre in fregio al torrente Diveria (Doveria in Svizzera) che pone in collegamento il settore ossolano del nord Piemonte con il territorio svizzero vallese. La parte studiata di tale via di comunicazione è compresa tra la località di Balmanolesca, nel comune italiano di Varzo, e la località svizzera di Gabi; complessivamente il tratto stradale valutato presenta uno sviluppo di circa 12 km e appartiene amministrativamente ai comuni italiani di Varzo e Trasquera e ai comuni svizzeri di Zwischbergen e Simplon.

Questo settore si sviluppa nel dominio Pennidico inferiore costituito principalmente da ortogneiss a biotite e muscovite ai quali si intercalano marmi e calcescisti.

Per omogeneizzare la raccolta dei dati di terreno ed uniformare i criteri di interpretazione delle caratteristiche geometriche, tipologiche e geologiche nella valutazione della pericolosità da caduta massi è stato effettuato un rilievo congiunto del versante settentrionale della Valle Divedro presso la località di Iselle, nel comune di Trasquera (provincia del Verbano-Cusio-Ossola) (figura 3.2).

In posizione opposta rispetto alla falesia che sovrasta l'abitato, i tecnici di ciascun ente hanno effettuato i rilievi della falesia utilizzando ciascuno il proprio metodo in un tempo fissato di circa un'ora e, al termine, sono stati presentati e discussi i risultati ottenuti (cfr par. III.2. e **ALLEGATO 2**).



Figura 3.2 – Fotografia delle pareti soprastanti l'abitato di Iselle oggetto del rilievo congiunto

Le fasi progettuali sviluppate direttamente sul territorio sono state accompagnate per tutta la durata del progetto da frequenti momenti di discussione e confronto dei risultati, che hanno consentito da un lato di chiarire in modo esaustivo le potenzialità e i limiti di ciascun metodo, riassunti sinteticamente in forma tabellare (cfr. capitolo V), e dall'altro di realizzare un prodotto che, a livello della fase di rilievo dei dati sul terreno, risponde all'obiettivo di integrare i tre modi di approcciare il problema della valutazione della pericolosità da caduta massi (cfr. **ALLEGATO 3**).

III.2. Sintesi dell'applicazione delle metodologie di studio delle pareti rocciose Proviaalp, BRGM, Matterock short/light sul versante pilota di «Iselle-dogana» – Synthèse de l'application commune des méthodologies d'évaluation de l'aléa chute de blocs Proviaalp, BRGM, Matterock short/light sur le site pilote «Iselle-douane»

Ce travail a été réalisé en commun, les trois organismes CREALP, ARPA et BRGM se sont rendus sur le site d'Iselle-douane le 19 mai 2011, examiner le tronçon de falaise à expertiser depuis un promontoire du versant opposé (sud).

Chaque équipe était constituée de 2 ou 3 personnes selon les cas, géologues et géotechniciens, ingénieurs expérimentés et débutants.

L'objectif était que chaque organisme réalise sur un laps de temps relativement court (1h), une caractérisation de l'aléa «chute de blocs» vis-à-vis de la route qui passe au pied du tronçon en question, selon les critères d'évaluation propres à sa méthode.

Ce travail, assez unique en son genre, et particulièrement riche ensuite en termes d'échanges entre experts, fut un des points forts de l'Action 1 du projet MASSA.

Il a permis en particulier :

- de confronter les trois méthodologies directement sur le terrain;
- d'illustrer *in situ* la définition des différents critères utilisés dans chacune des méthodologies et donc de mieux percevoir l'intérêt de chacun d'eux et leur poids dans le/les résultats finaux;
- de montrer que la méthodologie Proviaalp de l'ARPA PIEMONTE nécessite systématiquement un travail préalable, au bureau, d'analyse des orthophotos, avant toute expertise de terrain, afin de: a) identifier le *aree omogenee (I)*; b) identifier et caractériser géométriquement les «grandes» discontinuités ainsi que la densité de leurs intersections avec la falaise. Une première évaluation de la propagation, via la méthode des cônes automatisée, est ainsi proposée avant même d'aller sur le terrain (dans les cas où la vallée n'est pas trop encaissée pour l'utilisation de cette méthode). L'expertise sur le terrain



consiste à relever un certain nombre de données morphologiques et structurales qui sont saisies directement dans la base de données Arpa disponible sur un PC portable de terrain, de même qu'une description succincte des caractéristiques de la falaise;

- concernant la méthode Matterock short/light du CREALP, le travail sur le terrain consiste à construire l'agencement structural de la falaise, à identifier et décrire les *aléas ponctuels* et/ou *diffus (CH)* (mécanismes, volumes, taille des blocs), à évaluer leur *dangerosité (CH)* et à estimer la *probabilité d'atteinte (CH)* des blocs composant les aléas. L'exercice sur Iselle a permis, au bout d'une heure d'expertise, de déterminer un niveau de *danger (CH)* le long du linéaire routier concerné, incluant donc une notion de *probabilité d'occurrence (CH)*, ainsi qu'un niveau d'énergie des blocs estimé empiriquement à l'aide d'un «facteur de chute f » dépendant de la morphologie du versant à la base de la falaise;
- la méthode BRGM utilise cette expertise de terrain pour déterminer in situ la probabilité de départ des blocs ainsi que les valeurs des paramètres qui seront ensuite utilisés dans les logiciels de trajectographie (1D et 3D) et/ou de propagation type «méthode des cônes» et BORA afin d'évaluer une susceptibilité d'atteinte de la route puis un aléa. Le travail sur le terrain consiste donc principalement à relever les caractéristiques morphologiques et structurales de la falaise, évaluer la taille des blocs présents dans la pente et identifier des *zones homogènes (F)* sur lesquelles seront ensuite qualifiées des *susceptibilités de départ (F)* de blocs. Les valeurs des critères ne sont pas contraintes par des plages de variations, et les schémas réalisés sur place ainsi que les photos restent des outils incontournables dans l'expertise de terrain.

Les détails sur les relevés réalisés sont disponibles dans l'**ANNEXE 2**.

IV. APPLICAZIONE DEI METODI

Come evidenziato nel capitolo II, i tre enti operano con approcci differenti: la stima della *suscettibilità (I)*, dell'*aléa chute de blocs (F)* e del *danger (CH)* viene ottenuta direttamente sul terreno e affinata in sede di elaborazione del rapporto finale, come nel caso del metodo Matterock short/light, o suddividendo in fasi successive le attività di raccolta, analisi e trattamento dati, nel caso dei metodi BRGM e Proviaip. Queste diverse modalità operative determinano differenziazioni sia nelle modalità di rilievo sia nelle fasi di analisi dati e conseguentemente nei risultati finali ottenuti.

Di seguito viene riportato a titolo di esempio il confronto tra i rilievi e le osservazioni di terreno effettuate per il sito della Lombarda (Vallone di S. Anna); delle tre zone analizzate il Vallone di S. Anna risulta il sito in cui le carte di *suscettibilità (I)*, *aléa chute de blocs (F)* e *danger (CH)* derivano dalla realizzazione ex-novo dei rilievi di terreno e delle elaborazioni da parte dei tre gruppi di lavoro; si rimanda invece al sito web MASSA per i dati completi ottenuti dall'analisi dei tre siti pilota studiati.

Vengono di seguito confrontati i risultati ottenuti sulla base delle diverse attività previste dai tre metodi per il tratto centrale di strada della suddetta valle (figura 4.1).

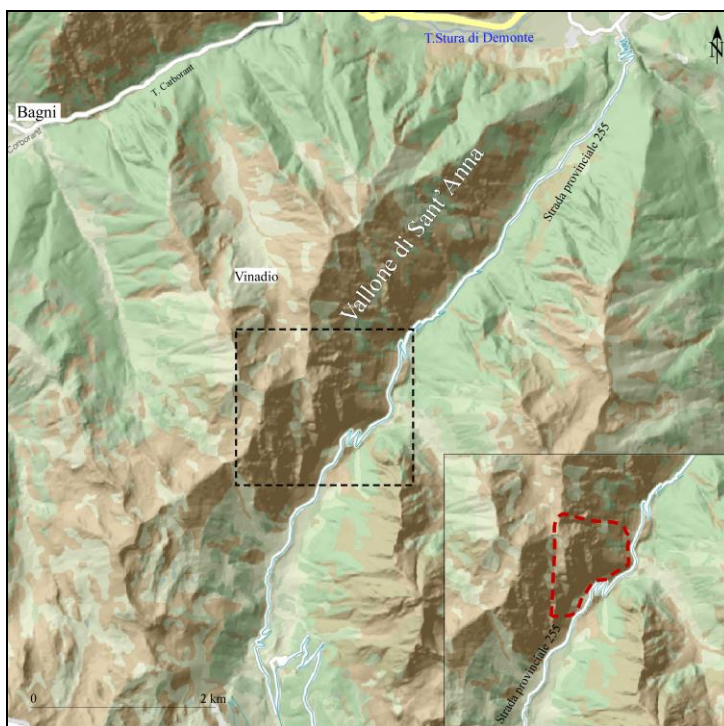


Figura 4.1 – Vallone di S. Anna, in rosso è riportata in dettaglio l'area di confronto

IV.1. Attività di rilievo di terreno

I tre metodi di studio comportano una prima fase che ha la finalità di suddividere le pareti rocciose sovrastanti la strada in *aree omogenee (I)*, *zones homogènes (F)* o *aires structurales (CH)* ovvero in settori contraddistinti da caratteristiche strutturali e morfologiche analoghe. Per compiere tale operazione il metodo Proviarp prevede un'analisi preliminare geomorfologica e strutturale da foto aeree che tiene conto del grado di destrutturazione e di orientazione, pendenza ed estensione dell'ammasso roccioso e affina il dato sul terreno; il metodo BRGM individua le *zones homogènes (F)* direttamente sul terreno contestualmente all'attività di rilievo strutturale e affina quindi il risultato in ufficio; il metodo Matterock short/light distingue la zona di studio in settori omogenei di significato prettamente logistico sulla base della morfologia e dell'orientazione del versante; successivamente questi settori possono essere distinti in *aires structurales (CH)*, cioè in domini con lo stesso assetto strutturale.

Nel caso del vallone di Sant'Anna, il metodo italiano individua 15 *aree omogenee (I)*, il metodo BRGM identifica 12 *zones homogènes (F)* e infine Matterock distingue, in funzione della litologia e dell'esposizione del versante, 3 *aires structurales (CH)*, due in sinistra orografica e uno in destra (figura 4.2).

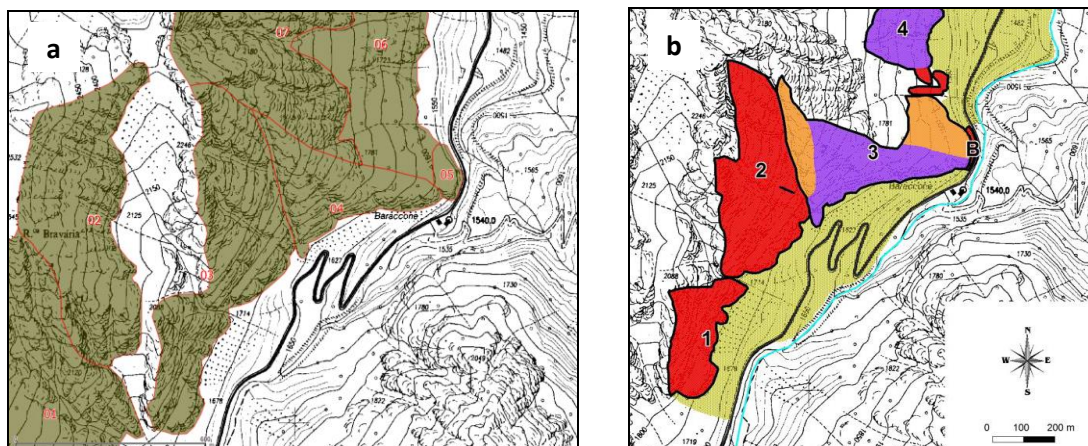


Figura 4.2 – Esempio di aree omogenee (I) relative al tratto centrale del Vallone di S. Anna, a: rilievo ARPA b: rilievo BRGM (i numeri identificano le zones homogènes (F) individuate). Per questo settore il metodo Matterock short/light individua un solo aire structurale (CH)

Sebbene in linea generale le attività di rilievo di terreno condotte dai 3 enti siano state svolte secondo le metodologie classiche di rilevamento dati geologico-strutturali e geomorfologici di superficie, si osservano differenze già in questa fase di studio.

Rilievo metodo Proviarp

I rilievi di terreno effettuati da Arpa Piemonte vengono riversati in un *database* strutturato *ad hoc* per la raccolta dati su *tablet pc*.

Per il settore in esame i rilievi di terreno sono stati effettuati sulle 4 *aree omogenee* (I) catalogate come tipo 2 (figura 4.3) per le quali si è ritenuto di poter fornire misure strutturali attendibili (tabella 4.1). Si tratta di aree caratterizzate da pendenze molto elevate (70°), che mostrano una morfologia e una densità di fratturazione differente come evidenziato anche dalle dimensioni dei volumi dei blocchi osservati sia in parete sia al piede del versante. Nelle 4 aree omogenee si distinguono 6 sistemi di discontinuità caratterizzati da differenti ordini gerarchici. I sistemi a maggiore persistenza e spaziatura interessano principalmente l'area 1 (persistenza > 20m) mentre le aree 3 e 4 sono interessate da sistemi a persistenza mediamente minore. Il metodo Proviarp prevede il confronto tra le misure strutturali di terreno e i sistemi di fratture individuati su viste prospettiche in 3D di foto aeree al fine di estendere il dato puntuale misurato sull'affioramento roccioso all'intera area omogenea.

Per le diverse aree sono stati descritti 6 *cinematismi* (I) ai quali si associa il meccanismo di distacco.

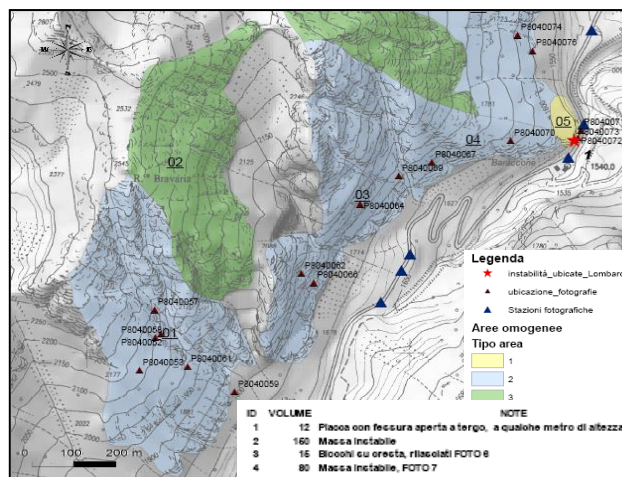


Figura 4.3 – Carta dei rilievi di terreno realizzata secondo il metodo Proviarp

	Area 1	Area 2	Area 3	Area 4		Tipo elemento	Spaziatura	Persistenza	
Orientazione Parete	Dir imm.130+/-5 Dip 70+/-10	Dir imm.110+/-20 Dip 70+/-10	Dir imm.130+/-5 Dip 70+/-10	Dir imm.140+/-10 Dip 70+/-5		A: N10 85 SE	faglia	molto ampia (>2m)	molto alta (>20m)
Altezza max parete	500	450	550	500		B: N70 45 NO	giunto	molto ampia (>2m)	molto alta (>20m)
Forma blocchi in parete	irregolare	n.d	irregolare	irregolare	Area 1	C: N155 45 NE	giunto	molto ampia (>2m)	molto alta (>20m)
volume blocchi in parete	0.5 medio 2 max	n.d	1 medio 10 max	0.1 medio 5 max		D: N90 60 SE	giunto	ampia (60cm-2m)	media (3m-10m)
Forma blocchi alla base	irregolare	n.d	irregolare	irregolare		E: N70 45 SE	giunto	ampia (60cm-2m)	media (3m-10m)
volume blocchi alla base	0.5 medio 1 max	n.d	0.5 medio 10 max	0.5 medio 15 max	Area 2	A:N10 85SE	faglia	n.d	n.d
Tipologia ammasso	irregolare	irregolare	bloccoso	bloccoso		B: N90 60 SE	giunto	n.d	n.d
Litotipo	metamorfiche a fogliazione pervasiva	metamorfiche a fogliazione pervasiva	metamorfiche a fogliazione pervasiva	metamorfiche a fogliazione pervasiva		C: N110 70 NE	giunto	n.d	n.d
Grado fratturazione	fratturata	fratturata	fratturata	fratturata	Area 3	A: N30 50 SE	giunto	moderata (20cm-60cm)	molto alta (>20m)
Grado alterazione	Debolmente alterata	Debolmente alterata	Debolmente alterata	Debolmente alterata		B: N100 75 NE	giunto	moderata (20cm-60cm)	alta (10m-20m)
resistenza	n.d	n.d	n.d	n.d		C: N120 70 NE	giunto	ampia (60cm-2m)	media (3m-10m)
Elementi strutturali	A: N10 85 SE B: N70 45 NO C: N155 45 NE D: N90 60 SE E: N70 45 SE Faglia:N10 85SE	A: N90 60 SE B: N110 70 NE Faglia:N10 85SE	A: N30 50 SE B: N100 75 NE C: N120 70 NE D: N30 35 NO E: N165 70 NE	A: N160 45 NE B: N20 70 NO C: N70 60 SE	Area 4	A:N10 85SE	giunto	ampia (60cm-2m)	alta (10m-20m)
Cinematismi	C1, P1	P1	C1, P1	C1		B: N90 60 SE	giunto	ampia (60cm-2m)	alta (10m-20m)
						C: N110 70 NE	giunto	n.d	n.d



	Area 1	Area 2	Area 3	Area 4		Tipo elemento	Spaziatura	Persistenza																																																																		
Orientazione Parete	Dir imm. 130+/-5 Dip 70+/-10	Dir imm. 110+/-20 Dip 70+/-10	Dir imm. 130+/-5 Dip 70+/-10	Dir imm. 140+/-10 Dip 70+/-5	<table border="1"> <tr><td rowspan="5">Area 1</td><td>A: N10 85 SE</td><td>faglia</td><td>molto ampia (>2m)</td><td>molto alta (>20m)</td></tr> <tr><td>B: N70 45 NO</td><td>giunto</td><td>molto ampia (>2m)</td><td>molto alta (>20m)</td></tr> <tr><td>C: N155 45 NE</td><td>giunto</td><td>molto ampia (>2m)</td><td>molto alta (>20m)</td></tr> <tr><td>D: N90 60 SE</td><td>giunto</td><td>ampia (60cm-2m)</td><td>media (3m-10m)</td></tr> <tr><td>E: N70 45 SE</td><td>giunto</td><td>ampia (60cm-2m)</td><td>media (3m-10m)</td></tr> <tr><td rowspan="3">Area 2</td><td>A: N10 85 SE</td><td>faglia</td><td>n.d.</td><td>n.d.</td></tr> <tr><td>B: N90 60 SE</td><td>giunto</td><td>n.d.</td><td>n.d.</td></tr> <tr><td>C: N110 70 NE</td><td>giunto</td><td>n.d.</td><td>n.d.</td></tr> <tr><td rowspan="5">Area 3</td><td>A: N30 50 SE</td><td>giunto</td><td>moderata (20cm-60cm)</td><td>molto alta (>20m)</td></tr> <tr><td>B: N100 75 NE</td><td>giunto</td><td>moderata (20cm-60cm)</td><td>alta (10m-20m)</td></tr> <tr><td>C: N120 70 NE</td><td>giunto</td><td>ampia (60cm-2m)</td><td>media (3m-10m)</td></tr> <tr><td>D: N30 35 NO</td><td>giunto</td><td>moderata (20cm-60cm)</td><td>bassa (1m-3m)</td></tr> <tr><td>E: N165 70 NE</td><td>giunto</td><td>n.d.</td><td>n.d.</td></tr> <tr><td rowspan="2">Area 4</td><td>A: N10 85 SE</td><td>giunto</td><td>ampia (60cm-2m)</td><td>alta (10m-20m)</td></tr> <tr><td>B: N90 60 SE</td><td>giunto</td><td>ampia (60cm-2m)</td><td>alta (10m-20m)</td></tr> <tr><td></td><td>C: N110 70 NE</td><td>giunto</td><td>n.d.</td><td>n.d.</td></tr> </table>	Area 1	A: N10 85 SE	faglia	molto ampia (>2m)	molto alta (>20m)	B: N70 45 NO	giunto	molto ampia (>2m)	molto alta (>20m)	C: N155 45 NE	giunto	molto ampia (>2m)	molto alta (>20m)	D: N90 60 SE	giunto	ampia (60cm-2m)	media (3m-10m)	E: N70 45 SE	giunto	ampia (60cm-2m)	media (3m-10m)	Area 2	A: N10 85 SE	faglia	n.d.	n.d.	B: N90 60 SE	giunto	n.d.	n.d.	C: N110 70 NE	giunto	n.d.	n.d.	Area 3	A: N30 50 SE	giunto	moderata (20cm-60cm)	molto alta (>20m)	B: N100 75 NE	giunto	moderata (20cm-60cm)	alta (10m-20m)	C: N120 70 NE	giunto	ampia (60cm-2m)	media (3m-10m)	D: N30 35 NO	giunto	moderata (20cm-60cm)	bassa (1m-3m)	E: N165 70 NE	giunto	n.d.	n.d.	Area 4	A: N10 85 SE	giunto	ampia (60cm-2m)	alta (10m-20m)	B: N90 60 SE	giunto	ampia (60cm-2m)	alta (10m-20m)		C: N110 70 NE	giunto	n.d.	n.d.
Area 1	A: N10 85 SE	faglia	molto ampia (>2m)	molto alta (>20m)																																																																						
	B: N70 45 NO	giunto	molto ampia (>2m)	molto alta (>20m)																																																																						
	C: N155 45 NE	giunto	molto ampia (>2m)	molto alta (>20m)																																																																						
	D: N90 60 SE	giunto	ampia (60cm-2m)	media (3m-10m)																																																																						
	E: N70 45 SE	giunto	ampia (60cm-2m)	media (3m-10m)																																																																						
Area 2	A: N10 85 SE	faglia	n.d.	n.d.																																																																						
	B: N90 60 SE	giunto	n.d.	n.d.																																																																						
	C: N110 70 NE	giunto	n.d.	n.d.																																																																						
Area 3	A: N30 50 SE	giunto	moderata (20cm-60cm)	molto alta (>20m)																																																																						
	B: N100 75 NE	giunto	moderata (20cm-60cm)	alta (10m-20m)																																																																						
	C: N120 70 NE	giunto	ampia (60cm-2m)	media (3m-10m)																																																																						
	D: N30 35 NO	giunto	moderata (20cm-60cm)	bassa (1m-3m)																																																																						
	E: N165 70 NE	giunto	n.d.	n.d.																																																																						
Area 4	A: N10 85 SE	giunto	ampia (60cm-2m)	alta (10m-20m)																																																																						
	B: N90 60 SE	giunto	ampia (60cm-2m)	alta (10m-20m)																																																																						
	C: N110 70 NE	giunto	n.d.	n.d.																																																																						
Altezza max parete	500	450	550	500																																																																						
Forma blocchi in parete	irregolare	n.d.	irregolare	irregolare																																																																						
volume blocchi in parete	0.5 medio 2 max	n.d.	1 medio 10 max	0.1 medio 5 max																																																																						
Forma blocchi alla base	irregolare	n.d.	irregolare	irregolare																																																																						
volume blocchi alla base	0.5 medio 1 max	n.d.	0.5 medio 10 max	0.5 medio 15 max																																																																						
Tipologia ammasso	irregolare	irregolare	bloccoso	bloccoso																																																																						
Litotipo	metamorfiche a fogliazione pervasiva	metamorfiche a fogliazione pervasiva	metamorfiche a fogliazione pervasiva	metamorfiche a fogliazione pervasiva																																																																						
Grado fratturazione	fratturata	fratturata	fratturata	fratturata																																																																						
Grado alterazione	Debolmente alterata	Debolmente alterata	Debolmente alterata	Debolmente alterata																																																																						
resistenza	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.																																																																						
Elementi strutturali	A: N10 85 SE B: N70 45 NO C: N155 45 NE D: N90 60 SE E: N70 45 SE Faglia: N10 85 SE	A: N90 60 SE B: N110 70 NE Faglia: N10 85 SE	A: N30 50 SE B: N100 75 NE C: N120 70 NE D: N30 35 NO E: N165 70 NE	A: N160 45 NE B: N20 70 NO C: N70 60 SE																																																																						
Cinematismi	C1; P1	P1	C1; P1	C1																																																																						

Tabella 4.1 – Esempio delle caratteristiche morfologiche e strutturali rilevate nelle aree omogenee (I) in esame derivate dalle schede del database. C (cuneo) e P (planare) indicano i meccanismi di instabilità

Rilievo metodo BRGM

In linea generale i rilievi effettuati dal BRGM sono rivolti ad attribuire dei punteggi ad ogni *zone homogène (F)* secondo un criterio misto morfologico e strutturale al fine di stabilire le classi di valutazione della *susceptibilité de départ (F)*. I criteri sono suddivisi in tre classi di intensità che consentono di “incasellare” dapprima le osservazioni di terreno valutate dall'esperto di dominio (criterio morfologico) e successivamente di stabilire i meccanismi di crollo di blocchi instabili in base all'assetto giaciturale tra le orientazioni dei sistemi di frattura e quella del versante, attraverso i diagrammi di Schmidt (criterio strutturale).

Per il settore in esame le osservazioni di terreno per le tre *zone homogènes (F)* sopra individuate sono riportate in tabella 4.2. Le *zone homogènes (F)* 1 e 2 mostrano caratteristiche analoghe, sono caratterizzate da alte pendenze (50°-60°), da una direzione di immersione molto favorevole alla predisposizione di crolli e da una stato di fratturazione intenso. Sono stati misurati 5 sistemi di discontinuità differenti che conferiscono a queste due aree un grado di suscettibilità di distacco alto; viceversa la *zone homogène (F)* 3 presenta un ammasso roccioso più omogeneo caratterizzato da un stato di fratturazione debole ed una strutturazione a franapoggio mediamente poco marcata (tabella 4.2).

Area 1	Description Générale	Falaise de 200 mètres de hauteur, pente 60° en moyenne, d'exposition SE (N20). Falaise fracturée mais massive, discontinuités fermées
	Ecoulement d'eau	Falaise humide
	Nombre de familles structurales 5 principales	Fracturation intense F1 N 140 60 SW S01 F2 N 72 90 3 fractures <i>subverticales</i> F3 N 160 50 NE Fa1 Aval pendage F4 N 55 40 SE Fa2 <i>Aval pendage</i> F5 N 50 50 NW S02
	Aval pendage	Très défavorable
	Surplomb	Nombreux surplombs
Area 2	Description Générale	Falaise de 250 mètres de hauteur, pente 55 à 60° en moyenne, d'exposition SE (N20 à N35). Falaise fracturée mais massive, discontinuités fermées
	Ecoulement d'eau	Falaise humide
	Nombre de familles structurales 5 principales	Fracturation intense F1 N 30 35 SE Fa2 Aval pendage F2 N 145 67 NE Fa1 Aval pendage F3 N 30 55 NW S0 2 permet décollement F4 N 115 50 SW variante de Fa1 Aval pendage F5 N 157 90 S01
	Aval pendage	Très défavorable
	Surplomb	Nombreux surplombs
Area 3	Description Générale	Falaise de 100 à 150 mètres de hauteur, pente 50° en moyenne, d'exposition SE à S (N50 à N100). Falaise massive fracturée et découpage marqué en partie supérieure, discontinuités fermées, quelques figures de décompressions en partie inférieure
	Ecoulement d'eau	Falaise humide
	Nombre de familles structurales 5 principales	Fracturation moyenne Homogène avec l'ensemble
	Aval pendage	Absent ou peu marqué en partie supérieure et très défavorable en partie inférieure
	Surplomb	Surplombs proéminents et/ou très nombreux

Tabella 4.2 – Descrizione di terreno delle tre zones homogènes (F) ottenute dal criterio di analisi morfologico



Le misure dei piani di fratturazione rilevati sul terreno consentono di determinare i meccanismi di distacco dei blocchi attraverso l'impiego del diagramma di Schmidt (figura 4.4).

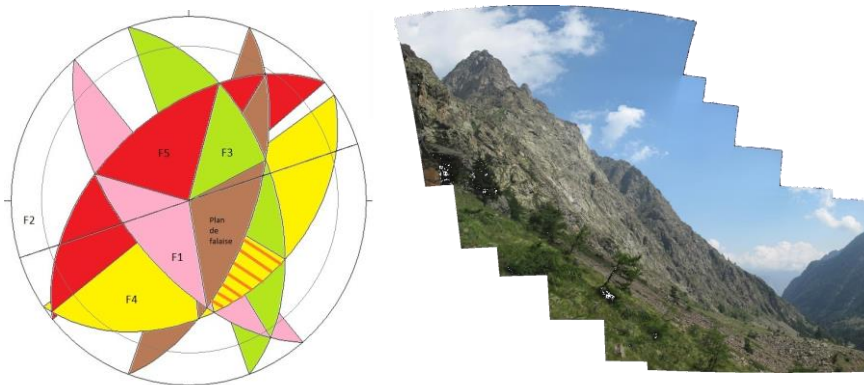


Figura 4.4 – Esempio di sistemi di discontinuità della zone homogène (F). I meccanismi di rottura dei blocchi si basano sull'assunzione che ogni zone homogène (F) è caratterizzata dalle stesse famiglie di fratture e che il meccanismo di rottura è condizionato da orientazione e pendenza del fronte roccioso

La valutazione della *susceptibilité de départ* (F) riportata in figura 4.5 rappresenta la somma ponderata dei pesi associati agli elementi morfologici e strutturali rilevati per ogni zone homogène (F).

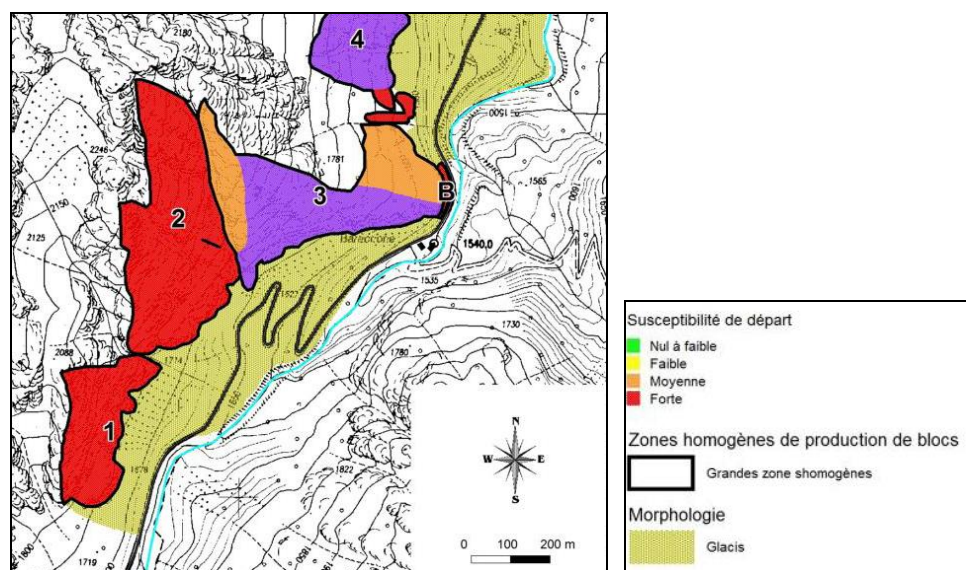


Figura 4.5 – Carta della *susceptibilité de départ* (F) del settore centrale de Vallone di S. Anna. Si osserva come all'interno di singole zones homogènes (F) i valori della pericolosità possono essere diversi

Rilievo metodo Matterock short/light

L'analisi strutturale del settore centrale del Vallone di S. Anna è stata effettuata a distanza attraverso osservazioni dal versante opposto al settore in studio. Sono stati individuati 6 sistemi di discontinuità principali distinti sulla base dei caratteri geometrici, geomeccanici e in base al ruolo nel meccanismo di instabilità dei blocchi e all'evidenza morfologica (tabella 4.3).

Per questo settore sono stati individuati 9 *aléas ponctuels* (CH) e 4 *aléas diffus* (CH) caratterizzati da meccanismi di distacco di tipo scivolamento superficiale e profondo con volumi che variano da 1 a 200.000 m³ per le instabilità puntuali e da 10 a 50 m³ per le instabilità diffuse (figura 4.6).

Famille	Orientation	Persistence [m]	Espacement [m]	Rôle morphologique	Rôle principal dans les aléas	Remarques
J1	110-150/30-55	10-20 (30-50)	0.5-1 (4)	front falaise	plan glissement	--
J'1	120-150/55-70	10-15 (20-50)	0.2-0.5 (2)	front falaise	plan glissement	--
J2	060-090/40-55	10-20 (60)	3-5 (20)	vires au sommet du versant	plan glissement	moins diffus que J1
J3	220-260/40-60	10-30 (60-80)	2-5 (15)	grandes vires dans la partie supérieure du versant	plan décollement et glissement	--
J'3	220-260/60-90	4-6 (15)	5	--	plan cisaillement et glissement	--
J'4	160-190/60-80	10-20	1-2	front falaise (secteur S de l'aléa BS10)	plan glissement et cisaillement	--
J'5	<i>300-330/50-80</i>	<i>4-6</i>	--	--	<i>plan décollement</i>	--

en italique les plans secondaires

Tabella 4.3 – Esempio delle caratteristiche dei sistemi strutturali rilevati nel tratto centrale del Vallone di S. Anna

Secteur	Baraccone Sud
Type	Diffus
Description:	Aléa diffus qui comprend tout le versant
Mécanisme:	Glissement profond sur 130/30, 080/40 et –plus rarement– sur 230/40; glissement superficiel selon 140/60
Dangerosité:	Elevée (< 10m ³); moyenne (10-20 m ³)
Volume:	1) < 10 m ³ 2) 10-20 m ³
Taille des blocs (max.):	0.5-2 m ³

Figura 4.6 – Esempio di rilievo degli aléa puntuali e diffusi (CH) individuati nel settore centrale del Vallone di S. Anna (BS3 instabilità diffusa, BS1 e BS4 instabilità puntuali)

Per ogni aléa (CH) individuato le osservazioni di terreno sono rivolte a definire una *probabilité d'occurrence (CH)* attraverso la stima della sua probabilità di mobilitazione (definita anche *dangerosité (CH)* dell'aléa (CH)) e della *probabilité d'atteinte (CH)* dei blocchi in caduta (tabella 4.4). Come si osserva dalla tabella 4.4 la probabilità di accadimento o *probabilité d'occurrence (CH)* valutata per questo settore, sebbene si basi su parametri che dipendono da criteri morfologici (pendenza versante, distanza dell'instabilità dalla strada ecc.) risulta sensibilmente controllata dalla *dangerosité (CH)*, cioè da una probabilità di rottura dei blocchi che vincola successivamente anche le classi di *danger (CH)* nonostante i valori di intensità e di energia cinetica diversi.

Nom aléa	Type (1:ponctuel ,2:diffus)	Bloc/volume de dimen- sionnement [m ³]	Dangero- sité	Probabilité d'atteinte	Probabilité d'occurrence	Intensité	Energie cinétique [kJ]	Classe de danger
BS1	1	1000	faible	élevée	faible	élevée	1'299'825	C
BS2	1	150	moyenne	élevée	moyenne	élevée	409'445	B
BS3	2	2	élevée	élevée	élevée	élevée	6'239	A
BS3	2	5	moyenne	élevée	moyenne	élevée	19'497	B
BS4	1	10	élevée	élevée	élevée	élevée	25'997	A
BS5	1	1000	faible	élevée	faible	élevée	623'916	C
BS6	1	200	moyenne	élevée	moyenne	élevée	187'175	B
BS7	1	150	élevée	élevée	élevée	élevée	77'990	A
BS8	1	30	moyenne	élevée	moyenne	élevée	48'353	B
BS9	1	200	moyenne	élevée	moyenne	élevée	265'164	B
BS10	2	2	élevée	élevée	élevée	élevée	520	A
BS10	2	10	moyenne	élevée	moyenne	élevée	5'199	B
BS11	1	1	moyenne	élevée	moyenne	moyenne	104	E

Tabella 4.4 – Parametri utilizzati per definire la classe di danger (CH) generata da ciascun aléa (CH)

La carta finale denominata *Carta des aléas, des événements et du danger de chutes de pierres/blocs et éboulements au niveau de la route* (figura 4.7) deriva in genere da queste osservazioni e quindi direttamente dai rilievi di terreno. Nel settore specifico scelto per il confronto, la definizione del *danger (CH)* lungo strada è stata affinata mediante i risultati delle analisi traiettografiche realizzate con l'applicativo Rockyfor3D.

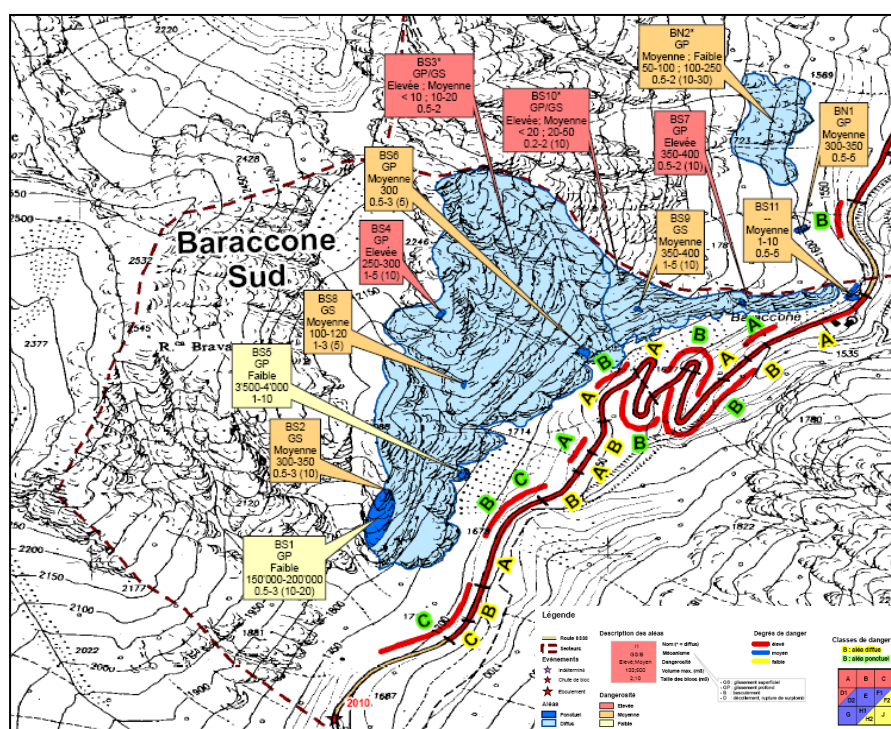


Figura 4.7 – Carta des aléas, des événements et du danger de chutes de pierres/blocs et éboulements derivata dall'applicazione del metodo Mattercock short/light

Sintesi

Il rilievo dei dati di terreno dell'ammasso roccioso è un lavoro comune ai tre metodi che inizia con una descrizione delle condizioni generali, quali l'identificazione e la classificazione delle litologie e degli aspetti strutturali principali che costituiscono l'ammasso roccioso. Le osservazioni successive di maggiore dettaglio degli elementi che influiscono sull'instabilità seguono procedure standardizzate proprie di ogni metodologia e come tali definiscono delle classi di *suscettibilità (I)*, *aléa chute de blocs (F)* e *danger (CH)* tra loro non direttamente confrontabili.

Ad esempio i metodi Provalp e BRGM prevedono la localizzazione e la descrizione dei blocchi instabili più voluminosi, ma sono elementi questi che non rientrano nelle successive fasi di



valutazione delle classi di *suscettibilità (I)* o *aléa chute de blocs (F)*; viceversa per il metodo Matterock short/light la descrizione e la localizzazione degli *aléa (CH)* è un parametro di grande importanza che controlla e influenza pesantemente la distribuzione areale della *probabilità d'occurrence (CH)* e quindi del *danger (CH)* di caduta blocchi sulla strada.

I caratteri geometrici della parete rocciosa quali l'altezza, l'orientazione, la pendenza ecc... rappresentano nel metodo Proviaalp dati di ingresso nei codici di calcolo utilizzati nelle fasi successive di analisi, nel metodo BRGM punteggi all'interno di sommatorie pesate, nel metodo Matterock short/light caratteristiche direttamente stimate dall'operatore sul terreno per la valutazione della *dangerosità (CH)*.

Infine la scelta del numero, della dimensione e della delimitazione delle *aree omogenee (I)* o *zones homogènes (F)* presenti in parete, si basa su valutazioni soggettive in quanto si valuta e si quantifica la predisposizione di una porzione di falesia al franamento che non è realmente misurabile, ma soltanto stimabile qualitativamente dall'operatore.

IV.2. Tempistica di applicazione delle metodologie

Nella tabella 4.5 è riportato un consuntivo totale del tempo impiegato dai tre enti per la realizzazione dello studio dei quattro siti campione (Tenda, Sempione italiano, Sempione svizzero e Lombarda).

Il Totale ore utilizzate è ripartito in 3 classi (1. Lavoro preparatorio in ufficio, 2. Rilievi di terreno, 3. Ufficio corrispondente ad elaborazione dei dati di terreno, esecuzione analisi traiettografiche e stesura della relazione tecnica) ed è messo in relazione con il numero di persone impiegate e i prodotti finali derivati dal lavoro svolto. Di ogni persona che ha preso parte allo studio viene data la percentuale di impiego distinta tra lavoro di ufficio e di terreno, riferita alla somma delle ore impiegate. Sono messe a confronto solo le ore relative al lavoro svolto nell'ambito del progetto Massa tralasciando quelle servite alla stesura di documenti che, pur essendo stati utilizzati per il confronto, non sono stati realizzati nell'ambito del progetto. Questi ultimi sono riportati in corsivo nell'elenco dei prodotti di ciascun sito.

Dall'analisi della tabella 4.5 si deduce che:

- l'applicazione della metodologia Matterock short/light richiede più ore rispetto a Proviaalp e BRGM. Solo al sito della Lombarda il totale ore impiegato è confrontabile tra le tre metodologie e sostanzialmente uguale se si limita al confronto tra BRGM e Matterock short/light (rispettivamente 160 e 166 ore). Questo è in parte giustificato dal fatto che Matterock prevede la realizzazione sistematica di rapporti tecnici di dettaglio contenenti le schede identificative degli *aléa (CH)* riconosciuti, la cui compilazione è molto più onerosa in termini di tempo, e da una cartografia finale -standard per tutti i siti studiati- del *danger (CH)* a livello della strada, relativa sia ai fenomeni di caduta blocchi che agli eventi franosi di volume più significativo. I risultati ottenuti con la metodologia svizzera permettono inoltre di scegliere in prima approssimazione le opere di protezione più idonee a mettere in sicurezza l'elemento esposto al pericolo di frana (in questo caso la strada). La differenza di ore tra l'applicazione delle tre metodologie tende a ridursi quando il numero e le caratteristiche dei prodotti finali si assomigliano.

- le ore dedicate ai rilievi di terreno sono simili in valore assoluto (ad esempio alla Lombarda sono 58 h per Matterock short/light, 50 per Proviaalp e 48 per BRGM) ma diventano in percentuale circa 1/3 rispetto al monte ore totale per le metodologie BRGM e Matterock short/light, che prevedono la realizzazione di un rapporto finale standardizzato. Il lavoro di ufficio propedeutico alle osservazioni di campagna oscilla tra il 5% e il 10% del totale ore impiegato.

Il numero di persone impegnato nei rilievi di terreno è sempre pari o maggiore di 2 tranne che per l'applicazione Matterock short/light alla Lombarda (1 persona). Per il sito del Sempione svizzero Arpa ha svolto il rilievo impiegando 2 gruppi costituiti da 2 tecnici ciascuno. Nelle metodologie Matterock short/light e BRGM i rilievi di terreno, l'elaborazione dei dati raccolti e la redazione del rapporto finale sono affidati ad un gruppo di lavoro ristretto composto da 2 o 3 persone. Nel Proviaalp le diverse fasi dello studio sono spesso compiute da soggetti diversi e può succedere che chi fa i rilievi di terreno non sia la stessa persona che poi elabora i dati.



		Matterock light	BRGM	Provialp
Tenda/Valle Roya (versante francese)	Lavoro preparatorio in ufficio	10%	--	5%
	Terreno	30%	--	70%
	Ufficio	60%	--	25%
	Totale ore	390	--	258
	Personale impiegato	Terreno: 2 (15%) Ufficio: 1 (40%) + 1 (30%)	--	Terreno: 2 (35%) Ufficio: 1 (20%) + 1 (10%)
	Prodotti	<ul style="list-style-type: none"> • Rapporto tecnico di dettaglio • Schede descrittive delle instabilità • Carta del <i>danger (CH)</i> di caduta blocchi e di frana a livello della strada • Risultati delle analisi traiettografiche eseguite su alcuni siti specifici 	<i>Carta dell'aléa chute de blocs (F) a livello della strada (non prodotta nell'ambito del progetto)</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Database delle aree omogenee (generalità, elementi strutturali, instabilità) • Rapporto sintetico (generalità area, geologia, rilievi) • Carta dei rilievi di terreno, carta delle instabilità ubicate e carta della pericolosità derivata • Carta elaborazione coni e carta della <i>suscettibilità (I)</i> derivata
Sempione/Valle Divedro (tratto italiano)	Lavoro preparatorio in ufficio	5%	5%	--
	Terreno	25%	20%	--
	Ufficio	70%	75%	--
	Totale ore	201	120	--
	Personale impiegato	Terreno: 2 (12,5%) Ufficio: 1 (75%)	Terreno: 2 (9%) + 1 (2%) Ufficio: 1 (65%) + 1 (10%) + 1 (5%)	--
	Prodotti	<ul style="list-style-type: none"> • Rapporto tecnico di dettaglio • Schede descrittive delle instabilità • Carta del <i>danger (CH)</i> di caduta blocchi e di frana a livello della strada • Risultati delle analisi traiettografiche eseguite su alcuni siti specifici 	<ul style="list-style-type: none"> • Schede tecniche per sito • Rapporto tecnico • Carta delle <i>zones homogènes (F)</i> • Anilisi traiettografiche e di propagazione • Cartografie della propagazione • Cartografie dell'<i>aléa chute de blocs (F)</i> 	<i>Carta di suscettibilità (I) desunta dall'applicativo Rotomap (carta già esistente non prodotta nell'ambito del progetto)</i>



Sempione/Valle Divedro (tratto svizzero)	Lavoro preparatorio in ufficio	--	5%	5%
	Terreno	--	20%	60%
	Ufficio	--	75%	35%
	Totale ore	--	120	140
	Personale impiegato	--	Terreno: 2 (9%) + 1 (2%) Ufficio: 1 (65%) + 1 (10%) + 1 (5%)	Terreno: 4 (15%) Ufficio: 2 (10%) + 1 (20%)
Prodotti	<i>Carta del danger (CH) di caduta blocchi e di frana a livello della strada (non prodotta nell'ambito del progetto)</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Schede tecniche per sito • Rapporto tecnico • Carta delle zones homogènes (F) • Anilisi traiettografiche e di propagazione • Cartografie della propagazione • Cartografie dell'aléa chute de blocs (F) 	<ul style="list-style-type: none"> • Database delle aree omogenee (I) (generalità, elementi strutturali, instabilità) • Rapporto sintetico (generalità area, geologia, rilievi) • Carta dei rilievi di terreno e carta della pericolosità derivata • Carta elaborazione coni e carta della suscettibilità (I) derivata • Carta di suscettibilità (I) desunta dall'applicativo Rotomap 	
Lombarda/Vallone di S. Anna (versante italiano)	Lavoro preparatorio in ufficio	5%	5%	10%
	Terreno	35%	30%	50%
	Ufficio	60%	65%	40%
	Totale ore	166	160	100
	Personale impiegato	Terreno: 1 (35%) Ufficio: 1 (40%) + 1 (25%)	Terreno: 1 (20%) + 2 (5%) Ufficio: 1 (55%) + 1 (10%) + 1 (5%)	Terreno: 2 (25%) Ufficio: 3 (10%) + 1 (20%)
Prodotti	<ul style="list-style-type: none"> • Rapporto tecnico di dettaglio • Schede descrittive delle instabilità • Carta del danger (CH) di caduta blocchi e di frana a livello della strada • Risultati delle analisi traiettografiche eseguite su alcuni siti specifici 	<ul style="list-style-type: none"> • Schede tecniche per sito • Rapporto tecnico • Carta delle zones homogènes (F) • Anilisi traiettografiche e di propagazione • Cartografie della propagazione • Cartografie dell'aléa chute de blocs (F) 	<ul style="list-style-type: none"> • Database delle aree omogenee (I) (generalità, elementi strutturali, instabilità) • Rapporto sintetico (generalità area, geologia, rilievi) • Carta dei rilievi di terreno e carta della pericolosità derivata • Carta dello stato di fratturazione e carta della suscettibilità (I) derivata • Carta elaborazione coni e carta della suscettibilità (I) derivata • Carta di suscettibilità (I) desunta dall'applicativo Rotomap 	

Tabella 4.5 – Prospetto riassuntivo delle ore di lavoro svolte dagli esperti di dominio dei tre enti rapportate al personale impiegato e ai prodotti finali ottenuti



IV.3. Trattamento dei dati

I metodi francese ed italiano necessitano di trattare a posteriori i dati rilevati sul terreno per poter ottenere un risultato finale che indichi la pericolosità o la suscettibilità dell'elemento esposto nei riguardi dei crolli.

Il metodo Proviaalp permette di avere i dati acquisiti sul terreno già in forma organizzata grazie all'uso di un *database* realizzato ad hoc installato su un *tablet pc*; rimane tuttavia la necessità di un lavoro informatico attualmente realizzabile solo in ufficio, che comporta:

- una prima fase in cui, attraverso l'utilizzo di codici di calcolo sviluppati dal Politecnico di Torino, a partire dai dati strutturali rilevati, si calcola la *probabilità di rottura (I)* di ogni *cinematismo (I)* e quindi un *indice di distacco (I)* per ogni *area omogenea (I)*;
- una seconda fase che, attraverso l'applicazione del programma traiettografico Rotomap, permette di ottenere la *suscettibilità (I)* dell'elemento esposto.

Il prodotto finale è rappresentato da una "Carta della suscettibilità dell'asse viario".

Il metodo BRGM prevede un lavoro di ufficio che, a partire dai dati acquisiti sul terreno, comporta il disegno preciso delle *zones homogènes (F)* mediante un programma GIS, la realizzazione degli stereogrammi attraverso i quali vengono individuate le instabilità possibili ed il calcolo della *susceptibilité de départ (F)* per ciascuna *zone homogène (F)* classificata secondo 5 classi i cui estremi corrispondono ai valori "debole o nulla" e "molto forte".

Per visualizzare il controllo esercitato dalla topografia nei riguardi dell'evoluzione dei crolli è utilizzato su tutto il territorio studiato il programma di propagazione BORA; per le situazioni ritenute più significative viene inoltre eseguita un'analisi traiettografica di dettaglio attraverso i programmi Pierre 98 2D/3D.

Bora è un applicativo sviluppato dal BRGM che viene utilizzato in presenza di valli molto ampie, caratterizzate da falesie sub verticali e pendii sottostanti ben sviluppati e a pendenza debole, per valutare la propagazione laterale di uno o più blocchi. L'applicativo Pierre 98 si utilizza in modo vantaggioso per pareti con o senza pendio al piede, con lo scopo di valutare più precisamente la propagazione frontale dei blocchi. La differenza basilare tra i due programmi è che Pierre 98 si basa su parametri fisici mentre BORA utilizza la sola morfologia del terreno derivata dal DTM.

Infine l'insieme dei risultati ottenuti necessita dell'intervento dell'esperto di dominio per essere sintetizzato nella "Carta dell' *aléa chute de blocs (F)* a livello dell'asse viario".

La metodologia Matterock short/light permette già sul terreno di ottenere una prima stima del *danger (CH)* e demanda al lavoro di ufficio la fase di interpretazione ragionata dei dati di terreno che confluisce nella preparazione della relazione tecnica finale e nell'allestimento delle cartografie. Il prodotto riassuntivo dello studio effettuato è rappresentato da un'unica carta dove sono rappresentati gli *aléa (CH)*, i fenomeni franosi accaduti in passato e il *danger (CH)* da caduta massi e frana in roccia a livello della strada.

IV.4. Confronto dei prodotti finali

a) Considerazioni generali

Il differente approccio seguito dai metodi di studio della problematica dei crolli di massi, che come specificato nei paragrafi precedenti si evidenzia nelle fasi sia di raccolta dei dati sia del loro utilizzo, si traduce necessariamente in un risultato finale, rappresentato per il metodo Arpa in una *carta della suscettibilità (I)*, per il metodo BRGM in una carta dell' *aléa chute de blocs (F)* e per il metodo Matterock short/light in una carta del *danger (CH)* o pericolo in italiano, che risultano difficilmente confrontabili.

In primo luogo la tipologia del dato posto a confronto è alla base differente dal momento che la carta finale derivata dal metodo Matterock short/light è relativa ad una suscettibilità che implica una probabilità stimata di accadimento su un periodo di tempo massimo di 300 anni,

la carta del metodo BRGM descrive una suscettibilità nel breve termine (indicativamente 10 anni) e senza alcun riferimento all'energia cinetica dei blocchi in caduta, mentre la carta del metodo Proviaalp rappresenta una suscettibilità di tipo spaziale che non implica considerazioni in merito alla ricorrenza o tempo di ritorno del fenomeno. Il concetto di pericolo svizzero, inoltre, integra la nozione di intensità, cioè dell'energia espressa in kJ.

Tralasciando la considerazione appena espressa, senza dimenticare però che appare piuttosto difficoltoso paragonare dati di natura diversa, dal confronto delle cartografie finali ottenute dall'applicazione dei 3 metodi emergono ulteriori disuniformità alcune delle quali riconducibili alla delimitazione delle *aree omogenee (I)/zones homogènes(F)/aléa diffus (CH)* in parete. Ad aree di dimensione diversa, infatti, corrispondono tratti di strada esposti a caduta massi di lunghezza e posizione differente.

Osservando i prodotti a confronto risulta evidente il diverso stile di rappresentazione cartografica determinato da una differente organizzazione di ciascuna legenda; in effetti si può constatare che il metodo Proviaalp indica la *suscettibilità (I)* secondo una scala di colori a classi multiple che in occasione del progetto MASSA è stata suddivisa in modo puramente aritmetico in 3 classi relative (bassa, media, alta) individuate da una gradazione semaforica (figura 4.8a), il metodo BRGM prevede la classificazione dell'*aléa chute de blocs (F)* in 5 classi (da nulla a debole, debole, media, forte, molto forte) indicate da un colore differente (figura 4.8b), il metodo Matterrock short/light suddivide il pericolo in 12 classi, funzione della *probabilità d'occurrence (CH)* e dell'*intensité (CH)*, ciascuna evidenziata da una lettera, a sua volta raggruppate in 3 categorie di *danger (CH)* (debole, medio, elevato) rappresentate da un colore (figura 4.8 c).

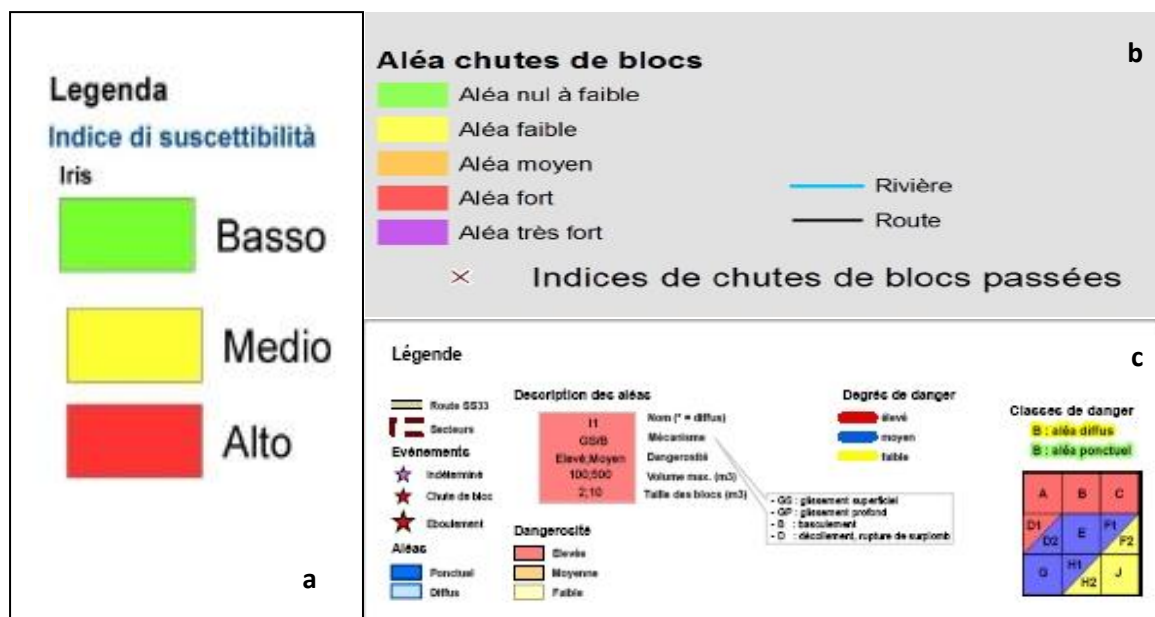


Figura 4.8 – Legenda delle carte di suscettibilità (I), aléa chute de blocs (F) e danger (CH) (a: metodo Proviaalp; b: metodo BRGM c: metodo Matterrock short/light)

Si tenga infine presente che mentre in Matterrock le classi di *danger (CH)* sono collegate a limiti costanti di energia (30 e 300 kJ) e di *probabilité d'occurrence (CH)* (30, 100 e 300 anni), le classi di *aléa chute de blocs (F)* francese e di *suscettibilità (I)* italiana non sono standard ma sono riferite al sito in esame per cui ad esempio un valore medio di *aléa chute de blocs (F)* in un sito di studio può non corrispondere esattamente ad un valore medio di *aléa chute de blocs (F)* calcolato in un altro sito.

Ponendo a confronto diretto le cartografie realizzate nel corso del progetto MASSA appare evidente che i prodotti ottenuti attraverso il metodo Matterrock short/light mostrano un livello di *danger (CH)* quasi sempre elevato mentre le carte ottenute con i metodi Proviaalp e BRGM tendono ad essere caratterizzate da una proporzione più variegata delle classi di *suscettibilità (I)* e di *aléa chute de blocs (F)*.

Questa differenza è legata al fatto che il metodo svizzero prende in considerazione la *probabilité d'occurrence (CH)* del fenomeno caduta massi e l'energia. Se si considera infine che la legislazione di questo paese definisce di "intensità elevata" qualsiasi fenomeno con

energia superiore ai 300 kJ ecco che si spiega facilmente la classificazione in “*danger (CH)* elevato” di gran parte dei tratti di strada oggetto di studio.

Se si considera ad esempio il risultato finale ottenuto per la zona di monte del Vallone di S. Anna a proposito dei *cinematismi (I) / aléas diffus (CH)* si osserva che la carta svizzera riporta un *danger (CH)* elevato compreso tra le classi A (intensità e probabilità di accadimento elevate) e B (intensità elevata e probabilità di accadimento media) mentre la carta francese e quella italiana individuano tratti soggetti a suscettibilità elevata più ristretti, la prima nei pressi della località Baraccone, la seconda in corrispondenza dei tornanti (figura 4.9 a, b, c).

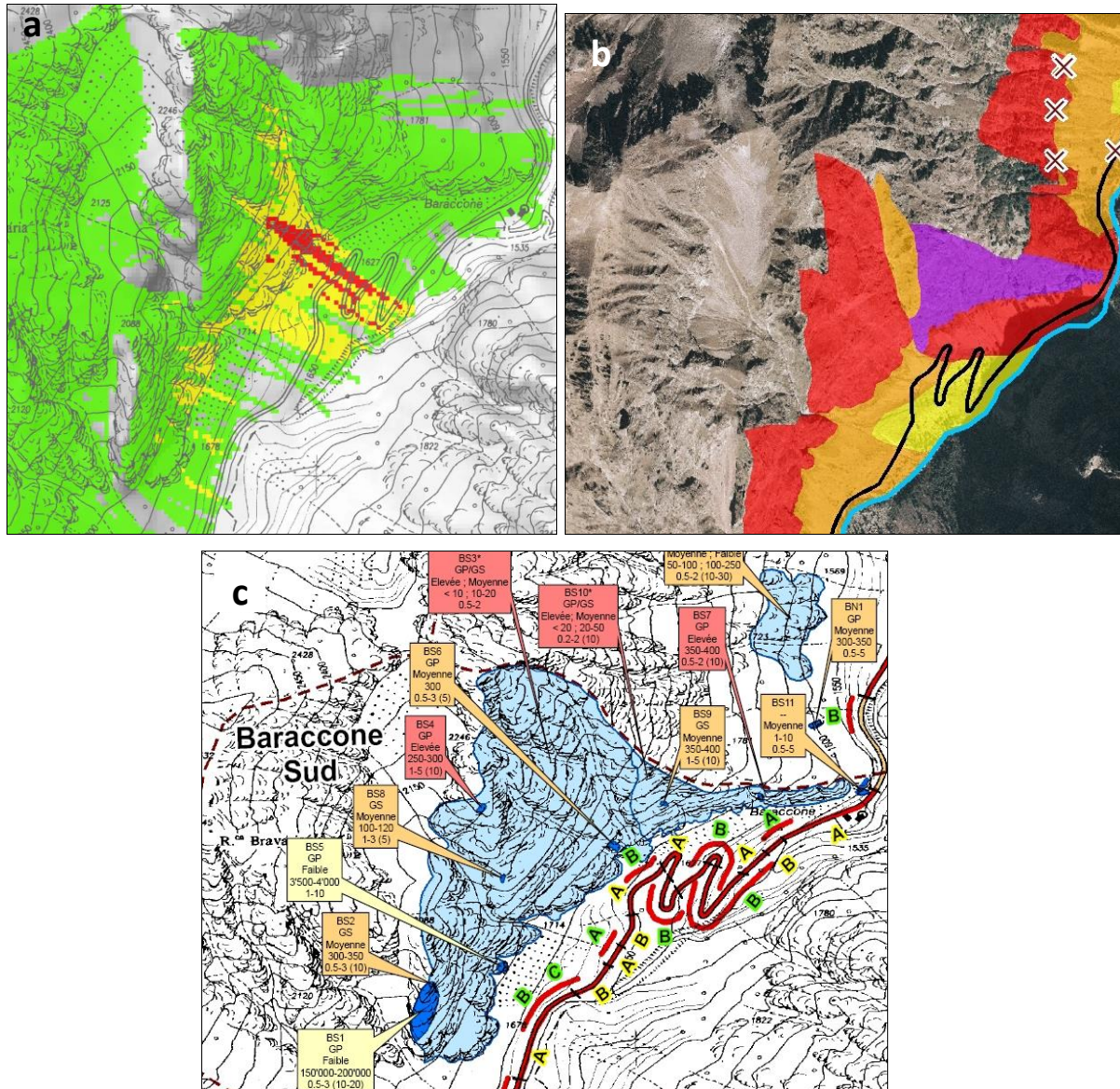


Figura 4.9 – Carte di suscettibilità (I), aléa chute de blocs (F) e danger (CH) (a: metodo Proviarp; b: metodo BRGM; c: metodo Matterrock short)

b) Risultati del confronto

Malgrado i prodotti finali delle tre metodologie siano concettualmente diversi attraverso alcune semplificazioni è stato possibile mettere a confronto tra loro i risultati ottenuti. Per farlo è stato necessario procedere ad alcune semplificazioni:

- si sono messe a confronto la *suscettibilità (I)* (desunta dai rilievi di terreno o, se disponibile, dall'applicativo Rotomap), l'*aléa final de chute de blocs (F)* e la *probabilité d'occurrence (CH)* a livello della strada relativamente ai soli fenomeni di caduta massi, tralasciando la probabilità di accadimento legata alla mobilitazione di *aléa ponctuels (CH)* di volumi maggiori;



- sono state ridotte da cinque a tre le classi dell'*aléa de chute de blocs (F)* secondo il seguente criterio:

- da nulla a debole e debole = debole
- media = media
- da forte a molto forte = elevata.

La strada è stata suddivisa in tronconi di lunghezza e numero variabile ai quali è stato associato il valore di suscettibilità/probabilità di accadimento ottenuto dalle tre metodologie. Con la semplificazione sopradescritta si è assunto che la suscettibilità/probabilità di accadimento può essere bassa, media o elevata. Per tre dei quattro siti studiati (Tenda, Sempione svizzero e Sempione italiano) si è anche effettuato un confronto a 2. In questo caso si è distinto tra risultati in accordo (i valori di suscettibilità/probabilità di accadimento coincidono), risultati in disaccordo (quando i risultati differiscono di un grado, ad esempio basso-medio, medio-elevato) e i risultati in forte disaccordo (quando la valutazione è sensibilmente diversa: coppie basso-elevato) (tabella 4.6).

Lombarda (versante italiano)

Il sito della Lombarda è l'unico che è stato studiato *ex novo* nel quadro del progetto per cui non sono stati effettuati confronti a 2. Il confronto a 3 mette in luce una concordanza di risultati a 3 di appena l'8%. Confortante è il dato relativo a risultati in moderato disaccordo che raggiungono il 64% del totale. La differenza di valutazione può essere influenzata anche dal numero e dall'esperienza dei rilevatori impiegati sul terreno (1 persona per Matterock short/light, 2 per Proviarp, 3 per BRGM).

Tenda (versante francese)

Il confronto a 3 dei risultati sul sito della valle Roya è condizionato dal fatto che il metodo BRGM non valuta l'*aléa de chute de blocs (F)* su gran parte del tratto di strada oggetto di studio. La percentuale di risultati in accordo comunque si attesta al 28%. Se si restringe il confronto alle metodologie Matterock short/light e Proviarp la percentuale di risultati in accordo completo sale al 50%.

Nella statistica dei risultati non è stato incluso il tratto tra St. Dalmas e Tenda a causa della grande differenza sia nell'ubicazione dei tratti di strada esposti a caduta massi sia nella valutazione della probabilità di accadimento. In condizioni di osservazione molto difficili come in questo tratto (assenza di punti di osservazione panoramici, vegetazione particolarmente densa), i metodi speditivi applicati non danno risultati affidabili.

Sempione (tratto italiano)

Il sito del Sempione italiano è quello dove i risultati concordano di più sia in termini di stima della suscettibilità/probabilità di accadimento sia nella segmentazione dei tronconi. Se si restringe il confronto a Matterock short/light e BRGM, le uniche metodologie applicate *ex novo* nell'ambito di questo progetto, la concordanza dei risultati è sorprendente. Su un solo tratto si ha una valutazione totalmente differente, probabilmente connessa alla presenza di una galleria. La convergenza tra i risultati è molto elevata ed è maggiore di quanto non risulti dai dati in tabella. La statistica non tiene infatti conto della lunghezza dei tronconi: su un totale di 4 tronconi lunghi, 3 mostrano risultati concordanti.

Difficile spiegare la concordanza di risultati in questo sito soprattutto se confrontata con il sito del Sempione svizzero; probabilmente è da ricercare nelle condizioni di rilievo morfologico-strutturale più semplici, di osservazione relativamente più agevoli e nella minore lunghezza del tratto in studio.

Sempione (tratto svizzero)

La mancanza di punti di osservazione sul versante opposto e la morfologia estremamente acclive hanno reso difficile l'esecuzione dei rilievi di terreno. Solo in 3 segmenti di strada posti in prossimità di Gondo la valutazione è concordante. La discrepanza dei risultati è accentuata dal fatto che mentre i risultati Proviarp e BRGM derivano da uno studio speditivo eseguito ad hoc per il progetto MASSA, quelli svizzeri sono la somma di studi di dettaglio eseguiti nel tempo da vari professionisti. Il confronto a 2 tra risultati dello stesso livello di approfondimento (BRGM e Proviarp) mostra una concordanza bassa dei risultati (25%),



soprattutto se confrontata con il sito del Sempione italiano (44%) e di Tenda (50%).

		Confronto a 3	Confronto a 2	
			(Proviaip-Matterock)	
Tenda/Valle Roya (versante francese)	3 risultati in accordo	28%	50%	Risultati in accordo
	2 su 3 in accordo	47%	31%	Risultati in disaccordo
	Disaccordo completo	25%	19%	Risultati in forte disaccordo
			(BRGM-Matterock)	
Sempione/Valle Divedro (tratto italiano)	3 risultati in accordo	28%	44%	Risultati in accordo
	2 su 3 in accordo	52%	53%	Risultati in disaccordo
	Disaccordo completo	20%	3%	Risultati in forte disaccordo
			(Proviaip-BRGM)	
Sempione/Valle Divedro (tratto svizzero)	3 risultati in accordo	8%	25%	Risultati in accordo
	2 su 3 in accordo	61%	64%	Risultati in disaccordo
	Disaccordo completo	31%	11%	Risultati in forte disaccordo
			--	
Lombarda/Vallon e di S. Anna (versante italiano)	3 risultati in accordo	8%	--	Risultati in accordo
	2 su 3 in accordo	64%	--	Risultati in disaccordo
	Disaccordo completo	28%	--	Risultati in forte disaccordo

Tabella 4.6 – Confronto tra i risultati ottenuti dalle tre metodologie nei 3 siti di studio. Dettagli esplicativi nel testo

Il confronto dei risultati così esposto dimostra che non esiste una metodologia migliore in assoluto e applicabile in tutti i contesti. Si tratta di metodologie speditive e quindi di per se l'affidabilità non può essere elevata.

E' opportuno sottolineare tuttavia che le tre metodologie, benché speditive, sono quasi sempre in grado di riconoscere i tratti di strada sottoposti ad un livello di suscettibilità di crollo elevata e molto elevata e quelli invece poco o per niente esposti a questi fenomeni. Più problematico appare, invece, definire le situazioni intermedie.

Un esempio di utilizzo pratico di queste metodologie speditive nella pianificazione del territorio ci è offerto dalla collocazione di una centralina idroelettrica nel Vallone di Sant'Anna, la quale è stata posizionata proprio nell'unico tratto a suscettibilità elevata di caduta massi confermato dalle cartografie di tutte le tre metodologie (figura 4.10).

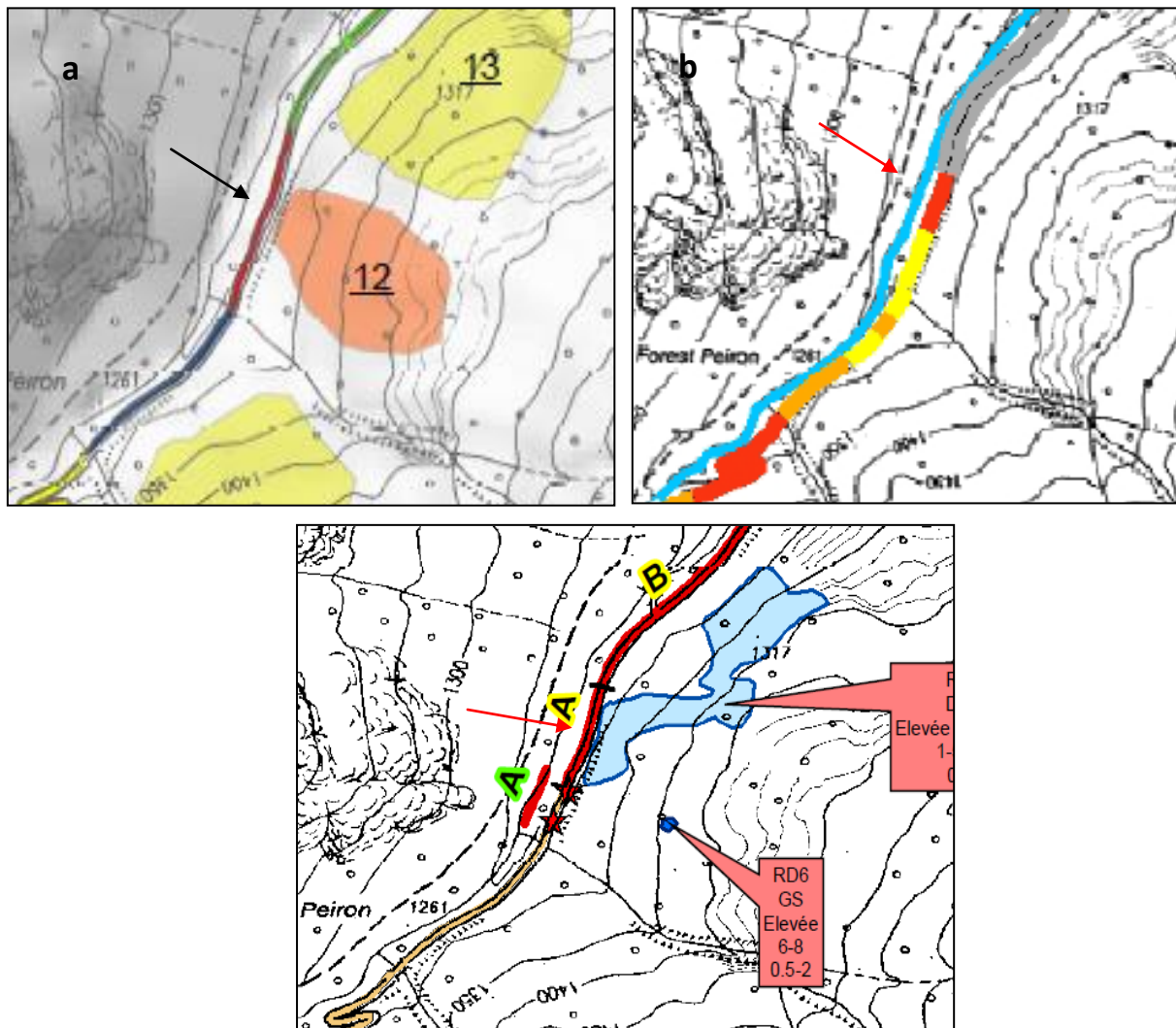


Figura 4.10 – Sito della Lombarda: carta della suscettibilità (I) (a), carta dell'aléa chute de blocs (F) (b) e del danger (CH) (c). La freccia indica la posizione della centralina idroelettrica

V. CONFRONTO TRA I METODI – CONFRONTATION DES METHODES

Le attività di rilievo di terreno, accompagnate da discussioni approfondite sui risultati ottenuti, hanno permesso di comprendere in che modo si sviluppano i 3 metodi di studio del fenomeno di caduta blocchi e le caratteristiche dei risultati che si ottengono. Se a priori era sembrato facile confrontare metodi di studio che si occupano del medesimo problema e che hanno l'obiettivo comune di zonare il territorio in classi di suscettibilità (I), aléa chute de blocs (F) e/o danger (CH), al contrario l'esperienza maturata nel progetto MASSA ha fatto emergere notevoli difficoltà in questo senso.

Una possibile motivazione può essere ricercata nella finalità per la quale le metodologie sono state concepite: per studi a piccola scala indirizzati principalmente alla pianificazione come capita per i metodi Proviarp e BRGM, per studi di dettaglio facilmente adattabili a situazioni di pronto intervento come nel caso del metodo Matterock short/light.

Tuttavia, anche nel caso della metodologia francese e di quella italiana improntate allo stesso obiettivo, si rilevano differenze a causa di una diversa strutturazione generale e soprattutto del differente peso che viene ascrivito alle variabili in gioco.

È infatti proprio nella valutazione speditiva dei parametri che regolano un processo naturale piuttosto complesso come quello dei crolli e nel peso che viene loro attribuito che si può ricercare il motivo della differenza che caratterizza i risultati ottenuti.

I metodi utilizzati dai tre enti, sia che prevedano approcci diretti sia semidiretti (simulazioni



automatiche), si basano sulla conoscenza delle cause e dei fattori di instabilità la cui bontà dipende dal livello di comprensione dei processi geomorfologici in atto o che hanno agito nel passato sul terreno. I fattori ritenuti responsabili dell'instabilità, generalmente litologia, fratturazione, pendenza dei versanti, giacitura, uso del suolo, ai quali si aggiungono i fattori che influiscono sulla valutazione della suscettibilità e/o del pericolo quali la stima dei volumi dei blocchi instabili, la loro probabilità di accadimento, le trattorie dei blocchi in caduta ecc., vengono classificati e pesati sulla base dell'importanza che si presume possano assumere in ciascun movimento gravitativo. Dalla combinazione di questi fattori, in maniera automatica, semi-automatica o diretta da terreno, vengono derivate le carte di *suscettibilità (I)*, *aléa chute de blocs (F)* e *danger (CH)* che saranno quindi caratterizzate da una più o meno elevata soggettività.

Preso atto di questa situazione è emersa la necessità di allestire un documento speditivo che permetta di evidenziare le caratteristiche di ciascun metodo e quindi il campo di utilizzo più adeguato di ciascuno di essi.

Il mezzo che si è ritenuto essere più funzionale a tale necessità è costituito da una tabella che pone a confronto i metodi di studio sulla valutazione della suscettività da crollo utilizzando una serie di criteri di comparazione definiti a priori accorpati in sezioni.

Di seguito si riporta integralmente il documento che è stato realizzato, in italiano ed in francese.



Tabella di confronto tra le metodologie di valutazione della pericolosità da caduta blocchi BRGM (fr) - MATTEROCK (ch) – PROVIALP (it)

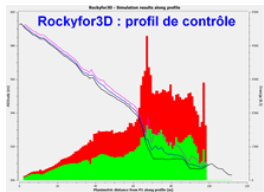
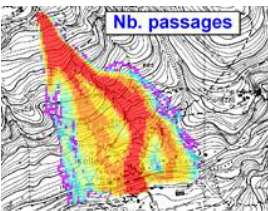
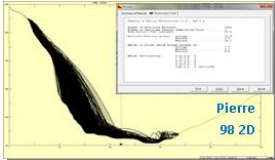
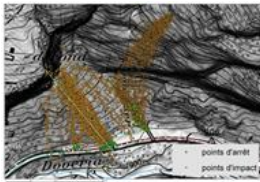
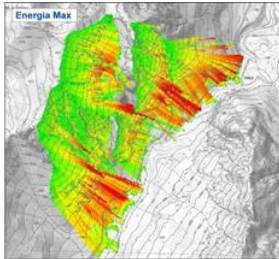
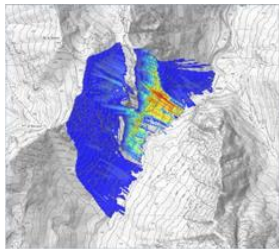
Criteri di confronto	Matterock	BRGM	Provi alp
Campo di applicazione			
Caduta di pietre o blocchi			
• Evento caduta pietre	No (possibile)	Si	Si
• Evento caduta blocchi ≤ 30-50 m ³	Si	Si	Si
• Evento caduta blocchi ² ≥ 30-50 m ³	Si	No	No
Tipologia dello studio			
• A grande scala: su lunghi assi stradali	Si (++) lungo)	Si	Si (+ lungo se eterogeneo)
• A scala locale: dopo un evento	Si	No	No
Tipologia della valle			
• Valle senza versante opposto accessibile	Poco adatta ³	Adatta	Adatta
• Valle <u>con</u> versante opposto accessibile	Adatta		
• Soggettività della metodologia (esperienza del geologo)	Elevata	Media	Bassa
• Tempo di ritorno evento considerato	A lungo termine (≤ 300 anni)	A corto termine (≤ 10 anni)	Poco considerato
Valutazione della probabilità di rottura			
• Analisi dello stato di fratturazione della parete	Non considerato sistematicamente	Considerato	Considerato indirettam. (ortofoto)
• Meccanismo di rottura (= confronto assetto strutturale della parete con orientazione e inclinazione delle topografia)	Considerato		
• Altezza della parete	Non considerata	Considerata	Non considerata
• Persistenza & spaziatura	Considerata		
• Forma dei blocchi alla partenza	Non considerata	Considerata	Non considerata
• Taglia dei blocchi alla partenza	Non considerata	Considerata	Considé ré
• Grado di alterazione della roccia	Non considerato sistematicamente		
• Presenza d'acqua	Considerata per gli alea puntuali	Considerata	Non considerata
Valutazione generale della propagazione			
• Analisi dei blocchi alla base della parete	Considerata qualitativamente		

²Comprese le frane in roccia

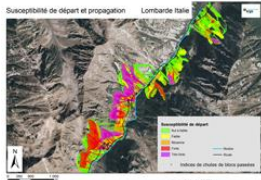
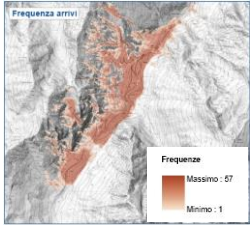
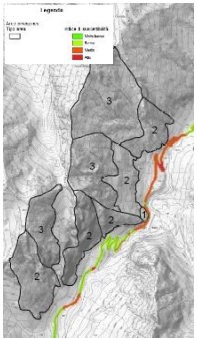
³L'applicazione della metodologia MATTEROCK necessita di punti di osservazione a distanza (posti ad esempio sul versante opposto) oppure dell'elicottero.



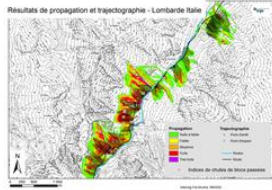
Criteria di confronto	Matterock	BRGM	Proviap
• Taglia del blocco alla partenza	Considerata	Considerata (Pierre 98)	Considerata (Rotomap)
• Ruolo della foresta	Considerato qualitativamente (Rockyfor3D : quantitativamente)	Può essere considerato (Pierre 98 + Rockyfornet)	Considerato (Rotomap)
• Elasticità del suolo lungo la traiettoria di caduta	Considerata (Rockyfor3D)	Considerata (Pierre 98)	Considerata (Rotomap)
• Valutazione senza calcolo numerico	Si con Matterock light	Oui (BORA + linea di energia quando la morfologia del versante lo consente)	No
Traiettografia e propagazione			
Traiettografia (= software)			
• Tipo di programma: determinista /probabilista - 2D/3D	Rockyfor3D: probabilista	Pierre 98 2D - 3D: determinista e probabilista	Rotomap 3D: deterministico
• Disponibilità del programma	In commercio (150 € / anno)	Non in commercio	In commercio (~ 3 k€)
• Obiettivi / principi di funzionamento dei programmi	- Simulazione di traiettorie monoblocco in 3D con l'impiego di un DTM - Generazione di raster caricabili su GIS - Simulazione con barriere e sezioni di controllo	- Determinare in modo più preciso l'estensione verso valle del fenomeno caduta blocchi (Pierre98 2D) - Permette di ottenere i punti di impatto e di arresto dei blocchi sul DTM (Pierre98 3D)	- Calcolare le aree di transito e di arresto dei blocchi soggetti a crollo
• Geometria del volume instabile in parete (punto, linea, superficie...)	Superficie	2D : punto 3D : superficie	Superficie
• Limitazione del numero di blocchi alla partenza	Non limitata	2D : topo + strati di suolo. 3D : non limitata	Non limitata
• Forme dei blocchi	Si	Si	No
• Rotazione dei blocchi	Si	Si	No
• Punto material	No	No	Si
• Presa in conto della foresta nella modellazione	Considerata quantitativamente (Rockyfor3D)	No	No
• Risultati forniti	Rockyfor3D: energie medie + 95%, velocità max., altezze di volo medie + 95%, n° transiti, n° celle sorgenti, prob. arrivo, n° punti di arresto, volume max. blocchi arrestati, angolo linea energia, tempo traiettoria, (con foresta: n° + altezze di impatto sugli alberi)	Pierre 98 2D / 3D : distanze di propagazione min. media max; analisi singole traiettorie con velocità in ogni punto; informazioni su un punto scelto per varie problematiche di pianificazione. Dati su velocità e rimbalzi	Rotomap: energia media, energia massima, altezze massime di volo, frequenze arrivi, indice di suscettibilità IRIS
• Dimensionamento delle opere di protezione	Si	No	No

Criteria di confronto	Matterock	BRGM	Proviaip
• Forma dei risultati	<ul style="list-style-type: none"> - Layer SIG (14 griglie raster) - File con le caratteristiche dettagliate dei blocchi in caduta in corrispondenza di opere/sezioni di controllo (velocità, energia, altezza di volo, angolo di impatto) 	<ul style="list-style-type: none"> - Per i 2D: risultati sotto forma di profili e diagrammi + elaborazioni statistiche - Per i 3D: layer SIG dei punti di arresto e impatto. Precisione inferiore rispetto al 2D 	<ul style="list-style-type: none"> - 4 Raster - Cartografie realizzate in funzione di energia cinetica media e massima, altezze massime di volo, distribuzione dei punti di arresto, indice di suscettibilità
• Limiti di utilizzo	<ul style="list-style-type: none"> - Rockyfor3D comporta la creazione di numerosi layer raster (da 10 fino a 17) - Non è un metodo speditivo: rilievi di terreno dettagliati, elaborazione e analisi richiedono molto tempo 	<ul style="list-style-type: none"> - Molti, a volte troppi parametri - Punti di partenza puntuali, scelta di punti di partenza solo rappresentativi dato che non è possibile far partire i blocchi da una zona di rottura - Programma non in commercio 	<ul style="list-style-type: none"> - Richiede un DTM dettagliato - La costruzione del dato di input non è speditiva - Il programma è a pagamento
• Illustrazioni	 	<p>Rappresentazione dei risultati di Pierre98 2D</p>  <p>Rappresentazione dei risultati di Pierre98 3D</p> 	<p>Rotomap : Energia massima</p>  <p>Rotomap : Indice di suscettibilità IRIS</p> 
Propagazione s./			
• Valutazione della propagazione (empirica) e/o della linea di energia	<p>Si (criteri geomorfologici – Matterock light)</p>	<p>Si (ma senza calcolo dell'energia, definizione dei probabilità di arrivo attraverso l'aléa di propagazione ricavato dal programma BORA)</p>	<p>Si (metodo dei coni modificato – linea di energia)</p>
• Obiettivi / principi dei programmi	<p>Nessun programma utilizzato</p>	<p>Riproduzione degli eventi conosciuti in condizioni identiche; estrapolazione ad altri siti di questi eventi mantenendo gli stessi parametri</p>	<p>Stimare la massima distanza di arresto dei blocchi</p>



Criteria di confronto	Matterock	BRGM	Proviaalp									
• Bisogno di un volume instabile di partenza che necessita di una valutazione di terreno preliminare	Si (morfologia, vegetazione, taglia e forma dei blocchi)	No se si dispone di un evento esistente o di una retroanalisi su eventi conosciuti	No									
• Geometria del volume instabile di partenza (punto, linea, superficie...)	Punto (alea puntuale) o superficie (alea diffuso)	Superficie o linea (con buffer)	Superficie									
• Presa in conto della foresta	Considerata qualitativamente (Matterock light)	No	No									
• Tipo di risultati	Probabilità di arrivo (3 classi)	Probabilità di arrivo	Arrivo (Si/No) rispetto ad un angolo dato									
• Formato dei risultati grezzi	Tabella	Raster	Raster + Shape									
• Rappresentazione cartografica dei risultati	No	Si (classificazione basata sul giudizio di esperti e osservazioni di terreno)	Si (classificazione su basi matematiche)									
• Limiti di utilizzo	Rilievi di terreno necessari	Programma empirico senza parametri fisici. Non utilizzabile su pareti verticali senza pendio alla base	- Dipende dal dettaglio del DTM - Applicabile quando la morfologia è favorevole									
• Illustrazioni	<p>Matrice di attribuzione delle classi di probabilità di arrivo</p> <table border="1"> <tr> <td></td> <td>Elevée</td> <td>20 -100%</td> </tr> <tr> <td>Probabilité d'atteinte</td> <td>Moyenne</td> <td>2 - 20%</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Faible</td> <td>0 - 2 %</td> </tr> </table>		Elevée	20 -100%	Probabilité d'atteinte	Moyenne	2 - 20%		Faible	0 - 2 %	<p>Rappresentazione cartografica della propagazione e della probabilità di rottura</p> 	<p>Metodi dei coni – frequenze arrivi</p>  <p>Carta della suscettibilità derivata dal metodo dei coni</p> 
	Elevée	20 -100%										
Probabilité d'atteinte	Moyenne	2 - 20%										
	Faible	0 - 2 %										



Criteria di confronto	Matterock	BRGM	Proviap
Sintesi generale (probabilità di rottura / analisi traiettografiche e propagazione)			
• Utilizzazione dei risultati intermedi di traiettografia e di propagazione	Sintesi delle osservazioni di terreno, degli eventi storici e delle simulazioni (Rockyfor3D)	Combinazione propagazione (BORA) e traiettografia (Pierre 98) + osservazioni di terreno + foto / ortofoto / eventi storici	1 (speditivo): combinazione densità di fratturazione + propagazione (Proto) 2 (dettagliato): combinazione osservazioni di terreno + codici di calcolo instabilità + traiettografia (Rotomap)
• Apporti della propagazione	Matterock light: stima delle probabilità di arrivo dei blocchi all'elemento esposto (asse stradale)	BORA: visualizzare le direzioni preferenziali prese dai blocchi e quindi le zone a probabilità di arrivo più o meno elevata. Corrisponde a una estensione 3D di Pierre98	PROTO: stimare la massima distanza di arresto dei blocchi in modo speditivo
• Apporti della traiettografia	Rockyfor3D: stima dei limiti di arrivo verso valle e lateralmente, calcolo dell'energia dei blocchi (dimensionamento delle opere di protezione), messa in evidenza dei corridoi preferenziali di caduta (concentrazione dei blocchi)	Pierre 98 : Stimare i limiti di propagazione verso valle e lateralmente e quindi tracciare il perimetro delle zone coinvolte	ROTOMAP: definire le zone di arresto e la suscettibilità dell'elemento esposto
• Illustrazioni relative all'integrazione dei due approcci (traiettografia e propagazione)	No	Rappresentazione cartografica della propagazione e della traiettografia 	No
Risultati ottenuti			
• Probabilità di rottura dei volumi instabili	Si [qualitativo : 3 classi] (CH = dangerosità degli aléa)	Si [semi-quantitativa : criteri di ponderazione]	Si [quantitativa : calcolo di stabilità]
• Modo di descrizione dei volumi instabili	Alea diffusi + puntuali	Zone omogenee (≈ alea diffusi)	
• Schede identificative degli alea	Si	No	
• Probabilità d'arrivo	Si (Matterock completo: quantitativo; Matterock light : qualitativo)	Si (quantitativo, Pierre98)	Si (quantitativo, Rotomap; qualitativo, Proto+densità fratturazione)
• Probabilità di accadimento (rottura + prob. di arrivo nel periodo di ritorno dato)	Si	Si	No



Criteria di confronto	Matterock	BRGM	Provialp																																																																																																															
• Energia dei blocchi	Si (Matterock completo: quantitativo; Matterock light : qualitativo)	Non	Si (Rotomap: energia cinetica; Proto + Fratturazione : energia potenziale)																																																																																																															
• Altezza di volo dei blocchi	Si (Rockyfor 3D)	Si	Si (Rotomap: con rimbalzi; Proto: altezza di partenza dei blocchi)																																																																																																															
• Classe di suscettibilità ⁴ (nozione spaziale = probabilità di rottura + d'arrivo)	No	Si	Si (Rotomap)																																																																																																															
• Classe di pericolo ⁵ (Diagramma intensità – accadimento)	Si	No	No																																																																																																															
• Dimensionamento delle opere di protezione	Si : Matterock completo No: Matterock light	No	No (possibile con Rotomap)																																																																																																															
• Posizionamento delle opere di protezione	Si: Matterock completo (Rockyfor 3D: messa in evidenza dei canali e degli assi di propagazione dei blocchi)	No	No (possibile con Rotomap)																																																																																																															
• Illustrazioni	<p>Relazione profilo del versante – fattore di caduta utilizzato per il calcolo dell'energia dei blocchi (Matterock light)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">A/ Falaise sans versant</th> <th>Facteur de chute f</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>Falaise très raide ou verticale avec chute libre sur la route</td> <td>f = 0,9 - 1</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>Falaise très raide ou verticale avec chute libre sur la route et rebonds en impacts en haut</td> <td>f = 0,6 - 0,9</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>Falaise inclinée à 45-60° avec rebonds</td> <td>f = 0,4 - 0,6</td> </tr> <tr> <th colspan="2">B/ Falaise avec versant</th> <th>Facteur de chute f</th> </tr> <tr> <td>4</td> <td>Blocs sautent</td> <td>f = 0,1 - 0,4</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>Blocs roulent</td> <td>f = 0,01 - 0,1</td> </tr> <tr> <td>6</td> <td>Cas n°4 ou 5 avec petite falaise le long de la route</td> <td>f = 0,4 - 0,6</td> </tr> </tbody> </table> <p>Diagramma intensità-accadimento + classi di pericolo :</p> <table border="1"> <tr> <td>A</td> <td>B</td> <td>C</td> </tr> <tr> <td>D1</td> <td>E</td> <td>F1</td> </tr> <tr> <td>D2</td> <td></td> <td>F2</td> </tr> <tr> <td>G</td> <td>H1</td> <td>J</td> </tr> <tr> <td></td> <td>H2</td> <td></td> </tr> </table>	A/ Falaise sans versant		Facteur de chute f	1	Falaise très raide ou verticale avec chute libre sur la route	f = 0,9 - 1	2	Falaise très raide ou verticale avec chute libre sur la route et rebonds en impacts en haut	f = 0,6 - 0,9	3	Falaise inclinée à 45-60° avec rebonds	f = 0,4 - 0,6	B/ Falaise avec versant		Facteur de chute f	4	Blocs sautent	f = 0,1 - 0,4	5	Blocs roulent	f = 0,01 - 0,1	6	Cas n°4 ou 5 avec petite falaise le long de la route	f = 0,4 - 0,6	A	B	C	D1	E	F1	D2		F2	G	H1	J		H2		<p>Cartografia dell'aléa di caduta blocchi</p>	<p>Tabella riassuntiva del calcolo della probabilità di rottura (P_r) di ogni cinematicismo e dell'indice di distacco (I_D) conseguente di ogni area omogenea</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Area</th> <th>Cinematismo</th> <th>P_r (%)</th> <th>Vol (m³)</th> <th>I_D (-)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="2">1</td> <td>1</td> <td>89,8</td> <td>0,10</td> <td rowspan="2">0,09</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>19,6</td> <td>0,10</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">3</td> <td>3</td> <td>10,7</td> <td>2,00</td> <td rowspan="2">2,20</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>65,3</td> <td>0,10</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">5</td> <td>5</td> <td>76,9</td> <td>0,10</td> <td rowspan="2">0,17</td> </tr> <tr> <td>6</td> <td>93,7</td> <td>0,10</td> </tr> <tr> <td rowspan="7">7</td> <td>8</td> <td>100</td> <td>0,10</td> <td rowspan="7">1,30</td> </tr> <tr> <td>9</td> <td>53,6</td> <td>1,00</td> </tr> <tr> <td>7</td> <td>97,1</td> <td>0,30</td> </tr> <tr> <td>10</td> <td>65,5</td> <td>0,30</td> </tr> <tr> <td>11</td> <td>2,7</td> <td>0,30</td> </tr> <tr> <td>12</td> <td>45,3</td> <td>0,30</td> </tr> <tr> <td>13</td> <td>100</td> <td>0,03</td> </tr> <tr> <td rowspan="6">8</td> <td>15</td> <td>18,5</td> <td>0,20</td> <td rowspan="6">0,76</td> </tr> <tr> <td>16</td> <td>0</td> <td>0,30</td> </tr> <tr> <td>17</td> <td>6</td> <td>0,10</td> </tr> <tr> <td>18</td> <td>100</td> <td>0,50</td> </tr> <tr> <td>14</td> <td>49,8</td> <td>0,30</td> </tr> <tr> <td>19</td> <td>22,2</td> <td>0,30</td> </tr> </tbody> </table>	Area	Cinematismo	P _r (%)	Vol (m ³)	I _D (-)	1	1	89,8	0,10	0,09	2	19,6	0,10	3	3	10,7	2,00	2,20	4	65,3	0,10	5	5	76,9	0,10	0,17	6	93,7	0,10	7	8	100	0,10	1,30	9	53,6	1,00	7	97,1	0,30	10	65,5	0,30	11	2,7	0,30	12	45,3	0,30	13	100	0,03	8	15	18,5	0,20	0,76	16	0	0,30	17	6	0,10	18	100	0,50	14	49,8	0,30	19	22,2	0,30
A/ Falaise sans versant		Facteur de chute f																																																																																																																
1	Falaise très raide ou verticale avec chute libre sur la route	f = 0,9 - 1																																																																																																																
2	Falaise très raide ou verticale avec chute libre sur la route et rebonds en impacts en haut	f = 0,6 - 0,9																																																																																																																
3	Falaise inclinée à 45-60° avec rebonds	f = 0,4 - 0,6																																																																																																																
B/ Falaise avec versant		Facteur de chute f																																																																																																																
4	Blocs sautent	f = 0,1 - 0,4																																																																																																																
5	Blocs roulent	f = 0,01 - 0,1																																																																																																																
6	Cas n°4 ou 5 avec petite falaise le long de la route	f = 0,4 - 0,6																																																																																																																
A	B	C																																																																																																																
D1	E	F1																																																																																																																
D2		F2																																																																																																																
G	H1	J																																																																																																																
	H2																																																																																																																	
Area	Cinematismo	P _r (%)	Vol (m ³)	I _D (-)																																																																																																														
1	1	89,8	0,10	0,09																																																																																																														
	2	19,6	0,10																																																																																																															
3	3	10,7	2,00	2,20																																																																																																														
	4	65,3	0,10																																																																																																															
5	5	76,9	0,10	0,17																																																																																																														
	6	93,7	0,10																																																																																																															
7	8	100	0,10	1,30																																																																																																														
	9	53,6	1,00																																																																																																															
	7	97,1	0,30																																																																																																															
	10	65,5	0,30																																																																																																															
	11	2,7	0,30																																																																																																															
	12	45,3	0,30																																																																																																															
	13	100	0,03																																																																																																															
8	15	18,5	0,20	0,76																																																																																																														
	16	0	0,30																																																																																																															
	17	6	0,10																																																																																																															
	18	100	0,50																																																																																																															
	14	49,8	0,30																																																																																																															
	19	22,2	0,30																																																																																																															

⁴ Nel calcolo della suscettibilità PROVIALP la nozione di *ricorrenza - tempo di ritorno* del fenomeno non è presa in considerazione. E' unicamente una combinazione di *suscettibilità di partenza del volume instabile + probabilità di arrivo + energia*.

⁵ In MATTEROCK il **pericolo** (o danger) è ottenuto combinando la *probabilità d'accadimento* e l'*intensità* (energia) dei blocchi.



Criteria di confronto	Matterock	BRGM	Proviaalp
Rappresentazione cartografica			
• Catasto degli eventi passati	Si		
• Carta dello stato di fratturazione generale del versante roccioso	No	No	Si
• Carta dei fenomeni ⁶	Si: Matterock completo No: Matterock light	Si (a titolo indicativo ma non integrata alla valutazione, serve da verifica dopo)	Si (fa parte dei dati raccolti sul terreno, ma non è utilizzata direttamente)
• Carta delle zone omogenee	No	Si	Si
• Carta dei volumi instabili	Si carta degli alea	No	No
• Carta della probabilità di arrivo	Si (Rockyfor3D)	Si	Si (Rotomap, Proto)
• Carta della probabilità di accadimento	No	Si	No
• Carta dell'intensità	Si (Rockyfor3D)	No	Si (Rotomap)
• Carta della suscettibilità CADUTA BLOCCHI	No	Si Chiamata comunemente carta d' <i>aléa chute de blocs</i> , in quanto non include la nozione di tempo di ritorno	Si (Rotomap)
• Carta pericolo CADUTA BLOCCHI/FRANA	Si - Alea puntuale/diffuso - Dangersité (bassa/media/elevata) - Grado di pericolo sulla strada (basso/medio/elevato) - Classi di pericolo (12 classi) - Pericolo di caduta blocchi e pericolo di frana tenuti distinti	Si (equivalente carta d' <i>aléa</i> = suscettibilità) - Numero di gradi di alea definiti in funzione del contesto - 5 gradi per la Lombardia (a priori nullo, da nullo a basso, basso, medio, elevato) - 6 gradi per il Sempione (a priori nullo, da nullo a basso, basso, medio, elevato, molto elevato)	No
• Rapporto finale standardizzato	Si	Si	No (schede automatiche da database per aree omogenee, elementi strutturali, cinematismi, immagini)

⁶Indici e gradi di attività, rilievi geomorfologici, depositi dei blocchi, ecc.




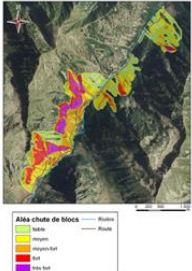

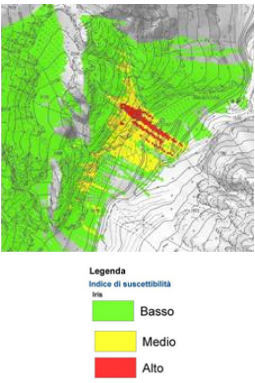
Criteri di confronto	Matterock	BRGM	Proviaalp																
<p>• Illustrazioni</p>	<p>Esempio di carta sintetica degli alea, degli eventi e del pericolo a livello della strada</p>  <p>Description des aleas</p> <table border="1"> <tr> <td>Evénements</td> <td>Incidenté</td> <td>Chute de bloc</td> <td>Eboulement</td> </tr> <tr> <td>Aléas</td> <td>Ponctuel</td> <td>Diffus</td> <td></td> </tr> </table> <p>Degrés de danger</p> <table border="1"> <tr> <td>élevé</td> <td>moyen</td> <td>faible</td> </tr> </table> <p>Classes de danger</p> <table border="1"> <tr> <td>B : aléa diffus</td> <td>B : aléa ponctuel</td> </tr> </table>	Evénements	Incidenté	Chute de bloc	Eboulement	Aléas	Ponctuel	Diffus		élevé	moyen	faible	B : aléa diffus	B : aléa ponctuel	<p>Cartografia dell'alea chute de blocs</p>  <p>Cartografia dell'alea chute de blocs a livello della strada</p> 	 <p>Legenda Indice di suscettibilità alea</p> <table border="1"> <tr> <td>Basso</td> <td>Medio</td> <td>Alto</td> </tr> </table>	Basso	Medio	Alto
Evénements	Incidenté	Chute de bloc	Eboulement																
Aléas	Ponctuel	Diffus																	
élevé	moyen	faible																	
B : aléa diffus	B : aléa ponctuel																		
Basso	Medio	Alto																	



Tableau de comparaison des méthodes d'évaluation de l'aléa chutes de blocs BRGM (fr) - MATTEROCK (ch) – PROVIALP (it)

Critères de comparaison	Matterock	BRGM	Proviaip
Domaine d'application			
Chute de pierres ou blocs			
• Événement chute pierres	Non (possible)	Oui	Oui
• Événement chute blocs ≤ 30-50 m ³	Oui	Oui	Oui
• Événement chute blocs ¹⁷ ≥ 30-50 m ³	Oui	Non	Non
Typologie de l'étude			
• Grande échelle : sur de longs axes routiers	Oui (++ long)	Oui	Oui (+ long si hétérogène)
• Echelle locale : après un événement	Oui	Non	Non
Typologie de vallée			
• Vallée <u>sans</u> versant opposé accessible	Peu adapté ⁸	Adapté	Adapté
• Vallée <u>avec</u> versant opposé accessible	Adapté		
• Subjectivité de la méthodologie (ou l'expérience du géologue prépondérante)	Elevée	Moyenne	Faible
• Temps de retour événement considéré	Long terme (≤ 300 ans)	Court terme (≤ 10 ans)	Peu considéré
Evaluation de la probabilité de rupture			
• Analyse état général de fracturation de la falaise	Pas considéré systématiquement	Considéré	Considéré indirectement (orthophoto)
• Mécanisme de rupture (= confrontation agencement structural de falaise avec orientation et pendage de la topo)	Considéré		
• Hauteur de la falaise	Pas considéré	Considéré	Pas considéré
• Persistance & espacement	Considéré		
• Forme des blocs au départ	Pas considéré	Considéré	Pas considéré
• Taille des blocs au départ	Pas considéré	Considéré	Considéré
• Degré d'altération de la roche	Pas considéré systématiquement		
• Présence d'eau	Considéré pour aléa ponctuel	Considéré	Pas considéré
Evaluation de la propagation générale			
• Analyse de blocs en pied de falaise	Considéré qualitativement		

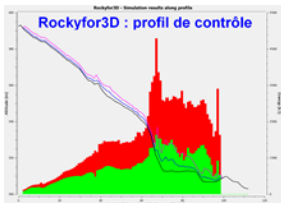
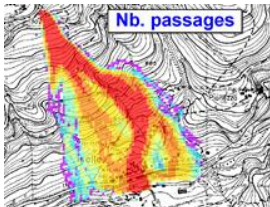
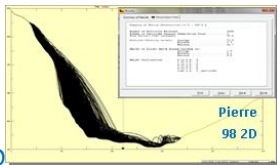
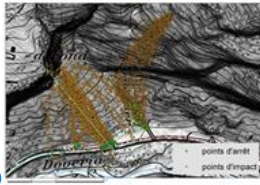
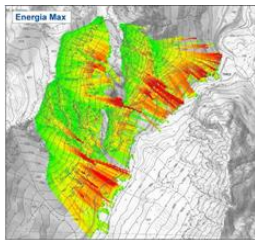
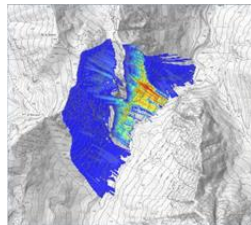
⁷ Y compris les éboulements

⁸ L'application de MATTEROCK nécessite des postes d'observation à distance (par ex. depuis le versant d'en face ou l'hélico).

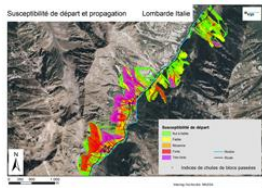
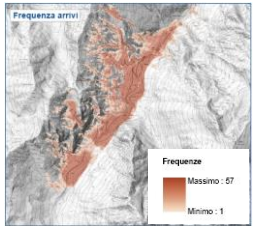



Critères de comparaison	Matterock	BRGM	Proviaalp
• Taille du bloc au départ	Considéré	Considéré (Pierre 98)	Considéré (Rotomap)
• Prise en compte de la forêt	Considéré qualitativement (Rockyfor3D : quantitatif)	Peut être considéré (Pierre 98 + Rockyfomet)	Considéré (Rotomap)
• Elasticité du sol de la trajectoire	Considéré (Rockyfor3D)	Considéré (Pierre 98)	Considéré (Rotomap)
• Evaluation sans calcul numérique	Oui avec Matterock light	Oui (BORA + ligne d'énergie quand morphologie du versant s'y prête)	Non
Trajectographie et propagation			
Trajectographie (= logiciels)			
• Type de logiciel: déterministes /probabilistes et 2D/3D	Rockyfor3D: probabiliste	Pierre 98 2D-3D: déterministe et probabiliste	Rotomap 3D : déterministe
• Disponibilité du logiciel	Commercialisé (150 €/an)	Non commercialisé	Commercialisé (~ 3 k€)
• Objectifs / principes de fonctionnement des logiciels	- Simulation de trajectoires monoblocs en 3D à l'aide d'un MNT - Génération de grilles raster qui peuvent être lues dans un SIG - Simulation avec barrières et écrans de contrôle	- Déterminer de façon plus précise l'extension en aval du phénomène chute de blocs (Pierre98 2D) - Permet d'obtenir les points d'impact et d'arrêt des blocs sur une grille MNT (Pierre98 3D)	- Calculer les zones de passage et d'arrêt des blocs
• Géométrie de l'aléa de départ (point, ligne, surface...)	Surface	2D : point 3D : surface	Surface
• Limitation du nombre de blocs au départ	Non limité	2D : topo + couches de sol et 3D non limité	Non limité
• Forme des blocs	Oui	Oui	Non
• Rotation des blocs	Oui	Oui	Non
• Point matériel	Non	Non	Oui
• Prise en compte de la forêt (dans le sens modélisation)	Considéré quantitativement (Rockyfor3D)	Non	Non
• Types de résultats fournis	Rockyfor3D: énergies moy. + 95%, vitesses max., hauteurs passage moy. + 95%, nb. passages, nb. cellules sources, prob. atteinte, nb. arrêts, volume max. blocs arrêtés, angle ligne énergie, temps trajet, (avec forêt : nb. + hauteurs impacts sur arbres)	Pierre 98 2D / 3D : distances de propagation min. moy. max ; trajectoires une à une avec vitesse en chaque point ; informations sur un point ciblé : enjeux ou futurs aménagements. Données de vitesse et de rebonds	Rotomap: énergie moyenne et max., hauteur max. de vol, fréquence d'atteinte, indice de susceptibilité IRIS
• Dimensionnement d'ouvrages de protection	Oui	Non	Non

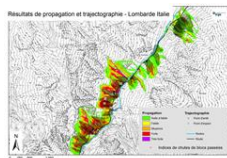


Critères de comparaison	Matterock	BRGM	Proviapl
<ul style="list-style-type: none"> • Forme des résultats 	<ul style="list-style-type: none"> - Couches SIG (14 grilles raster) - Fichier avec détail des caractéristiques des blocs aux ouvrages/écrans de contrôle (vitesse, énergie, hauteur passage, angle impact) 	<ul style="list-style-type: none"> - Pour le 2D : résultats sous la forme de profils et diagramme + traitement statistiques - Pour le 3D : couche SIG de points d'arrêts et d'impacts mais moins ponctuel que le 2D 	<ul style="list-style-type: none"> - 4 Raster - Cartographies en fonction de l'énergie cinétique moyenne et max., hauteur de vol max., distribution des points d'arrêt, indice de susceptibilité
<ul style="list-style-type: none"> • Limites d'utilisation 	<ul style="list-style-type: none"> - Rockyfor3D nécessite la création de nombreuses couches raster (entre 10 et 17) - Pas une méthode expéditive : relevés de terrain détaillés, traitement et analyse assez longs 	<ul style="list-style-type: none"> - Beaucoup voir trop de paramètres - Points de départ ponctuels, choix de points de départ représentatifs car pas de possibilité de partir d'une zone de rupture - Logiciel non commercial 	<ul style="list-style-type: none"> - Exige un MNT détaillé - La collecte des données input n'est pas une opération expéditive - Logiciel payant
<ul style="list-style-type: none"> • Illustrations 	 	<p>Représentation des résultats de Pierre98</p>  <p>2D</p> <p>Représentation des résultats de Pierre98</p>  <p>3D</p>	<p>Rotomap : Énergie maximale</p>  <p>Rotomap : Indice de susceptibilité IRIS</p> 
Propagation s./			
<ul style="list-style-type: none"> • Evaluation de la propagation (empirique) et/ou de ligne d'énergie 	<p>Oui (critères géomorphologiques – Matterock light)</p>	<p>Oui (mais pas de calcul d'énergie, gradation de niveaux d'atteinte correspondant à l'aléa de propagation - logiciel BORA)</p>	<p>Oui (méthode des cônes modifiée – ligne d'énergie)</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Objectifs / principes des logiciels 	<p>Aucun logiciel utilisé</p>	<p>Reproduit des événements connus dans des conditions identiques, et extrapolés à d'autres sites en conservant les paramètres</p>	<p>Estimer la distance d'arrêt maximale des blocs</p>



Critères de comparaison	Matterock	BRGM	Provialp									
• Besoin d'un aléa de départ en entrée nécessitant une expertise de terrain	Oui (morphologie, végétation, taille du bloc, forme de blocs)	Non si on dispose d'un événement existant sinon une rétroanalyse sur événements connus	Non									
• Géométrie de l'aléa de départ (point, ligne, surface...)	Point (aléa ponctuel) ou surface (aléa diffus)	Surface ou ligne (avec buffer)	Surface									
• Prise en compte de la forêt	Considéré qualitativement (Matterock light)	Non	Non									
• Type de résultats	Probabilités d'atteinte (3 classes)	Probabilités d'atteinte	Atteinte ou non (O/N) par rapport à un angle donné									
• Format des résultats bruts	Tableau	Raster	Raster + Shape									
• Représentation cartographique des résultats	Non	Oui (classification à partir d'un jugement d'expert et d'observations de terrain)	Oui (classification sur critères mathématiques)									
• Limites d'utilisation	Relevés terrain nécessaires	Logiciel empirique sans paramètres physiques Pas utilisable sur falaise verticale sans talus en pied	- En fonction du détail du MNT - Applicable seulement si la morphologie est favorable									
• Illustrations	<p>Matrice d'attribution des classes de probabilité d'atteinte</p> <table border="1"> <tr> <td>Probabilité d'atteinte</td> <td>Elevée</td> <td>20 -100%</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Moyenne</td> <td>2 - 20%</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Faible</td> <td>0 - 2 %</td> </tr> </table>	Probabilité d'atteinte	Elevée	20 -100%		Moyenne	2 - 20%		Faible	0 - 2 %	<p>Représentation cartographique de la propagation sur la probabilité de départ</p> 	<p>Metodi dei coni – frequenze arrivi</p>  <p>Carta della suscettibilità derivata dal metodo dei coni</p> 
Probabilité d'atteinte	Elevée	20 -100%										
	Moyenne	2 - 20%										
	Faible	0 - 2 %										



Critères de comparaison	Matterock	BRGM	Provialp
Synthèse générale (probabilité de rupture / analyses trajectographie et propagation)			
• Utilisation des résultats intermédiaires de trajectographie et de propagation	Synthèse des observations de terrain, des événements historiques et des simulations (Rockyfor3D)	Combinaison propagation (BORA) et trajectographie (Pierre 98) + observations de terrain + photos / orthophotos / événements historiques	1 (expéditif) : combinaison densité de fracturation + propagation (Proto) 2 (détaillé) : combinaison observations de terrain + codes de calcul de l'instabilité + trajectographie (Rotomap)
• Apports de la propagation	Matterock light : estimation des probabilités d'atteinte de l'objet menacé (axe routier)	BORA : visualiser les directions préférentielles empruntées par les blocs et donc les zones de probabilité d'atteinte plus ou moins fortes. Correspond à une extension 3D de Pierre98	PROTO : Estimer la distance d'arrêt maximale des blocs de façon expéditive
• Apports de la trajectographie	Rockyfor3D : estimation des limites d'atteinte vers l'aval et latéralement, calcul de l'énergie des blocs, (dimensionnement d'ouvrages de protection), mise en évidence des couloirs (concentration des blocs)	Pierre 98 : Estimer les limites de propagation en aval et latéralement et donc tracer les contours des zones concernés	ROTOMAP : définir les zones d'arrêt et la susceptibilité de l'objet exposé
• Illustrations sur l'intégration des deux approches (trajectographie et propagation)	Non	Représentation cartographique de la propagation et de la trajectographie 	Non
Résultats obtenus			
• Probabilité rupture des instabilités	Oui [qualitatif : 3 classes] (CH = dangerosité des aléas)	Oui [semi-quantitatif : pondération critères]	Oui [quantitatif : calcul stabilité]
• Mode de description des instabilités	Aléas diffus + ponctuels	Zones homogènes (≈ aléas diffus)	
• Fiches d'identification des aléas	Oui	Non	
• Probabilité d'atteinte	Oui (Matterock complete: quantitatif; Matterock light : qualitatif)	Oui (quantitatif, Pierre98)	Oui (quantitatif, Rotomap ; qualitatif, Proto + densité de fracturation)
• Probabilité d'occurrence (rupture + atteinte dans période retour donnée)	Oui	Oui	Non



Critères de comparaison	Matterock	BRGM	Provialp																																																																																																															
• Degré d'énergie des blocs	Oui (Matterock complete : quantitatif; Matterock light : qualitatif)	Non	Oui (Rotomap: énergie cinétique; Proto + Fracturation : énergie potentielle)																																																																																																															
• Hauteur de vol des blocs	Oui (Rockyfor 3D)	Oui	Oui (Rotomap : avec rebonds; Proto: hauteur de départ des volumes instables)																																																																																																															
• Degré de susceptibilité ⁹ (notion spatiale = probabilité de rupture + d'atteinte)	Non	Oui	Oui (Rotomap)																																																																																																															
• Degré de danger ¹⁰ (Diagramme intensité – occurrence)	Oui	Non	Non																																																																																																															
• Dimensionnement d'ouvrages de protection	Oui : Matterock complete Non: Matterock light	Non	Non (possible avec Rotomap)																																																																																																															
• Positionnement d'ouvrages de protection	Oui : Matterock complète (Rockyfor 3D : mise en évidence des couloirs et axes de propagation des blocs)	Non	Non (possible avec Rotomap)																																																																																																															
• Illustrations	<p>Relation profil du versant – facteur de chute utilisé pour le calcul de l'énergie des blocs (Matterock light)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">A/ Falaise sans versant</th> <th>Facteur de chute f</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>Falaise très raide ou verticale avec chute libre sur la route</td> <td>f = 0,9 - 1</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>Falaise très raide ou verticale avec chute libre sur la route et rebonds et impacts en haut</td> <td>f = 0,6 - 0,9</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>Falaise inclinée à 45-60° avec rebonds</td> <td>f = 0,4 - 0,6</td> </tr> <tr> <th colspan="2">B/ Falaise avec versant</th> <th>Facteur de chute f</th> </tr> <tr> <td>4</td> <td>Blocs sautent</td> <td>f = 0,1 - 0,4</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>Blocs roulent</td> <td>f = 0,01 - 0,1</td> </tr> <tr> <td>6</td> <td>Cas n°4 ou 5 avec petite falaise le long de la route</td> <td>f = 0,4 - 0,6</td> </tr> </tbody> </table> <p>Diagramme intensité-occurrence + classes de dangers :</p> <table border="1"> <tr> <td>A</td> <td>B</td> <td>C</td> </tr> <tr> <td>D1</td> <td>E</td> <td>F1</td> </tr> <tr> <td>D2</td> <td>F2</td> <td></td> </tr> <tr> <td>G</td> <td>H1</td> <td>J</td> </tr> <tr> <td></td> <td>H2</td> <td></td> </tr> </table>	A/ Falaise sans versant		Facteur de chute f	1	Falaise très raide ou verticale avec chute libre sur la route	f = 0,9 - 1	2	Falaise très raide ou verticale avec chute libre sur la route et rebonds et impacts en haut	f = 0,6 - 0,9	3	Falaise inclinée à 45-60° avec rebonds	f = 0,4 - 0,6	B/ Falaise avec versant		Facteur de chute f	4	Blocs sautent	f = 0,1 - 0,4	5	Blocs roulent	f = 0,01 - 0,1	6	Cas n°4 ou 5 avec petite falaise le long de la route	f = 0,4 - 0,6	A	B	C	D1	E	F1	D2	F2		G	H1	J		H2		<p>Cartographie de la susceptibilité considérée comme étant de l'aléa par abus de langage</p>	<p>Tableau de synthèse du calcul de probabilité de rupture (Pr) pour chaque cinématisme et de l'indice de mobilisation (ID) associé à chaque zone homogène</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Area</th> <th>Cinematismo</th> <th>Pa (%)</th> <th>Vol (m³)</th> <th>lg (.)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="2">1</td> <td>1</td> <td>89.8</td> <td>0.10</td> <td rowspan="2">0.09</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>19.6</td> <td>0.10</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">3</td> <td>3</td> <td>10.7</td> <td>2.00</td> <td rowspan="2">2.20</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>65.3</td> <td>0.10</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">5</td> <td>5</td> <td>76.9</td> <td>0.10</td> <td rowspan="2">0.17</td> </tr> <tr> <td>6</td> <td>93.7</td> <td>0.10</td> </tr> <tr> <td rowspan="6">7</td> <td>8</td> <td>100</td> <td>0.10</td> <td rowspan="6">1.30</td> </tr> <tr> <td>9</td> <td>53.6</td> <td>1.00</td> </tr> <tr> <td>7</td> <td>97.1</td> <td>0.30</td> </tr> <tr> <td>10</td> <td>65.5</td> <td>0.30</td> </tr> <tr> <td>11</td> <td>2.7</td> <td>0.30</td> </tr> <tr> <td>12</td> <td>45.3</td> <td>0.30</td> </tr> <tr> <td rowspan="7">8</td> <td>13</td> <td>100</td> <td>0.03</td> <td rowspan="7">0.76</td> </tr> <tr> <td>15</td> <td>18.5</td> <td>0.20</td> </tr> <tr> <td>16</td> <td>0</td> <td>0.30</td> </tr> <tr> <td>17</td> <td>6</td> <td>0.10</td> </tr> <tr> <td>18</td> <td>100</td> <td>0.50</td> </tr> <tr> <td>14</td> <td>49.8</td> <td>0.30</td> </tr> <tr> <td>19</td> <td>22.2</td> <td>0.30</td> </tr> </tbody> </table>	Area	Cinematismo	Pa (%)	Vol (m³)	lg (.)	1	1	89.8	0.10	0.09	2	19.6	0.10	3	3	10.7	2.00	2.20	4	65.3	0.10	5	5	76.9	0.10	0.17	6	93.7	0.10	7	8	100	0.10	1.30	9	53.6	1.00	7	97.1	0.30	10	65.5	0.30	11	2.7	0.30	12	45.3	0.30	8	13	100	0.03	0.76	15	18.5	0.20	16	0	0.30	17	6	0.10	18	100	0.50	14	49.8	0.30	19	22.2	0.30
A/ Falaise sans versant		Facteur de chute f																																																																																																																
1	Falaise très raide ou verticale avec chute libre sur la route	f = 0,9 - 1																																																																																																																
2	Falaise très raide ou verticale avec chute libre sur la route et rebonds et impacts en haut	f = 0,6 - 0,9																																																																																																																
3	Falaise inclinée à 45-60° avec rebonds	f = 0,4 - 0,6																																																																																																																
B/ Falaise avec versant		Facteur de chute f																																																																																																																
4	Blocs sautent	f = 0,1 - 0,4																																																																																																																
5	Blocs roulent	f = 0,01 - 0,1																																																																																																																
6	Cas n°4 ou 5 avec petite falaise le long de la route	f = 0,4 - 0,6																																																																																																																
A	B	C																																																																																																																
D1	E	F1																																																																																																																
D2	F2																																																																																																																	
G	H1	J																																																																																																																
	H2																																																																																																																	
Area	Cinematismo	Pa (%)	Vol (m³)	lg (.)																																																																																																														
1	1	89.8	0.10	0.09																																																																																																														
	2	19.6	0.10																																																																																																															
3	3	10.7	2.00	2.20																																																																																																														
	4	65.3	0.10																																																																																																															
5	5	76.9	0.10	0.17																																																																																																														
	6	93.7	0.10																																																																																																															
7	8	100	0.10	1.30																																																																																																														
	9	53.6	1.00																																																																																																															
	7	97.1	0.30																																																																																																															
	10	65.5	0.30																																																																																																															
	11	2.7	0.30																																																																																																															
	12	45.3	0.30																																																																																																															
8	13	100	0.03	0.76																																																																																																														
	15	18.5	0.20																																																																																																															
	16	0	0.30																																																																																																															
	17	6	0.10																																																																																																															
	18	100	0.50																																																																																																															
	14	49.8	0.30																																																																																																															
	19	22.2	0.30																																																																																																															

⁹ Dans le calcul de la **susceptibilité** PROVIALP la notion de *réurrence - temps de retour* du phénomène n'est pas pris en compte. C'est uniquement une combinaison *susceptibilité de départ du bloc + probabilité d'atteinte + énergie*.

¹⁰ Dans MATTEROCK le danger est obtenu en combinant la *probabilité d'occurrence* et l'*intensité* (énergie) des blocs.



Critères de comparaison	Matterock	BRGM	Provialp
Représentation cartographique			
• Cadastre événements	Oui		
• Carte de l'état de fracturation général du versant rocheux	Non	Non	Oui
• Carte phénomènes ¹¹	Oui : Matterock complete Non : Matterock light	Oui (à titre indicatif mais non intégré à l'évaluation, sert de vérification après)	Oui (fait partie des données recueillies, mais n'est pas utilisée directement)
• Carte de zones homogènes	Non	Oui	Oui
• Carte instabilités	Oui carte d'aléas	Non	Non
• Carte de probabilité d'atteinte	Oui (Rockyfor3D)	Oui	Oui (Rotomap, Proto)
• Carte probabilité d'occurrence	Non	Oui	Non
• Carte intensité	Oui (Rockyfor3D)	Non	Oui (Rotomap)
• Carte susceptibilité CHUTE DE BLOCS	Non	Oui Appelée communément carte d'aléa par abus de langage, car pas de notion de période de retour	Oui (Rotomap)
• Carte danger CHUTE DE BLOCS/EBOULEMENT	Oui - Aléa ponctuel/diffus - Dangersité (faible/moyenne/faible) - Degrés de danger sur la route (faible/moyen/élevé) - Classes de danger (12 classes) - Danger chute de blocs et danger éboulement distingués	Oui (équivalent carte d'aléa = susceptibilité) - Nombre de niveaux d'aléa défini en fonction du contexte - 5 niveaux pour la Lombarde (à priori nul, nul à faible, faible, moyen, fort) - 6 niveaux pour le Simplon (à priori nul, nul à faible, faible, moyen, fort, très fort)	Non
• Rapport final standardisé	Oui	Oui	Non (Fiches automatiques de la base de données pour les zones homogènes, éléments structuraux, cinémathèmes et images)

¹¹ Indices et degrés d'activité, lever géomorphologiques, dépôts de blocs, etc.

Critères de comparaison	Matterock	BRGM	Proviaip																											
<p>• Illustrations</p>	<p>Exemple de carte synthétique des aléas, des événements et du danger sur la route</p> <p>Description des aléas</p> <table border="1"> <tr> <td>Secteurs</td> <td>B</td> <td>Nom (" + diffus)</td> </tr> <tr> <td>Evénements</td> <td>CS-B</td> <td>Mécanisme</td> </tr> <tr> <td>Indétectable</td> <td>Elevé/Moyen</td> <td>Dangerosité</td> </tr> <tr> <td>Chute de bloc</td> <td>100.500</td> <td>Volume max. (m³)</td> </tr> <tr> <td>Eboulement</td> <td>2.19</td> <td>Taille des blocs (m)</td> </tr> </table> <p>Dangerosité</p> <table border="1"> <tr> <td>Elevée</td> <td>Aléas</td> </tr> <tr> <td>Moyenne</td> <td>Ponctuel</td> </tr> <tr> <td>Faible</td> <td>Diffus</td> </tr> </table> <p>Degrés de danger</p> <table border="1"> <tr> <td>élevé</td> <td>Classes de danger</td> </tr> <tr> <td>moyen</td> <td>B : aléas diffus</td> </tr> <tr> <td>faible</td> <td>B : aléas ponctuel</td> </tr> </table>	Secteurs	B	Nom (" + diffus)	Evénements	CS-B	Mécanisme	Indétectable	Elevé/Moyen	Dangerosité	Chute de bloc	100.500	Volume max. (m ³)	Eboulement	2.19	Taille des blocs (m)	Elevée	Aléas	Moyenne	Ponctuel	Faible	Diffus	élevé	Classes de danger	moyen	B : aléas diffus	faible	B : aléas ponctuel	<p>Cartographie de l'aléa chute de blocs</p> <p>Aléa chute de blocs au niveau de la route</p>	<p>Legenda Indice di suscettibilità Ina</p> <ul style="list-style-type: none"> Basso Medio Alto
Secteurs	B	Nom (" + diffus)																												
Evénements	CS-B	Mécanisme																												
Indétectable	Elevé/Moyen	Dangerosité																												
Chute de bloc	100.500	Volume max. (m ³)																												
Eboulement	2.19	Taille des blocs (m)																												
Elevée	Aléas																													
Moyenne	Ponctuel																													
Faible	Diffus																													
élevé	Classes de danger																													
moyen	B : aléas diffus																													
faible	B : aléas ponctuel																													



VI. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

Allodi A., Castelli M. (2007). Toppling Stones: analisi probabilistica all'equilibrio limite della stabilità per ribaltamento di un blocco prismatico - Manuale d'uso. Politecnico di Torino – DISTR.

Arpa Piemonte, Cemagref, Politecnico di Torino, Consorzio Forestale Alta Valle di Susa (2008) – Progetto n. 165 Provi alp. Protezione della viabilità alpina. Relazione Finale. Interregg IIIa 2000-2006 Alpes Latines. Litografia Viscardi, Alessandria. ISBN 978-887479-070-8

Carere K., Ratto S., Zanolini F. coord. (2002). Prevenzione dei fenomeni di instabilità delle pareti rocciose. Confronto dei metodi di studio dei crolli nell'arco alpino – Prévention des mouvements de versant et des instabilités de falaises. Confrontation des méthodes d'étude des éboulements rocheux dans l'arc alpin. Programma Interreg IIC «Falaises». Rapport final.

Evans S.G., Hungr O. (1993). The assessment of rockfall hazard at the base of talus slopes. Canadian Geotechnical Journal, vol. 30(4), pp. 620-636.

GéoVal SA et Pra SA (2006). Simplonstrasse A9 / Brig-Gondo. Steinschlaggefährdung Galerien: Generelle Überprüfung. Technischer Bericht: Methodik. Rapport inédit des bureaux Pra SA et GéoVal SA, Sion

Marçot N. et Girard A. (2011) - Projet MASSA ALCOTRA n°65 (Medium And Small Size rockfall hazard Assessment) : Evaluation de l'aléa lié aux chutes de blocs et aux éboulements de volume intermédiaire. Rapport intermédiaire - Action 1 : Méthodes d'évaluation – Activité 1 : Application de la méthodologie BRGM à la cartographie « rapide » de l'aléa chute de blocs sur les axes transfrontaliers Rapport intermédiaire BRGM/RP-59667-FR - 170 pages, 78 Ill. et 4 An.

Major J., Marder F., Kim H.S. (1974). WINTAM (Wedge along line of INTERsection Analysis including Monte carlo simulation). Mining Research Laboratories - CANMET, Department of Energy, Mines and Resources.

Office Fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage OFEFP (1997): Recommandations fédérales pour la prise en compte des dangers dus au mouvement de terrain dans le cadre des activités de l'aménagement du territoire.

Pisani G. (2005). Un metodo di tipo probabilistico per lo studio degli scivolamenti planari in roccia. Tesi di Laurea Specialistica, Politecnico di Torino – DISTR.

Rouiller, J.D., Jaboyedoff M., Marro C., Philipposian F., Mamin M. (1998). Pentest instables dans le Pennique valaisan face aux changements climatiques. Matterock. Une méthodologie d'auscultation des falaises et de détection des éboulements majeurs potentiels. Rapport final du PNR 31. Éditeur vdf Hochschulverlage AG an der ETH Zürich.



VII. ALLEGATI - ANNEXES

Allegato 1 : Lessico tecnico – Annexe 1 : Lexique technique

Lessico tecnico Proviaip (I)

Area omogenea (I)

Settore di una falesia caratterizzato da condizioni geologico-strutturali omogenee e da un'orientazione del fronte più o meno costante; quando possibile, ovvero se sono stati riconosciuti nell'area uno o più cinematismi (I), al settore viene associato un indice di distacco (I).

Analisi traiettografica (I)

Studio della traiettoria dei blocchi a partire da punti di distacco definiti. I risultati ottenuti attraverso il programma ROTOMAP GIS sono espressi in termini di energia cinetica specifica media e massima, altezze di rimbalzo massime, frequenza degli arrivi e indice di suscettibilità (I).

Cinematismo (I)

Volume roccioso instabile riconosciuto nell'area omogenea (I), non ubicato con precisione, collegato ad un definito meccanismo di distacco. Si assume che il cinematismo possa prodursi a scala dell'intera area omogenea (I). Per ogni area omogenea (I) è possibile censire più di un cinematismo; per ciascun cinematismo viene calcolata una probabilità di rottura (I).

Indice di distacco (I)

Parametro associato a ciascuna area omogenea (I) che dipende dalla probabilità di rottura (I) di ogni cinematismo (I) individuato e dal relativo volume medio.

Indice di suscettibilità (I)

Parametro determinato come il prodotto tra l'energia cinetica calcolata attraverso il codice di calcolo ROTOMAP GIS e l'indice di distacco (I) calcolato per ciascuna area omogenea (I).

Instabilità ubicata (I)

Volume instabile caratterizzato da un definito meccanismo di distacco localizzato in parete con precisione (il censimento delle instabilità ubicate è stato introdotto da Arpa Piemonte durante lo svolgimento del progetto Massa).

Probabilità di rottura (I)

Probabilità statistica che un cinematismo (I) si mobilizzi; viene calcolata come il rapporto tra i casi in cui il fattore di sicurezza calcolato è minore di 1 e i casi totali considerati.

Suscettibilità (I)

Probabilità che un evento naturale di data intensità interessi una certa area.



Lexique technique BRGM (F)

Aléa chute de blocs (F)

Probabilité d'apparition du phénomène "chute de blocs" sur un territoire donné, dans une période de référence donnée mais sans préjuger de la date de son déclenchement, ni des dommages qu'il peut causer.

On peut distinguer dans l'aléa chute de blocs (F):

- aléa diffus: se caractérisant, dans un périmètre donné, par un certain nombre d'instabilités qualifiées et globalement identifiées, mais sans connaître leur localisation exacte. Elles sont généralement nombreuses et de volumes inférieurs au m³.
- aléa ponctuel: se caractérisant par la localisation et la délimitation de compartiments potentiellement instables, concernant généralement des volumes unitaires de plusieurs m³.

L'aléa chute de blocs (F) prend en compte la susceptibilité de départ et les éventuelles atténuations d'aléa liées à la propagation et par conséquent au relief.

Aléa de propagation (F)

Probabilité qu'un ou plusieurs blocs produits par la falaise se propagent en aval de façon latérale et frontale sur une surface (pente d'un glacier), et subissent d'éventuelles atténuations en fonction du relief. La propagation évaluée avec le logiciel BORA ne tient pas compte des paramètres physiques liés à la pente ou aux blocs, mais «se cale» sur des événements avérés.

Glissement banc sur banc (F)

Type d'instabilité rocheuse se manifestant par un mouvement de translation sur une discontinuité plane, de structure aval pendage.

Rupture de dièdre (F)

Type d'instabilité rocheuse se manifestant par un mouvement de translation sur deux discontinuités formant un dièdre.

Susceptibilité de départ (F)

Probabilité de rupture des compartiments rocheux instables compris dans la zone homogène.

Trajectographie (F)

Extension d'un bloc en aval d'une falaise, sur une pente (glacis, éboulis...), déterminée par des outils de trajectographie permettant de modéliser le comportement (rebonds, vitesse, points d'arrêt, ...) du bloc le long d'un profil topographique (2D) ou d'un modèle numérique de sol (3D). Les paramètres physiques liés à la pente et aux blocs sont toujours pris en compte dans l'évaluation de la trajectographie.

Zone homogène (F)

Surface composée de falaises montrant une géologie, une structure et une géomorphologie homogène et caractérisées par une susceptibilité de départ (F) donnée.



Lexique technique Matterock short/light (CH)

Aléa ponctuel (CH)

Compartiment rocheux instable bien délimité en falaise dont on estime le volume, le mécanisme de mobilisation et la probabilité de rupture (= dangerosité (CH)). Synonyme : instabilité ponctuelle.

Aléa diffus (CH)

Secteur de falaise parsemé de compartiments rocheux instables de volumes comparables possédant des mécanismes de mobilisation et dangerosités (CH) semblables. Synonyme: instabilité diffuse.

Aire structurale (CH)

Secteur de falaise qui montre le même agencement structural, c'est à dire qui est découpé par les mêmes familles de discontinuités.

Danger (CH)

Le danger de « chute de blocs » est le produit entre la probabilité d'occurrence (CH) du phénomène et son intensité (CH) dans un lieu donné. Le danger est qualifié de élevé, moyen ou faible.

Dangerosité (CH)

Probabilité de mobilisation de l'aléa (CH) considéré. On l'appelle aussi probabilité de rupture. La dangerosité (CH) est classée en 3 degrés: élevée, moyenne et faible.

Intensité (CH)

Énergie d'impact (en kJ) des blocs qui tombent dans un lieu donné.

Probabilité d'atteinte (CH)

Probabilité qu'un bloc qui tombe d'une falaise atteigne un lieu donné (route, maison ou autres objets menacés).

Probabilité d'occurrence (CH)

Probabilité que le phénomène « chute de blocs » s'avère dans un lieu donné. La probabilité d'occurrence (CH) résulte de la combinaison entre dangerosité (CH) de l'aléa (CH) et probabilité d'atteinte (CH) des blocs qui composent l'aléa (CH) considéré.

Scénario de rupture (CH)

Déroulement hypothétique d'un événement de chute de blocs associé à un aléa (CH) donné, dans une période de retour donnée. Chaque scénario de rupture (CH) est caractérisé par un volume mobilisable et une taille de bloc. Pour les aléas diffus (CH) avec plusieurs degrés de dangerosité (CH) différents scénarios de rupture sont définis pour les différentes périodes de retour considérées.

Allegato 2 : Applicazione delle tre metodologie sul sito pilota di Iselle-dogana – Annexe 2 : Application des trois méthodologies sur le site pilote d'Iselle-douane

(con dettaglio sui rilievi di terreno eseguiti dai tre gruppi di lavoro)

Allegato 2-1 : Metodo Proviarp

Il metodo Proviarp consiste in due attività: una di tipo preliminare realizzata principalmente in ufficio e l'altra di rilievo di terreno. I risultati dell'attività preliminare qui presentati sono stati ottenuti al di fuori del progetto Massa.

Analisi preliminare al rilievo di terreno

Gli studi che precedono i rilievi di terreno consistono in:

- 1) **Interpretazione geologica attraverso un modello prospettico del terreno in 3D**, rivolta a:
 - a. Individuazione delle *aree omogenee (I)* (figura 1);
 - b. identificazione dei sistemi di discontinuità (faglie, fratture) dell'ammasso roccioso (figura 2);
 - c. caratterizzazione geometrica dei sistemi di frattura (figura 3);
 - d. analisi della densità di intersezioni della fratturazione (figura 4a, 4b).

Nelle figure sono riportati i risultati della fase di analisi preliminare propedeutica ai rilievi di terreno. Questa prima parte è realizzata al fine di caratterizzare le geometrie dei sistemi di frattura e le zone maggiormente fratturate dell'ammasso roccioso.

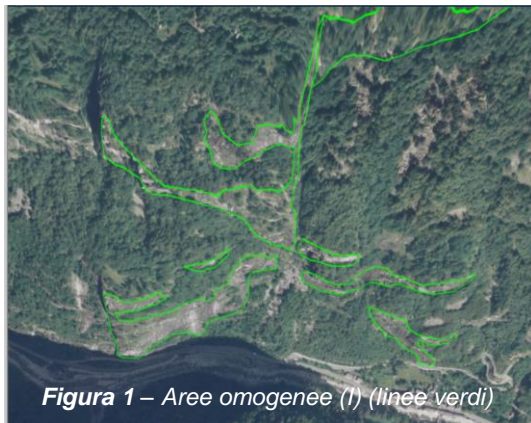


Figura 1 – Aree omogenee (I) (linee verdi)

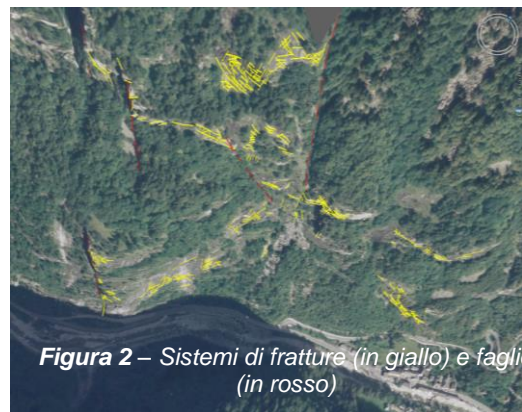


Figura 2 – Sistemi di fratture (in giallo) e faglie (in rosso)



Figura 3 – Sistemi di discontinuità (linee rosse) e diagrammi a rosa dei settori a maggiore densità di fratturazione (cerchi neri tratteggiati). I sistemi di frattura mostrano una direzione media N-S, E-W e WNW-ESE.

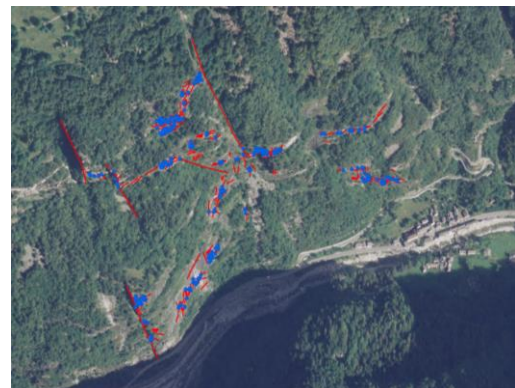


Figura 4a – Sistemi di discontinuità (linee rosse) ed intersezioni (punti in blu).

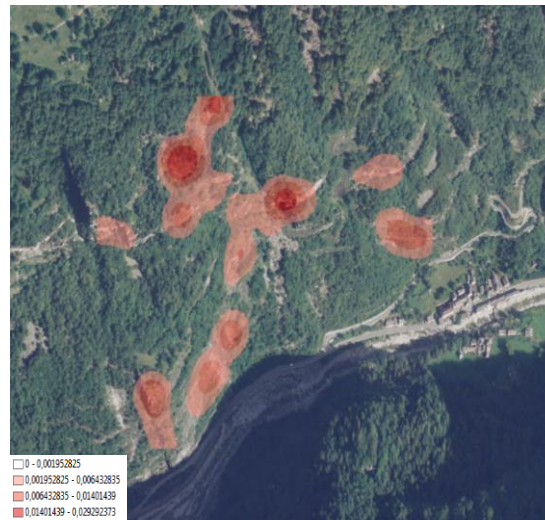


Figura 4b – Densità delle intersezione dei sistemi di discontinuità.

2) Modellazione rivolta alla valutazione delle aree di invasione tramite il metodo dei coni.

Per questo studio le aree a maggior fratturazione sono state utilizzate come dati di input per il modello dei coni (figura 5).

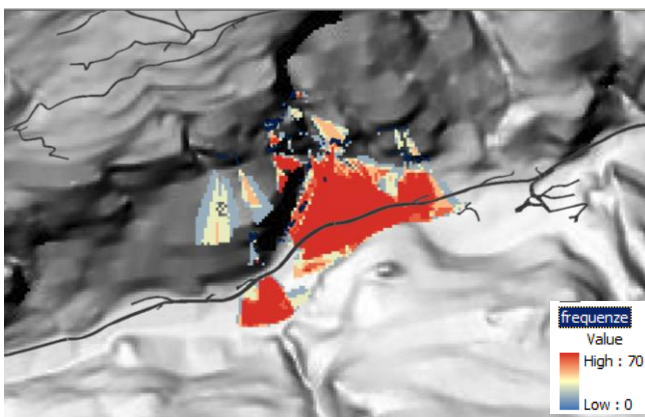


Figura 5a – Frequenze di arrivo.

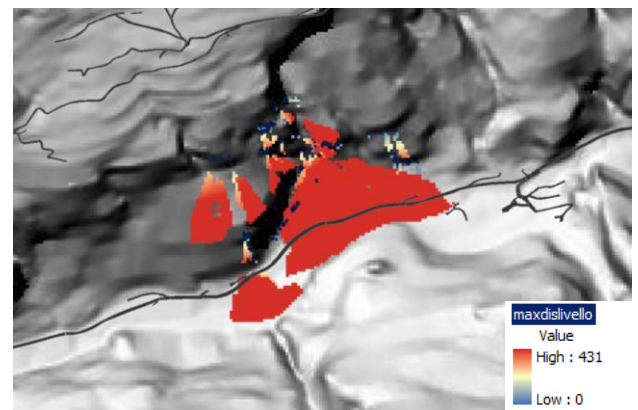


Figura 5b – Massimo dislivello

3) Rilievi di terreno

Le osservazioni di terreno hanno permesso di riconoscere 2 aree omogenee **Iselle ovest** e **Iselle nord** di cui si fornisce il *report* automatico ricavabile direttamente dal database di raccolta dati.



Allegato 2-1a : Metodo Proviaip, Iselle ovest



PROGETTO MASSA
Scheda di rilevamento di terreno



Dati Generali

Codice: 1055 **Località:** Iselle ovest **Data** 19/05/2011 **Ora:** 09:00

Tipo Area Omogenea Tipo 1 Tipo 2 Tipo 3 **Punto Osservazione:** pposto **Orientazione parete:** **dip dir:** 120 ±5
dip: 80±5

Descrizione:

Area test con svizzeri e francesi. Settore di parete a ovest dell'abitato di Iselle, in destra idrografica rispetto ad una marcata incisione definita da un piano di faglia; il settore si articola in 5 falesie principali. Sul fronte principale i cinematismi diffusi sono generalmente di piccole dimensioni. Alla base della parete, sulla scarpata soprastante la strada nazionale, sono presenti blocchi di maggiori dimensioni conseguenti al crollo di grosse instabilità probabilmente provenienti dalla parte alta del versante all'interno del canale generato dalla faglia; attualmente è evidente un grande blocco staccato a tergo posizionato sul fronte locale 230/85 definito dal piano di faglia stesso.

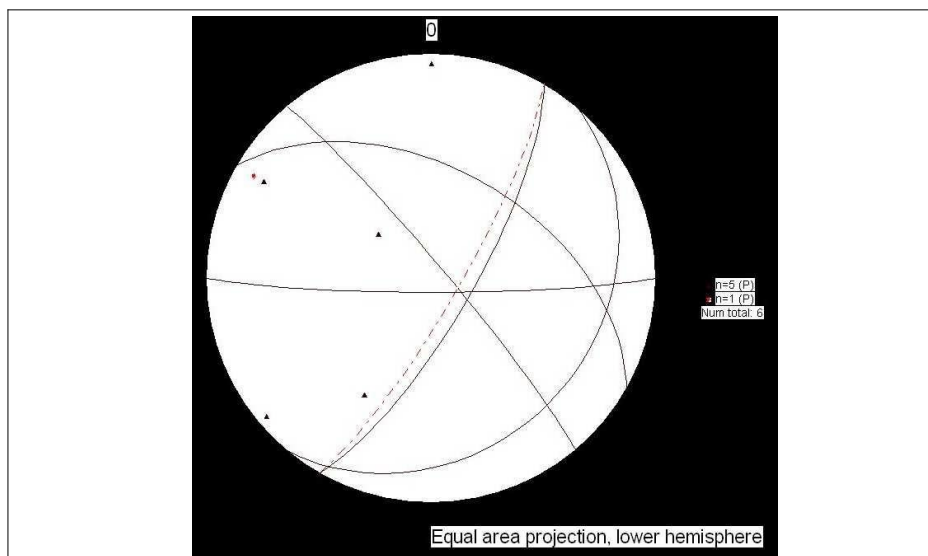
Litologia:

r. metamorfiche poco o nulla fogliate

Tipologia Ammasso <input checked="" type="radio"/> Massivo <input type="radio"/> Bloccoso <input type="radio"/> Tabulare <input type="radio"/> Colonnare <input type="radio"/> Irregolare <input type="radio"/> Frantumato	Grado di fratturazione <input type="radio"/> Sana <input checked="" type="radio"/> Fratturata <input type="radio"/> Rilasciata <input type="radio"/> Disarticolata	Grado di alterazione <input type="radio"/> Inalterata <input checked="" type="radio"/> Debolmente alt. <input type="radio"/> Moderatamente alt. <input type="radio"/> Fortemente alt. <input type="radio"/> Completamente alt.	Resistenza <input type="radio"/> Estremamente debole <input type="radio"/> Molto debole <input type="radio"/> Debole <input type="radio"/> Mediamente debole <input checked="" type="radio"/> Resistente <input type="radio"/> Molto Resistente <input type="radio"/> Estremamente resistente
---	---	--	---

<input checked="" type="checkbox"/> Blocchi in parete Forma Blocchi <input type="radio"/> Prismatica <input type="radio"/> Irregolare <input checked="" type="radio"/> Tabulare <input type="radio"/> n.d.	Volume blocchi (mc) max <u>2,5</u> med: <u>0,5</u>	<input checked="" type="checkbox"/> Blocchi Alla base Forma Blocchi <input type="radio"/> Prismatica <input type="radio"/> Irregolare <input checked="" type="radio"/> Tabulare <input type="radio"/> n.d.	Volume blocchi (mc) max <u>2,5</u> med: <u>0,5</u>
---	---	---	---

Dati Strutturali





Dati Strutturali									
Nome	Tipo	Dip. dir	Dip	Spaziatura	Persistenza	Scabrezza	Apertura	Riempimento	C. Idrauliche
a	F	50±5	85±5	(mA)>2m	(mA)>20m				
b	G	130±5	25±10	(mA)>2m	(A) 10m-20m				
c	G	120±5	75±5	(M) 20cm-60cm	(B) 1m-3m				
d	F	30±10	50±10	(mA)>2m	(M) 3m-10m				
e	F	180±5	85±5	n.d.	(mA)>20m				

Cinematismi									
nome	tipo	H (med/max)	L (med/max)	P (med/max)	V (med/max)				
R1	ribaltamento	0 / 10	0 / 3	0 / 5	0 / 150	Piano 1	<u> c </u>	Giunto traz.	<u> a </u>
note:	Un blocco tabulare che si stacca sul fronte locale definito dal piano di faglia; potrebbe verificarsi un ribaltamento oppure uno scivolamento.					Piano 2	<u> </u>	Svincolo	<u> </u>
P1	planare	0 / 0	0 / 0	0 / 0	0,5 / 2,5	Piano 1	<u> c </u>	Giunto traz.	<u> b </u>
note:						Piano 2	<u> </u>	Svincolo	<u> </u>

ALLEGATI FOTOGRAFICI



Panoramica delle falesie inserite nell'area omogenea Iselle ovest



Particolare della falesia inferiore



Allegato 2-1b : Metodo ProviaIp, Iselle nord



PROGETTO MASSA
Scheda di rilevamento di terreno



Dati Generali

Codice: 1056 **Località:** Iselle nord **Data** 19/05/2011 **Ora:** 09:00

Tipo Area Omogenea Tipo 1 Tipo 2 Tipo 3 **Punto Osservazione:** pposto **Orientazione parete:** **dip dir:** 170 ±10
dip: 65±10

Descrizione:

Area test con svizzeri e francesi. Settore di parete a nord dell'abitato di Iselle, in sinistra idrografica rispetto ad una marcata incisione definita da un piano di faglia; il settore si articola in 4 falesie principali, 3 immediatamente a monte dell'abitato e 1 in alto sul versante a valle del ripiano su cui sorge la frazione di Bugliaga. Sul fronte principale i cinematismi diffusi sono generalmente di piccole dimensioni. Sono presenti reti paramassi installate a ridosso della parete nella parte destra idrografica (in prossimità del canale di faglia) e subito a monte della strada secondaria che si stacca dalla nazionale.

Litologia:

r. metamorfiche poco o nulla foliate

Tipologia Ammasso

- Massivo
- Bloccoso
- Tabulare
- Colonnare
- Irregolare
- Frantumato

Grado di fratturazione

- Sana
- Fratturata
- Rilasciata
- Disarticolata

Grado di alterazione

- Inalterata
- Debolmente alt.
- Moderatamente alt.
- Fortemente alt.
- Completamente alt.

Resistenza

- Estremamente debole
- Molto debole
- Debole
- Mediamente debole
- Resistente
- Molto Resistente
- Estremamente resistente

Blocchi in parete

- Forma Blocchi**
- Prismatica
 - Irregolare
 - Tabulare
 - n.d.

Volume blocchi (mc)

max 3
med: 1

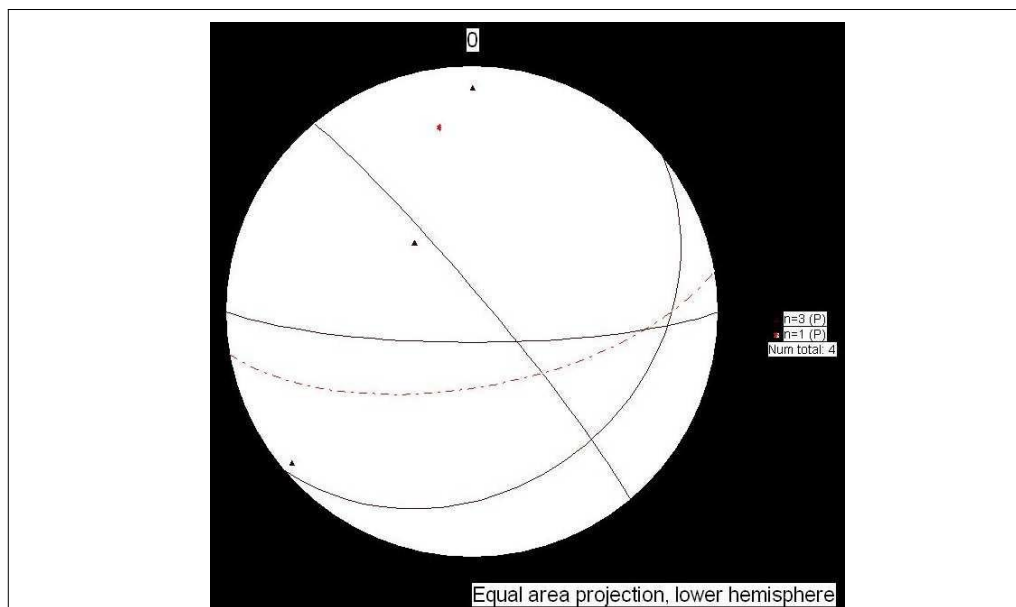
Blocchi Alla base

- Forma Blocchi**
- Prismatica
 - Irregolare
 - Tabulare
 - n.d.

Volume blocchi (mc)

max 3
med: 1

Dati Strutturali





Dati Strutturali

Nome	Tipo	Dip. dir	Dip	Spaziatura	Persistenza	Scabrezza	Apertura	Riempimento	C. Idrauliche
a	F	50±5	85±5	(mA)>2m	(mA)>20m				
b	G	140±10	30±20	(M)20cm-60cm	(A)10m-20m				
c	G	180±5	80±5	(M)20cm-60cm	(B) 1m-3m				

Cinematismi

nome	tipo	H (med/max)	L (med/max)	P (med/max)	V (med/max)		
P2	planare	1 / 1,5	2 / 2	0,5 / 1	1 / 3	Piano 1	<u>c</u> Giunto traz. <u>b</u>
note:						Piano 2	<u> </u> Svincolo <u>a</u>
<hr/>							
nome	tipo	H (med/max)	L (med/max)	P (med/max)	V (med/max)		
P1	planare	1 / 1,5	2 / 2	0,5 / 1	1 / 3	Piano 1	<u>c</u> Giunto traz. <u>b</u>
note:						Piano 2	<u> </u> Svincolo <u>a</u>



Allegato 2-1b1 : Metodo Proviaalp, Iselle nord foto

ALLEGATI FOTOGRAFICI



Panoramica del settore destro idrografico dell'area omogenea Iselle nord



Panoramica del settore sinistro idrografico dell'area omogenea Iselle nord

Annexe 2-2 : Méthodologie BRGM

Observations de terrain

L'étude débute par la réalisation d'un schéma global de la falaise sur papier avec annotation des informations concernant:

- la fracturation;
- les volumes de blocs produits;
- la présence ou non de végétation;
- la présence ou non d'aménagement;
- les zones homogènes (F) mises en évidence à partir des premières observations.



Figure 6 – Schéma global de la falaise

Identification des grandes familles de fractures

Les mesures sont prises à la boussole, à vue, depuis le point d'observation. 6 familles de fractures sont identifiées ainsi qu'une direction de schistosité dont l'azimut et la pente varient d'une extrémité à l'autre de la falaise, d'est en ouest.

- S0:** N30 40SE → Schistosité et aval pendage;
- F1:** N160 90° → Direction régionale de fracturation;
- F2:** N70 70N → Fracturation pénétrante et bien visible;
- F3:** N85 70N → Fracturation oblique à l'Ouest;
- F4:** N120 10NE → Forme les surplombs;
- F5:** N30-40 80SE → Plan de falaise Est;
- F6:** N40 90° → Plan de falaise Ouest.

Mise en évidence de blocs instables

Une attention particulière est portée sur des blocs ou des volumes potentiellement instables (figure 7). A titre d'exemple, 5 secteurs sont illustrés ci-dessous montrant des volumes instables:

- 1- zone densément fracturée individualisant des blocs, avec mise en surplomb de certains;
- 2- écailles évaluées comme potentiellement instables à long termes (100 m^3), découpées par une fracturation perpendiculaire au plan de falaise et paraissant légèrement décollées de celui-ci. Une rupture du pied de l'écaille pourrait la déstabiliser;
- 3- surplomb d'un bloc très volumineux, en crête sommitale de la falaise;
- 4- surplombs de blocs au niveau d'une vire rocheuse;
- 5- début de déstabilisation de blocs en surplomb, par basculement, sous une barre rocheuse. L'un d'eux ne semble plus « tenir » que par frottement de 2 génératrices.



Figure 7 – Localisation des blocs instables en falaise

Choix des zones homogènes (F)

A partir des observations de terrain et des mesures de fracturation, la falaise est découpée en 5 zones homogènes (F) représentées dans la figure 8.

Les 5 zones homogènes sont identifiées:

A: Zones de pied de falaise montrant des structures en aval pendage entre la schistosité et F4 à l'Est et entre le plan de falaise (F6) et F4 à l'Ouest avec estimation des volumes des blocs pouvant potentiellement être déstabilisés de 5 à 10 m^3 ;

B: Zone intermédiaire Ouest montrant un découpage marqué par une fracturation verticale et oblique (F3), ainsi que des surplombs pouvant produire des blocs d'environ $2-3 \text{ m}^3$ (observation des volumes découpés et des volumes des blocs dans les éboulis en pied);

C: Zone intermédiaire Est marquée par une fracturation verticale formant des surplombs,

mais absence apparente de fracturation oblique (F3). Il est également observé des dièdres pincés formés par deux directions de fracturation subhorizontales;

D : Zone triangulaire entre les grandes fracturations régionales (F1), dont l'une d'elle est une faille pénétrantes (F2). Zone très fracturée et mettant en évidence un aléa ponctuel avec une écaille (E1) estimée avec un volume de 100 m³ et une plus petite en pied (E2);

E : Zone supérieure marquée par des fractures régionales moins pénétrantes (F1) et des déstabilisations en crête de falaise.



A chaque zone homogène (F) on donne une susceptibilité de départ (F) en fonction des critères de pondération suivants:

- Pente de la falaise C1=3
- Hauteur de la falaise C2=2
- Aspect de la falaise C3=3
- Etat du glissement bancs sur bancs (si existence) C4=2
- Etat des surplombs (si existence) C5=2
- Présence d'eau dans la fracturation C6=1
- Nombre de dièdres et plans instables C7=3

Ce travail ne peut se faire qu'au bureau avec les informations acquises sur le terrain et des calculs réalisés sur SIG. Les zones homogènes (F) sont en effet redessinées sur SIG sur le fond topographique raster ou l'orthophoto. Les stéréogrammes sont également réalisés de retour au bureau sur PC.

Néanmoins, les observations faites précédemment nous indiquent la présence de blocs instables sur la falaise, et une structuration telle que la susceptibilité de départ (F) est qualifiée, de façon provisoire à ce stade, de moyenne.

La susceptibilité de départ (F) sera ensuite précisée en additionnant les notes arbitraires de chaque critère, pondérées par zone homogène (F), puis reclassée en 5 niveaux allant d'une susceptibilité «faible à nulle» à une susceptibilité «très forte».

Annexe 2-3 : Méthodologie MATTEROCK SHORT/LIGHT

L'étude du versant pilote de Iselle-dogana par le Crealp selon la méthode Matterock short/light s'est déroulée selon les étapes ci-dessous. L'analyse a été entièrement réalisée sur le terrain dans le temps imparti d'une heure.

a) Construction de l'agencement structural

	Orientation	Persistance [m]		Espacement [m]		Notes
		à petite échelle	à grande échelle	à petite échelle	à grand échelle	
J'1	130/70	--	20-50	0.5-1	5-10	J'1 forme le front falaise; plan de glissement/décollement
S	230/20 - horizontal	1-5	15	0.2-2	5	Schistosité; forme vires ou petits surplombs
J'2	240/75-90	1-2	20-50	0.5-1	5-10	Plan souvent subvertical,
J3	170/50-70	5-10	30	5	30	Parfois vires herbeuses entre la faille et le couloir de gauche
PS1	020/70	5-10	--	--	--	Plan secondaire visible à gauche
PS2	horizontal	--	--	--	--	Plan secondaire; surplombs

Tableau 1 – Caractéristiques structurales et geomécaniques des discontinuités du site pilote de Iselle-dogana

Les observations de terrain ont permis de reconnaître les principales familles de discontinuités qui affectent la falaise. L'agencement structural est unique pour tout le versant-pilote.

b) Identification des aléas (CH)

Un seul aléa diffus (CH) a été reconnu. Il englobe tout le versant-pilote et est caractérisé par 2 scénarios de rupture (CH):

1^{ère} scénario

- mécanismes de mobilisation: 1) rupture de surplomb; 2) glissement superficiel sur J'1 avec décollement sur S et cisaillement selon J'2; 3) glissement superficiel sur J3
- volume mobilisable: 1-2 m³
- taille de blocs: 0.1-1 m³; moyenne: 0.5 m³
- *dangerosité (CH)* : élevée

2^{ème} scénario

- mécanismes de mobilisation: glissement superficiel sur J3
- volume mobilisable: 10-20 m³
- taille de blocs: 0.5-2 m³
- *dangerosité (CH)* : moyenne

c) Détermination de la probabilité d'atteinte (CH) de la route

L'évaluation de la probabilité d'atteinte (CH) est faite à l'œil, selon les critères géomorphologiques du versant.

- Scénario 1 – bloc de 0.5 m³: probabilité d'atteinte (CH) moyenne. Moins de 20 % des blocs de 0.5 m³ atteignent la route du fait de la présence de forêt et d'éboulis à gros blocs → forte rugosité.
- Scénario 2 – bloc de 1 m³: probabilité d'atteinte (CH) moyenne. Moins de 20 % des blocs de 1 m³ atteignent la route pour les mêmes raisons que ci-dessus.

d) Détermination de la probabilité d'occurrence (CH)

L'évaluation de la probabilité d'occurrence (CH) est faite à l'aide du tableau 2:



Probabilité d'occurrence		Probabilité de mobilisation (dangerosité de l'aléa)		
		Elevée	Moyenne	Faible
Probabilité d'atteinte	Elevée	Elevée	Moyenne	Faible
	Moyenne	Moyenne	Faible	-
	Faible	Faible	-	-

Tableau 2 – Relation entre probabilité de mobilisation (dangerosité CH) et probabilité d'atteinte (CH)

Résultats: *probabilité d'occurrence (CH) moyenne* pour le scénario 1 et **faible** pour le scénario 2.

e) Détermination du **danger (CH)** au niveau de la route

Le *danger (CH)* est estimé en croisant la *probabilité d'occurrence (CH)* et l'énergie, laquelle est directement proportionnelle à la taille des blocs. La valeur de l'énergie au niveau de la route est estimée avec un facteur de chute **f** qui dépend de la morphologie du versant.

Formule: $f \cdot mgh$ (dans l'exemple le facteur de chute considéré est de 0.1-0.2)

Energie pour le scénario 1: $(0.5 \text{ m}^3 \cdot 2.6 \text{ t/m}^3) \cdot g \cdot 150$ (hauteur de chute moyenne) $\cdot 0.1 = 191 \text{ kJ} \rightarrow$ **intensité moyenne** (énergie entre 30 et 300 kJ)

Energie pour le scénario 2: $(1 \text{ m}^3 \cdot 2.6 \text{ t/m}^3) \cdot g \cdot 150$ (hauteur de chute moyenne) $\cdot 0.2 = 765 \text{ kJ} \rightarrow$ **intensité élevée** (énergie > 300 kJ).

Résultats:

Le scénario 1 génère un *danger (CH) moyen* de classe E (avec une probabilité d'occurrence moyenne)

Le scénario 2 génère un *danger (CH) élevé* de classe C (avec une probabilité d'occurrence faible).



Allegato 3 : Prodotti realizzati da Arpa Piemonte

(Risultati di progetto esterni al confronto tra i metodi Proviaalp, BRGM e Matterock short/light)

Integrazione tra i metodi: il *database* MASSA

Sulla base di quanto descritto nei capitoli precedenti emerge come sia difficoltoso riuscire a definire una metodologia di analisi unica e comune che soddisfi le esigenze dei diversi enti territoriali delle tre nazioni coinvolte nel progetto. Le tre metodologie analizzate, infatti, sebbene abbiano tutte come fine ultimo la valutazione speditiva della suscettibilità da crollo, affrontano il problema utilizzando approcci differenti e sono adattate alle differenti esigenze degli enti territoriali preposti alla pianificazione di ogni nazione. È altresì vero che proprio le differenze riscontrate tra i diversi metodi possono essere il loro maggior punto di forza: i tre metodi possono essere infatti considerati sotto diversi aspetti complementari tra loro, in quanto ognuno presenta caratteristiche e peculiarità proprie. Invece di realizzare una nuova metodologia condivisa che avrebbe presentato caratteristiche ibride e sarebbe risultata poco confacente alle necessità dei singoli, si è scelto di integrare tra loro le diverse metodologie all'interno di uno strumento unico, mantenendone però intatte le caratteristiche proprie di ognuna. In questo modo è facoltà del rilevatore scegliere se una delle metodologie proposte si adatta meglio alle proprie necessità o, al contrario, se applicare contemporaneamente le diverse metodologie per confrontarne i risultati.

Nell'ambito del Progetto Proviaalp (Arpa Piemonte & et al., 2008) al fine di contenere al massimo i tempi di raccolta dei dati su terreno e di analisi e riorganizzazione degli stessi in ufficio, era stato realizzato uno specifico *database* per la raccolta delle informazioni di rilievo di terreno. Il *database* permette di inserire i dati in modo guidato mediante l'utilizzo di *form*, limitando al massimo la possibilità di errori. Inoltre, sono stati implementati alcuni strumenti per la gestione della componente geografica, per il plottaggio dei dati strutturali, per la verifica dei dati inseriti e per l'esportazione dei dati in altri formati. Al fine di rendere disponibili questi strumenti a tutti i partner di progetto, le componenti di rilevamento di terreno delle metodologie francese e svizzera sono state inserite all'interno del *database* Proviaalp. In tal modo è possibile inserire tutti gli elementi utili alla valutazione dell'indice di distacco direttamente su terreno. Nel caso della metodologia italiana (Proviaalp) per poter calcolare un indice di distacco è comunque necessario elaborare i dati raccolti su terreno con i codici di calcolo sviluppati dal Politecnico di Torino; pur non escludendo questa possibilità, si è deciso di affiancare a questo metodo il calcolo di un indice di distacco semplificato, simile a quello francese, che fosse possibile ottenere contestualmente alla fase di rilevamento di terreno. In questo modo è possibile, con tutte e tre le metodologie ottenere già direttamente su terreno una prima stima della probabilità di distacco di blocchi rocciosi. Il *database* infatti, una volta inserite le informazioni essenziali, calcola in automatico i valori di output definiti secondo le tre metodologie.

Per semplificare la lettura del *form* i campi sono stati contraddistinti con colori ed etichette diverse: le etichette colorate in blu [F], in verde [I] e in bianco [CH] permettono di identificare le informazioni relative alla tre diverse metodologie. I campi gialli invece indicano le informazioni minime obbligatorie per poter calcolare gli indici propri di ogni metodologia.

L'accesso alle diverse componenti del *database* avviene mediante il pannello principale. La scheda relativa all'inserimento/consultazione dei dati è suddivisa in quattro diverse sezioni, ognuna relativa a diversi tematismi di dati. I campi e le sezioni sono accessibili dalle linguette posizionate nella parte alta della maschera.

- Area omogenea: (figura 1) contiene, oltre ai dati relativi all'inquadramento anagrafico dell'area analizzata (il tipo di area, il nome del rilevatore, la data di compilazione della scheda, l'orientazione media del fronte roccioso), le informazioni utili per la caratterizzazione delle *aree omogenee (I)*, come definite secondo il metodo italiano e francese. Una volta compilati i campi in giallo (obbligatori) è possibile calcolare l'*indice di distacco (I)* secondo i due metodi utilizzando il pulsante presente nella parte bassa del *form*.



Progetto MASSA - v2.1

Codice Scheda: 18 Sigla Settore: 1

Area Omogenea | Elementi Strutturali | Instabilità | Immagini | Descrizione

Dati generali
 Rilevatore: Arpa Piemonte | Data: 2012-10-01
 Località: Bardonecchia Melezet | Ora: 10:30

Caratteristiche parete
 Orientazione media: | Altezza max (m): 170
 dip dir (°): 115 +/- 10 | Altezza Falesia: >100m | F
 dip (°): 70 +/- 10 | Pendenza Falesia: >= 60° < 80° | F I

Blocchi in parete
 Forma prevalente: irregolare
 Volume [m3]: med 0.5 max 8
 n* instab. snet: due | F
 n* instab. terreno: due | I

Blocchi alla base
 Volume [m3]: med 0 max 0
 n* blocchi: nessuno | I

Caratterizzazione geologico-strutturale
 Tipologia di ammasso: irregolare | densità di intersezione: alta | I
 Litotipo: rocce carbonatiche | evidenze di distacchi progressi: alcune | I
 fratturazione falesia: media | F
 strapiombi: alcuni | F
 fratturazione franapoggio: assente o poco marcata | F
 acqua nelle fratture: asciutto | F

Indice di distacco: I 24 | F 36 | calcola

Record: 1 di 5

Figura 1 – Database di raccolta dei dati di terreno: sezione area omogenea (I)

- **Elementi strutturali:** (figura 2) raccoglie le caratteristiche gomecchaniche della famiglia di discontinuità descritte. Si tratta di informazioni opzionali per tutti e 3 i metodi speditivi ma indispensabili per utilizzare il metodo Proviaalp originale. Nella parte superiore vengono riportate, in forma raccolta, le principali informazioni relative alle discontinuità. Selezionando una delle righe è possibile inserire o consultare tutte le informazioni di dettaglio. Le informazioni sulla geometria delle strutture devono essere inserite seguendo lo standard *dip direction/dip* (immersione/inclinazione). Per maggior comodità di lettura, dopo aver inserito i dati in tale formato, questi vengono visualizzati anche nel formato *strike/dip* (direzione/inclinazione).

Progetto MASSA - v2.1

Codice Scheda: 18 Sigla Settore: 1

Area Omogenea | Elementi Strutturali | Instabilità | Immagini | Descrizione

Famiglie elementi strutturali

ID elemento	Sigla	Elemento	dip dir	dip	strike	dip
60	G1		230	55	N 140	55 SO
61	c2		90	45	N 180	45 NE

Dettaglio Famiglia selezionata
 ID elemento: 60 | Sigla: G1 | dir. immersione (°): 230 +/- 10
 Spaziatura: ampia (60cm-2m) | inclinazione (°): 55 +/- 20
 Persistenza: molto alta (>20m)
 Note: presenti localmente

Record: 1 di 5

Figura 2 – Database di raccolta dei dati di terreno: sezione elementi strutturali

- **Instabilità:** (figura 3) contiene i dati che descrivono i *cinematismi (I)* e le *instabilità ubicate (I)* individuati in parete. La sezione è strutturata in modo simile alla precedente: la parte superiore riporta l'elenco di tutte le instabilità individuate visualizzando le principali informazioni in forma tabellare, mentre nella parte inferiore è possibile consultare tutte le informazioni di dettaglio per l'instabilità selezionata. La sezione comprende le informazioni da rilevare per il calcolo della probabilità di accadimento, dell'intensità e della pericolosità ricavabili secondo il metodo Matterock short/light.

The screenshot shows the 'Instabilità' section of the software. At the top, there are tabs for 'Area Omogenea', 'Elementi Strutturali', 'Instabilità', 'Immagini', and 'Descrizione'. Below these is a table titled 'Instabilità associate' with columns for 'ID' and 'Sigla'. The table contains two rows: ID 3, Sigla I3 and ID 5, Sigla I5. Below the table is the 'Dettaglio Instabilità' section for ID 3, Sigla I3. It includes fields for 'Fronte instabilità', 'dip dir (°)', and 'dip (°)'. There are also checkboxes for 'Instabilità ubicata' and 'Cinematismo'. A 'Ruolo dei piani' section contains a table with columns for 'Piano di sciv.', 'Dip Dir', and 'Dip'. The 'Parametri' section includes fields for 'vol. dimensionamento [m3]', 'densità specifica [kg/dm3]', 'altezza di caduta [m]', and 'fattore di caduta'. On the right, there are sections for 'probabilità accadimento', 'intensità [kJ]', and 'pericolosità CREALP'. At the bottom, there is a 'Record' field and a 'calcola' button.

Figura 3 – Database di raccolta dei dati di terreno: sezione instabilità

- **Documentazione fotografica:** in questa sezione è possibile inserire e consultare l'eventuale documentazione fotografica con una breve descrizione. Nel campo note possono essere indicate ulteriori informazioni caratteristiche dell'area omogenea.
- **Descrizione:** in questa scheda è possibile inserire tutte le informazioni testuali descrittive relative all'area omogenea e ai suoi attributi.

Valutazione delle zone d'invasione da crollo: integrazione tra il metodo dei coni e la fratturazione dell'ammasso roccioso

La valutazione della pericolosità da frane di crollo è un compito complesso a causa dell'elevato grado di incertezza nella definizione dei parametri principali che determinano l'attivazione, la fase di *run-out* e soprattutto la localizzazione delle potenziali aree di origine. Inoltre, l'ampia estensione delle aree coinvolte rende difficile in tempi brevi una raccolta di informazioni sufficienti per condurre delle analisi dettagliate. Nel caso di grandi aree la procedura deve quindi necessariamente essere effettuata attraverso l'uso di metodi semplificati i cui risultati possono costituire la base di partenza per analisi di dettaglio.

Nel corso del progetto MASSA è stato sviluppato da Arpa Piemonte un metodo agile di analisi della suscettibilità da frane di crollo in parte già adottato in ambito del progetto Proviaalp. Si tratta di un metodo che fornisce carte di suscettibilità, sulla base dell'identificazione di aree maggiormente predisposte a frana di crollo e della valutazione delle aree di invasione di caduta blocchi. Questo metodo si basa sul presupposto che le rocce caratterizzate da un'elevata densità di fratturazione e quindi da uno stato di deformazione elevato, siano soggette, a parità di altre condizioni, a maggiore predisposizione all'instabilità da crollo. È un metodo applicabile a scala locale (falesia, versante) e/o a scala regionale (intera valle) in diversi contesti geografici e geologico-geomorfologici, ed adattabile all'oggetto in analisi quali ad esempio: strade, ferrovie, ponti, sentieri, aree urbanizzate, ecc.

Le carte di *suscettibilità (I)* sono state ottenute attraverso tre attività principali:

1. caratterizzazione dello stato di fratturazione del versante attraverso l'individuazione dei sistemi di frattura dell'ammasso roccioso ottenuto dall'interpretazione di ortofoto prospettive in 3D di dettaglio (figura 4a) e la realizzazione della carte di densità di intersezione della fratturazione attraverso l'analisi geostatistica (figura 4b e 4c). Lo scopo è di suddividere le diverse porzioni dell'ammasso roccioso in settori caratterizzati da diversi livelli di predisposizione a fenomeni di crollo;

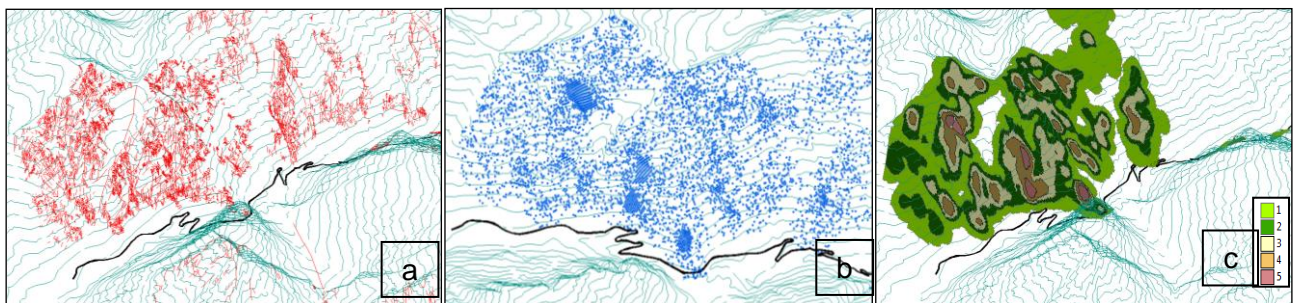


Figura 4 – Studio dello stato di fratturazione (esempio: sito della valle della Lombardia). a: carta della fratturazione, in rosso sono riportati i sistemi di fratture individuati su ortofoto prospettive in 3D di dettaglio; b: distribuzione delle intersezioni della fratturazione; c: carta della densità di intersezione della fratturazione (carta della densità di intersezione della fratturazione (le classi di colori corrispondono alle diverse classi di densità di fratturazione ottenute dall'analisi geostatistica in funzione dello stato di fratturazione generale dell'ammasso roccioso).

2. analisi delle aree di invasione per frane di crollo (metodo dello *shadow angle* o *metodo dei coni*). È un metodo empirico e veloce per valutare la massima zona di invasione, senza dover far riferimento a parametri di tipo meccanico, e si basa unicamente sulle caratteristiche geometriche del versante. In questo metodo ogni punto è posto nel baricentro di una cella del DEM ed è considerato origine di un cono di vista, con l'ipotesi che possa essere sorgente di un distacco. L'algoritmo realizzato in ambiente GIS, in ambito Massa (chiamato PROTO <http://www.adaptalp.org>), permette di definire la zona di *run-out* del crollo secondo il metodo descritto da Evans e Hungr, 1993. Il programma realizzato in linguaggio Python prende come dati in input: il DEM della zona in esame ed uno *shapefile* di punti in cui



vengono definiti: la quota di partenza, l'angolo di visibilità sul piano orizzontale, l'angolo di visibilità sul piano verticale e la distanza di visibilità. L'algoritmo produce in output tre *raster* della stessa dimensione (estensione e risoluzione) del DEM di partenza che indicano rispettivamente: la frequenza di punti di partenza che "vedono" la cella di arrivo, la quota del punto con il maggior dislivello e la media delle quote di tutti i punti che partecipano alla definizione della frequenza. Infine, viene prodotto uno *shapefile* di punti con tutte le indicazioni di x, y, z, id del punto di partenza e x, y, z, id del punto di arrivo (figura 5). Questo *shapefile* permette di conoscere cella per cella quali sono i punti di partenza che concorrono alla visibilità. L'algoritmo PROTO si basa su ipotesi semplificate che tutti i punti di partenza sono potenziali aree di origine;

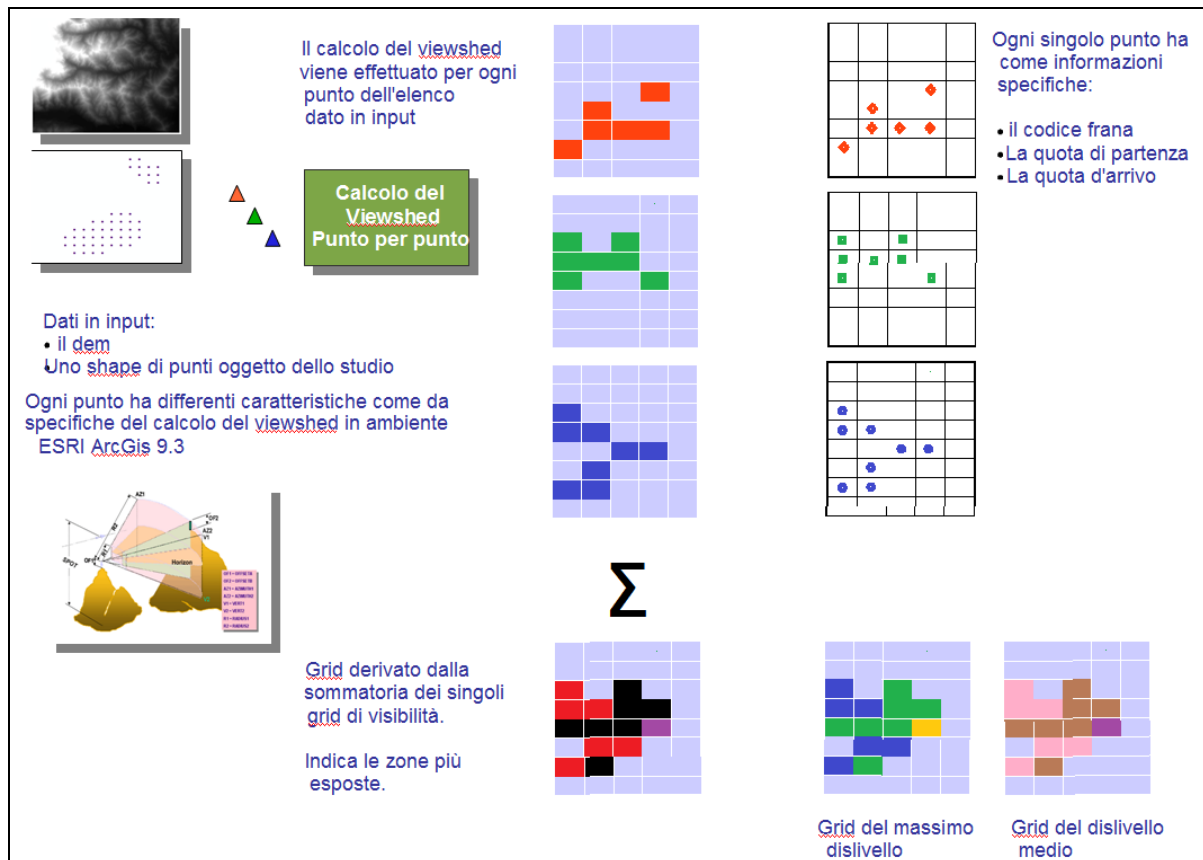


Figura 5– Schema logico dell'algoritmo PROTO

3. integrazione delle cartografie della fratturazione e il metodo dello *shadow angle* in cui le ubicazioni dei blocchi potenzialmente instabili sono ottenuti dalla carta della densità di fratturazione ed utilizzati come dato di input all'algoritmo PROTO (figura 6). Questa integrazione ha la finalità di produrre carte di suscettibilità vincolate all'assetto geologico-strutturale del versante in esame (figura 7).

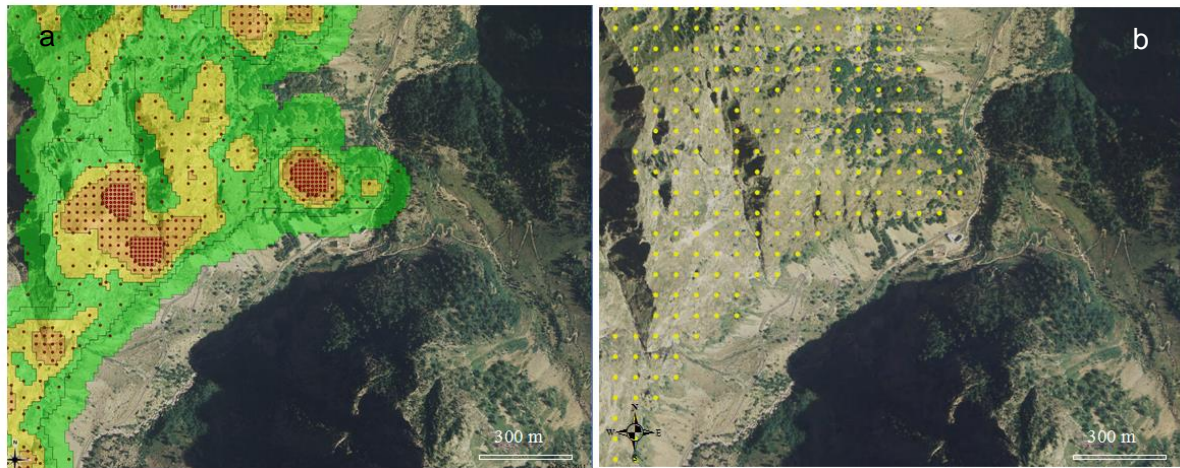


Figura 6 – a: esempio di carta della distribuzione dei punti di partenza in funzione della densità di fratturazione (la densità dei punti di partenza è scelta in funzione dei valori ottenuti dall'analisi geostatistica); b: esempio di distribuzione regolare dei punti di partenza vincolato unicamente alle caratteristiche geometriche del DTM.

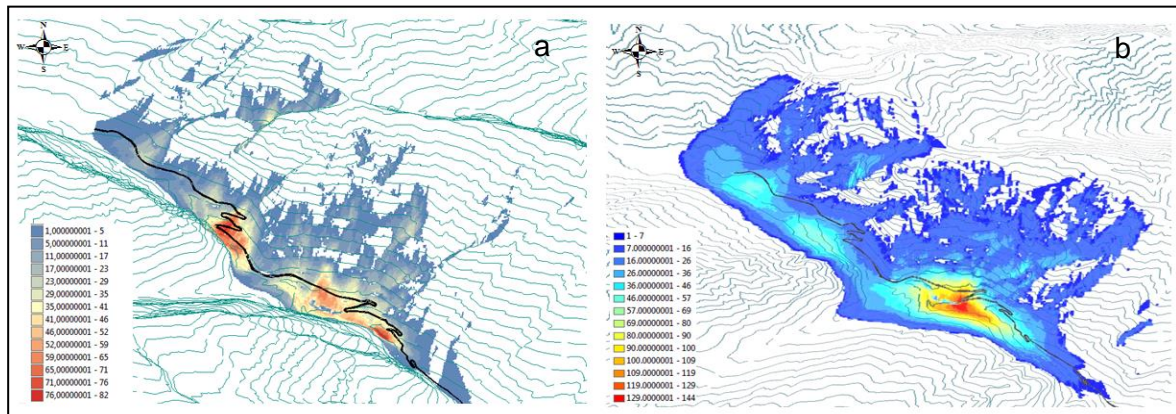


Figura 7 – Carta delle frequenze di arrivo (valle della Lombarda); a: esempio di carta di suscettibilità vincolata allo stato di fratturazione; b: carta di suscettibilità ottenuta dal solo metodo dei coni. La legenda riporta le frequenze di arrivo.

Riferimenti bibliografici

Arpa Piemonte, Cemagref, Politecnico di Torino, Consorzio Forestale Alta Valle di Susa (2008) – *Progetto n° 165 Provalp. Protezione della viabilità alpina. Relazione Finale*. Interregg IIIa 2000-2006 Alpes Latines. Litografia Viscardi, Alessandria. ISBN 978-887479-070-8

Evans S.G., Hungr O. (1993). *The assessment of rockfall hazard at the base of talus slopes*. Canadian Geotechnical Journal, vol. 30(4), pp. 620-636.



Allegato 4 : Rilevamento e monitoraggio in ambito emergenziale

(Attività di progetto esterna al confronto tra i metodi Proviaalp, BRGM e Matterock short/light)

Introduzione

Nell'ambito del progetto MASSA è stata avviata una collaborazione tra il Servizio Protezione Civile della Provincia di Torino ed il CNR IRPI, U.O.S. di Torino, finalizzata all'analisi delle attività di rilevamento e monitoraggio da compiersi nelle fasi immediatamente successive ad un fenomeno di crollo.

L'analisi si è dunque concentrata su quelle attività che possono essere svolte immediatamente dopo l'evento, in un lasso di tempo di 24-72 ore. Tale lasso temporale rappresenta, di fatto, il periodo nel quale sono solitamente chiamati ad intervenire i servizi di protezione civile per una prima valutazione dell'evento e per una definizione delle azioni preliminari di salvaguardia e messa in sicurezza del territorio e della popolazione. In seguito ad un evento di crollo, infatti, le prime fasi d'intervento hanno come oggetto la comprensione del fenomeno e l'analisi circa la possibilità che esso possa ripetersi nel breve e medio termine. In queste fasi spesso l'accesso ai luoghi da cui si è generato il crollo può essere estremamente difficile, se non impossibile, per molti fattori tra i quali le condizioni meteorologiche avverse o il pericolo imminente di nuovi distacchi. In tale ambito, lo studio metodologico ha cercato di individuare una serie di operazioni che fossero in grado di supportare sia la fase preliminare di analisi dello stato dei luoghi che le operazioni di interdizione o messa in sicurezza delle aree colpite o potenzialmente coinvolgibili.

Dato il ridotto intervallo di tempo a disposizione per la messa in opera delle procedure e la spesso scarsa disponibilità di accesso diretto alle aree di innesco, la ricerca si è concentrata sulla possibilità di utilizzare sistemi topografici in grado sostanzialmente di rilevare con elevato dettaglio lo stato dei luoghi e monitorarne l'evoluzione nel tempo. Per riuscire ad attuare una soluzione di questo genere sono stati analizzati i numerosi sistemi di rilevamento e controllo delle deformazioni presenti sul mercato, cercando di differenziarli in base al prodotto ottenibile, alle modalità di impiego ed ai tempi di processamento e restituzione. L'impiego di sistemi di monitoraggio nell'ambito dello studio dei crolli in roccia è un aspetto molto delicato e complesso a causa delle caratteristiche intrinseche del processo che deve essere studiato. L'elevata velocità del processo e la scarsa presenza di segnali premonitori rendono infatti solitamente molto difficile la messa in opera di sistemi di controllo altrimenti molto diffusi nel campo del monitoraggio di altre tipologie di fenomeni di dissesto. Nel caso specifico, lo studio si è concentrato su quei sistemi che possono essere utilizzati nel breve periodo per supportare le prime fasi post evento fornendo dei dati oggettivi a chi è chiamato a prendere delle decisioni per la gestione del rischio residuo. In tale ambito, si è ritenuto opportuno suddividere le metodologie analizzate in due macro categorie dividendo i sistemi in grado di restituire un rilevamento ad alta risoluzione dell'area indagata o un suo monitoraggio. In tutti e due i casi la metodologia proposta si basa essenzialmente sull'impiego di sistemi topografici.

Metodologie atte al rilevamento di aree soggette a crolli

Per quanto riguarda le attività di rilevamento, l'obiettivo principale è la produzione di un modello digitale ad alta risoluzione dell'area in esame con sistemi che non necessitano di un accesso diretto al sito. In particolare, per il progetto MASSA sono stati presi in considerazione sia la versione terrestre che aviotrasportata dei sensori LiDAR (Abellan et al., 2009, 2010) ed una particolare tecnica basata sul processamento di immagini digitali ad alta risoluzione che presenta numerosi vantaggi rispetto all'approccio stereoscopico classico (Furukawa & Ponce 2007). Tutti e tre i metodi sono stati appositamente testati sui siti campione qui di seguito presentati per effettuare una valutazione comparata ed un'analisi di tipo metodologico. In base ai dati raccolti è stato possibile riassumere una serie di indicazioni generali circa l'impiego di tali sistemi in aree interessate da crolli in condizioni di emergenza. Per ogni metodo sono stati descritti i prodotti ottenibili, i principali pregi e limitazioni e, soprattutto, è stata fornita un'indicazione relativa al tempo necessario per l'esecuzione delle



operazioni di rilievo e restituzione del dato (tabella 1 e figura 1). A tal proposito, si sottolinea come le specifiche qui di seguito elencate debbano essere considerate indicative e quindi soggette a variazioni anche importanti in funzione delle condizioni specifiche dei singoli siti. Tra gli elementi maggiormente variabili c'è sicuramente il fattore tempo: le indicazioni di durata delle operazioni sono infatti da riferirsi a condizioni di rilevamento ideali, senza la presa in considerazione di stop derivanti da condizioni meteorologiche particolarmente avverse che potrebbero rendere estremamente difficile la fase iniziale di rilevamento.

METODOLOGIA	PRODOTTI ATTESI	PREGI	LIMITAZIONI
Fotogrammetria digitale ad alta risoluzione	Immagine solida ad alta risoluzione derivante da una nuvola di punti estratta dalla mosaicatura delle immagini da cui viene generato un DSM	L'analisi di dettaglio del sito in modalità realtà virtuale consente una maggior cura nell'individuazione dei sistemi di fratturazione e permette una prima individuazione e misurazione delle aree instabili	Nuvola di punti a bassa risoluzione; necessita di un supporto topografico per la georeferenziazione che aumenta la complessità delle operazioni
LiDAR terrestre	DTM ad altissima risoluzione (sino a maglie regolari centimetriche) da cui generare una serie di prodotti numerici derivati (curve di livello, <i>shaded relief</i>); produzione di ortofoto	Particolarmente indicato per il rilevamento di porzioni ridotte di territorio con particolare riferimento ad aree subverticali scarsamente vegetate. Parziale eliminazione della presenza di coni d'ombra attraverso l'unione di più scansioni riprese da punti diversi	Il suo impiego dipende dalla disponibilità di punti di presa idonei; bassa capacità di penetrazione della vegetazione che lo rende poco indicato per aree boschive. Rilevamenti eseguibili solamente in condizioni meteorologiche favorevoli
LiDAR aviotrasportato	DTM ad alta risoluzione (sino a maglie regolari decimetriche) da cui generare una serie di prodotti numerici derivati (curve di livello, <i>shaded relief</i>); produzione di ortofoto	Particolarmente indicato per il rilevamento di vaste aree di territorio anche molto vegetate; particolarmente indicato per il rilievo di aree a morfologia complessa che prenda in considerazione non solo il punto di distacco ma anche la zona di <i>run out</i>	Il suo impiego è poco indicato per il rilevamento di falesie a causa dell'orientamento nadirale del sistema di presa. Rilevamenti eseguibili solamente in condizioni meteorologiche favorevoli

Tabella 1 – Tabella riassuntiva che prende in considerazione i prodotti ed i principali vantaggi e svantaggi dei metodi presi in considerazione

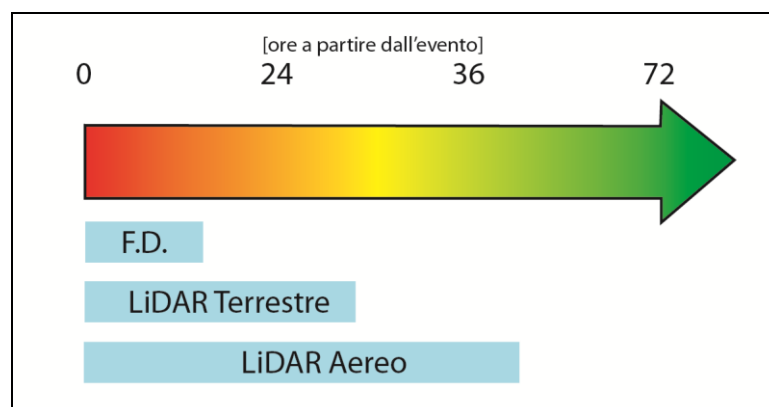


Figura 1 – Valutazione indicativa del tempo necessario per la restituzione dei risultati ottenibili dai diversi metodi presi in considerazione; le valutazioni proposte si intendono a partire dall'arrivo del team di intervento sul luogo delle operazioni senza che intercorrano periodi di tempo caratterizzati da condizioni meteorologiche sfavorevoli. F.D. = fotogrammetria digitale ad alta risoluzione



Passando ad un approccio multi-temporale in grado di valutare nel tempo l'evoluzione dell'area soggetta a crollo è necessario introdurre il concetto di monitoraggio. Anche in questo caso, il lasso di tempo preso in considerazione per l'installazione e l'utilizzo della strumentazione è estremamente ridotto e quindi il numero di sistemi impiegabili si riduce bruscamente, prendendo in considerazione quasi esclusivamente sistemi in grado di misurare le deformazioni superficiali. Prima di entrare nel merito dei sistemi analizzati va tuttavia premesso come l'impiego di strumenti di monitoraggio per il controllo di aree soggette a crolli sia estremamente complesso e a volte non consigliabile in quanto il carattere impulsivo del crollo rende non consone gran parte delle strumentazioni in commercio. Nell'ambito dei crolli esistono tuttavia situazioni geologico-strutturali molto eterogenee che possono portare alla generazione di fenomeni simili ma con processi differenti. Come si vedrà per il caso di studio B, in base alla tipologia di fenomeno esistono tuttavia sistemi di monitoraggio che possono essere impiegati anche in questi frangenti. A prescindere dal tipo di sensore impiegato, uno degli elementi determinanti è legato alla frequenza di campionamento ed alla velocità di campionamento ed analisi del dato; i sistemi in *real time* sono da preferire ad altri sistemi differiti. Qui di seguito sono stati inseriti i sistemi che possono essere ritenuti maggiormente efficaci soprattutto nel brevissimo termine (tabella 2 e figura 2). In particolare, gli estensimetri a filo (così come anche i tilometri, soprattutto con sensori MEMS), il SAR nella sua versione terrestre e la stazione totale possono essere considerati tra i sistemi maggiormente indicati per l'impiego in contesti emergenziali legati a fenomeni di crollo.

METODOLOGIA	PRODOTTI ATTESI	PREGI	LIMITAZIONI
Estensimetri a filo/barra	Misura diretta, talvolta in tempo reale, dell'apertura di una determinata discontinuità; solitamente organizzati in reti di sensori lungo le discontinuità più importanti	Si tratta di un sistema di misura diretto ad altissima frequenza che, con opportuni accorgimenti, può essere abbinato ad un sistema di allarme. Si tratta di uno dei pochi sistemi che possono essere utilizzati in <i>real time</i>	Misurazione monodimensionale la cui precisione può risentire delle variazioni degli agenti esterni (temperatura); l'installazione presuppone un accesso diretto al sito
GBInSAR	Misurazione ad alta frequenza delle variazioni di distanza tra il target e lo strumento lungo la <i>line of sight</i> (LOS). Il risultato è spesso presentato come una mappa di deformazione	Si tratta di un sistema di monitoraggio areale particolarmente indicato per aree subverticali poco vegetate che raggiunge risoluzioni in termini di spostamento molto elevate; l'installazione non prevede nessun accesso diretto al sito	Misurando esclusivamente la componente lungo la LOS, la corretta orientazione dello strumento rispetto alla direzione di spostamento presunta dell'oggetto monitorato è fondamentale; può essere complessa la fase di analisi ed interpretazione dei dati
Stazione totale robotizzata	Misurazione nelle tre componenti di una serie di target installati in punti rappresentativi delle aree da monitorare	Consente la misurazione nelle tre componenti di una serie di target. Può essere usato per riconoscere eventuali trend evolutivi anche in aree che hanno componenti di movimento molto eterogenee	Strumento spesso non adatto per un monitoraggio di fenomeni di crollo in quanto la frequenza di campionamento e l'accuratezza possono non essere sufficienti

Tabella 2 – Tabella riassuntiva che prende in considerazione i prodotti ed i principali vantaggi e svantaggi dei metodi presi in considerazione

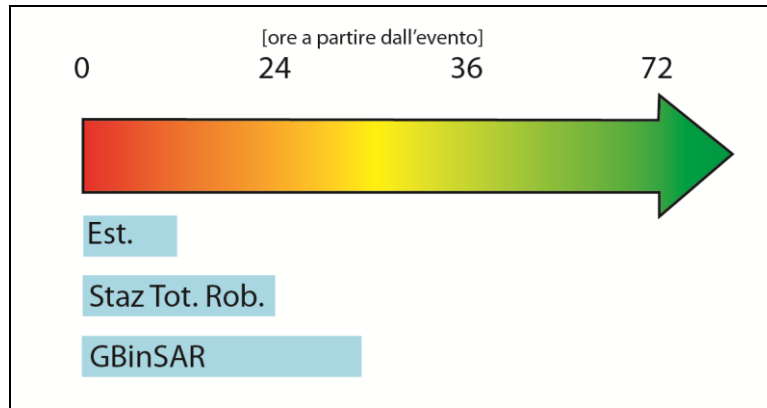


Figura 2 – Valutazione indicativa del tempo necessario per la restituzione dei risultati ottenibili dai diversi metodi presi in considerazione; le valutazioni proposte si intendono a partire dall'arrivo del team di intervento sul luogo delle operazioni e prendono in considerazione anche i tempi di calibrazione del sistema

Scenari di riferimento

Per poter testare le diverse metodologie sono stati presi in considerazione dei siti campione che potessero essere considerati come rappresentativi di situazioni differenti nei quali fossero avvenuti dei fenomeni di crollo. I due siti impiegati si trovano in Provincia di Torino e rispettivamente nei comuni di Sauze di Pinerolo (CASO A: loc. Ponte della Rabbiosa – figura 3a) e Quincinetto (CASO B: loc. Lacou – figura 3b). Qui di seguito vengono brevemente descritti i tratti salienti dei siti, si rimanda al sito web del progetto per una completa analisi delle attività svolte. Il primo caso è rappresentativo di una situazione tipica, dove un ammasso roccioso subverticale è caratterizzato da un elevato grado di fratturazione che determina l'insorgenza di instabilità locali. Il secondo caso è invece più articolato, in quanto il fenomeno di crollo deve essere inserito in un contesto più complesso legato alla presenza di un ampio fenomeno gravitativo caratterizzato da tassi di movimento differenti.

Il Caso A è stato considerato un esempio di un fenomeno di crollo tipico, nel quale è difficile poter installare repentinamente un sistema di monitoraggio ma è fondamentale, sin dalle prime battute, poter disporre di un *dataset* il più possibile completo su cui basare le valutazioni circa la stabilità dell'ammasso roccioso ed il riconoscimento di ulteriori settori instabili. In questo caso, quindi, sono da preferire, almeno nelle prime 24-36 ore attività che siano in qualche modo di supporto alle prime valutazioni attraverso la creazione di immagini solide navigabili. Il caso specifico ha evidenziato come spesso le avverse condizioni meteorologiche rendono difficile l'accesso diretto al sito e rendono necessario l'impiego di sistemi di rilevamento e monitoraggio da remoto.

Il Caso B vuol essere invece un esempio che evidenzia come talvolta un fenomeno di crollo possa essere indice della presenza di un fenomeno di instabilità decisamente più ampio. In questo caso, data la complessità dell' reale coinvolto e la presenza di un fenomeno gravitativo di più ampie dimensioni nell'area sorgente, si è ricorsi ad una tecnica mista che ha previsto un rilievo LiDAR integrato terrestre ed aereo e la realizzazione di una rete di monitoraggio delle deformazioni presenti nell'area a monte del distacco.

Il *dataset* così ottenuto è stato impiegato sia per un'iniziale valutazione dello stato del fenomeno ma anche come base per approfondimenti successivi, tra cui la simulazione delle traiettorie di caduta massi e l'eventuale progettazione di opere di difesa.

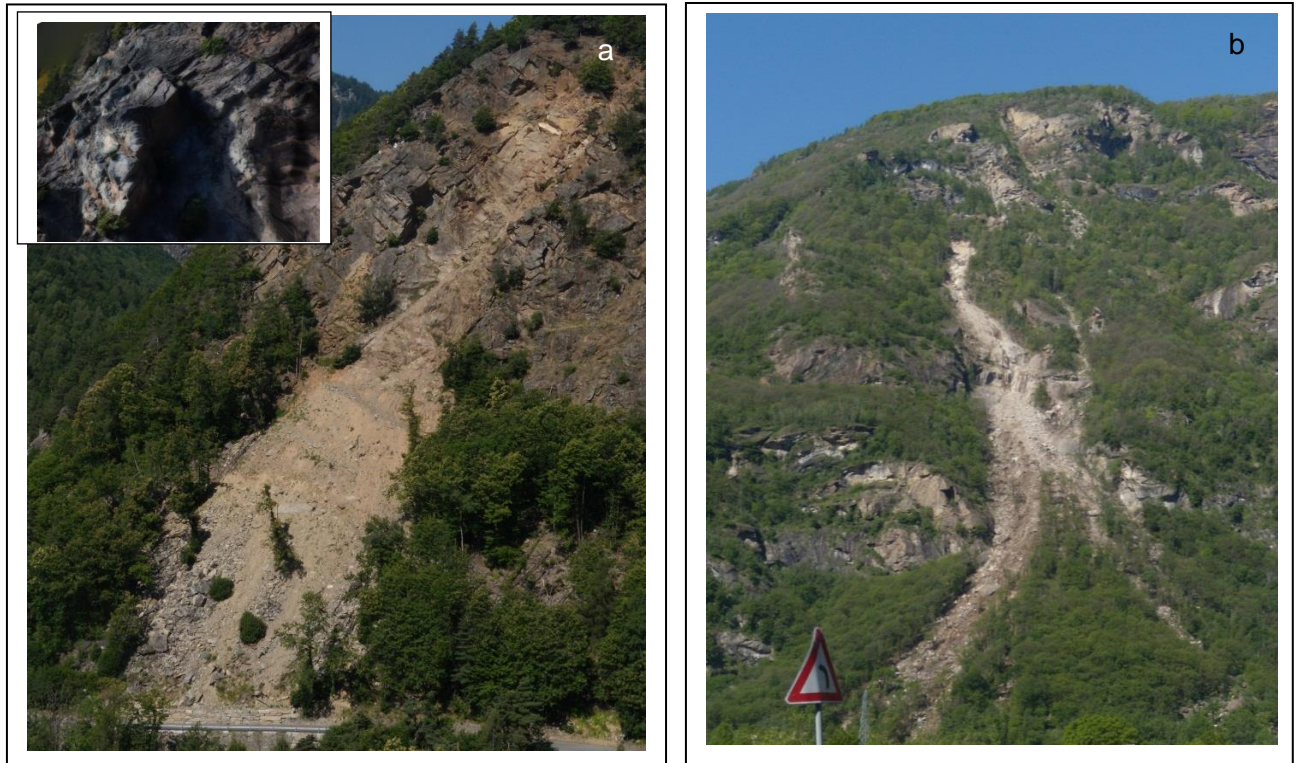


Figura 3 – a) CASO A, in loc. Ponte della Rabbiosa (Comune di Sauze di Pinerolo - TO); b) CASO B in loc. Lacou (Comune di Quincinetto – TO). In alto a sinistra nell'immagine 3a un estratto dall'immagine solida navigabile.

Conclusioni

La realizzazione di un sistema di pronto intervento consente alla Protezione Civile di fornire un sostegno alle decisioni che gli amministratori si trovano a dover prendere nel più breve tempo possibile al fine di salvaguardare l'incolumità delle persone e dei beni minacciati dall'evento, ma non solo, la definizione dell'evoluzione dello stesso sia in termini temporali che spaziali consente ai sindaci e quindi alla popolazione coinvolta di minimizzare il disagio patito e di supportare la provincia e le amministrazioni coinvolte nelle decisioni riguardanti gli interventi che si possono realizzare in emergenza per la messa in sicurezza dei luoghi.

Le analisi svolte consentono poi di ricalibrare le pianificazioni di emergenza esistenti sul nuovo stato di fatto rendendo i piani di protezione civile comunali elastici ed aderenti alle continue mutazioni del territorio nel rispetto e nella salvaguardia della popolazione e delle infrastrutture coinvolte.

Riferimenti bibliografici

Abellán, A., Calvet, J., Vilaplana, J.M., Blanchard, J. 2010. Detection and spatial prediction of rockfalls by means of terrestrial laser scanner monitoring. *Geomorphology* 119:162–171.

Abellán, A., Jaboyedoff, M., Oppikofer, M.T., Vilaplana, J.M., 2009. Detection of millimetric deformation using a terrestrial laser scanner: experiment and application to a rockfall event. *Nat. Hazard Earth Syst. Sci.* 9: 365-372.

Furukawa, Y., Ponce, J. 2007 Accurate, dense and robust multi-view stereopsis, paper presented at Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, IEEE Comput. Soc., Minneapolis, Minn.

Allegato redatto da: Daniele Giordan (CNR-IRPI), Furio Dutto e Connie Contrafatto (Provincia di Torino – Servizio Protezione Civile).



alcotra
Ensemble au-delà les frontières
Insieme oltre i confini 2007-2013



FEDER
Fonds Européens pour le Développement
Régional
FESR
Fondo Europeo di Sviluppo Regionale



VOLET 2 : Détection, caractérisation et surveillance des aléas d'éboulements de volume intermédiaire (10^3 m^3 - 10^5 m^3) - Individuazione, caratterizzazione e monitoraggio della pericolosità da crollo di taglia intermedia (10^3 m^3 - 10^5 m^3)

Action 2 : Ecoute géophysique des sites reconnus instables - Monitoraggio geofisico delle instabilità rocciose

Coordinateur : Denis JONGMANS (ISterre, UJF - Grenoble)





Action 2 : Ecoute géophysique des sites reconnus instables

Monitoraggio geofisico delle instabilità rocciose

I. OBJECTIFS DE L'ACTION 2	95
II. CHOIX DES SITES.....	96
II.1. Site de Rubi	97
II.2. Site de la Suche.....	98
II.3. Site de la Praz	98
II.4. Site du Cervin	100
II.5. Site des Arches.....	101
II.6. Site de Madonna del Sasso	102
II.6. Conclusion sur les sites instrumentés	104
III. INSTRUMENTS UTILISES	104
III.1. Sismologie	104
III.2. Extensométrie.....	105
III.3. Clinométrie	106
III.4. Station météorologique	107
III.5. Lidar	107
V. METHODES	108
IV.1. Détection d'évènements	108
IV.2. Extraction de la réponse dynamique.....	109
IV.3. Direction du mouvement.....	110
IV.4. Suivi temporel.....	110
IV.5. Intercorrélation avec les autres données	110
V. RESULTATS	110
V.1. Site de Rubi.....	111
V.2. Site de La Praz.....	112
V.3. Site de la Suche	113
V.4. Site du Cervin.....	114
V.5. Site des Arches	116
V.6. Site de Madonna del Sasso.....	118
VI. BILAN OPERATIONNEL.....	119
VII. CONCLUSIONS SCIENTIFIQUES.....	120
VIII. RÉFÉRENCES.....	121
IX. ANNEXES : LISTE DE PUBLICATIONS ISSUES DU PROJET MASSA	122



I. OBJECTIFS DE L'ACTION 2

L'action 2 du volet 2 du projet (Détection, caractérisation et surveillance des aléas d'éboulements de volume intermédiaire) concerne l'écoute géophysique des sites reconnus instables et caractérisés par des volumes intermédiaires (entre 10^3 m^3 et 10^5 m^3). L'objectif principal était de développer une nouvelle méthode de reconnaissance et de surveillance à partir d'un réseau permanent de capteurs multiples (sismique, déformation, température, pression d'eau branchés sur la même centrale d'acquisition afin de suivre l'évolution de plusieurs paramètres caractéristiques de l'endommagement des compartiments rocheux en profondeur. En particulier, l'enregistrement permanent du bruit de fond sismique a permis de déterminer et de suivre les fréquences de résonance des compartiments rocheux en fonction du temps. Cette méthodologie a été testée sur trois sites expérimentaux choisis dans un répertoire de sites potentiellement instables, établi dans le cadre de la phase préparatoire du projet après une étude géotechnique et instrumentale préliminaire (étude de reconnaissance). En parallèle de ce développement, un système de suivi d'écoute sismique et de détection d'événements a été émis en place sur le site du Cervin, dans un milieu d'accès délicat et aux conditions climatiques rudes.

L'action 2 a été structurée de la manière suivante :

Année 2010 : phase de reconnaissance

Première proposition par les partenaires de 9 sites reconnus comme instables et susceptibles de générer des volumes de taille intermédiaire.

Sélection de 5 sites susceptibles d'être instrumentés sur la base de critères géotechniques et géophysiques recensés lors de visites et de mesures temporaires.

Complément d'instrumentation du site du Cervin avec la pose de 3 géophones courte-période.

Année 2011 : phase d'instrumentation permanente et d'écoute géophysique

Premier semestre : Instrumentation longue durée de 3 sites retenus permettant l'enregistrement en continu de données sismiques, de mesures de déplacement, et de données météorologiques.

Surveillance et écoute géophysique des sites.

Remise en route et maintenance du système d'écoute du Cervin.

Année 2012 : phase d'écoute géophysique et d'interprétation

Surveillance et écoute géophysique des sites.

Traitement des données et mesures des fréquences de résonance.

Interprétation de l'évolution des fréquences de résonance sur les différents sites.

Nouvelle remise en route et maintenance du système d'écoute du Cervin.

Enregistrement de bruit de fond en continu durant 30 minutes.

Les résultats obtenus depuis 2010 sur un site (Les Arches, France) non instrumenté dans le cadre du projet MASSA mais présentant un volume intermédiaire potentiellement instable ont été incorporés au rapport.



II. CHOIX DES SITES

Suite aux orientations définies lors la réunion de démarrage du projet (19/01/2010), les sites potentiels suivants ont été proposés et présentés lors de la réunion de l'Action 2, qui s'est tenue à Turin le 19 mars 2010.

France : Saorge, Valabres, Grasse, Rubi, La Praz
Italie : Cervino, San Giovanni, Madonna del Sasso
Suisse : La Suche

A l'exception du Cervin (difficilement accessible), ces sites ont été visités en mai et en juin 2010 par l'ensemble des participants à l'Action 2 et les 4 sites suivants ont été sélectionnés pour la phase de reconnaissance géophysique lors de la réunion du 29/06/2010 à Courmayeur :

- Rubi (France)
- La Praz (France)
- La Suche (Suisse)
- Madonna del Sasso (Italie)

Leur localisation est donnée à la Figure 1.

Parallèlement à la reconnaissance géophysique de ces quatre sites, la remise en état et le complément d'instrumentation (pose de géophones courte-période) ont été réalisés sur le site du Cervin en été 2010.

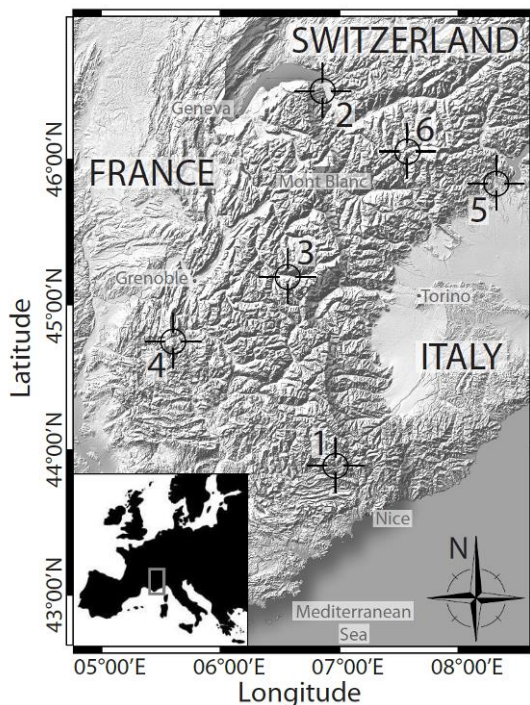


Figure 1 Carte de localisation des sites d'étude.
1.Rubi, 2.la Suche, 3.la Praz, 4.Les Arches, 5. Madonna del Sasso, 6. Cervin.

Lors de la phase de reconnaissance géophysique, les quatre sites ont montré un potentiel pour la méthode d'écoute géophysique du bruit de fond sismique. Leurs caractéristiques sont détaillées dans les paragraphes 2.1.1 à 2.1.5. Trois sites ont alors été choisis pour être instrumentés sur une longue durée : Rubi, La Praz et La Suche.

II.1. Site de Rubi

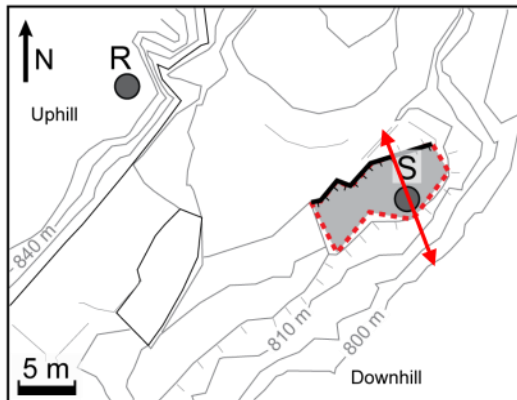


Figure 2 Schéma du site de Rubi. Le massif rocheux est indiqué en blanc, le compartiment instable est en gris, entouré par les pointillés rouges. La fracture arrière principale est représentée par la ligne noire épaisse. La position des capteurs Référence (R) et Site (S) est indiquée par le rond gris.

Le site de Rubi se trouve sur la rive droite du Cians, dans le département des Alpes-Maritimes (06), à environ 800 m d'altitude. Le versant, fortement penté, est composé d'une série monotone de sédiments rouges stratifiés péliciques, à grains fins datant du Permien, et appartenant à l'unité du dôme de Barrot (Faure-Muret and Fallot 1957). Le pendage est parallèle à la pente (N65°), avec une inclinaison de 20° vers le SE. L'épaisseur totale de cette formation géologique peut atteindre 1000 m. La colonne instable (entourée en pointillés rouge, notée S, Figure 2 et 3), d'un volume d'environ 4500 m³, est découpée du massif sur l'ensemble de sa hauteur par une discontinuité sub-verticale d'ouverture métrique orientée N65° (notée RF, Fig. 3). En direction du NW, on trouve une vire d'une dizaine de mètres de largeur surmontée par une falaise quasi-verticale d'une trentaine de mètres de hauteur (C, Fig. 3). En direction du Sud, la colonne instable surplombe un pierrier d'une cinquantaine de mètres linéaires (SC, Fig. 3), qui se termine quelques dizaines de mètres en amont de la Route Départementale 26. Deux familles principales de discontinuités sub-verticales (pendage 80 à 90°) affectent le massif, d'orientation N20-30° et N100-120°, respectivement.

La morphologie de la colonne et la structure du massif rocheux suggèrent un mécanisme de rupture potentiel en basculement et/ou en glissement en pied. Comme l'argilite est un matériau assez peu perméable, les circulations hydrologiques se font préférentiellement au sein du réseau de fractures. La paroi est orientée vers SE, et donc exposé au soleil tout au long de l'année. En hiver, couverture neigeuse est faible et peu durable. Les mesures de déplacements conduits sur la période 2001-2011 ont mis en évidence un mouvement cumulé de 13 cm de direction moyenne N160° et d'inclinaison 30° vers l'aval.

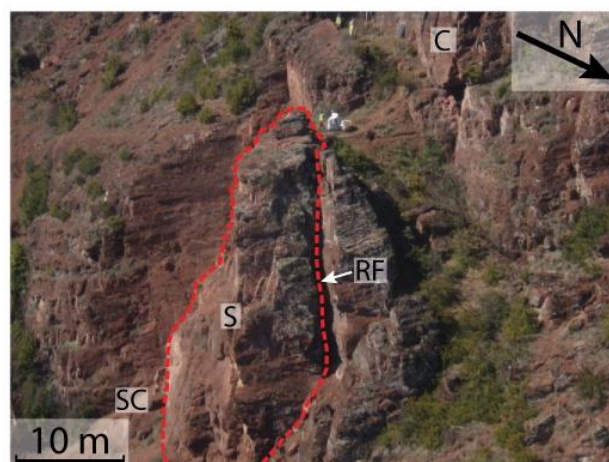


Figure 3 Photographie aérienne oblique du site de Rubi, prise en direction du SW. La colonne instable (S) est entourée en pointillés rouges. D'amont en aval sont localisés la falaise amont (C), la fracture arrière principale (RF) et le pierrier (SC).

II.2. Site de la Suche

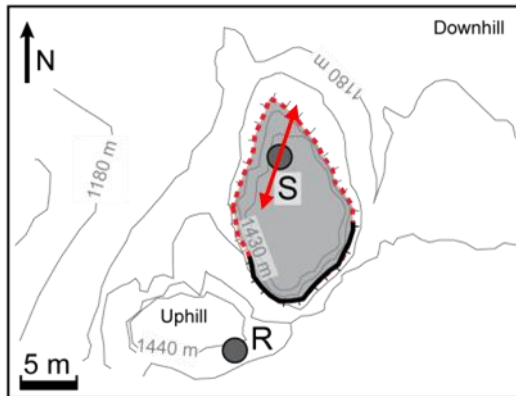


Figure 4 Schéma du site de La Suche. Le massif rocheux est indiqué en blanc, le compartiment instable est en gris, entouré par les pointillés rouges. Le réseau de fractures arrière est représenté par la ligne noire épaisse. La position des capteurs Référence (R) et Site (S) est indiquée par le rond gris

Le second site (La Suche), est situé à une altitude d'environ 1400 m en rive gauche de la vallée du Rhône, quelque kilomètres en amont du Lac Léman (ou Lac de Genève), dans le Canton du Valais, Suisse. Ce versant appartient à l'unité des Préalpes médianes. La falaise en question est composée de lits sub-horizontaux de calcaires

massifs, s'étendant du Jurassique Inférieur au Paléocène (Badoux 1965).

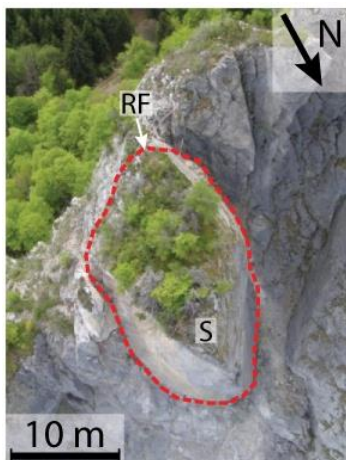


Figure 5 Photographie aérienne oblique du site de La Suche, prise en direction du SW. La colonne instable (S) est entourée en pointillés rouges. La fracture arrière principale (RF) est pointée par la flèche blanche (RF)

L'aléa instable étudié est une colonne d'environ 70 m de hauteur, 28 m de largeur et 15 m d'épaisseur, pour un volume total d'environ 30000 m³ (entourée en rouge, Fig 4 et 5). La colonne est délimitée par deux familles de fractures sub-verticales, orientées N40° et N 165°. Sur son versant SE, le compartiment instable est séparé du massif par un réseau complexe de fractures sub-verticales de faible ouverture, tandis que le versant SW est bien marqué par une fracture ouverte sub-verticale N120-135°. La colonne est affectée en pied par une discontinuité N100°,70°NE, ce qui crée un plan de glissement potentiel. L'aléa étudié est relativement actif, comme en attestent les chutes de blocs/éboulements réguliers depuis les années 1960, avec en particulier quatre événements significatifs entre 1969 et 1999. Le suivi extensométrique du site opéré par le CREALP (Centre de Recherche en Environnement ALPin – Réseau Guardaval) depuis 2005 met en évidence une ouverture vers le NW de magnitude environ 3 mm/an.

II.3. Site de la Praz

Le troisième site, La Praz, est situé dans la partie médiane de la vallée de la Maurienne, en Savoie (France). Il affecte le versant ubac (exposé au Nord), à environ 1230 m d'altitude. Le matériau est composé d'une alternance de bancs gréseux d'épaisseur métrique et de schistes micacés, intensément fracturés et datant du Carbonifère (Debelmas *et al.* 1989). Le pendage est rentrant, d'inclinaison 20-30° vers le Nord, pratiquement perpendiculaire à l'axe de la vallée.

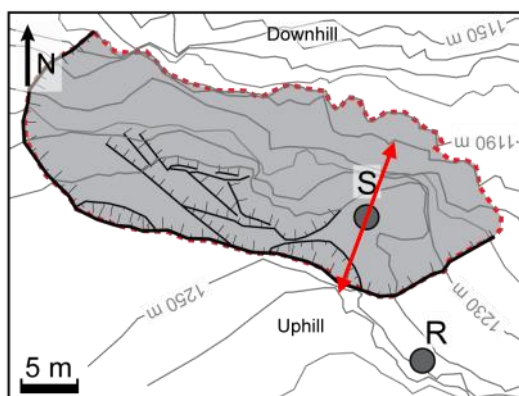


Figure 6 Schéma du site de La Suche. Le massif rocheux est indiqué en blanc, le compartiment instable est en gris, entouré par les pointillés rouges. Le réseau de fractures arrière est représenté par la ligne noire épaisse. La position des capteurs Référence (R) et Site (S) est indiquée par le rond gris.

Le massif est affecté par une fracturation N90-100°/55-70°N, ce qui est pratiquement conforme à la pente. Ces fractures prédécoupent le versant, et conduisent à la formation d'un amas de blocs avec des volumes unitaires pouvant aller jusqu'à 10 m³ dans les grès. Cette zone instable (délimitée par les pointillés rouges, Fig 6 et 7) est séparée du massif par un escarpement arrière d'une dizaine de mètres de hauteur. Le mécanisme de rupture pressenti est un glissement fractionné.

Dans sa partie Ouest, le compartiment instable est limité par une importante fracture sub-verticale N130-150°, tandis que la morphologie du côté Est, avec des blocs très désordonnés, suggère l'occurrence d'un éboulement antérieur. La limite aval du glissement est marquée par une vire supposée stable à environ 1190-1195 m d'altitude. L'ensemble du volume instable est estimé à environ 13000 m³, pour une épaisseur variant de 7 m à localement 15 m. Des éboulements unitaires jusqu'à 1000 m³ se sont produits sur ce site au cours du 20^{ème} siècle, tandis que trois événements récents se sont produits entre 2002 et 2009 pour des volumes de quelques centaines de mètres cube. Le site a été équipé de 9 extensomètres en 2006, et les mesures de vitesse de déplacement montrent des variations spatiales très fortes (de quelques mm/an à plus de 40 mm/an localement), reflétant la structure fortement hétérogène du matériau en mouvement.

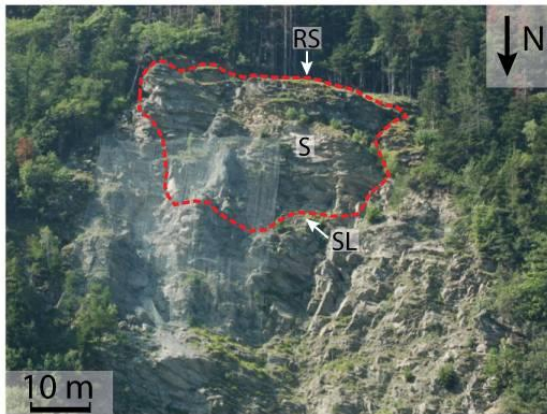


Figure 7 Photographie prise en contrebas du site de La Praz, en direction du Sud. Le compartiment instable (S) est entouré en pointillés rouges. La vire stable à la cote 1190-1195 m est désignée par la flèche SL, tandis que l'escarpement arrière principal est montré par RS.

Trois profils de tomographie sismique en ondes P ont été entrepris sur le site de la Praz, afin de définir la géométrie du compartiment rocheux potentiellement instable et de caractériser la fracturation du matériau. Seuls les résultats du profil amont-aval est présenté ci-après, Figure 8. Avec ses 57.5 m de longueur, il a permis d'investiguer à la fois le compartiment instable, situé en dessous de l'escarpement principal (RS), mais aussi le massif supposé stable, en amont (Figure 7). La source sismique consiste en des impacts répétés de marteau sur une plaque métallique posée à même le sol.

Les mouvements du sol ont été enregistrés par un réseau de 24 géophones verticaux de fréquence de coupure 4,5 Hz. L'inversion des temps de trajet a été conduite selon l'algorithme SIRT (Simultaneous Iterative Reconstruction Technique, Dines and Lyttle 1979), implémenté dans le logiciel SARDINE (Demagnet *et al.* 2000). Le modèle de départ est considéré homogène, avec une vitesse d'ondes P initiale de 3000 m/s. La concordance entre le modèle calculé et les données est estimée à l'aide du critère RMS (Root Mean Square) :

$$RMS = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{1}{N} \left(\frac{t_i - t_{ic}}{t_i} \right)^2} \quad (1)$$

avec N le nombre de rais sismique, t_i et t_{ic} le $i^{\text{ème}}$ temps de trajet, mesuré et calculé, respectivement. L'inversion a été conduit jusqu'à la 5^{ème} itération, aboutissant à un RMS de 6.1 %. L'image de la tomographie est présentée à la Figure 8, sur laquelle sont indiqués le compartiment rocheux instable (S) et l'escarpement arrière principal (RS). On observe une augmentation de V_p avec la profondeur, passant de 300 m/s en surface à environ 2800 m/s à 25 m de profondeur. Si l'on considère que $V_p < 1000$ m/s caractérise des roches

extrêmement déstructurées, l'épaisseur du compartiment instable peut être estimée autour de 12 à 15 m, en bon accord avec les observations morphologiques. La tomographie a aussi mis en évidence que cette zone superficielle de faible vitesse s'étend aussi en amont de l'escarpement arrière principal, laissant penser qu'une évolution régressive du glissement rocheux est possible

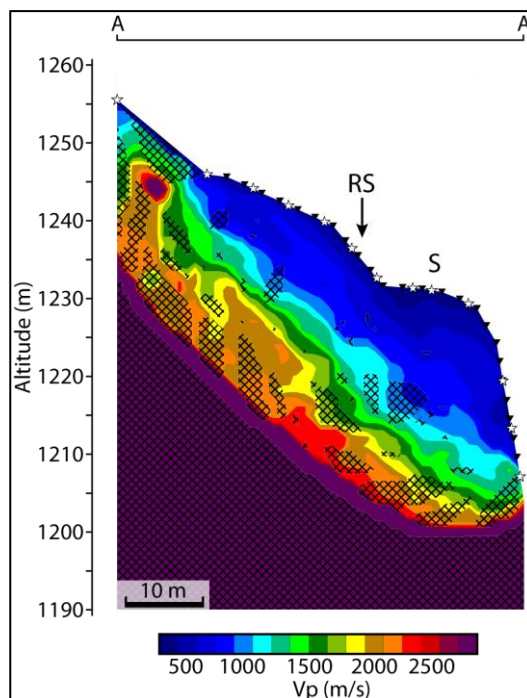


Figure 8 Tomographie sismique en ondes P du site de La Praz, dans le sens de la pente. 5 itérations, RMS = 6.1 %.

II.4. Site du Cervin

Le site du Cervin est situé dans la partie haute de la Valtournenche, en Vallée d'Aoste (Italie), le long de la voie normale italienne de montée au sommet (4478 m) en correspondance de la *Capanna* J.A. Carrel (3829 m). Le refuge est accessible à partir de la ville de Breuil-Cervinia (2012 m) par un parcours de montagne (2h de randonnée et 4h d'escalade).

Figure 9 Contexte géographique et localisation du site (photos: V. Coviello) : a) la pyramide du Cervin (4478 m), le site d'étude est indiqué par un cercle rouge; b) détail de la cabane J.A. Carrel et de l'amas rocheux situé à proximité du refuge.



Le choix de ce site a été fait en raison des éboulements rocheux qui ont eu lieu ces dernières années dans la région et en raison de la présence du refuge, qui fournit un support logistique très important. Les travaux de consolidation du refuge exécutés en 2004 et 2005 ont permis la réalisation de quatre forages ensuite utilisés pour placer des capteurs. Pendant l'été 2003 aux températures exceptionnellement élevées, le Cervin a été théâtre de nombreux éboulements rocheux qui se sont produits sur les territoires italien et suisse et qui ont intéressé des volumes allant de quelques mètres à quelques centaines de mètres cubes de roche. L'événement le plus important est celui de la "Cheminée", qui a eu lieu le 18 Août 2003 juste en dessous du refuge J.A. Carrel : la chute de plusieurs centaines de mètres cubes de roche a révélé la présence de glace dans les fractures et a montré le rôle des

conditions thermiques sur ces phénomènes d'instabilité.

Le refuge J.A. Carrel se trouve sur l'arrêt Sud-ouest du Cervin (Figures 9 et 10), qui à cette altitude est formé par des méta-granites intensément fracturés et désintégrés, prédisposant aux détachements de rocher. Quatre principaux systèmes de discontinuité sont identifiés lors des relevés structuraux : une schistosité qui se plonge vers l'Ouest-Sud-ouest ; un premier système de fractures parallèles orientées vers la crête (NE-SO) ; un deuxième système oblique par rapport à la crête (ONO-ESE) ; un troisième plongé vers les quadrants de Sud-ouest et Nord-ouest.

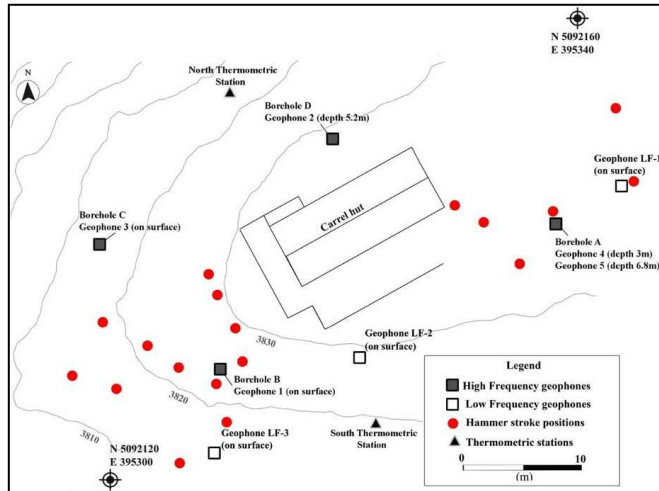


Figure 10 Plan du système de monitoring installé au refuge J.A. Carrel (positions des géophones et des capteurs de température de ARPA VdA) et des points de test.

II.5. Site des Arches

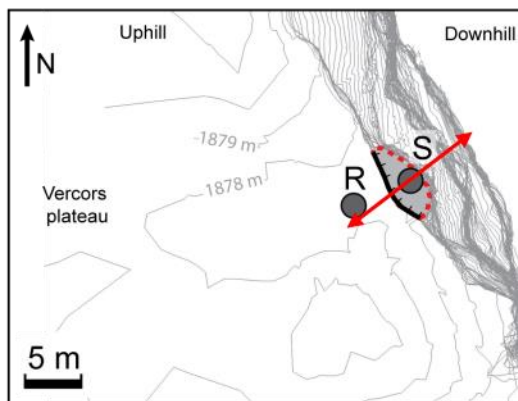


Figure 11 Schéma du site des Arches. Le massif rocheux est indiqué en blanc, le compartiment instable est en gris, entouré par les pointillés rouges. La fracture arrière est représentée par la ligne noire épaisse. La position des capteurs Référence (R) et Site (S) est indiquée par les cercles gris.

Le site des Arches est situé dans le département de l'Isère (France), dans la partie Sud du massif du Vercors à une élévation d'environ 1900 m. En direction de l'Est, ces hauts-plateaux se terminent par une falaise composée de bancs subhorizontaux de calcaire bioclastique, d'épaisseur métrique sur les 100 m les plus hauts ; et de strates de marnes d'une dizaine de centimètres d'épaisseur dans sa partie aval, moins raide (Arnaud *et al.* 1974 ; Lévy *et al.* 2010).

L'analyse structurale montre que le matériau est affecté par deux familles de discontinuités sub-verticales à l'échelle métrique, orientées N30-50° et N110-120°. La colonne est découplée du massif par une fracture arrière ouverte N145°, indiquée par le trait noir gras sur la Figure 11. Le compartiment rocheux instable mesure environ 30 m de hauteur, 15 m de largeur pour une épaisseur de 5 m au sommet, ce qui résulte en un volume total d'environ 1000 m³ (entouré de rouge, Figures 11 et 12). Des venues d'eau fréquentes sont observées en pied de colonne. La géométrie de la colonne et de sa fracture arrière suggère une rupture en basculement, avec éventuellement du glissement en pied. Dans un tel contexte géologique, le facteur principal qui contrôle la stabilité est la proportion de ponts rocheux le long de la surface de rupture, comme mis en évidence par Frayssines et Hantz (2006) dans



leur étude portant sur 25 éboulements survenus dans des falaises calcaires dans les Alpes françaises.

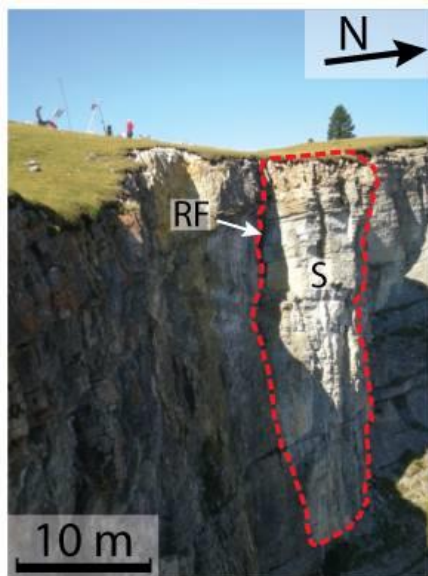


Figure 12 Photographie de l'écaïlle des Arches prise en direction du NW. Le compartiment instable (S) est entouré en pointillés rouges. La fracture arrière est pointée par la flèche (RS).

II.6. Site de Madonna del Sasso

Le site de Madonna del Sasso (Province de Verbania, Italie) se situe sur la rive occidentale du lac d'Orta, à une altitude d'environ 650 m. La partie sommitale du versant est surmontée par un sanctuaire reconnu pour son intérêt artistique. Des indices de mouvements sont visibles de manière évidente depuis les années 80.

La pente de Madonna del Sasso est constituée d'un éperon granitique d'orientation E-W, limité sur les versants N, E et S par des parois sub-verticales d'environ 200 m de hauteur (Figure 14). Quatre familles principales de fractures affectent le site (Figure 13), orientées N75, 110 (K1); N80, 0° (K2); N15, 150° (K3) et N75, 50° (K4) et d'espacement généralement métrique ; avec des ouvertures millimétriques à centimétriques. Aucune présence notable d'eau n'a été repérée sur le site.

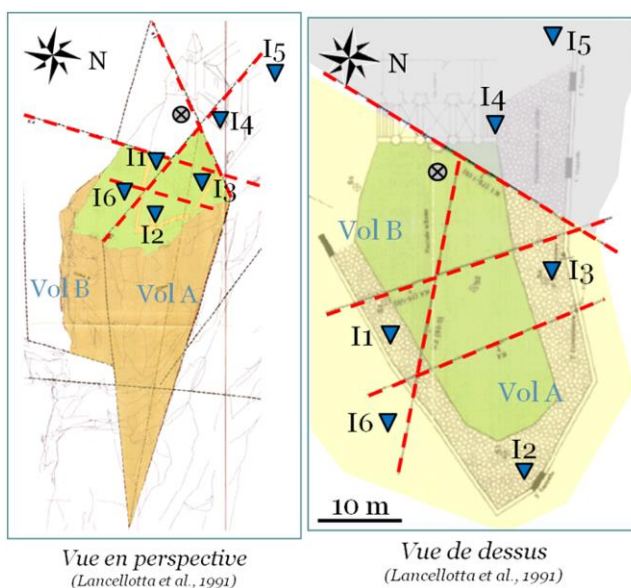


Figure 13 Schémas du site de la Madonna del Sasso. (a) A gauche, vue oblique, (b) à droite, vue de dessus. Les principales familles de fracture sont indiquées en pointillés rouges. Les deux compartiments instables instrumentés sont repérés par (Vol A) et (Vol B). La position des capteurs sismologiques est indiquée par les triangles bleus.

Le volume A (env. 12000m³, Fig. 14) est délimité par le plan K3 à sa base, et par le plan K2 côté Sud. K1 et K4 marquent sa limite côté amont. Ce compartiment rocheux est bloqué en pied, et l'instabilité ne peut se déclencher que si ce soutien venait à manquer. Le volume B



(7500 m³, Fig. 14) est délimité par les plans K4 côté amont, K2 au Nord et K3 à la base. Des reconnaissances sont organisées depuis 1981, qui ont montré la présence exclusive de granite plus ou moins fracturé.

Des inclinomètres ont été installés dans les années 90, des déplacements maximaux de l'ordre de 10 mm ayant été relevés et probablement liées à des variations thermiques saisonnières. A partir de septembre 1991, des extensomètres ont été installées autour du volume A, 5 sur la fracture K1 et 5 sur le fracture K2. Durant les quelques années de fonctionnement, les mouvements maximaux relevés étaient de l'ordre de 3-4 mm/an en partie haute du bloc A, et les mouvements minimaux étaient relevés en partie basse, avec environ 1 mm/an. Le volume instable présente un mouvement saisonnier lié à la température. L'ouverture des fractures est maximale pendant la période hivernale, minimale pendant l'été. A la fin d'un cycle annuel, l'ouverture résiduelle n'est plus que de 2 mm/an.

Le détail des relevés extensométriques est donné dans le Tableau 1 ci-après.

Instrument	Période d'opération	Vitesse de déplacement relevée	Remarques
Inclinomètres	1981-1991	10 mm max	Variations thermiques saisonnières
Extensomètres / joints	1991-1994	Jusqu'à 3-4 mm/an	Déplacements liés en partie aux variations thermiques saisonnières, avec une composante résiduelle de 2 mm/an
Extensomètres à câble	2007-2010	Jusqu'à 3 mm/an	Variations thermiques saisonnières
Base topographique	2006-2010	Jusqu'à 2,2 mm/an	Variations thermiques saisonnières
Base distomètre	2007-2009	20 mm max	Une seule mesure

Tableau 1 : Suivi des déplacements des compartiments rocheux de Madonna del Sasso

Les enjeux sur le site de Madonna del Sasso sont le parvis panoramique du sanctuaire, point d'attraction touristique majeur, une route communale et une zone d'activités en pied de versant. Un merlon a été édifié en pied de pente pour réduire le risque.



Figure 14 Photographie du site de Madonna del Sasso prise en direction de l'Ouest. Les compartiments instables (A) et (B) sont entourés en pointillés rouges.



II.6. Conclusion sur les sites instrumentés

Les sites instrumentés pour tester la méthode d'écoute géophysique présentent une large variété de contextes géologiques : roches sédimentaires carbonatées (La Suche et Les Arches), roches sédimentaires détritiques (Rubi), roches détritiques plus ou moins métamorphisées (La Praz), roches magmatiques (Madonna del Sasso) et roches métamorphiques (Cervin) ; cf. Tableau 2 ci-après.

De même, les morphologies des compartiments instables sont très variables, avec trois colonnes rocheuses relativement élancées (Rubi, La Suche, Les Arches), un compartiment plus massif (Madonna del Sasso) et deux pentes intensément fracturées (La Praz, Cervin).

Les volumes mis en jeu ainsi que le mécanisme de rupture supposé diffèrent selon les sites.

Un résumé des caractéristiques de chacun est donné dans le Tableau 2.

Site	Nature de la roche	Morphologie	Mécanisme de rupture	Volume (m ³)	Orientation de la fracture arrière (°)
Rubi	Pélites	Colonne	Basculement/glissement en pied	4500	65
La Suche	Calcaire	Colonne	Basculement/glissement en pied	30000	indéfini
La Praz	Alternance grès-schistes	Amas de blocs	Glissement fractionné	13000	90-100
Cervin	Méta-granites	Roche déstructurée	?	?	indéfini
Les Arches	Calcaire	Colonne	Basculement/glissement en pied	1000	145
Madonna del Sasso	Granite	Deux blocs massifs	Basculement	12000 + 7500	indéfini

Tableau 2 : Caractéristiques des compartiments instables et leur instrumentation. Les azimuts sont exprimés dans le sens horaire, par rapport au Nord.

III. INSTRUMENTS UTILISES

III.1. Sismologie

Les capteurs sismiques utilisés sont des capteurs vélocimétriques trois composantes, qui enregistrent le mouvement du sol selon les axes Vertical, Nord-Sud et Est-Ouest (cf. Figure 15). Ils sont reliés à une station d'acquisition sismique, qui permet la numérisation et le stockage des signaux. Le détail technique de la chaîne d'acquisition sismologique est donné dans le Tableau 3. Les enregistrements réalisés sont datés à l'aide des GPS intégrés aux stations, et les temps sont exprimés en UTC.

Site	Station d'acquisition	Quantification	Gain (dB)	Capteur	fc (Hz)	fs (Hz)
Rubi	Granite (Kinometrics)	24 bits	0	LE3D 1s (Lennartz)	1	250
La Suche	Granite (Kinometrics)	24 bits	0	LE3D 5s (Lennartz)	0.2	250
La Praz	Granite (Kinometrics)	24 bits	0	LE3D 5s (Lennartz)	0.2	250
Cervin	-	16 bits	38	Mark L40A-2	100	8000
			38	VELOGET.3D	4.5	8000
Les Arches	Kephrene (Agecodagis)	24 bits	0	IHR 3C 2Hz	2	250
Madonna del Sasso	Granite (Kinometrics) + Taurus (Nanometrics)	24 bits	0	LE3D 5s (Lennartz)	0.2	250

Tableau 3 Caractéristiques de la chaîne d'acquisition sismologique utilisée sur les différents sites.

Pour tous les sites hors Cervin, des capteurs ont été installés à la fois sur le compartiment instable (S) et sur le massif rocheux en place (R) (cf. section *Choix des sites*). Les sismomètres ont été orientés vers le Nord, avec une précision de $\pm 5^\circ$. La bande de fréquence dans laquelle on se place dans ce projet est contenue dans la zone de réponse plate des capteurs utilisés, c'est pourquoi la déconvolution des signaux par la réponse instrumentale n'a pas été entreprise. Les signaux sont enregistrés sous forme de fichiers d'une heure, au format .seed ou .sac) et collectés sur site à des intervalles de temps variables, de l'ordre de quelques mois.



Figure 15 Photo d'un capteur sismique Lennartz 3C 5s installé sur le site de La Praz.

Dans le cas du Cervin, où les méthodes employées sont différentes (cf. section *Méthodes* ci-après), le type d'instrumentation sismologique varie légèrement. Le système de monitoring microsismique (MS) installé en Septembre 2010 au refuge J.A. Carrel par le CNR IRPI Turin, en collaboration avec SOLGEO S.r.l. et avec le soutien de la Regione Valle d'Aosta, est un système de surveillance numérique multi-canal. Cinq capteurs sismiques

haute-fréquence (en forage) et trois capteurs basse-fréquence (en surface) ont été installés (cf. Tableau 3 et localisation Figure 10). Chaque carte d'acquisition est équipée d'un processeur de signal numérique (DSP) qui démarre l'algorithme de reconnaissance automatique de l'événement, enregistre les données avec un *buffer* de 1 s sur une mémoire RAM (Random-Access Memory) et convertit les signaux analogiques enregistrés en signaux numériques. Le DSP permet de fixer différents seuil de déclenchement de l'enregistrement pour chaque canal

Les données sont acquises par la station 24 canaux sur carte flash, puis transmises jusqu'au village de Breuil-Cervinia, d'où ils sont soit périodiquement téléchargés sur place soit envoyés via internet au CNR IRPI Turin.

III.2. Extensométrie

Afin de suivre d'éventuels déplacements des compartiments instables et/ou des ouvertures de fractures, un système de suivi extensométrique des sites a été mis en place sur le site de Rubi. Sur les sites de La Praz et La Suche, ce système était déjà en place, et opéré respectivement par la SAGE et le CREALP. Les données acquises sur ces deux sites nous ont été communiquées par les partenaires.



Figure 16 Photo d'un extensomètre à piston installé sur le site de Rubi.

Selon la configuration du terrain, deux types d'extensomètres différents ont été utilisés :

- des extensomètres à piston (Figure 16), pour le suivi d'ouverture de fractures faiblement à moyennement ouvertes (quelques cm à quelques dizaines de cm). Ce type d'extensomètre est plus précis et moins sujet aux perturbations provenant de l'environnement extérieur.
- des extensomètres à câble, lorsque les distances entre les deux points d'ancrage sont moyennes à grande (plusieurs dizaines de cm à plusieurs mètres). La précision des mesures est moindre que pour un extensomètre à piston, et peut être affectée par des perturbations thermiques (contraction/dilatation du câble de mesure, si ce n'est pas du fil invar), climatiques (pluie, neige, gel) et mécaniques (chute d'objets sur le câble, manipulation intempestive, faune,...).

Les variations de distance inférieures au dixième de mm et à 0.5 cm pour les extensomètres à piston et à câble, respectivement, n'ont pas été interprétées.

Sur le site de la Praz, une mesure est stockée chaque heure, tandis qu'à La Suche, la fréquence de mesure est de 10 min.

A Rubi, une mesure est prise chaque seconde (fréquence d'échantillonnage = 1 Hz). La moyenne de toutes les mesures faites pour chaque heure est ensuite enregistrée.

Sur le site des Arches, une valeur de distance est stockée toutes les minutes, qui est la moyenne de la distance mesurée toutes les secondes.

III.3. Clinométrie



Figure 17 Photo d'un clinomètre installé sur le site de Rubi.

Un système de suivi d'inclinaison a été déployé sur les sites de Rubi, La Suche et La Praz. Il se compose de clinomètres de surface haute résolution ($1/1000^{\text{ème}}$ de degré, Fig. 17). Il est opéré avec une fréquence d'échantillonnage de 1 Hz, dont la moyenne des mesures sur une heure est ensuite sauvegardée pour futurs traitements.

III.4. Station météorologique

Comme les conditions environnementales jouent un rôle potentiellement crucial dans la réponse dynamique d'un compartiment rocheux instable (Lévy *et al.* 2010), une station météorologique complète a été installée sur chaque site. La température de l'air, la pluviométrie, le vent (vitesse & direction) sont les principaux paramètres qui ont été suivis, avec une mesure toutes les 15 minutes. Des capteurs de température déportés ont été installés dans les fractures ouvertes le cas échéant, afin d'explorer la variabilité spatiale de la température sur chacun des sites. Sur le site du Cervins, des sondes de température en forage ont été posées. Sur les sites de Rubi, La Praz et la Suche, la station météo (Davis Vantage Pro II, Fig. 18) a été implantée au plus près du compartiment rocheux instable.



Figure 18 Photo d'une station météo Davis Vantage Pro 2, installée sur trois des quatre sites monitorés (photo Davis).

Sur le site des Arches, on utilise les données de la station « Jardins du Roi », opérée par le LTHE (Laboratoire des Transferts en Hydrologie et Environnement), située 120 m plus bas en altitude et environ 3 km au SW du site. Toutes les observations météo sont référencées en UTC.

III.5. Lidar

LIDAR est l'acronyme de l'expression anglaise « Light Detection And Ranging ». La technologie LIDAR permet de relever la position d'un grand nombre de points (nuage) sur la surface d'un objet avec l'aide d'un laser, par mesure du temps de trajet aller-retour de la lumière. Dans le cas d'objets de grande taille, à géométrie complexe et ne permettant pas de point de prise de vue aisé, le LIDAR peut-être monté sur un aéronef moyennant quelques adaptations. Le scanner laser est alors accompagné d'une unité de mesure inertielle (IMU) et d'un GPS pour localiser précisément la position de l'aéronef durant la mesure. Dans ce cas, on parle de LIDAR aéroporté (cf. Figure 19). C'est la technique qui a été utilisée afin d'obtenir les Modèles Numériques de Terrain (MNT) haute résolution des sites instrumentés (sauf le Cervin), avec une résolution de l'ordre de quelques dizaines de cm. Ces MNT haute résolution ont pour but de permettre d'entreprendre de la modélisation numérique des différents sites, et déterminer les volumes éboulés le cas échéant par comparaison des MNT avant/après évènement.



Figure 19 Photo de l'acquisition par Lidar à visée oblique, par technique aéroportée. (photo Hélimap).

IV. METHODES

Deux méthodes différentes ont été employées dans ce projet. Toutes deux sont basées sur de l'écoute sismique passive, c'est-à-dire l'enregistrement des vibrations sur sol sans recourir à une source sismique active dédiée.

La première méthode consiste à détecter les événements sismiques, c'est-à-dire les signaux générés par des phénomènes bien particuliers, et dont l'amplitude dépasse le niveau habituel du bruit de fond (Figure 20). Ces événements sismiques peuvent être dus à de multiples causes, dont des cassures se produisant dans la roche à proximité des capteurs sismiques. Un nombre important de cassures peut être un indice de la fragilisation du massif rocheux, et de la possible occurrence prochaine d'un éboulement.

La deuxième méthode s'intéresse quant à elle au bruit de fond sismique, (Figure 20) c'est à dire les vibrations du sol qui se produisent en continu et partout, et qui sont provoquées par des causes naturelles (le vent, les vagues, les conditions météorologiques,...) ou anthropiques (transports, machines,...).

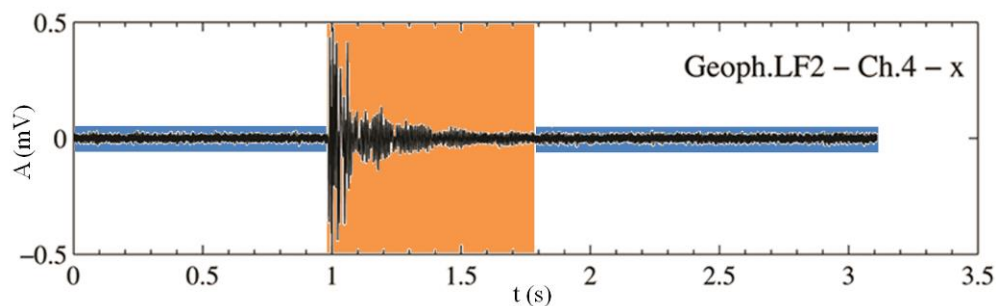


Figure 20 Un exemple de signal sismique enregistré. Zone orange : événement sismique, exploité par la méthode de détection des événements; zone bleue : bruit de fond sismique, d'où l'on extrait la réponse dynamique du compartiment rocheux.

IV.1. Détection d'événements

Afin de détecter les événements sismiques sur le site du Cervin, c'est à dire des signaux dont l'amplitude excède le niveau du bruit de fond sismique, un système de déclenchement à seuil est utilisé : lorsque l'amplitude du signal dépasse 0.01 mm/s simultanément sur au moins 6 des 24 canaux, l'enregistrement est déclenché pour une durée de 3 à 5 s, avec un buffer de 1s. Au début de la période de suivi, les canaux des géophones basse fréquence contribuaient à l'enregistrement de nombreux événements, sans aucun signal sur les canaux de géophones haute fréquence. A partir du 1 avril 2011, les géophones basse fréquence ont été exclus de la condition de trigger.



Figure 21 Tests de calibration du système: a) coup de marteau; b) géo-référencement du point (photos: CNR IRPI Torino).



Une expérience de sismique active a été conduite pour obtenir d'un modèle de vitesse des ondes sismiques au sein de l'amas rocheux, permettant la relocalisation des événements enregistrés. 18 points d'impact géoréférencés ont été répartis le plus uniformément possible autour du refuge, avec 3 stacks de signaux pour chaque point (Figure 21). Le temps zéro du signal a été enregistré sur la canal x d'un géophone LF, afin de permettre la relocalisation de l'événement artificiel à travers le temps d'arrivée aux géophones. Les signaux ont été traités en collaboration avec Gamut S.r.l. en utilisant GeoTomCG, un logiciel commercial de tomographie qui utilise une technique itérative d'inversion (SIRT, *simulation iterative reconstructive technique*). Comme le nombre de coups de marteau était insuffisant pour être considéré une tomographie classique, l'échantillon de données a été étendu à travers des analyses statistiques d'extension afin d'améliorer le modèle. La localisation des hypocentres des sources naturelles sera effectuée par la suite pour avoir des indications sur la présence d'éventuels zones de faiblesse du rocher.

IV.2. Extraction de la réponse dynamique

Les capteurs sismologiques courte période trois composantes ont été installés à la fois sur le compartiment instable (S) et sur le massif rocheux en place (R), et ce pour chaque site. Leur orientation a été contrôlée avec une boussole, et on estime la précision sur l'azimut à $\pm 5^\circ$. Les différents types de capteurs utilisés sont listés dans le Tableau 2, partie 2.2 Sismologie. La bande de fréquence d'intérêt pour les traitements est contenue dans la zone de réponse plate des capteurs utilisés, c'est pourquoi la déconvolution des signaux par la réponse instrumentale n'a pas été entreprise. Les signaux se présentent sous forme de fichiers d'une heure, au format .seed ou .sac) et sont collectés sur site à des intervalles de temps variables, de l'ordre de quelques mois.

La réponse dynamique du compartiment rocheux (fréquences de résonance, amortissement, déformées modales) peut être extraire du bruit de fond sismique. Dans notre cas, le calcul des fréquences de résonance est basé sur une analyse spectrale des signaux sismiques enregistrés. Les différentes étapes du traitement du signal sont représentées à la Figure 22 ci-après.

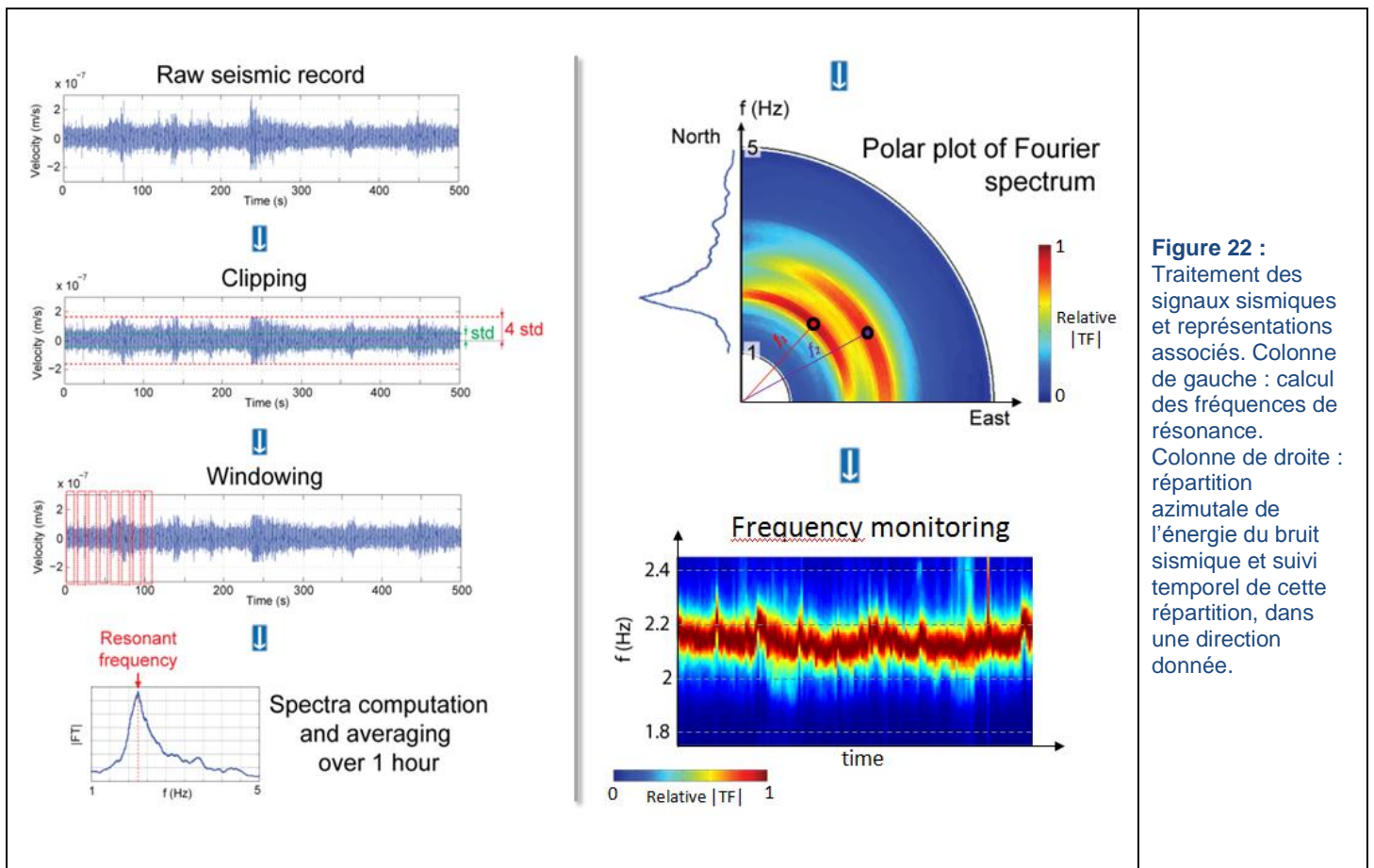


Figure 22 : Traitement des signaux sismiques et représentations associés. Colonne de gauche : calcul des fréquences de résonance. Colonne de droite : répartition azimutale de l'énergie du bruit sismique et suivi temporel de cette répartition, dans une direction donnée.



Dans un premier temps, le signal d'une heure de long est échantillonné, avec un seuil pris égal à 4 fois l'écart-type de l'ensemble du signal. Ensuite, le signal est fenêtré en fenêtres de 100 s, compromis entre résolution fréquentielle et réduction de la variance de l'analyse spectrale. La transformée de Fourier rapide (FFT) est calculée pour chacune de ces fenêtres, avec un nombre de points pris égal à 2 exponentielle de la puissance suivante du nombre d'échantillons dans la fenêtre. Cette analyse permet in-fine d'obtenir la répartition fréquentielle de la vibration de bruit ambiant, sur les trois composantes (Nord, Est, Verticale).

IV.3. Direction du mouvement

En croisant les spectres calculés pour chacune des voies (cf. section 3.1), il est possible d'obtenir la répartition de l'énergie de vibration non seulement pour chaque fréquence mais aussi pour chaque direction de vibration. En particulier, si l'on utilise les voies Nord et Est, on obtient la répartition azimutale (angle par rapport au Nord, dans le sens horaire) et fréquentielle (axe radial) du bruit de fond dans le plan horizontal, comme montré à la Figure 11. La résolution azimutale est ici prise égale à 1°, et la gamme de fréquence présentée est comprise entre 1 et 5 Hz.

IV.4. Suivi temporel

A partir des spectres azimutaux (cf. section 3.2), on peut fixer une direction de vibration et suivre l'évolution de la répartition fréquentielle de l'énergie de bruit de fond au cours du temps, ce qui ramène à un classique suivi temps-fréquence (cf. Figure 11). Sur les sites instrumentés, la direction a été fixée par l'azimut du premier pic en fréquence rencontré, appelé fréquence fondamentale.

IV.5. Intercorrélation avec les autres données

L'ensemble des données collectées sur les sites (sismiques, météorologiques, extensométriques et clinométriques) sont toutes référencées par rapport au Temps Universel Coordonné (UTC), ce qui permet de rechercher des corrélations éventuelles entre différents paramètres.

V. RESULTATS

Dans cette section, les résultats obtenus sur les sites instrumentés sont présentés et commentés. Les résultats sur le site de Rubi seront présentés en premier, et plus précisément décrits. On passera plus rapidement sur les résultats des autres sites, lorsqu'ils présentent des caractéristiques similaires. A la fin de cette partie, on dressera des conclusions plus générales, valables pour l'ensemble des sites instrumentés.

V.1. Site de Rubi

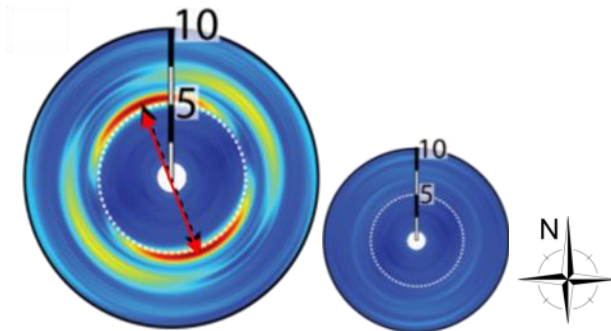


Figure 23: Diagrammes azimutaux pour le capteur sur la colonne instable (S, à gauche) et sur le massif stable (R, à droite).

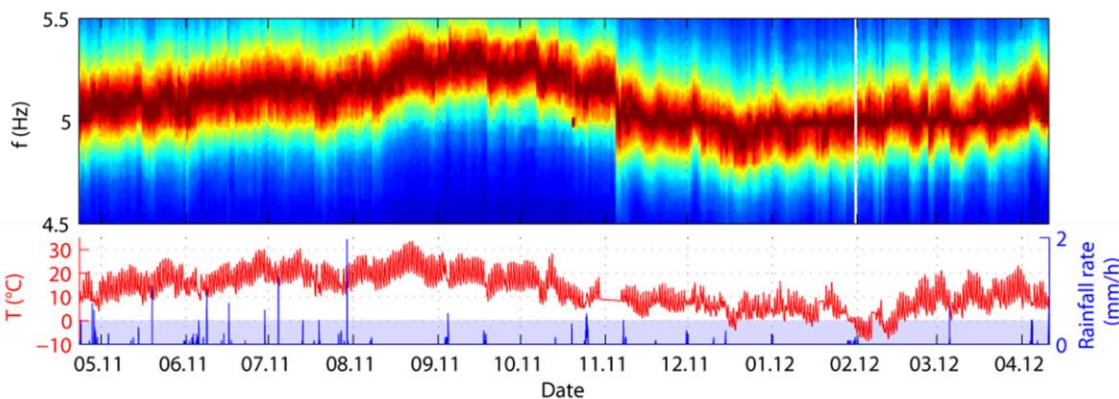


Figure 24 : Suivi temporel du premier pic en fréquence, selon l'azimut NXX°. La température et la pluviométrie sont présentées dans la partie inférieure.

Le diagramme azimutal tracé à partir des enregistrements réalisés sur la colonne instable montre une répartition hétérogène de l'énergie de vibration du bruit de fond sismique (Figure 23). En particulier, deux pics apparaissent nettement : le premier, le plus énergétique, est visible autour de 5,2 Hz, dans la direction NNW-SSE (flèche rouge); et le second à env. 7 Hz, est orienté NE-SW, soit quasiment perpendiculaire au premier pic. Sur le diagramme des enregistrements sur le massif stable en revanche, aucun pic n'apparaît. Les niveaux d'énergie de vibration sont plus faibles et leur répartition plus homogène.

Comme les pics en fréquence observés sur la partie instable ne sont transitoires et ne sont pas visibles sur le capteur de référence, on infère qu'il s'agit des fréquences de résonance du compartiment instable (ce point sera vérifié par modélisation numérique par la suite). En particulier, le premier pic en fréquence est considéré comme la fréquence fondamentale. La direction de vibration à ce pic fondamental est orientée perpendiculairement à la fracture arrière du site de Rubi, soit dans la direction de la ligne de plus grande pente. Une telle orientation, perpendiculaire à la fracturation, est observée également par Lévy *et al.* 2010, Burjánek *et al.* 2009, 2012.

La Figure 24 présente l'évolution du premier pic spectral enregistré sur la colonne instable au cours d'environ 1 cycle annuel (23/04/2011 au 11/04/2012). Pour rappel, ce pic a été localisé à env. 5,2 Hz sur la Figure 12, et selon la direction NNW-SSE. Sur l'ensemble de la période d'étude, il apparaît que la fréquence de ce pic n'est pas constante, mais fluctue au cours du temps. Ces fluctuations apparaissent à la fois à grande période (cycle annuel), mais aussi à des périodes plus courtes, de l'ordre de quelques jours à quelques semaines. Ces fluctuations apparaissent fortement corrélées avec les variations de température de l'air mesurées sur le site, comme visible à la Figure 13. Aucune corrélation significative n'a été trouvée avec la pluviométrie.



V.2. Site de La Praz

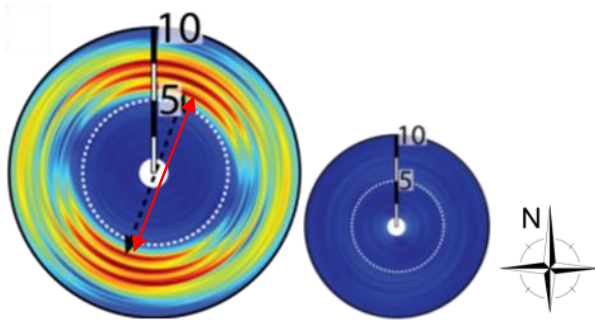


Figure 25 : Diagrammes azimutaux pour le capteur sur la colonne instable (S, à gauche) et sur le massif stable (R, à droite).

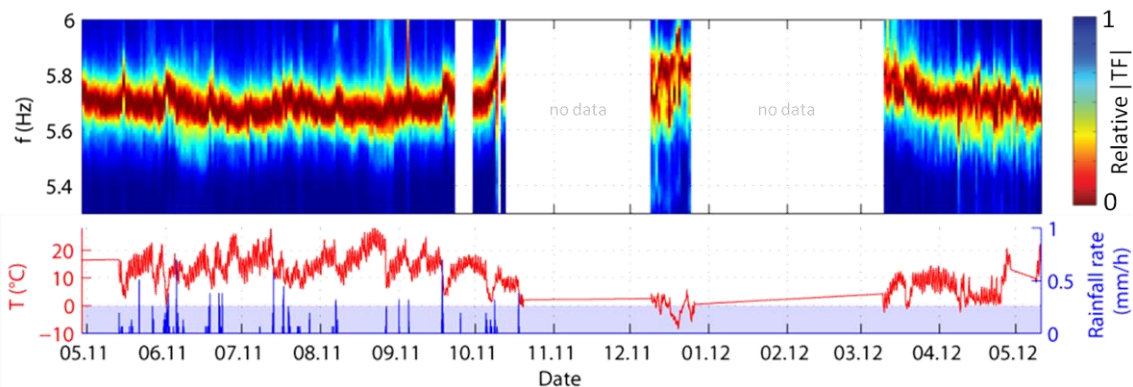


Figure 26 : Suivi temporel du premier pic en fréquence, selon l'azimut NXX°. La température et la pluviométrie sont présentées dans la partie inférieure.

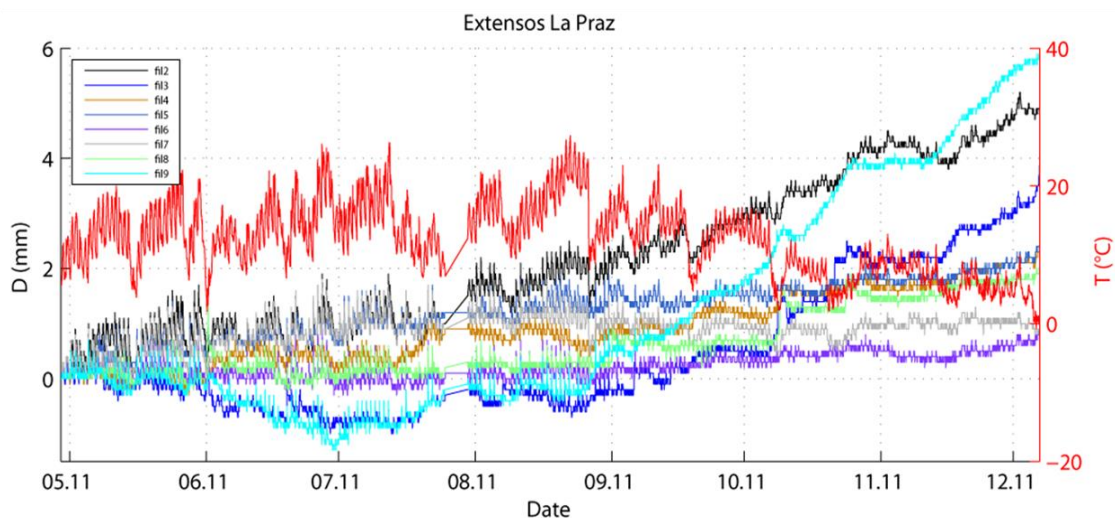


Figure 27 : Suivi extensométrique du site de La Praz.

De manière analogue aux observations faites sur le site de Rubi, des pics spectraux bien définis en azimut et en fréquence sont observés sur le compartiment instable, et pas sur le massif de référence (Figure 25). Cette fois, trois pics spectraux sont bien visibles à env. 5,8 ; 7 et 7,5 Hz sur la Figure 25 (gauche), et sont tous trois orientés selon un axe N-S à NNE-SSW. Cette direction correspond à la ligne de plus grande pente du versant, perpendiculairement à laquelle se développent les fractures principales, en particulier l'escarpement arrière.

La Figure 26 présente l'évolution du premier pic spectral enregistré sur la colonne instable au cours d'environ 1 cycle annuel (23/04/2011 au 11/04/2012). Pour rappel, ce pic a été localisé à env. 5,2 Hz sur la Figure 14, et selon la direction NNW-SSE. Sur l'ensemble de la

période d'étude, il apparaît que la fréquence de ce pic n'est pas constante, mais fluctue au cours du temps. Ces fluctuations apparaissent à la fois à grande période (cycle annuel), mais aussi à des périodes plus courtes, de l'ordre de quelques jours à quelques semaines. Ces fluctuations apparaissent fortement corrélées avec les variations de température de l'air mesurées sur le site, comme visible à la Figure 26. Aucune corrélation significative n'a été trouvée avec la pluviométrie. Des mesures extensométriques sont opérées par le partenaire SAGE (Fig. 27), et l'interprétation croisée avec les mesures de fréquence de résonance est à réaliser.

V.3. Site de la Suche

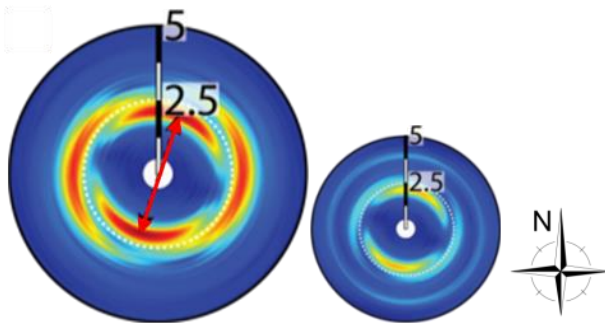


Figure 28: Diagrammes azimutaux pour le capteur sur la colonne instable (S, à gauche) et sur le massif stable (R, à droite).

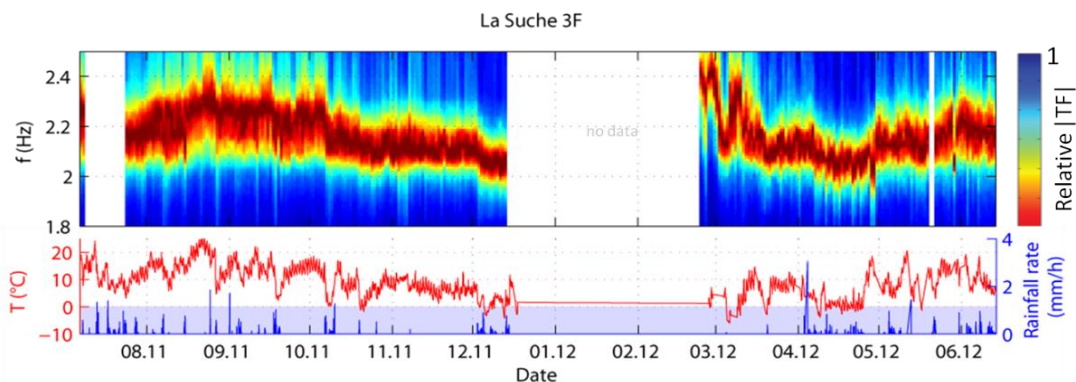


Figure 29 : Suivi temporel du premier pic en fréquence, selon l'azimut NXX°. La température et la pluviométrie sont présentées dans la partie inférieure.

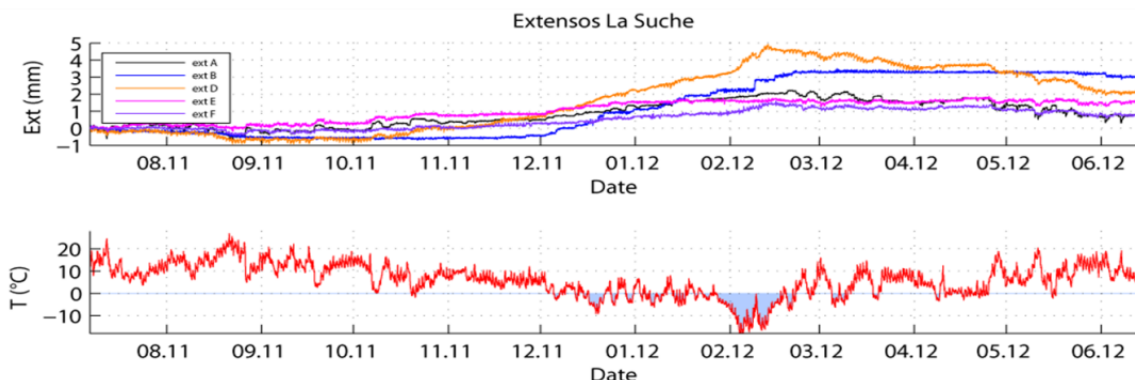


Figure 30 : Suivi extensométrique du site de La Suche.

Le diagramme azimutal sur la colonne instable de la Suche (Figure 28) montre un premier pic spectral à 2,2 Hz, avec une direction de vibration orientée N-NE S-SW ; et un second pic à environ 2.7 Hz, orienté E-W. Le premier pic en fréquence est également visible sur le diagramme du capteur de référence. Cela est probablement dû à la proximité entre le capteur référence et la colonne en vibration, qui fait que le capteur de référence reçoit de l'énergie. La direction de vibration du premier pic correspond à la ligne de plus grande pente, et est en bon accord avec une direction préférentielle de rupture.

La Figure 29 présente l'évolution du premier pic spectral enregistré sur la colonne instable au cours d'environ 1 cycle annuel (07/072011 au 14/06/2012). Sur l'ensemble de la période d'étude, la fréquence fondamentale varie entre 2 et 2,5 Hz. De manière identique aux autres sites, ces fluctuations apparaissent à la fois à grande période (cycle annuel), mais aussi à des périodes plus courtes, de l'ordre de quelques jours à quelques semaines. Ces fluctuations apparaissent fortement corrélées avec les variations de température de l'air mesurées sur le site, comme visible à la Figure 28.

Aucune corrélation significative n'a été trouvée avec la pluviométrie. On observe également un pic sur la fréquence fondamentale lors des périodes de gel. Cela pourrait être dû à la formation de glace dans les discontinuités et dans les pores du matériau, faisant ainsi augmenter la rigidité de contact et intrinsèque, respectivement. Des mesures extensométriques sont opérées par le partenaire CREALP (Figure 30), et l'interprétation croisée avec les mesures de fréquence de résonance est à réaliser.

V.4. Site du Cervin

649 événements naturels ont été enregistrés dans la première période de monitoring, entre le 6 Octobre 2010 (date du début monitoring, après le calibrage du système) et le 5 Octobre 2011 (date de la maintenance du système). Cependant, cette activité d'enregistrement était discontinuë: (i) entre Novembre 2010 et Avril 2011, un dysfonctionnement du système d'alimentation a provoqué une perte de données ; (ii) à partir du 26 Août 2011, les géophones 3 et 1 ont arrêté d'enregistrer et les signaux enregistrés après cette date n'ont pas été analysés. En conséquence, 540 événements ont été sélectionnés pour les analyses successives. 211 de ces événements présentent des oscillations harmoniques, pics instantanés et/ou multiples et des canaux muets qui peuvent être attribués à des perturbations électriques. En fin, 329 événements, enregistrés entre le 6 Octobre 2010 et le 23 Août 2011, ont été analysés.

813 événements naturels ont été enregistrés dans la deuxième période de monitoring, entre 5 Octobre 2011 et le 31 Décembre 2011: à partir de cette date, le système est tombé en panne et il a été possible de le restaurer seulement le 25 Octobre 2012.

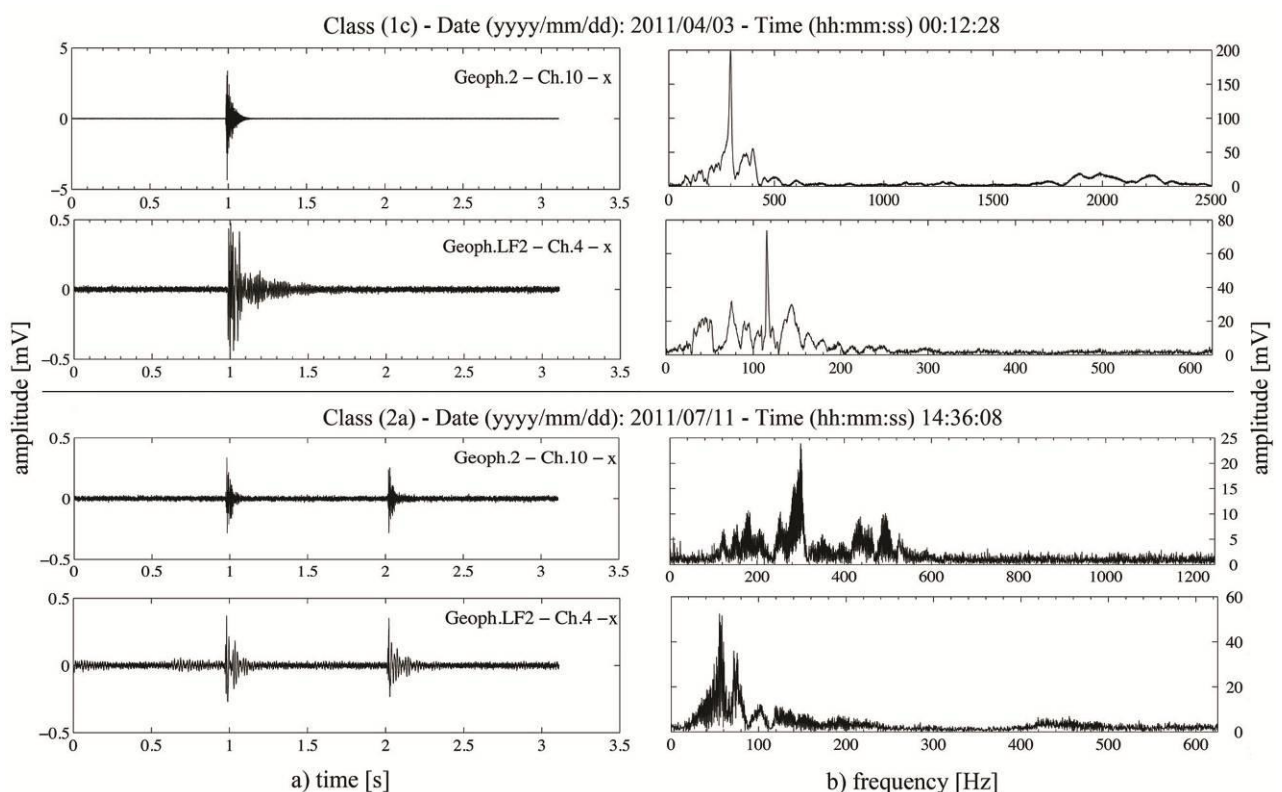


Figure 31 : Exemple de deux événements (un single event en haut, un multiple event en bas) enregistrés par un géophone HF et un géophone LF: a) dans le domaine du temps b) dans le domaine des fréquences.

L'analyse des données récoltées dans la première période de monitoring a été réalisée en collaboration avec l'Ecole Polytechnique de Turin (voir Occhiena *et al.*, 2012). La classification des signaux MS enregistrés entre le 6 Octobre 2010 et le 5 Octobre 2011 est basée sur les principales caractéristiques des amplitudes et du domaine des fréquences. La classification des événements naturels a permis d'évaluer leur qualité et caractéristiques : une première observation qualitative des enregistrements à chaque géophone a permis d'identifier deux catégories principales de signaux (Figure 31):

- class (1) : 167 *single signals*, qui contiennent un seul événement qui dépasse le seuil de *trigger*
- class (2) : 162 *multiple signals*, qui contiennent plusieurs événements qui dépassent le seuil de *trigger* dans le même enregistrement.

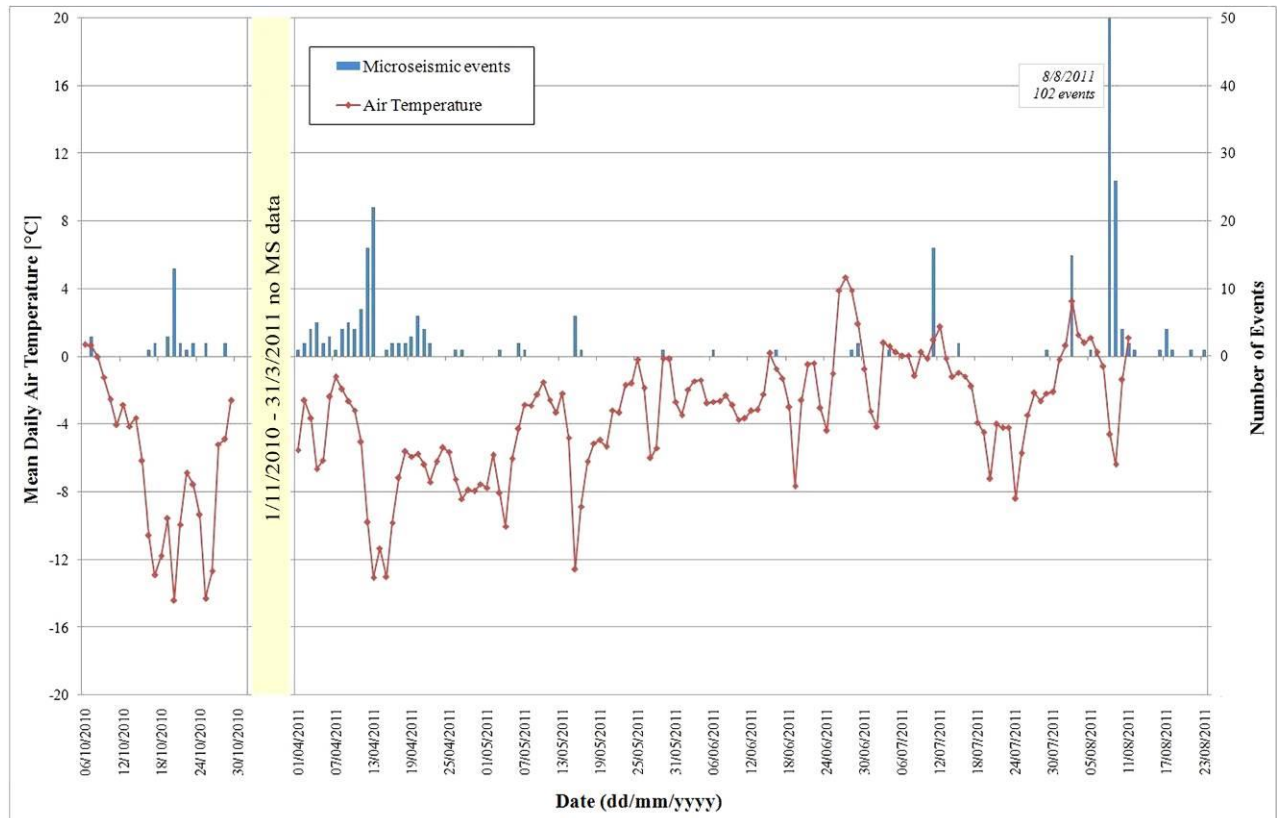


Figure 32 : Corrélation entre l'activité MS et les températures (ARPA VdA): la ligne continue représente la température moyenne quotidienne enregistrée en proximité du refuge J.A. Carrel, long l'arrête Nord-ouest; l'histogramme représente le nombre quotidien des événements MS.

Avec un code MATLAB on analyse les amplitudes des signaux ensuite classifiés à partir du rapport signal/bruit (SNR, Signal-to-Noise-Ratio). La méthode utilisée pour calculer le SNR est basée sur une moyenne à court terme / long terme (STA / LTA). Grâce à cette détection automatique, les 167 *single signals* ont été subdivisés en quatre catégories supplémentaires dont les caractéristiques spectrales ont été étudiées en calculant les transformées de Fourier:

- événement avec $SNR < 0.5$ sur les géophones HF géophones et $SNR > 4$ sur les géophones LF;
- événement avec $SNR > 4$ sur tous les géophones;
- événement avec $SNR > 10$ sur tous les géophones;
- événement avec $SNR > 4$ sur les trois géophones HF qui se trouvent dans la partie Ouest du réseau (géophones 1, 2 and 3), $SNR < 0.5$ sur les deux géophones HF qui se trouvent dans la partie Est du réseau (géophones 4 and 5) et sur les trois géophones LF.

Les 162 *multiple signals* sont caractérisés par une séquence de signaux instantanés et ont été subdivisées en deux catégories:

- class (2a): événements caractérisés par un faible SNR et une succession de deux ou trois signaux impulsifs dans le même enregistrement;
- class (2b): événements caractérisés par une variable SNR et une fluctuation du signal composé d'une séquence de pics dans le même enregistrement.

Le contenu en fréquence de ces deux catégories est plutôt homogène: dans les deux cas, la fréquence dominante est comprise entre 100 et 300 Hz pour les géophones HF et entre 50 et 150 Hz pour les géophones LF.

La superposition entre le nombre d'événements MS par jour et la température moyenne de l'air, enregistrée par ARPA VdA sur le côté Nord-ouest de l'arête, est utilisée pour étudier les corrélations entre les déformations de la roche et les variations de la température (Figure 32). Comme déjà observé par Amitrano *et al.* (2010), les concentrations les plus importantes d'activité MS se produisent pendant les descentes rapides et intenses de température. Concentrations mineures d'événements MS peuvent être observée lorsque la température de l'air augmente localement au-dessus de 0 ° C. Récentes observations de terrain de Hasler *et al.* (2012) effectués en Suisse sur l'Hörnligrat, arête Nord-Est du Cervin, montrent que: (i) pendant la saison froide, les principales instabilités de versant ont une origine thermomécanique et sont renforcées par le processus cryogénique ; (ii) en saison chaude, les principaux mouvements sont d'origine hydro-thermiquement et se produisent suite à la réduction de la résistance de la roche induite par l'augmentation de circulation et pression de l'eau dans les fractures.

Une tentative de localisation des zones sources d'évènements microsismiques a été entreprise, pour mettre en évidence la présence éventuelle de zones de faiblesse dans la zone investiguée, correspondant à une concentration spatiale d'hypocentres localisés. Pour une localisation précise, un modèle de vitesse précis est requis. Un premier modèle a été obtenu par tomographie active, et le travail de localisation des évènements est en cours.

NB : Un premier essai d'enregistrement du bruit sismique en continu (~30 min) a été réalisé avec succès le 25 octobre 2012. Ils ont été analysés par la méthode de fréquence de résonance mais leur interprétation est difficile en raison de problèmes, probablement instrumentaux.

V.5. Site des Arches

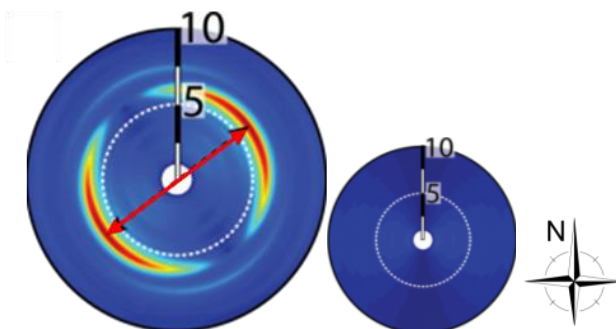


Figure 33 : Diagrammes azimutaux pour le capteur sur la colonne instable (S, à gauche) et sur le massif stable (R, à droite).

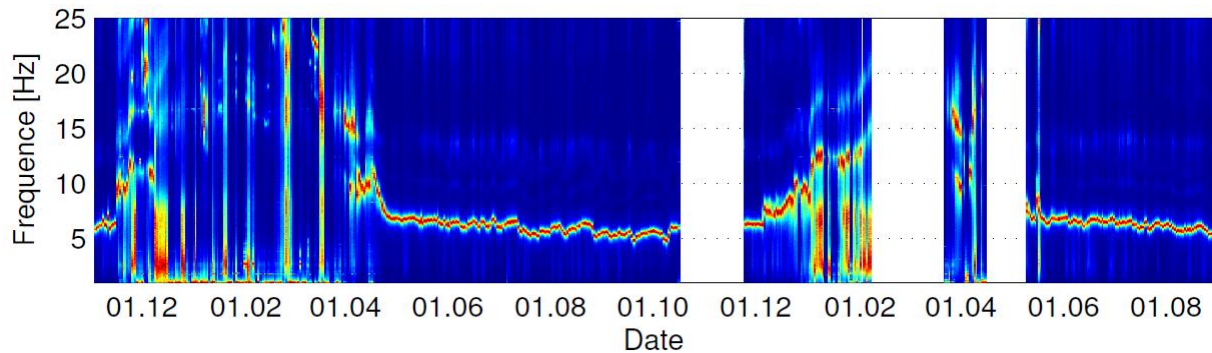


Figure 34 : Suivi temporel du premier pic en fréquence, selon l'azimut NXX°, du 03/11/2010 au 26/08/2012. La température et la pluviométrie sont présentées dans la partie inférieure.

Sur la colonne instable des Arches (Fig. 33, gauche), on observe un premier pic en fréquence à environ 5.9 Hz, orienté NE-SW (perpendiculaire à la fracture arrière); et un second pic à env. 7.5 Hz, perpendiculaire au premier. Aucun de ces deux pics n'est visible sur le diagramme azimutal du capteur de référence (Fig. 33, droite), ce qui conduit à associer les pics spectraux à des fréquences de résonance, comme pour les autres sites.

Pour tester la validité de cette assertion, des simulations numériques aux éléments finis ont été entreprises, avec le logiciel COMSOL (www.comsol.com), et sont présentées Figure 35. Les simulations numériques montrent que les deux premiers modes de résonance de l'écaïlle sont de la flexion transverse et de la flexion longitudinale, à respectivement 4,06 et 8,06 Hz.

Les fréquences de résonance issues des simulations sont compatibles avec les pics spectraux observés, et les directions de vibration concordent. Cela confirme l'interprétation des pics spectraux comme étant des fréquences de résonance du compartiment instable.

La Figure 34 présente l'évolution du premier pic spectral enregistré sur la colonne instable au cours d'environ 2 cycles annuel (03/11/2010 au 26/08/2012). Sur le site des Arches, les fluctuations de fréquence fondamentale au cours du temps sont beaucoup plus importantes que sur les autres sites. Les pics sont observés pendant la période hivernale, avec environ 25 Hz comme maximum, tandis que les minima correspondent aux périodes estivales, avec environ 5 Hz. f_1 évolue de manière multi-périodique, avec des variations journalières, hebdo ou pluri-hebdomadaires et des variations annuelles.

Les fluctuations de fréquence fondamentale sont corrélées avec la température, hors période de gel. Lorsque la température descend sous zéro, la fréquence de résonance augmente de manière très importante. Cela est probablement dû à la formation de glace dans la fracture arrière et dans les pores du matériau, qui tendent à augmenter sa rigidité.

Numerical modeling

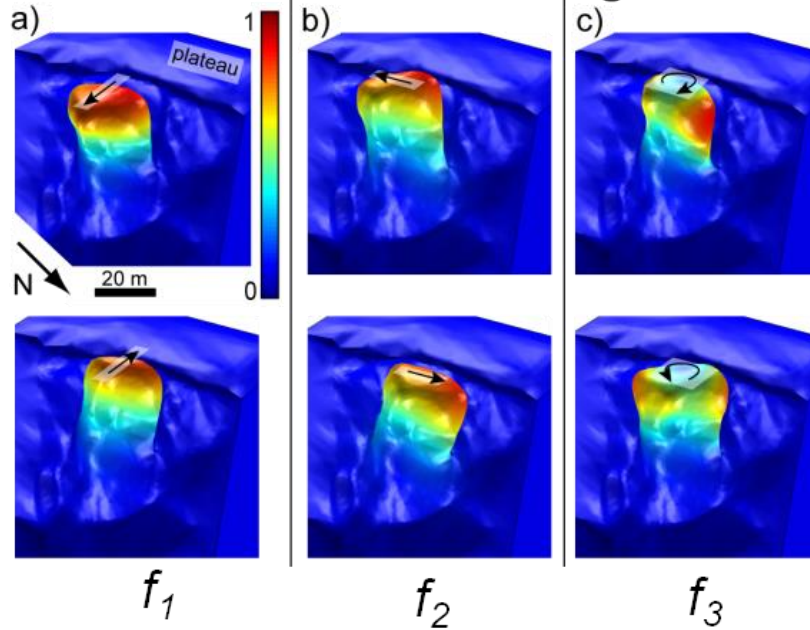


Figure 35 : Modélisation numérique des trois premiers modes propre de la colonne instable des Arches.

V.6. Site de Madonna del Sasso

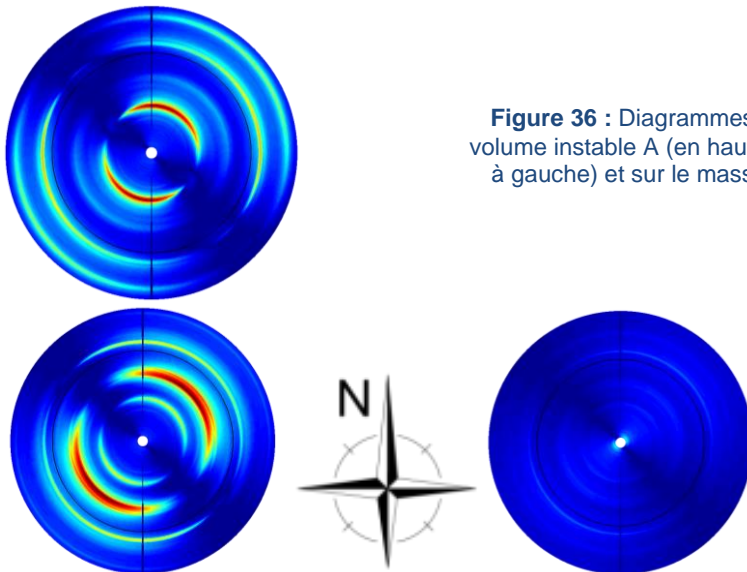


Figure 36 : Diagrammes azimutaux pour le capteur sur le volume instable A (en haut), sur le volume instable B (en bas, à gauche) et sur le massif de référence (en bas, à droite).

Le site des Madonna del Sasso présente des similitudes avec les résultats obtenus sur les autres sites. Sur le massif référence, l'énergie du bruit de fond sismique est répartie de façon homogène, à la fois en fréquence et en azimut, comme visible à la Figure 36. Sur les compartiments instables en revanche, plusieurs pics spectraux se détachent nettement. Le premier pic en fréquence est situé à 2,3 Hz pour le volume A (12 000 m³) et 3,8 Hz pour le volume instable B (7500 m³). Le site n'a pas été équipé de manière permanente par la suite.



VI. BILAN OPERATIONNEL

Cette section traite des aspects opérationnels de l'action d'écoute géophysique de sites instables.

Sur tous les sites, l'ensemble de l'instrumentation prévue a pu être posée. Les différents capteurs (sismiques, extensométriques, clinométriques, météo) sont fonctionnels, et ont démontré leur capacité à acquérir des données.

Les données apparaissent de très bonne qualité, excepté les données clinométriques et surtout extensométriques, sans que la cause en soit clairement identifiée.

Sur de tels sites isolés, d'accès difficile et en terrain montagneux, la principale cause de perte de données est la déficience de l'alimentation en énergie. Celle-ci reposant initialement exclusivement sur des panneaux solaires, l'ensoleillement disponible sur les sites instrumentés est le paramètre conditionnant la quantité de données récoltées. Suite à de nombreuses coupures de l'acquisition sur le site de La Praz (versant Nord, sans soleil pendant plusieurs mois), une alimentation par pile à combustible y a été installée à l'automne 2012, et donne des résultats satisfaisants sur les premières semaines de fonctionnement. Les autres sites, mieux exposés, fonctionnent exclusivement grâce à l'énergie solaire.

Un système de télécommunication a été mis en place sur chaque site. Il permet une récupération automatique d'un échantillon de données (géophysiques, thermiques, extensométriques, météorologiques) chaque jour afin de s'assurer du bon fonctionnement du système et de détecter d'éventuelles variations des paramètres mesurés. Cette transmission des données permet de suivre à distance l'état de l'instrumentation, la qualité des données et d'optimiser les déplacements sur sites. Au niveau opérationnel, la télémétrie est couramment utilisée à visée de système d'alerte. Le second système, dit « manuel », vise à récupérer l'intégralité des données acquises en se rendant sur site.

Une fois l'ensemble des données rapatriées au laboratoire, leur traitement complet est semi-automatisé : des routines de traitement ont été développées, et leur lancement est contrôlé par un opérateur. Les temps de calculs sont quasi instantanés pour les données de faible volume (météo, extensométrie, clinométrie) ; mais le traitement des données sismique est plus long (env. 3 à 4 sec de traitement par heure de bruit sismique enregistrée et par voie, script non optimisé avec une fréquence d'échantillonnage à 250 Hz, décimée à 62.5 Hz pour accélérer le traitement).

Sur le site du Cervin, le fonctionnement est un peu différent. Comme l'acquisition est en mode déclenché, les volumes sont beaucoup plus faibles et l'ensemble des données est télé-transmis. Le projet MASSA a permis de compléter le système de suivi de l'activité microsismique installée lors du projet Interreg IIIA Alcotra n. 196 "PERMAdataROC" (2006-2008) par la pose de géophones 4,5 Hz en surface.

A cette occasion, le système d'acquisition et transmission a été réparé et des tests ont été réalisés dans 18 points géo-référencés pour pouvoir définir un modèle hétérogène de vitesse des ondes sismiques dans l'amas rocheux. Le système complet a été vérifié le 5 Octobre 2011, alors que le système de transmission était en panne à cause d'une foudre. Le fonctionnement correct de tous les géophones a été vérifié : 649 événements ont été enregistrés dans la première période d'enregistrement (6 Octobre 2010 - 5 Octobre 2011). Le 25 Octobre 2012 a eu lieu un deuxième entretien du système : l'antenne a été remplacée et la connexion radio-internet réhabilitée. Le système d'acquisition a été endommagé par une décharge électrique à la fin de l'année 2011 et a été donc remplacé. 813 événements ont été enregistrés dans la deuxième période d'enregistrement, entre 5 Octobre 2011 et le 30 Décembre 2011. Pendant cette dernière mission de terrain, un premier essai d'enregistrement du bruit sismique en continu durant 30 minutes a été effectué.



VII. CONCLUSIONS SCIENTIFIQUES

La réponse dynamique de quatre compartiments rocheux instables a été caractérisée par la méthode des fréquences de résonance. Ces compartiments présentent des morphologies, des mécanismes de rupture, des contextes géologiques et des volumes variés, ce qui permet de dresser des conclusions sur la validité de la technique des vibrations ambiantes appliquée à l'aléa éboulement rocheux.

Premièrement, tous les enregistrements réalisés sur les compartiments instables présentent des pics spectraux bien définis en fréquence et en azimut.

Un pic prédominant a été systématiquement mesuré à la fréquence la plus basse (f_1), qui a été interprétée comme la première fréquence de résonance du compartiment instable, en accord avec les premiers résultats des modélisations numériques 2D ou 3D, selon les sites.

La direction de vibration à f_1 est orientée selon la ligne de plus grande pente, perpendiculairement à la fracture arrière principale des compartiments instables, pour les trois sites présentant une fracture largement ouverte. Cela suggère un premier mode de vibration en flexion. Ces résultats, cohérents avec les conclusions de Lévy *et al.* 2010 et Burjánek *et al.* 2009, 2012 attestent que la méthode d'écoute de bruit de fond peut apporter des informations sur le comportement de masses instables dans des contextes géologiques variés.

De plus, en suivant l'évolution de la première fréquence de résonance (f_1) de quatre sites sur une période de plusieurs mois n'a pas permis de mettre en évidence de diminution irréversible de f_1 liée à de l'endommagement. Au contraire, tous les sites montrent des fluctuations de f_1 liées à des variations de température. A Rubi, La Suche et les Arches, température et fréquence de résonance sont corrélés, au contraire de La Praz où les deux paramètres sont anti-corrélés, avec des amplitudes de variation plus faibles. En comparant les fréquences fondamentales en fonction du volume sur les différents sites, il apparaît que la Praz semble avoir un comportement différent des autres sites.

Cela est probablement dû au fait que le compartiment instable à la Praz est un amas de blocs extrêmement fracturés et hétérogène avec une grande interface de contact avec le massif, tandis que les autres sites sont caractérisés par une fracture arrière sub-verticale. La résonance observée à la Praz pourrait résulter d'un contraste de rigidité interne entre le massif et le compartiment fracturé, de manière identique aux effets de site observés en sismologie, plutôt que du découplage entre la masse instable et le massif le long de la fracture arrière.

Quelle que soit l'origine du phénomène de résonance du compartiment instable, une chute irréversible de fréquence fondamentale peut être interprétée comme résultant de l'endommagement du contact le long de l'interface ou bien de l'endommagement interne à la masse instable. Pour les sites en basculement ou en glissement en pied, la chute de f_1 pourrait être liée à des ruptures de ponts rocheux et à la diminution de la friction le long du plan de glissement, respectivement.

Dans le cas d'un glissement composé (la Praz), la diminution de f_1 pourrait résulter de la désintégration graduelle du matériau rocheux, ce qui entraîne une décroissance de son module de rigidité.

Ces résultats soulignent l'intérêt de suivre la fréquence fondamentale f_1 au cours du temps, pour peu que les variations d'origine réversibles et irréversibles puissent être séparées.

Concernant la technique de suivi de l'activité sismique, les recherches sur le Cervin sont toujours en cours. L'enregistrement des événements microsismiques et le suivi des températures se poursuit, afin de mieux comprendre les corrélations mises en évidence entre ces deux paramètres. La faisabilité d'étudier les fréquences de résonance de la masse rocheuse sur ce site doit encore être étudiée.



VIII. RÉFÉRENCES

- Amitrano, D., Arattano, M., Chiarle, M., Mortara, G., Occhiena, C., Pirulli, M. & Scavia, C.: Microseismic activity analysis for the study of the rupture mechanisms in unstable rock masses, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 10(4), 831–841, doi:10.5194/nhess-10-831-2010, 2010.
- Arnaud H., Meloux M. and Montjuvent G. 1974. Notice explicative de la carte géologique de la France au 1/50 000ème, feuille XXXII-37 Mens (844), BRGM.
- Badoux H. 1965. Notice explicative de la carte géologique de la France au 1/50 000ème, feuille XXXV-28 Thonon-Châtel, BRGM.
- Burjánek J., Gassner-Stamm G., Poggi V., Moore J.R. and Fäh D. 2009. Ambient vibration analysis of an unstable mountain slope. *Geophys. J. Int.* 180, 820-828.
- Burjánek J., Moore J.R., Yugsi Molina F.X. and Fäh D. 2012. Instrumental evidence of normal mode rock slope vibration. *Geophys. J. Int.* 188(2), 559-569.
- Debelmas J., Desmons J., Ellenberger F., Goffé B., Jabre J., Jaillard E. and Pachoud A. 1989. Notice explicative de la carte géologique de la France au 1/50 000ème, feuille Modane (775), BRGM, 53 p.
- Demagnet D. 2000. Tomographies 2D et 3D à partir de mesures géophysiques en surface et en forage. PhD thesis. Université de Liège, Belgique, 153 pp.
- Dines K.A. and Lytle R.J. 1979. Computerized geophysical tomography. *Proceedings of the IEEE* 67(7), 1065-1073.
- Faure-Muret A. and Fallot P. 1957. Notice explicative de la carte géologique de la France au 1/50 000ème, feuille XXXVI-41 Puget-Théniers, BRGM.
- Frayssines M. and Hantz D. 2006. Failure mechanisms and triggering factors in calcareous cliffs of the Subalpine Ranges (French Alps), *Eng. Geol.*, 86, 256–270, doi:10.1016/j.enggeo.2006.05.009.
- Hasler, A., Gruber S., and Beutel J.: Kinematics of steep bedrock permafrost, *J. Geophys. Res.*, 117, F01016, doi:10.1029/2011JF001981, 2012.
- Lévy, C., L. Baillet, D. Jongmans, P. Mourot, and D. Hantz, Dynamic response of the Chamousset rock column (Western Alps, France), *J. Geophys. Res.*, 115, F04043, doi:10.1029/2009JF001606, 2010.
- Occhiena, C., Coviello, V., Arattano, M., Chiarle, M., Morra di Cella, U., Pirulli, M., Pogliotti, P., and Scavia, C.: Analysis of microseismic signals and temperature recordings for rock slope stability investigations in high mountain areas, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 12, 2283-2298, doi:10.5194/nhess-12-2283-2012, 2012.



IX. ANNEXES : LISTE DE PUBLICATIONS ISSUES DU PROJET MASSA

Revue Internationales

Bottelin P., C.Lévy, L. Baillet, D. Jongmans, P. Guéguen, Modal and thermal analysis of an unstable rock column (Vercors massif, French Alps), *accepted in Geophysical Journal International*.

Bottelin P., D. Jongmans, L. Baillet, T. Lebourg, D. Hantz, J. Turpin, C. Levy, O. Leroux, H. Cadet, L. Lorier and J-D Rouiller, Spectral analysis of prone-to-fall rock compartments using ambient vibrations, *Near Surface Geophysics*, *accepted*.

C. Occhiena², V. Coviello^{1,2}, M. Arattano¹, M. Chiarle¹, U. Morra di Cella³, M. Pirulli², P. Pogliotti³, and C. Scavia², 2012, Analysis of microseismic signals and temperature recordings for rock slope stability investigations in high mountain areas, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 12, 2283-2298.

Colloques

Bottelin P., D. Jongmans, L. Baillet, T. Lebourg, D. Hantz, J. Turpin, C. Levy, O. Leroux, H. Cadet, L. Lorier and J-D Rouiller, Study of the Dynamic Response of Prone-to-fall Compartments Using Seismic Noise, *Near Surface 2012 – 18th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics Paris, France, 3- 5 September 2012, A12, 4p*



VOLET 2 : Détection, caractérisation et surveillance des aléas d'éboulements de volume intermédiaire (10^3 m^3 - 10^5 m^3) - *Individuazione, caratterizzazione e monitoraggio della pericolosità da crollo di taglia intermedia (10^3 m^3 - 10^5 m^3)*

Action 3 : Etude de la propagation

Studio della propagazione

Coordinateur : Vincent Labiouse (LMR – EPFL)

crealp





Action 3 : Etude de la propagation **Studio della propagazione**

I. CONTRIBUTION DU LMR-EPFL A L'ACTION 3 DU PROJET MASSA	125
I.1. Introduction.....	125
I.2. Modélisation physique de la propagation de masses granulaires.....	125
I.3. Modélisations numériques d'essais de laboratoire	130
I.4. Conclusions	139
I.5. Remerciements.....	140
I.6. Bibliographie.....	140
II. ATTIVITÀ SVOLTA DAL POLITECNICO DI TORINO	141
II.1. Descrizione del modello numerico	141
II.2. Prove di laboratorio EPFL.....	144
II.3. Applicazione del codice di calcolo ai risultati sperimentali dell'EPFL.....	145
II.4. Confronto POLITO - 3SR risultati energia	154
II.5. Applicazione a dei casi reali.....	159
II.6. Conclusioni	162
II.7. Pubblicazioni realizzate nell'ambito del progetto MASSA.....	163
II.8. Bibliografia.....	163
III. CONTEXTE DES TRAVAUX REALISES AU LABORATOIRE 3SR	164
III.1. Description du modèle numérique.....	165
III.2. Procédure de calibration des paramètres.....	166
III.3. Confrontation du code de calcul avec les résultats expérimentaux de l'EPFL	167
III.4. Etude paramétrique	170
III.4. Application à des cas réels	178
III.5. Conclusion.....	179
III.6. Publications effectuées dans le cadre du projet MASSA.....	180
IV. CONCLUSION ACTION 3	180



I. CONTRIBUTION DU LMR-EPFL A L'ACTION 3 DU PROJET MASSA

I.1. Introduction

La propagation des éboulements rocheux est un processus complexe dont les mécanismes et les paramètres influents ne sont encore que très peu compris. En effet, de tels événements étant presque toujours uniques (contrairement aux chutes de blocs), les déductions que l'on peut faire à partir des observations in situ sont extrêmement ardues au vu du nombre élevé de paramètres potentiellement influents, e.g. caractéristiques topographiques du versant et propriétés mécaniques des matériaux impliqués (Labiouse 2011).

Les mécanismes de propagation, les modèles mathématiques les décrivant et les paramètres relatifs étant mal connus, on conçoit toute la difficulté de valider des programmes de calcul développés pour leur modélisation.

Par contre, des expérimentations de laboratoire menées sur modèles réduits (modélisation physique) consistant à lâcher des blocs ou particules granulaires sur une topographie idéalisée constituent une excellente alternative de validation et calage des codes de calcul développés. En effet, non seulement la géométrie du modèle réduit et les propriétés des matériaux sont parfaitement contrôlées, mais de surcroît l'influence de ces paramètres peut être quantifiée et analysée. Dès lors, une confrontation systématique des observations et mesures faites pour diverses configurations d'essais (e.g. pente, hauteur, volume, matériaux) avec les résultats numériques permet de tester, et d'améliorer le cas échéant, les programmes de calcul.

I.2. Modélisation physique de la propagation de masses granulaires

a) Dispositif d'essai et campagnes expérimentales

Des campagnes expérimentales sont menées au Laboratoire de Mécanique des Roches avec pour objectifs :

- d'améliorer la compréhension des mécanismes en jeu lors de la propagation d'avalanches rocheuses ;
- d'identifier les paramètres influents, puis de quantifier leur influence sur l'étendue des zones susceptibles d'être touchées ainsi que sur les caractéristiques du dépôt final ;
- d'obtenir un ensemble de données expérimentales permettant de valider et caler des codes de calcul.

Les campagnes expérimentales sont menées en lâchant d'une boîte des matériaux granulaires secs sur un plan incliné qui se termine par une zone d'accumulation horizontale (Figure 1). Les essais sont organisés afin de mettre en évidence l'influence sur la propagation de la masse et la morphologie du dépôt (longueur, largeur, hauteur) de divers paramètres, à savoir: la nature du matériau (sable, gravier, briquettes), la hauteur de lâcher, le volume de matériau et sa séquence de lâcher (en une ou plusieurs fois), l'inclinaison du plan et le type de matériau constituant sa surface (rugueux ou lisse), la morphologie de la transition entre les plans incliné et horizontal (brusque ou progressive).

Une première campagne expérimentale antérieure au projet MASSA a été menée dans le cadre de la thèse de doctorat d'Irene Manzella (2008) intitulée : « Dry rock avalanche propagation: unconstrained flow experiments with granular materials and blocks at small scale ». Les résultats ont fait l'objet de publications (Manzella et Labiouse 2008, 2009, 2013) auxquelles le lecteur intéressé se référera.

Une seconde campagne expérimentale a ensuite été menée pour préciser l'influence de certains facteurs. Elle a fait l'objet de la thèse de doctorat de Claire Sauthier (2012) financée par le Fonds National Suisse et intitulée : « Modélisation physique et analyse numérique de la propagation d'une masse granulaire : contribution à l'étude des avalanches rocheuses ». Les essais de cette campagne ont été réalisés sous les conditions suivantes :

Matériau	Gravier (\varnothing 1-2 mm)
Volume	20, 40 et 100 litres
Hauteur de chute (pied de la boîte)	0.5, 1.0, 1.5 et 2.0 m
Inclinaison	37.5° et 45°
Rayon de courbure de la transition	0.1, 0.25, 0.5 et 1.0 m
Etat de la surface	Lisse (forex)

En complément d'une mesure manuelle des principales caractéristiques du dépôt (runout, longueur, largeur), la morphologie de celui-ci et la position de son centre de gravité sont déterminées grâce à une technique métrologique dite de projection des franges (collaboration avec le laboratoire de nanophotonique et métrologie de l'EPFL). Il s'agit d'une méthode optique qui permet de reconstruire la morphologie d'un objet en mesurant la distorsion de franges sinusoïdales projetées sur sa surface. Récemment, cette méthode a également été appliquée pour suivre la géométrie de la masse et la position de son centre de gravité au cours de la propagation. Un projecteur et une caméra numérique à acquisition rapide sont utilisés à cet effet (Figure 1).

La Figure 2 illustre à titre d'exemple le dépôt résultant d'un lâcher de 100 litres de gravier depuis 1 mètre de hauteur sur un plan incliné à 45° terminé par une transition courbe de 25 cm de rayon. Les franges sinusoïdales projetées sur le dépôt avec un certain angle d'incidence apparaissent déformées sur les images acquises par la caméra numérique. Moyennant une calibration préalable du système de mesure, la distorsion des franges peut être convertie en hauteur, ce qui permet de déterminer la géométrie du dépôt.

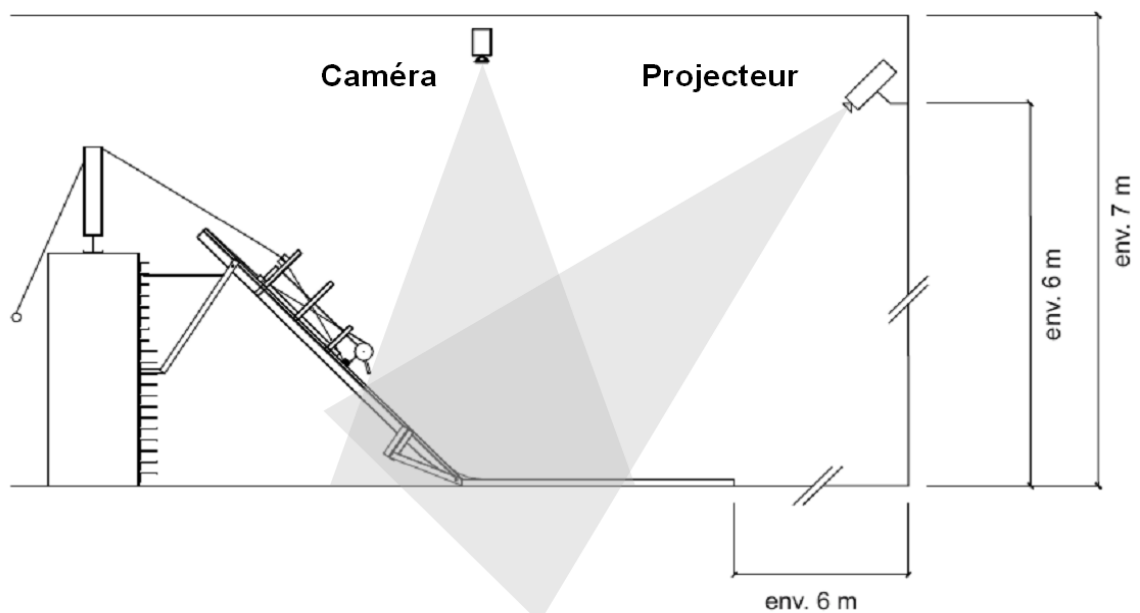


Figure 1 : Dispositifs d'essai et de mesure utilisés pour l'étude de la propagation d'avalanches rocheuses [Sauthier 2012]

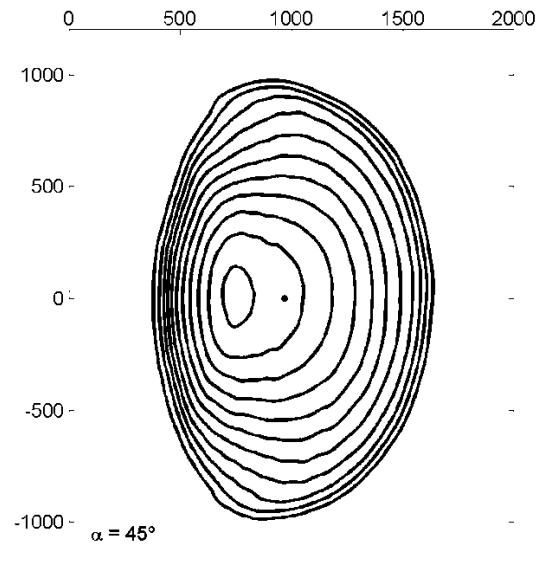


Figure 2 : Dépôt résultant d'un lâcher de 100 litres de gravier depuis 1 mètre de hauteur sur un plan incliné à 45° terminé par une transition courbe de 25 cm de rayon. Distorsion des franges sinusoidales projetées sur le dépôt (photo à gauche) et résultat du traitement d'images (graphe à droite).

Au cours de ce dernier travail de recherche mené au LMR (Sauthier 2012), près de 300 essais ont été réalisés. L'analyse des résultats a permis de préciser l'influence des divers paramètres variés lors des campagnes expérimentales (volume, hauteur de chute, pente du plan incliné et courbure de la transition avec le plan horizontal) sur les caractéristiques du dépôt final (distances de propagation du front et du centre de gravité, longueur, largeur et morphologie) ainsi que sur le mouvement de la masse au cours de la propagation (étalement et vitesse du front avant). Une étude quantitative de la dépendance des caractéristiques du dépôt final en fonction des paramètres variés a également été menée. Les résultats contribuent à une meilleure compréhension des phénomènes en jeu lors de la propagation (sources de dissipation d'énergie, transfert de quantité de mouvement) et devraient permettre à terme d'améliorer l'estimation empirique ou, mieux, la prédiction numérique des zones atteintes par la masse rocheuse.

a) Essais avec une masse structurée au départ

L'action 3 du projet MASSA s'intéressant à la propagation de masses rocheuses de volume intermédiaire (entre 10^3 et 10^5 m³), il était prévu que le LMR-EPFL mène sur le dispositif d'essai décrit à la Figure 1 une campagne expérimentale consistant en des lâchers de masses constituées de blocs avec des arrangements initiaux différents et pouvant se disloquer au cours de la propagation. Le nombre de blocs utilisés (jusqu'à 10'000) étant relativement proche du nombre de blocs impliqués dans des événements réels, la réalisation de tels essais peut en effet contribuer à mieux comprendre certains phénomènes en jeu lors de la propagation d'éboulements de taille intermédiaire ainsi qu'à déterminer les paramètres les plus influents.

A défaut de financement, un seul essai a pu effectivement être réalisé dans le cadre du projet MASSA. Cette expérimentation avait notamment pour objet de fournir des données expérimentales pour la validation et le calage des codes de calcul utilisés dans le volet modélisation numérique de l'action 3.

Une masse composée de briques empilées a été lâchée depuis une boîte située à 1.11 m de hauteur sur un plan lisse (forex) incliné à 45°, terminé par une transition courbe de 10 cm de rayon et un plan horizontal (Figure 1). La source, d'environ 20 litres et illustrée à la figure 3, était constituée de 4840 petites briques de terre cuite (31 mm x 15 mm x 8 mm) soigneusement disposées selon un parallélépipède subdivisé comme suit :

- Sur la largeur, par 11 briques alignées selon leur plus grande arête (i.e. 31 mm) ;
- Sur la profondeur, par 20 briques disposées les unes derrière les autres, selon l'arête de 15 mm ;
- Sur la hauteur, par 22 briques empilées les unes sur les autres, selon leur épaisseur de 8 mm.

La Figure 4 illustre le dépôt résultant de ce lâcher. Il se caractérise par une longueur de 1.65 m, une largeur de 1.21 m et une propagation sur le plan horizontal de 1.82 m (mesurée depuis l'intersection avec le plan incliné). Une analyse de la distorsion de franges sinusoïdales projetées sur la surface du dépôt (technique métrologique de projection des franges) a permis de reconstruire la morphologie du dépôt (graphe de gauche de la figure 4) et ensuite de déterminer la position de son centre géométrique : 1.02 m depuis l'intersection avec le plan incliné et 13 mm au-dessus du plan horizontal.

Ces résultats sont à mettre en regard avec ceux obtenus lors d'un essai relativement analogue effectué dans le cadre de la thèse d'Irene Manzella (2008), à savoir le lâcher d'une masse de briques structurées au départ (20 litres) depuis 1 m de hauteur sur un plan lisse incliné à 45°, mais présentant en son pied une discontinuité angulaire avec le plan horizontal. Le dépôt résultant se caractérisait par une longueur de 1.09 m, une largeur de 0.98 m, une propagation sur le plan horizontal de 0.87 m et une abscisse du centre de gravité de 0.32 m.

La différence très significative de propagation entre ces deux lâchers de conditions relativement comparables résulte du type de transition entre les plans incliné et horizontal, à savoir progressive (rayon de 10 cm) pour le premier et brusque (discontinuité angulaire) pour le second. Une analyse des images prises par la caméra rapide montre que la masse ordonnée au départ demeure relativement structurée au-delà du plan incliné lorsque la transition avec le plan horizontal est progressive. La dissipation d'énergie se fait donc principalement par frottement à la base et peu par chocs en son sein. Par contre, en cas de transition brusque entre les plans incliné et horizontal, la masse perd sa structure initiale (elle se fragmente) à cause du brusque changement dans la direction de l'écoulement, ce qui induit une perte d'énergie importante par frottement et par chocs en son sein. Il s'ensuit une propagation significativement plus courte sur le plan horizontal.

Ce constat expérimental souligne l'importance de la morphologie de la pente sur la distance parcourue par une masse rocheuse. Une telle influence du profil du versant sur la propagation avait déjà été relevée par Heim en 1932 (« regularity of the pathway ») et reprise par Abele en 1974. Très peu de recherches se sont néanmoins intéressées à quantifier l'influence de ce facteur, manifestement très important.

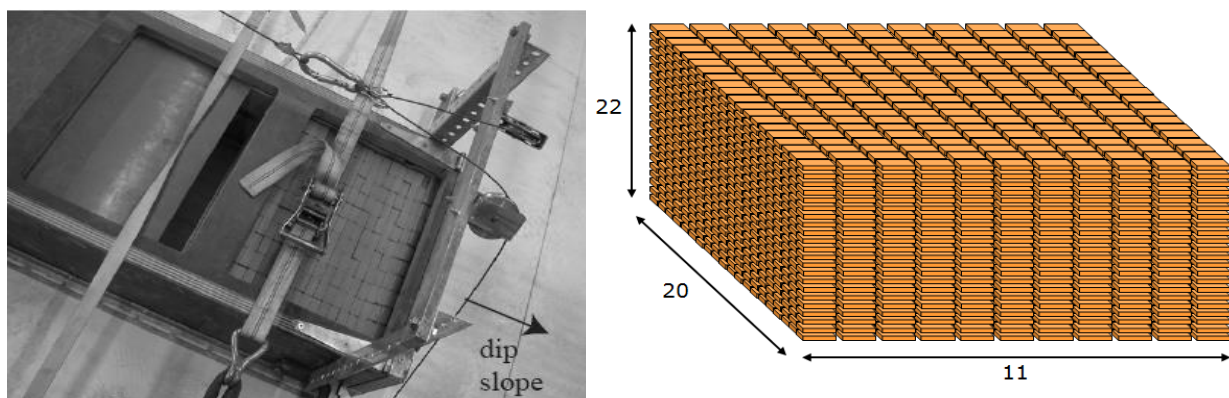


Figure 3 : Configuration des briques au départ (photo tirée de la thèse d'Irene Manzella, 2008)

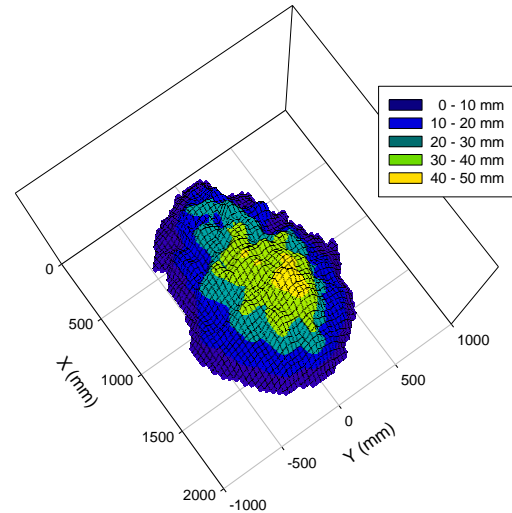
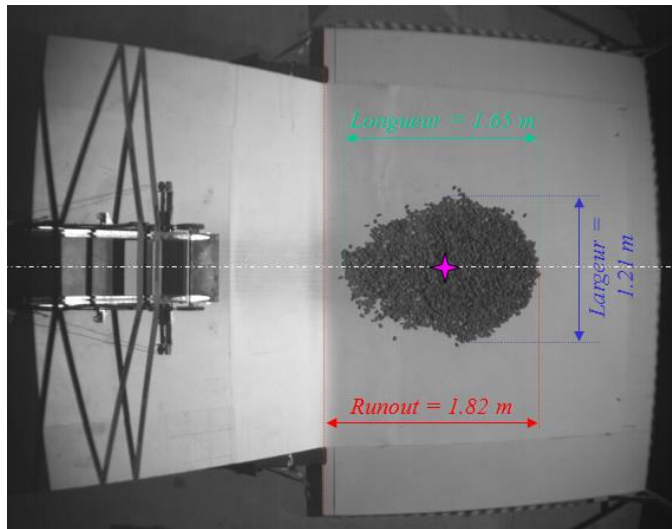


Figure 4 : Dépôt résultant du lâcher d'environ 20 litres de briques structurées au départ depuis 1.11 mètre de hauteur sur un plan lisse incliné à 45° terminé par une transition courbe de 10 cm de rayon. Mesure directe des principales caractéristiques du dépôt (image de gauche) et indirecte de sa géométrie selon la technique de projection des franges (graphe de droite).

La partie supérieure du tableau 1 ci-dessous résume les diverses configurations expérimentales pour lesquelles des résultats étaient à disposition en vue d'une comparaison avec les modélisations numériques. La partie inférieure du tableau synthétise pour chacun des codes de calcul utilisés les divers cas ayant été modélisés.

Expérimentations physiques avec données disponibles												
Matériau	Gravier ($\phi = 34^\circ$; $\phi_b = 23.5^\circ \pm 0.5^\circ$)								Briques			
	Brusque				Courbe R=0.5 m				Brusque			0.1 m
Disposition	-	-	-	-	-	-	-	-	Ord.	Vrac	Vrac	Ord.
Pente (°)	45	45	45	37.5	45	45	45	45	45	45	37.5	45
Volume (l)	40	20	40	40	40	20	40	20	40	40	40	≈20
Hauteur (m)	1	1	1.5	1	1	1	1.5	1.5	1	1	1	1.11

Modélisations numériques effectuées												
DAN3D	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓				
RASH3D $a_c=0$	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓				
RASH3D $a_c \neq 0$	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓				
EPAN3D	✓	✓	✓	✓	✓				✓	✓		
YADE									✓	✓	✓	
3DEC									✓			

Tableau 1 : Synthèse des expérimentations physiques et des modélisations numériques ayant fait l'objet de comparaisons.



I.3. Modélisations numériques d'essais de laboratoire

a) Calculs avec le logiciel DAN3D

- **Logiciel et méthodologie du travail**

Le logiciel DAN3D a été développé à l'Université de Colombie Britannique (UBC, Vancouver, Canada) au sein de l'équipe du Professeur Hungr (Hungr 1995 ; McDougall and Hungr 2004 ; McDougall 2006 ; Hungr and McDougall 2009). Ce code de calcul appartient à la famille des méthodes basées sur la mécanique des milieux continus et qui assimilent la masse rocheuse à un fluide équivalent. Le lecteur intéressé par les équations (St-Venant) et leur implémentation numérique consultera les références susmentionnées. Le programme a été acquis par le Canton du Valais et utilisé depuis quelques années au sein du LMR pour la modélisation tant d'expériences de laboratoire que d'événements survenus ou potentiels sur le Canton du Valais (e.g. Randa, La Suche, Chalchofenzug). Un travail de comparaison a aussi été entrepris avec le programme RASH3D utilisé par le Politecnico di Torino (Marina Pirulli et Claudio Scavia).

La méthodologie adoptée pour la modélisation numérique a consisté dans un premier temps à déterminer le jeu de paramètres physique (angle de frottement dynamique à la base pour le modèle rhéologique frictionnel retenu) et numériques (nombre de particules N, coefficient de lissage des particules B, coefficient de lissage de la vitesse C et coefficient de rigidité D) permettant de reproduire au mieux un essai de référence, à savoir un lâcher de 40 litres de gravier depuis 1 m de hauteur sur un plan lisse (forex) incliné à 45° présentant une transition courbe de 50 cm de rayon en son pied. Ce jeu de paramètres optimisé a ensuite été appliqué aux autres configurations expérimentales étudiées afin de déterminer l'aptitude du programme à reproduire correctement l'influence des divers paramètres variés, à savoir le volume de gravier, la hauteur de chute ainsi que la géométrie de la surface de glissement (i.e. pente et nature de la transition entre le plan incliné et le plan horizontal).

- **Détermination des paramètres du modèle**

Une très bonne adéquation entre la modélisation numérique et les données expérimentales pour l'essai de référence a été obtenue pour le jeu de paramètres suivants :

- N = 2000 Nombre de particules
- B = 4 Coefficient de lissage des particules
- C = 0.02 Coefficient de lissage de la vitesse
- D = 1 Coefficient de rigidité
- $\phi_b = 23^\circ$ Angle de frottement effectif bulk dynamique apparent à la base

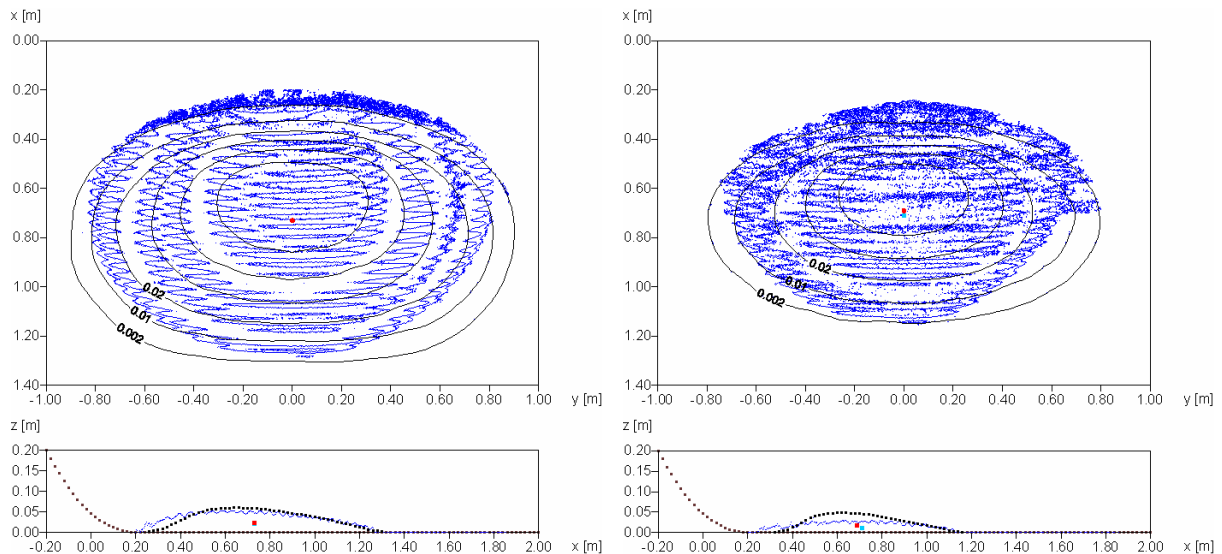
L'angle de frottement dynamique à la base de 23° retenu pour les calculs coïncide avec l'angle de frottement gravier-forex déterminé expérimentalement ($23.5^\circ \pm 0.5^\circ$). La valeur des paramètres numériques a quant à elle été fixée après une analyse de sensibilité et afin d'assurer la meilleure correspondance entre les résultats numériques (en particulier le runout et la position du centre de gravité du dépôt) et expérimentaux pour l'essai de référence. Parmi les paramètres retenus, le coefficient de lissage de la vitesse C se distingue quelque peu de celui admis par McDougall (2006) pour la modélisation d'évènements réels, à savoir C=0.01. Il en va différemment du coefficient de rigidité D, dont la valeur recommandée est de 200 selon McDougall (2006), mais de 1 pour une bonne reproduction des essais de laboratoire ! Parmi les paramètres numériques, ce coefficient s'est avéré être le plus influent sur les résultats.

- **Comparaison avec les résultats expérimentaux**

La Figure 5 présente les résultats expérimentaux (en bleu) et numériques (en noir) pour l'essai de référence (40 litres de gravier depuis 1 m de hauteur sur un plan lisse (forex) incliné à 45° présentant une transition courbe de 50 cm de rayon en son pied ; graphes en haut à gauche) et pour trois autres essais : 20 litres depuis 1 m (en haut à droite), 40 litres depuis 1.5 m (en bas à gauche) et 20 litres depuis 1.5 m (en bas à droite). On observe que le jeu de paramètres déterminés à partir de l'essai de référence permet de reproduire de

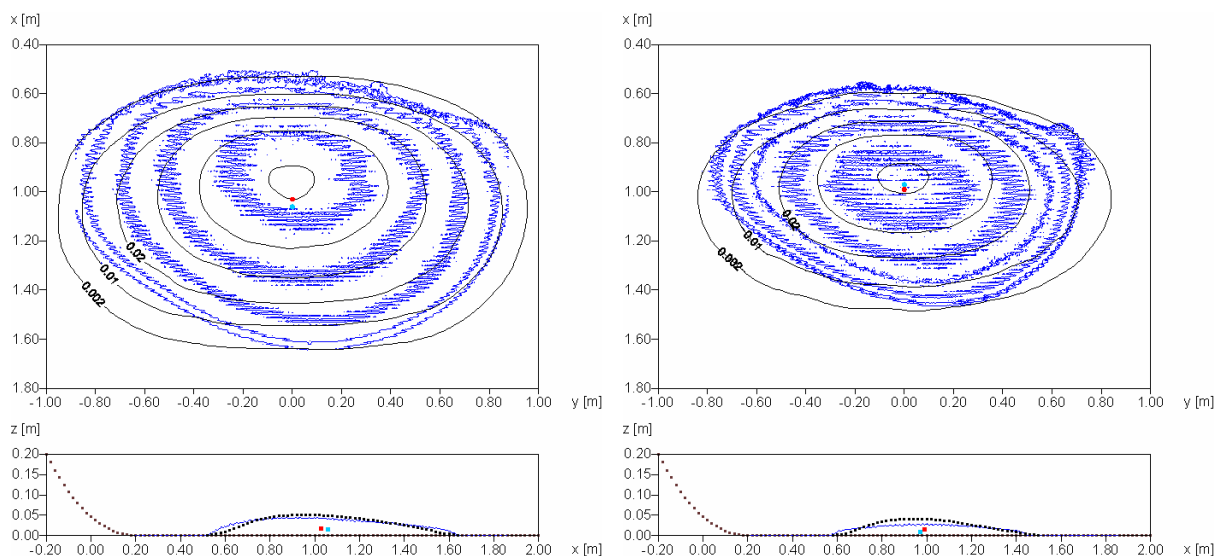


façon très satisfaisante les autres cas. Le runout, l'extension longitudinale et la position du centre de gravité du dépôt sont en particulier bien prédits ; par contre la morphologie de celui-ci et son extension latérale sont moins bien modélisées. En effet, les modélisations numériques donnent un dépôt final de forme elliptique régulière avec un front arrière en pente douce et de type concave, contrairement à la modélisation physique qui met en évidence une asymétrie longitudinale du dépôt et un front arrière pentu et de type convexe.



40l, 1m, 45°, surface lisse, transition courbe
Essai de référence pour le calage des paramètres

20l, 1m, 45°, surface lisse, transition courbe



40l, 1.5m, 45°, surface lisse, transition courbe

20l, 1.5m, 45°, surface lisse, transition courbe

Figure 5 : *Vue en plan et en coupe du dépôt mesuré expérimentalement (en bleu ; Manzella 2008) et calculé par DAN3D (en noir ; Sauthier 2012) pour l'essai de référence (40 litres de gravier depuis 1 m de hauteur sur un plan lisse (forex) incliné à 45° présentant une transition courbe de 50 cm de rayon en son pied ; graphes en haut à gauche) et pour trois autres essais : 20 litres depuis 1 m (en haut à droite), 40 litres depuis 1.5 m (en bas à gauche) et 20 litres depuis 1.5 m (en bas à droite). La position du centre de gravité du dépôt est représentée en bleu clair pour l'expérimental et en rouge pour le numérique.*

Le constat énoncé ci-avant d'une très bonne correspondance des principales grandeurs caractéristiques du dépôt (i.e. runout, longueur et position du centre de gravité) déterminées expérimentalement et numériquement est à nuancer sur la base d'autres résultats obtenus dans le cadre de la thèse de Claire Sauthier (2012). Si les résultats numériques demeurent dans l'ensemble assez satisfaisants, l'influence du volume de matériau et de la hauteur de chute apparaît néanmoins moins bien quantifiée lorsque la gamme de ces paramètres s'élargit, à savoir pour des volumes de 20, 40 et 100 litres, et des hauteurs de chute de 0.5,



1, 1.5 et 2 m.

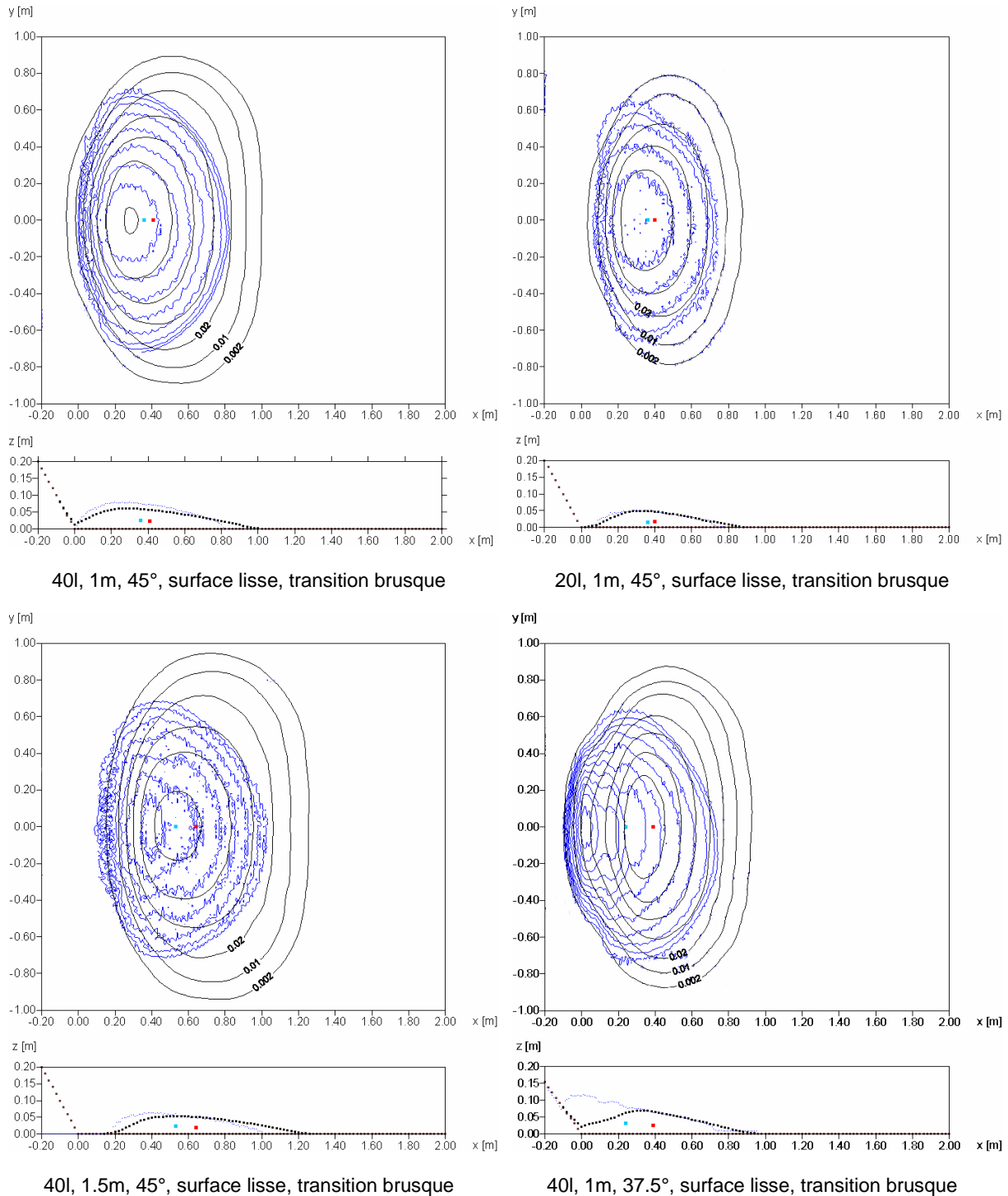


Figure 6 : Vue en plan et en coupe du dépôt mesuré expérimentalement (en bleu ; Manzella 2008) et calculé par DAN3D (en noir ; Sauthier 2012) pour des lâchers de gravier réalisés sur un plan lisse incliné à 45° présentant une transition brusque avec le plan horizontal (i.e. discontinuité angulaire) : 40 litres depuis 1 m de hauteur (en haut à gauche) ; 20 litres depuis 1 m (en haut à droite), 40 litres depuis 1.5 m (en bas à gauche). Lâcher de 40 litres depuis 1 m sur un plan incliné à 37.5° (en bas à droite). La position du centre de gravité du dépôt est représentée en bleu clair pour l'expérimental et en rouge pour le numérique.

Une différence très significative de propagation est observée expérimentalement lors de lâchers sur un plan incliné présentant en son pied une discontinuité angulaire avec le plan horizontal (Manzella et Labiouse 2013). La distance maximale parcourue par la masse (runout) ainsi que la propagation de son centre de gravité sont beaucoup plus courtes. Ceci résulte du brusque changement de direction lors de l'écoulement qui induit une importante perte d'énergie par frottement au sein de la masse, en complément de la dissipation d'énergie par frottement à la base.



La Figure 6 présente les résultats expérimentaux (en bleu) et numériques (en noir) pour 4 essais réalisés avec une transition brusque entre les plans incliné et horizontal. Trois d'entre eux sont relatifs à des lâchers sur un plan incliné à 45° : 40 litres depuis 1 m (graphes en haut à gauche), 20 litres depuis 1 m (en haut à droite) et 40 litres depuis 1.5 m (en bas à gauche) ; le dernier essai correspondant quant à lui au lâcher de 40 litres depuis 1 m sur un plan incliné à 37.5° (graphes en bas à droite). Il est manifeste que le jeu de paramètres utilisé pour les modélisations numériques de l'essai de référence et des autres essais menés avec une transition courbe entre les plans incliné et horizontal (Figure 5) n'est pas satisfaisant pour la modélisation de la propagation lorsque le dispositif d'essai présente une discontinuité angulaire. Certes, les distances parcourues par le front de la masse (runout) et par son centre de gravité sont plus courtes que celles obtenues dans les calculs avec une transition courbe ; cependant elles sont surévaluées, parfois passablement, par rapport aux mesures expérimentales. Un angle de frottement dynamique à la base de 24° (au lieu de 23°) permet une meilleure adéquation de la position du centre de gravité pour les essais sur un plan incliné à 45°, sans pour autant améliorer significativement la prédiction des autres grandeurs caractéristiques du dépôt, à savoir le runout, sa longueur et sa largeur.

Il n'est pas surprenant qu'une configuration topographique présentant une transition brusque et dès lors induisant une dissipation d'énergie conséquente au sein de la masse en mouvement (par chocs et frottement entre les particules) soit difficile à modéliser, voire induise des instabilités numériques, avec DAN3D et des programmes analogues (e.g. RASH3D). En effet, de par leurs hypothèses, ces programmes concentrent la dissipation d'énergie à la base de la masse en mouvement par frottement sur le versant sous-jacent et ne sont pas en mesure de modéliser rigoureusement la part d'énergie dissipée au sein de la masse (e.g. Mancarella et Hungr 2010). La prise en compte de cette dernière ne peut être faite qu'en augmentant artificiellement la valeur des paramètres rhéologiques caractérisant le frottement à la base, à savoir l'angle de frottement effectif bulk dynamique apparent à la base φ_b pour le modèle frictionnel.

- **Conclusion de la comparaison**

Il ressort des comparaisons entre modélisations physiques et numériques que les résultats fournis par le code DAN3D sont dans l'ensemble satisfaisants. En particulier, l'influence du volume de matériau et de la hauteur de chute sur les principales caractéristiques du dépôt est raisonnablement bien prédite, même si celle-ci semble moins bien quantifiée lorsque la gamme des paramètres s'élargit. Il apparaît plus problématique de reproduire avec une seule valeur de l'angle de frottement à la base φ_b la distance parcourue et le dépôt de la masse granulaire pour les diverses configurations géométriques étudiées, en particulier dans le cas des essais avec une transition angulaire en pied de pente ou avec un petit rayon de courbure. Ceci peut résulter de problèmes numériques et/ou des hypothèses inhérentes aux codes de calcul tels que DAN3D (mécanique des milieux continus, assimilation de la masse rocheuse à un fluide équivalent incompressible, faible épaisseur de l'écoulement, équations de Saint Venant moyennées sur la hauteur, frottement concentré à la base de la masse en mouvement).

b) Calculs avec le logiciel EPAN3D

- **Description du logiciel**

Le logiciel EPAN3D a été développé au Laboratoire d'Aix en Provence du CETE Méditerranée par Jean-François Serratrice. Il a pour objectif de simuler la propagation le long d'un versant puis l'accumulation et l'étalement en pied de versant d'une masse rocheuse. Le calcul s'appuie sur la topologie du site définie à trois dimensions par un modèle numérique de terrain (MNT). La masse rocheuse instable est discrétisée 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 pied de versant où ils s'accumulent et s'étalement. Le MNT tenant compte de la masse rocheuse en mouvement est mis à jour à chaque pas de calcul. La dissipation de l'énergie est produite essentiellement par frottement des éléments entre eux et sur la surface du versant.



Plus précisément, après discrétisation de la masse rocheuse instable, le calcul s'effectue par pas de temps successifs. A un instant donné, la trajectoire d'un élément glissant au sein de la masse rocheuse est déterminée par l'équation dynamique du mouvement appliquée au plan tangent local couvert par l'élément. Ainsi, à chaque instant, la position de tous les éléments et donc l'étendue de la masse rocheuse et sa forme jusqu'à sa stabilisation complète est connue. Pour cela, la modélisation fait appel à deux lois d'évolution locales (relatives aux éléments) :

- une première qui fixe le rapport entre le frottement et la vitesse instantanée d'un élément et qui s'inspire des lois proposées par Pouliquen et Forterre (2002) pour les milieux granulaires ;
- une seconde qui traduit l'évolution de la forme et du volume d'un élément au cours de son déplacement et qui est paramétrée entre autres par des coefficients d'allongement, d'étalement et de foisonnement.

- **Détermination des paramètres du modèle**

Le modèle de calcul sous EPAN3D est paramétré par 5 familles de paramètres :

- les paramètres permettant de définir le volume de départ,
- les paramètres physiques et mécaniques,
- les paramètres cinématiques,
- les paramètres numériques,
- les paramètres de sortie.

L'expérimentation de référence considérée est le lâcher de 40 litres de gravier depuis 1 m de hauteur sur un plan lisse (forex) incliné à 45° présentant en son pied une transition angulaire avec le plan horizontal. Le volume est simulé par des couches d'éléments glissants contenus dans trois rangées d'éléments fixes simulant le contenant, la boîte (Figure 7 à gauche). Ainsi le modèle numérique s'approche au mieux des conditions expérimentales. Pour un volume de 20L, le nombre de lignes d'éléments en profondeur est divisé par 2. Quel que soit le matériau étudié, la même densité volumique d'éléments a été choisie.

Les paramètres mécaniques et physiques comprennent le poids volumique et les paramètres des lois d'évolution. Ainsi le poids volumique choisi pour les trois types de matériau (gravier, briques empilées, briques en vrac) est celui évalué expérimentalement (Manzella et Labiouse 2009) : 14,3 kN/m³ pour le gravier, 16 kN/m³ pour les briques empilées, 10 kN/m³ pour les briques en vrac.

Les paramètres de frottement (angles et vitesses-seuil) sont calés sur l'expérimentation de référence. Les angles de frottement sont augmentés pour l'expérimentation sur plan incliné rugueux. Les paramètres de frottement sont légèrement modifiés dans le cas du matériau « brique ».

Comme constaté expérimentalement, il est affecté aux briques empilées un coefficient de foisonnement évalué à partir des poids volumiques des briques en vrac et des briques empilées. Aucun foisonnement n'est considéré pour les briques en vrac. Un coefficient très faible est choisi pour le gravier.

Concernant les autres paramètres physiques, ils sont fixes pour les deux types de matériaux (gravier et brique). Les paramètres d'allongement et d'étalement sont tels que (Figure 7 au centre et à droite) :

- le gravier est représenté par des éléments circulaires et étalés initialement qui s'étaient encore pendant le mouvement pour aboutir à des formes adoucies du dépôt final ;
- les briques sont représentées par des éléments allongés initialement qui ne changent pas de forme ni ne s'étaient pour aboutir à un dépôt de forme chaotique.

Les paramètres cinématiques sont choisis en accord avec le mouvement concerné dans le cadre des expérimentations, à savoir une masse de matériau de vitesse initiale nulle orientée dans la direction de plus grande pente. Du fait de la topologie plane de la surface-support au mouvement, le coefficient tenant compte de la dissipation aux changements de

penne est considérée nulle.

Le principal paramètre numérique, le pas de temps, est choisi égal à 0.01 s après une étude paramétrique et un calage sur l'expérimentation de référence (Figure 8).

Les paramètres de sortie permettent de définir la précision retenue pour les distances, les vitesses et les accélérations ainsi que le contenu des fichiers de sortie du calcul.

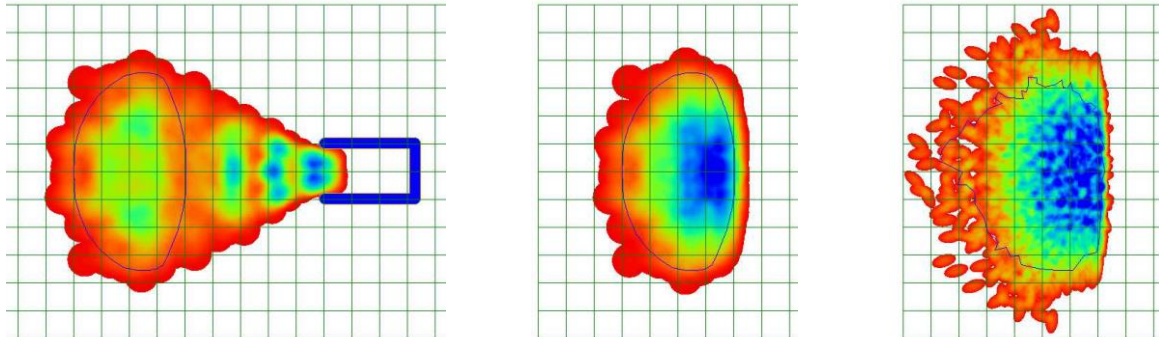


Figure 7 : Exemples de simulations sous EPAN3D. Vue en plan de l'écoulement d'une masse de gravier (à gauche), d'un dépôt final de gravier (au centre) et d'un dépôt final de briques empilées au départ (à droite). La gradation de couleur du rouge au bleu indique la gradation croissante de la hauteur de tas.

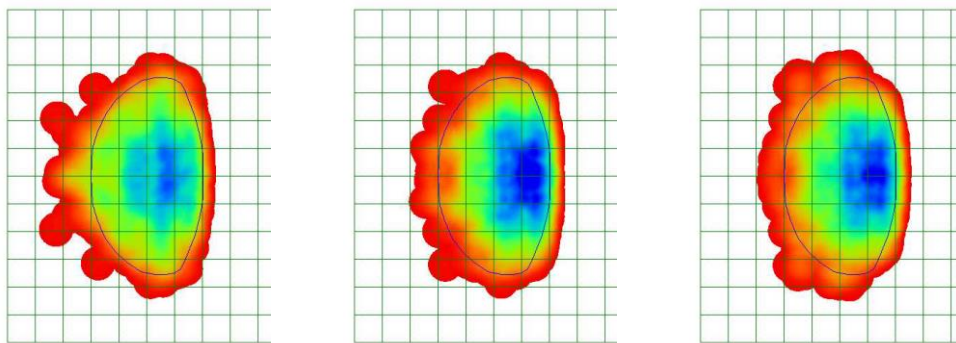


Figure 8 : Etude paramétrique du pas de temps sur le cas de référence : $\Delta t = 0.05$ s (à gauche) ; $\Delta t = 0.01$ s (au centre) ; $\Delta t = 0.005$ s (à droite).

- **Comparaison avec les résultats expérimentaux**

Les expérimentations présentées dans Manzella et Labiouse (2009) ont été simulées avec le modèle décrit ci avant.

L'expérimentation de référence sur laquelle les paramètres du modèle ont été calés, correspond au lâcher de 40 litres de gravier depuis 1 m de hauteur sur un plan peu rugueux (forex) incliné à 45° et terminé par une transition angulaire avec le plan horizontal. La simulation avec EPAN3D permet de visualiser une vue en plan du dépôt final où la gradation de couleur représente la topologie du dépôt (Figure 9). Les couleurs indiquent donc des altitudes entre 0 cm en rouge et 8.5 cm en bleu. Le dépôt obtenu par simulation dépasse la frontière du dépôt expérimental. Cependant le volume en jeu au-delà du contour expérimental est marginal d'autant que le contour expérimental a été relevé à 2 mm pour tenir compte de la taille des grains. La bordure arrière du dépôt obtenu par simulation est légèrement en arrière et plus rectiligne par rapport à celle du dépôt expérimental. Globalement, la simulation reproduit bien le contour du dépôt en forme et en dimension.

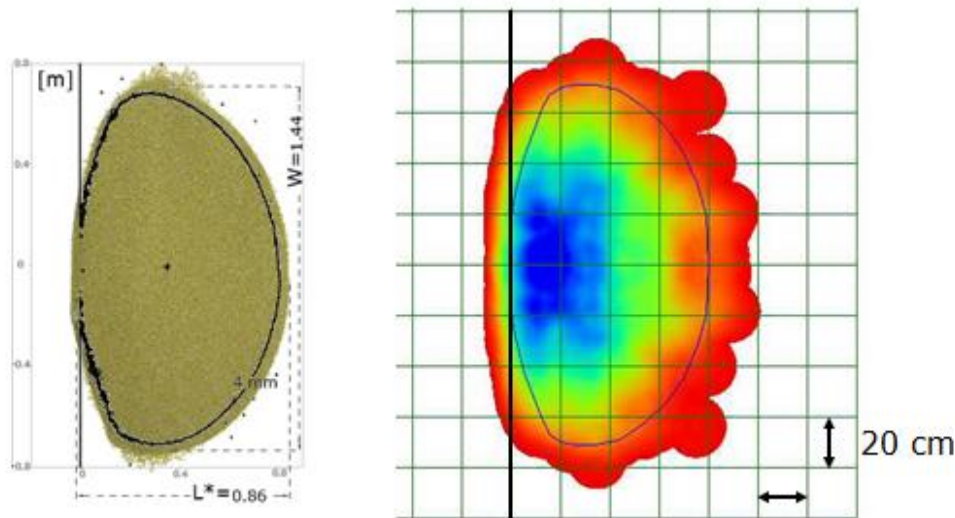


Figure 9 : Expérimentation de référence : volume de 40 litres de gravier largué sur un plan incliné à 45° à 1m de hauteur : vue en plan du dépôt expérimental (Manzella et Labiouse 2009) et dépôt obtenu par simulation avec EPAN3D (le contour du dépôt expérimental est rappelé par une ligne bleue sur la simulation).

Lorsqu'on diminue le volume de gravier de 40 à 20 litres, toutes autres conditions d'essai demeurant égales, la morphologie ainsi que la position du centre de gravité du dépôt varient peu, par contre l'étalement de la masse diminue (Figure 10, 2^{ème} ligne). Ces constats expérimentaux sont qualitativement reproduits numériquement.

Lorsqu'on augmente la hauteur de lâcher de 1 à 1.5 m, les autres conditions d'essai demeurant identiques, on constate expérimentalement une translation globale du dépôt (Figure 10, 3^{ème} ligne). Cette translation quasi-uniforme des fronts avant et arrière de la masse ainsi que de son centre de gravité n'est que peu reproduite numériquement.

Lorsqu'on augmente la rugosité du plan incliné et donc le frottement à la base de la masse en mouvement, on constate que le dépôt s'étale et se translate d'autant plus en longueur que la pente est lisse (Figure 10, 4^{ème} ligne). Cette observation est valable expérimentalement et numériquement.

Lorsqu'on diminue la pente du plan incliné de 45° à 37.5°, les autres conditions d'essai étant les mêmes, la masse se propage moins loin sur le plan horizontal et se dépose partiellement sur le plan incliné (Figure 10, 5^{ème} ligne). Le phénomène est plus marqué numériquement qu'expérimentalement.

Référence	Variante	Modélisation physique	Modélisation numérique
Cas de référence: Vol. : 40 litres 1 m de chute panneau lisse inclinaison 45° transition brusque			
Volume : 40 litres	20 litres		
Hauteur de chute : 1 m	1.5 m		
panneau lisse $\phi_b = 28^\circ$	rugueux $\phi_b = 32^\circ$		
Inclinaison 45°	37.5°		
transition brusque	Courbe R=50cm		

Figure 10 : Dépôt mesuré expérimentalement (au centre ; Manzella et Labiouse 2009) et calculé par EPAN3D (à droite) pour l'essai de référence (première ligne du haut et courbes noires) et pour diverses autres configurations : 20 litres ; 1.5 m de chute ; plan rugueux ; inclinaison de 37.5° ; transition courbe.

Lorsqu'on passe d'une transition angulaire (expérimentation de référence) à une transition courbe, on observe expérimentalement une translation bien plus importante de la masse ainsi qu'un étalement plus marqué du dépôt final (Figure 10, 6^{ème} ligne). Cette influence est à peine reproduite numériquement.

Lorsqu'on change de matériau et passe d'une masse de gravier à une masse constituée de briques disposées en vrac au départ, on observe aussi bien numériquement qu'expérimentalement une propagation analogue à celle avec du gravier (Figure 11, 1^{ère} ligne). Numériquement, le changement de matériau s'est traduit par un allongement des particules élémentaires constituant la masse de départ.

Lorsqu'on teste une masse de briques empilées au départ, on remarque aussi bien expérimentalement que numériquement que les éléments se propagent plus loin (Figure 11, 2^{ème} ligne). Numériquement, le changement de matériau par rapport à la masse de briques en vrac est introduit par un coefficient de foisonnement non nul.

Référence	Variante	Modélisation physique	Modélisation numérique
Cas de référence: Matériau : Gravier transition brusque	Matériau : Briques en vrac transition brusque		
Matériau : Gravier transition brusque	Matériau : Briques empilées transition brusque		
Matériau : Briques empilées transition brusque	Matériau : Briques empilées transition courbe R=50cm		

Figure 11 : Dépôt mesuré expérimentalement (au centre ; Manzella et Labiouse 2009) et calculé par EPAN3D (à droite) pour 3 lâchers de 40 litres de briques depuis 1 m de hauteur : briques en vrac et transition brusque (en haut) ; briques empilées et transition brusque (au milieu) ; briques empilées et transition courbe de 50 cm de rayon (en bas).

Finalement, lorsqu'on teste le lâcher d'un volume de briques empilées au départ sur un plan à transition courbe (rayon de 50 cm), on constate expérimentalement une propagation et



un étalement de la masse bien plus importants que dans le cas d'une transition angulaire entre les plans incliné et horizontal (Figure 11, 3^{ème} ligne). Cette influence est quelque peu reproduite dans les modélisations numériques, mais pas dans les proportions observées expérimentalement.

- **Conclusion de la comparaison**

Après avoir été paramétré sur une expérimentation de référence, le logiciel EPAN3D permet de reproduire qualitativement l'influence sur les caractéristiques du dépôt de certains des paramètres étudiés dans le cadre de la campagne expérimentale menée à l'EPFL. En particulier, ces modélisations numériques ont mis en évidence les tendances suivantes :

- la masse s'étale quand le volume augmente et lorsque la transition est courbe ;
- la propagation de la masse est d'autant plus longue que la hauteur du lâcher est élevée, que le frottement avec la surface de glissement est faible, que la pente est forte, que la transition est courbe ;
- le comportement d'une masse de briques en vrac est similaire à celui d'une masse de gravier ;
- l'étalement et la propagation d'une masse de briques empilées au départ sont plus importants que ceux d'une masse de briques disposées en vrac.

Il est cependant à noter que si l'influence de ces paramètres est reproduite qualitativement, des différences assez significatives peuvent être notées d'un point de vue quantitatif entre les caractéristiques du dépôt déterminées expérimentalement et numériquement. Ceci est notamment le cas pour la hauteur de lâcher et la pente du plan incliné, mais surtout pour le type de transition entre les plans.

Par ailleurs, le modèle EPAN3D ayant été éprouvé sur des cas réels (Séchilienne, La Clapière, Charmonétier, Six des Eaux Froides, Val Pola), il valide le caractère représentatif des expérimentations mises en place à petite échelle à l'EPFL vis-à-vis de la propagation des avalanches rocheuses.

I.4. Conclusions

Afin d'améliorer la compréhension des mécanismes en jeu lors de la propagation d'avalanches rocheuses ainsi que la délimitation des zones du territoire susceptibles d'être touchées par de tels événements catastrophiques, des campagnes expérimentales ont été menées au LMR-EPFL. Les essais qui consistent à lâcher des matériaux granulaires sur un plan incliné se terminant par une zone horizontale ont été organisés afin de mettre en évidence l'influence sur la propagation de la masse de divers paramètres potentiellement influents: nature et volume de matériau, hauteur de lâcher, inclinaison du plan et type de matériau constituant sa surface, morphologie de la transition entre les plans incliné et horizontal. Les données récoltées lors des campagnes expérimentales constituent une base de données intéressante pour évaluer la capacité prédictive des codes élaborés pour le calcul de propagation d'avalanches rocheuses.

Des modélisations numériques de certains essais ont été réalisées au moyen des programmes de calcul DAN3D (Université de Colombie Britannique, Canada) et EPAN3D (CETE d'Aix-en-Provence, France). Après détermination du jeu de paramètres pour un essai de référence, ces programmes permettent de reproduire qualitativement les observations faites pour diverses configurations de lâchers testées dans le cadre des campagnes expérimentales. Par contre, une prédiction quantitative de l'influence des divers paramètres variés sur les caractéristiques du dépôt est plus problématique. Particulièrement délicate est la prise en compte, avec un seul jeu de paramètres, de la géométrie du dispositif d'essai, à savoir l'inclinaison du plan incliné et la nature de la transition avec le plan horizontal (angulaire ou courbe). Une modélisation de la part d'énergie dissipée par frottement et chocs au sein de la masse en mouvement, notamment lors de changements de direction de l'écoulement, permettrait probablement une meilleure prédiction de l'influence de la topographie du versant sur la propagation de la masse.



I.5. Remerciements

Les modélisations physiques décrites dans ce rapport sont le fruit du travail de plusieurs personnes et du financement de divers organismes : Laurent Gastaldo, Claire Sauthier, Irene Manzella (LMR-EPFL) ; Sébastien Equis (NAM-EPFL) ; FNS (Subside 200021-120001) ; Canton du Valais (Programme Interreg IIIA).

I.6. Bibliographie

Heim A (1932) Bergsturz und menschenleben. Frets und Wasmuth, Zurich

Hungr, O., 1995. Two numerical models for landslide dynamic analysis, Canadian Geotechnical Journal, 32(4), 610-623.

Hungr O., McDougall S., 2009. A model for the analysis of rapid landslide motion across three-dimensional terrain. Computers & Geosciences, 35(5), 978-992.

Labiouse V., 2011. Modélisations physiques au LMR – Exemples du cylindre creux et d'avalanches rocheuses. Journée d'automne de la Société Géotechnique Suisse : 75ème anniversaire des laboratoires de mécanique des sols et des roches de l'EPFL, Lausanne, 18 novembre 2011, Publ. de GS N° 163, 24-32.

Mancarella D., Hungr O., 2010. Analysis of run-up of granular avalanches against steep, adverse slopes and protective barriers. Revue canadienne de géotechnique, 2010, 47(8), pp. 827-841

Manzella I., Labiouse V., 2008. Qualitative analysis of rock avalanches propagation by means of physical modelling of non-constrained gravel flows. Rock Mechanics and Rock Engineering (2008), 41 (1), pp. 133–151

Manzella I., Labiouse V., 2009. Flow experiments with gravel and blocks at small scale to investigate parameters and mechanisms involved in rock avalanches. Engineering Geology, Vol. 109 (2009), pp. 146–158.

Manzella I., Labiouse V., 2013. Empirical and analytical analyses of laboratory granular flows to investigate rock avalanche propagation. Landslides, Vol. 10, Issue 1, 23-36. DOI: 10.1007/s10346-011-0313-5

Manzella I., 2008. Dry rock avalanche propagation: unconstrained flow experiments with granular materials and blocks at small scale. Thèse EPFL n° 4032.

McDougall S., 2006. A new continuum dynamic model for the analysis of extremely rapid landslide motion across complex 3D terrain. Ph.D.Thesis in Geotechnical Engineering, Supervisor: Prof. Hungr Oldrich, University of British Columbia, Canada.

McDougall S., Hungr O., 2004. A model for the analysis of rapid landslide motion across three-dimensional terrain. Canadian Geotechnical Journal, 41(6), 1084-1097.

Pouliquen O., Forterre Y., 2002. Friction law for dense granular flows: application to the motion of a mass down a rough inclined plane. J. Fluid Mech., 453, 133-151.

Sauthier C., 2012. Modélisation physique et analyse numérique de la propagation d'une masse granulaire : contribution à l'étude des avalanches rocheuses. Thèse EPFL n° 5285.



II. ATTIVITÀ SVOLTA DAL POLITECNICO DI TORINO

L'attività di ricerca svolta nell'ambito del progetto MASSA presso il Politecnico di Torino ha riguardato l'applicazione e la validazione di un codice di calcolo basato sulla meccanica dei continui attraverso simulazione di prove di laboratorio svolte presso l'EPFL di Losanna e di casi reali di valanghe di roccia di medie e piccole dimensioni.

Come descritto nella sezione successiva, rispetto all'approccio del discontinuo utilizzato nell'ambito del progetto dal laboratorio 3SR di Grenoble, l'approccio della meccanica del continuo ha la caratteristica di ricondurre la massa eterogenea reale ad un continuo equivalente. L'approccio non prevede quindi lo studio del comportamento delle singole particelle ma si focalizza su un'analisi a più grande scala in cui il comportamento della singola particella diventa parte caratterizzante il comportamento della massa nel suo insieme.

I parametri reologici necessari per la simulazione degli eventi analizzati risultano quindi dei parametri globali, la cui calibrazione avviene per tentativi fino al raggiungimento della corretta combinazione che garantisca l'ottimale riproduzione del percorso di propagazione della massa e della sua configurazione di deposito. Questo in termini sia di tempi di propagazione che di velocità media e di distribuzione di spessori del materiale nel deposito. Rispetto all'applicazione diretta allo studio di casi reali, la simulazione numerica di prove di laboratorio permette, grazie alla precisa conoscenza delle condizioni in cui è stato riprodotto l'evento, la validazione del modello numerico e l'indagine del ruolo che i singoli parametri rivestono nella caratterizzazione del fenomeno analizzato, ivi compresa l'influenza che su di essi possono avere le condizioni di prova.

Per meglio comprendere i limiti e i campi di validità dei modelli del continuo e del discontinuo, degli studi numerici complementari sono stati realizzati sui principi di base che caratterizzano la campagna sperimentale condotta presso l'EPFL. Delle modellazioni specifiche sono state svolte in collaborazione con il laboratorio 3SR di Grenoble per dare delle risposte quanto ai meccanismi di dissipazione d'energia in prossimità di una brusca piuttosto che lieve variazione di pendenza. Al termine di tali lavori si dovrebbe giungere ad un arricchimento delle leggi di comportamento da utilizzare nei modelli del continuo.

Per quel che riguarda l'applicazione di RASH3D allo studio di casi reali, un'analisi parametrica sull'importanza e l'influenza dei singoli parametri reologici è stata condotta per quanto riguarda il sito di La Suche.

II.1. Descrizione del modello numerico

Le analisi di propagazione oggetto del presente lavoro sono state realizzate con il codice di calcolo RASH3D (Pirulli, 2005), basato sulla meccanica del continuo.

Le ipotesi su cui si basano le equazioni implementate numericamente nel codice RASH3D prevedono che: 1) la massa eterogenea reale sia ricondotta ad un "fluido apparente" le cui caratteristiche intendano riprodurre attraverso un mezzo monofase il comportamento della massa complessa reale (passaggio ad un continuo equivalente) (e.g. Savage e Hutter, 1989; Iverson e Denlinger, 2001); 2) che lo spessore caratteristico dello strato di materiale in movimento (H) sia trascurabile rispetto alla lunghezza caratteristica (L) del movimento stesso (Fig. 1), ipotesi quest'ultima che rende valide le equazioni di St. Venant secondo cui la sua descritta "superficialità" ($H/L \ll 1$) permette di descrivere il movimento utilizzando i valori medi nello spessore delle grandezze considerate (es. velocità media);

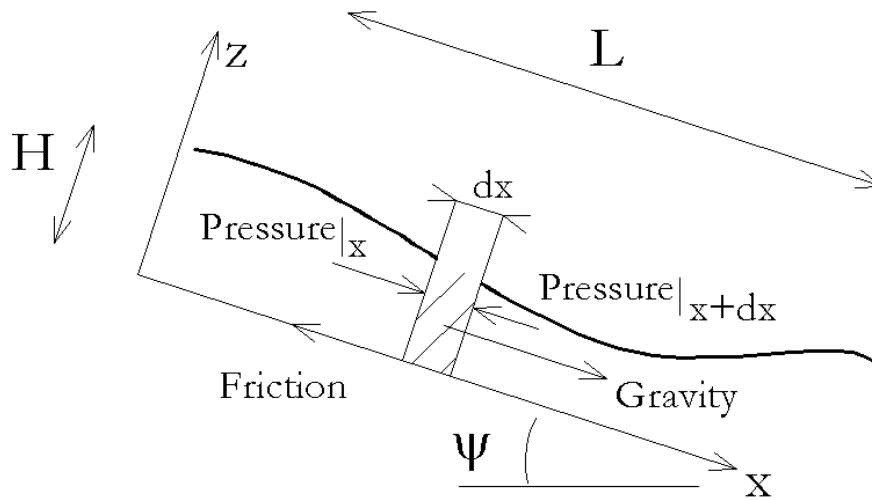


Figura 1: Principio delle equazioni di St. Venant in cui lo spessore H è piccolo rispetto alla lunghezza caratteristica L

Le equazioni di conservazione della massa e del momento nella direzione $-x$ e $-y$ ricavate risultano quindi essere:

$$\begin{cases} \frac{\partial h}{\partial t} + \text{div}(h\mathbf{v}) = 0 \\ \rho \left[\frac{\partial}{\partial t}(hv_x) + \frac{\partial}{\partial x}(hv_x^2) + \frac{\partial}{\partial y}(hv_x v_y) \right] = -\frac{\partial}{\partial x}(h\sigma_{xx}) + T_x - \rho h g \gamma_x \\ \rho \left[\frac{\partial}{\partial t}(hv_y) + \frac{\partial}{\partial x}(hv_x v_y) + \frac{\partial}{\partial y}(hv_y^2) \right] = -\frac{\partial}{\partial y}(h\sigma_{yy}) + T_y - \rho h g \gamma_y \end{cases} \quad [1]$$

in cui $\mathbf{v}(x, y, t) = [v_x(x, y, t), v_y(x, y, t)]$ è la velocità media della massa che fluisce, considerando un sistema di riferimento (x, y, z) locale, h lo spessore locale del flusso, $\sigma_{xx}(x, y, t)$ e $\sigma_{yy}(x, y, t)$ sono le componenti del tensore degli sforzi di Cauchy integrate nello spessore del flusso, $\gamma_x, \gamma_y, \gamma_z$ sono coefficienti, funzione dell'andamento della topografia, che definiscono la proiezione del vettore gravità lungo la direzione x ed y , rispettivamente, ρ è la massa volumica della massa mobilitata, g è la costante di gravità e T_x, T_y sono i termini di resistenza alla base che si sviluppa all'interfaccia tra la massa in movimento e la superficie topografica.

Il sistema di equazioni [1] viene risolto numericamente ricorrendo ad un approccio ai volumi finiti (Pirulli, 2005). Le equazioni vengono discretizzate su una griglia di elementi triangolari usando come volume di controllo la cella duale mediana (Fig. 2), il sistema discretizzato risulta il seguente:

$$U_i^{n+1} = U_i^n - \sum_{j \in K_i} \frac{\Delta t L_{ij}}{|C_{ij}|} F(U_i^n, U_j^n, n_{ij}) - \Delta t B(U_i^n)$$

in cui U è la soluzione del sistema in termini di $h, q_x (=hv_x)$ e $q_y (=hv_y)$, rispettivamente, al tempo n ed $n+1$. $B(U_i^n)$ è il termine sorgente e $F(U_i^n, U_j^n, n_{ij})$ è il termine di flusso.

Per una descrizione completa del metodo si rimanda a Audusse et al., 2000 e Mangeney-Castelnau et al., 2003.

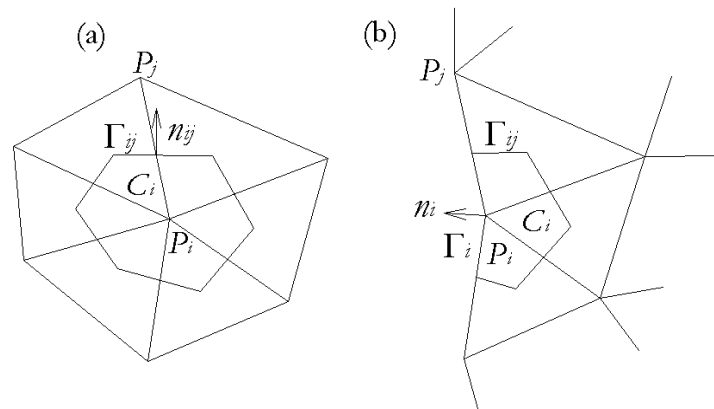


Figura 2 : a. Cella duale interna; b. Cella duale di bordo, n_{ij} : vettore normale al bordo Γ_{ij} della cella C_i di centro P_i .

Per potere avviare un'analisi, il codice RASH3D richiede che sia fornito il modello digitale del terreno (DTM) precedente al dissesto, la geometria del volume di innesco, conseguente alla fase di primo distacco del fenomeno franoso, e una legge di comportamento.

In funzione della legge di comportamento assunta si avranno diversi parametri reologici da definire. Allo stato attuale RASH3D permette l'utilizzo di una semplice reologia per attrito, che prevede come unico parametro da calibrare l'angolo di attrito alla base (φ), o di una reologia di tipo Voellmy, in cui agli sforzi di attrito si sommano quelli derivanti dall'agitazione turbolenta, definiti attraverso un parametro (ξ) avente le dimensioni di un'accelerazione.

Stabilire quale reologia approssima al meglio il comportamento del materiale durante il movimento è di difficile definizione: le reologie complesse, funzione di molti parametri, sono difficili da utilizzare per la complessità nella taratura dei parametri, al contrario utilizzando reologie troppo semplici, si rischia di non analizzare al meglio tutti gli aspetti del movimento della massa.

Nel presente lavoro è stata principalmente utilizzata la reologia di tipo attritivo in cui la forza di taglio resistente della massa è funzione esclusivamente dello sforzo normale efficace agente alla base della massa mobilitata.

$$T_i = -\rho g \gamma_z h \tan \varphi \operatorname{sgn}(v_i)$$

Reologia Voellmy: in questo caso è necessario definire due parametri: il coefficiente di turbolenza ξ , che dipende dal quadrato della velocità del flusso e della densità dei detriti e ha le dimensioni di un'accelerazione (m/s^2), e il coefficiente d'attrito μ .

$$T_i = -\left(\rho g \gamma_z \mu h + \rho g \frac{v^2}{\xi} \right) \operatorname{sgn}(v_i)$$

Una giustificazione fisica per l'utilizzo di questa equazione è fornita dai risultati ottenuti in laboratorio da Bagnold (1954), il quale trovò che la resistenza di un materiale granulare, in condizioni di volume costante, aumenta con il quadrato della quota di deformazione a taglio.

a) RASH3D: implementazione dell'accelerazione centripeta ed analisi del suo ruolo sui risultati numerici

La versione iniziale di RASH3D risultava implementata trascurando l'effetto del termine di curvatura sulla dinamica di propagazione della massa rilasciata.

Per esempio, assumendo un comportamento di tipo attritivo il termine di resistenza alla base utilizzato all'interno delle equazioni di bilancio risultava espresso secondo la formulazione

riportata nell'equazione [3].

Dai risultati ottenuti dalle prime simulazioni numeriche delle prove di laboratorio condotte presso l'EPFL (§ 3) è emerso che, in funzione della superficie topografica utilizzata in laboratorio, per non avere valori falsati dei parametri reologici diventava importante scorporare tale effetto ed introdurre il termine di accelerazione centripeta funzione del raggio di curvatura della superficie di propagazione.

In particolare, si osserva che a causa del cambiamento di pendenza della topografia, si registra un incremento del peso apparente della massa in movimento e una variazione della resistenza dovuta all'attrito alla base.

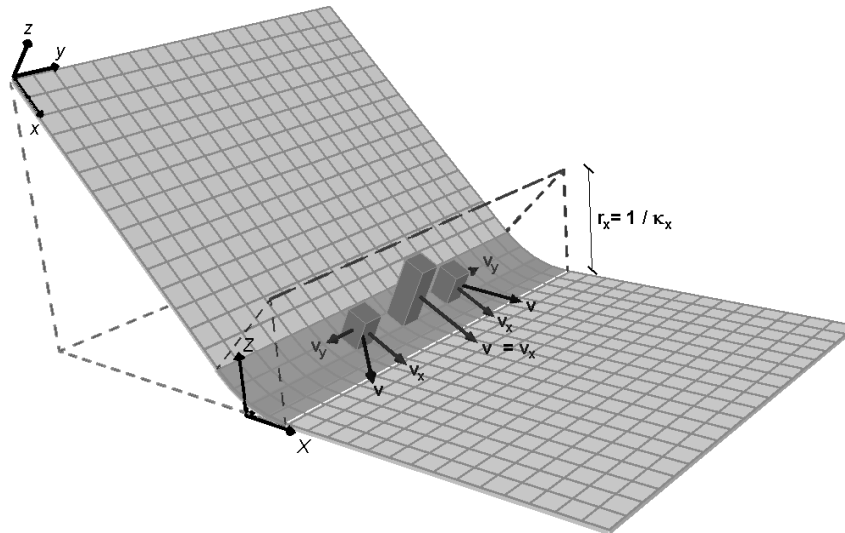


Figura 3 : Geometria utilizzata per la simulazione numerica delle prove di laboratorio condotte presso l'EPFL.

Nella geometria in esame (Fig. 3), passando dal piano inclinato a quello orizzontale la componente normale dello sforzo risulta infatti aumentato di una quota pari a $(\rho v_x^2 k_x)$, dove $k_x = 1/r_x$ rappresenta la curvatura, r_x è il raggio di curvatura nella direzione x e $v_x^2 k_x = a_{c,x}$ è l'accelerazione centripeta che ne risulta.

Ne risulta che l'equazione [3] viene modificata lungo la direzione del moto (x) come segue:

$$T_x = -\rho(g\gamma_z + a_{c,x})h \tan \phi \operatorname{sgn}(v_x)$$

Per quanto riguarda la direzione y, abbiamo che il raggio di curvatura r_y tende ad infinito per cui la curvatura $k_y = 0$ e l'accelerazione centripeta lungo y ($a_{c,y}$) tende a zero. L'espressione dell'equazione [3] nella direzione ortogonale al moto (y) rimane quindi:

$$T_y = -\rho g \gamma_z h \tan \phi \operatorname{sgn}(v_y)$$

II.2. Prove di laboratorio EPFL

Il codice di calcolo RASH3D è stato utilizzato per simulare delle prove di laboratorio realizzate presso l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (CH).

Tali prove prevedevano il rilascio di 3 diverse tipologie di materiale lungo un piano inclinato raccordato alla base con un piano orizzontale.

Le tipologie di materiale rilasciato consistevano in: ghiaia ($D = 0.5-3\text{mm}$) e piccoli mattoncini ($1.5\text{cm} \times 3.1\text{cm} \times 0.8\text{cm}$), questi ultimi posizionati in modo caotico Fig. 4b) o impilato (Fig. 4c).

L'approccio della meccanica dei continui adottato nel codice di calcolo RASH3D non permette la corretta simulazione numerica della dinamica di propagazione osservabile nel caso dei mattoncini a causa soprattutto della forte anisotropia che caratterizza la geometria degli elementi rilasciati; le problematiche aumentano ulteriormente nel caso di rilascio di mattoncini regolarmente impilati, la dinamica di propagazione di questi ultimi è difficilmente riconducibile a quella di un flusso in quanto la massa assume la configurazione di singolo blocco che scivola su piano inclinato fino alla variazione topografica dettata dalla transizione con il piano orizzontale. Ne risulta che tale configurazione non è oggetto di questo lavoro.

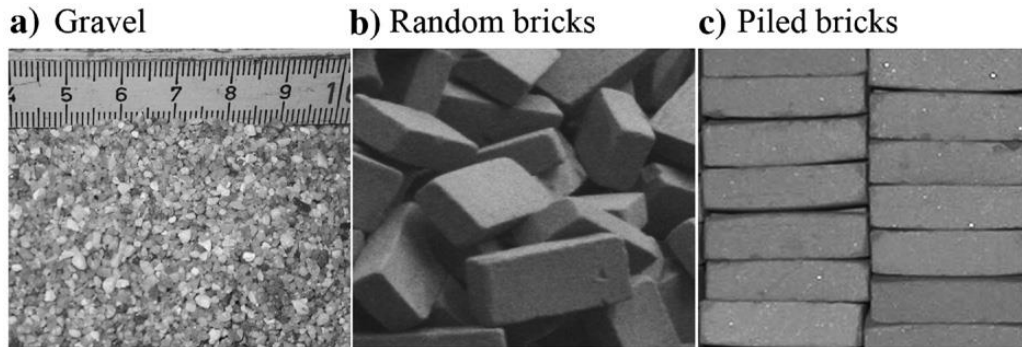


Figura 4 : Materiale utilizzato per le prove di laboratorio condotte presso l'EPFL (Manzella & Labiouse, 2009).

Per quanto riguarda la geometria della superficie di scivolamento utilizzata in laboratorio, si sottolinea la presenza di due classi di simulazioni, le prime realizzate in presenza di passaggio brusco dalla superficie inclinata a quella orizzontale (raggio di curvatura, $r = 0m$), le seconde con raccordo avente $r = 0.5m$.

Infine, si riportano in Tab. 1 le principali caratteristiche del materiale granulare rilasciato.

Diametro [mm]	0.5 -3
D90 [mm]	2
Peso di volume [kN/m^3]	14.3
Angolo di attrito interno [°]	34 ± 1
Angolo di attrito statico di base [°]	28 ± 1
Angolo di attrito dinamico di base [°]	23.5 ± 0.5

Tabella 1: Caratteristiche della ghiaia utilizzata per le prove di laboratorio condotte presso l'EPFL (Manzella & Labiouse, 2009).

II.3. Applicazione del codice di calcolo ai risultati sperimentali dell'EPFL

L'elenco delle prove sperimentali dell'EPFL che sono state oggetto di simulazione numerica sono riportate in Tab.2 e Tab. 3, per il caso con $r = 0m$ (transizione brusca) ed $r = 0.5m$ (transizione curva), rispettivamente.

Test	Geometria		
	Inclinazione [°]	Altezza caduta [m]	Volume rilasciato[l]
1b	45	1	40
2b	45	1	20
3b	45	1.5	40
4b	37.5	1	40

Tab. 2 Prove EPFL con configurazione $r = 0m$

Test	Geometria		
	Inclinazione [°]	Altezza caduta [m]	Volume rilasciato[l]
1c	45	1	40
2c	45	1	20
3c	45	1.5	40
4c	45	1.5	20

Tab. 3 Prove EPFL con configurazione $r = 0.5m$

a) Risultati simulazione numerica assumendo $a_c = 0$ e confronto con DAN3D

Le simulazioni con il codice di calcolo RASH3D sono state inizialmente svolte considerando il termine di accelerazione centripeta a_c nullo.

La calibrazione dei parametri da utilizzare nella reologia attritiva è stata fatta in funzione della posizione del baricentro del deposito misurato nel caso del Test 1b (Tab. 2).

Il migliore risultato è stato ottenuto con un angolo di attrito dinamico $\varphi = 34.5^\circ$. Il confronto tra i risultati della simulazione numerica e il deposito rilevato in laboratorio è riportato in pianta in Fig. 5.

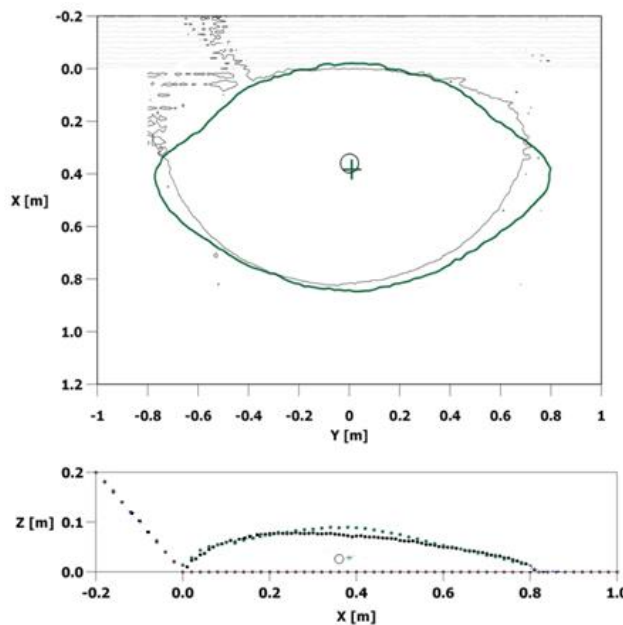


Figura 5 : Confronto risultati simulazione numerica e deposito misurato in laboratorio per il Test 1b (Tab.2).

Si riscontra una buona rispondenza sia in termini di posizione del fronte e della coda, del baricentro e del profilo del deposito stesso.

L'angolo di attrito calibrato sul Test 1b è stato quindi utilizzato per simulare i Test 2b-3b. I risultati ottenuti sono riportati in Fig. 6.

Si riscontra che mantenendo inalterato il valore di angolo di attrito calibrato per il Test 1b, i risultati restano soddisfacenti in termini di profilo, baricentro posizione fronte e coda del deposito per ciascuno dei Test 2b ed 3b.

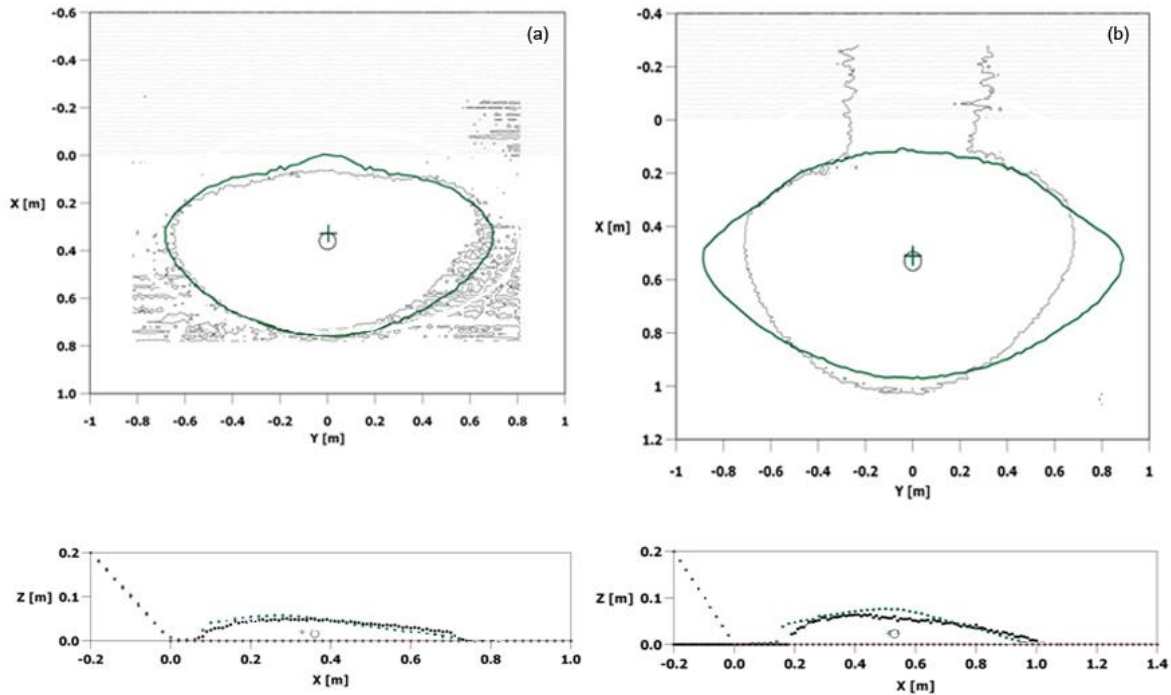


Figura 6 : Confronto risultati simulazione numerica e deposito misurato in laboratorio per il (a) Test 2b ed il (b) Test 3b (Tab.2).

Al contrario, la simulazione del Test 4b, caratterizzato da una topografia in cui il piano inclinato risulta meno inclinato ($37,5^\circ$ anziché 45°) i risultati ottenuti non sono soddisfacenti (Fig. 7a). Per riprodurre tale test risulta necessario modificare il valore dell'angolo di attrito (Fig. 7b). Intervento ritenuto non giustificato dal momento che l'angolo di attrito è una caratteristica del materiale e per tutti i test analizzati il tipo di materiale rilasciato e di substrato risultano invariati.

Un'ulteriore evidenza della variazione che subisce l'angolo di attrito modificando la geometria di propagazione a parità di materiale emerge se si analizzano i risultati delle simulazioni relative ai test su topografia con transizione curva (Tab. 3).

In questo caso i 4 test risultano tutti simulabili in modo soddisfacente utilizzando un angolo di attrito pari a 30.3° . I risultati in pianta ed in sezione sono riportati per confronto con il deposito misurato in laboratorio in Fig. 8.

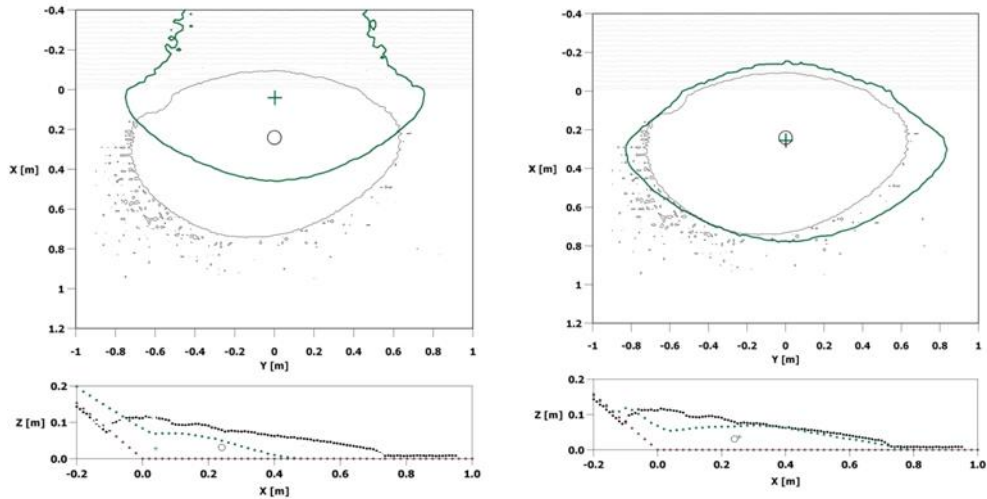


Figura 7 : Confronto risultati simulazione numerica e deposito misurato in laboratorio per il Test 4b (Tab.2).

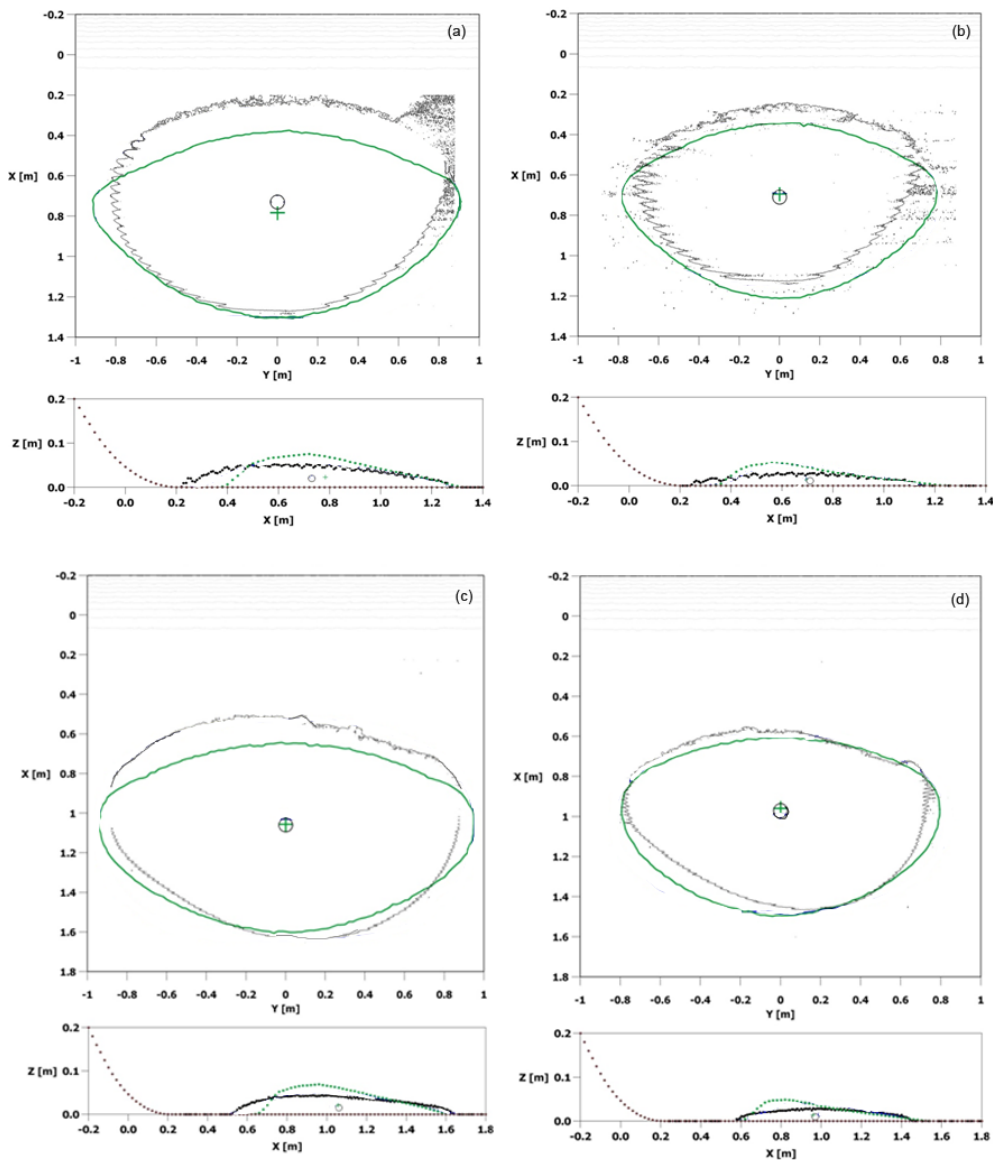


Figura 8 : Confronto risultati simulazione numerica e deposito misurato in laboratorio per i test con transizione curva (Tab.2).

b) Risultati simulazione numerica assumendo $a_c \neq 0$ per topografia con transizione curva

Sulla base dei risultati presentati nella sezione 3.1, secondo cui:

- l'angolo di attrito calibrato sul set di prove su topografia con transizione brusca differisce dal valore calibrato sul set di prove con transizione curva (sebbene le caratteristiche del materiale rilasciato siano le stesse);
- il valore di angolo di attrito calibrato per entrambe i set di prove differisce dal valore di angolo di attrito ottenuto in laboratorio con il tilting test, si è proceduto con l'implementazione nel codice di calcolo RASH3D del termine di accelerazione centripeta così come indicato nella sezione 2.1.

I risultati delle nuove analisi su topografia a transizione curva hanno evidenziato una netta riduzione del valore di angolo di attrito necessario per la simulazione delle prove di laboratorio. In particolare, si è passati per queste prove da un valore di 30.3° ad un valore di 24.3° , valore che bene approssima l'angolo di attrito dinamico ottenuto in laboratorio ed indicato in Tab. 3.

Il confronto tra i risultati delle vecchie prove ($a_c=0$) e delle nuove prove ($a_c \neq 0$) rispetto al deposito misurato in laboratorio è riportato in Fig. 10.

c) Implementazione della condizione di anisotropia degli sforzi

Un ulteriore upgrade del codice di calcolo ha interessato il passaggio da una condizione di isotropia degli sforzi $\sigma_x=\sigma_y=\sigma_z$ ad una condizione di anisotropia $\sigma_x \neq \sigma_y \neq \sigma_z$.

Tale passaggio richiede l'introduzione, tra i parametri di input del programma, dell'angolo di attrito interno del materiale (δ) da utilizzare nella determinazione del coefficiente di spinta K , infatti

$$K_{pass/att} = 2 \frac{1 \pm \sqrt{1 - \cos^2 \delta (1 + \tan^2 \varphi)}}{\cos^2 \delta} - 1 \quad \begin{cases} \partial_x v_x + \partial_y v_y < 0 & K = K_{pass} \\ \partial_x v_x + \partial_y v_y > 0 & K = K_{att} \end{cases}$$

Tale coefficiente di spinta permette di definire gli sforzi come $\sigma_x = \sigma_y = K \sigma_z$

L'effetto del passaggio dalla condizione di isotropia alla condizione di anisotropia è rappresentato in Fig. 9 per quanto riguarda la prova su topografia a transizione curva 1t. Si rileva come la coda del deposito simulato risulti più arretrata, evidenziando una migliore rispondenza con la forma del deposito ottenuta sperimentalmente.

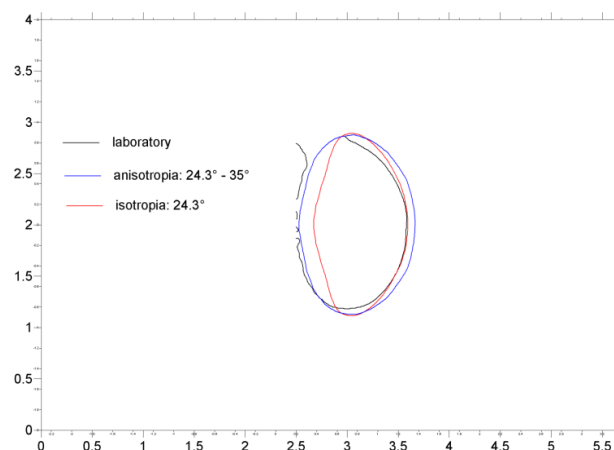


Figura 9 : Prova 1t. Confronto deposito con assunzione di isotropia o anisotropia degli sforzi

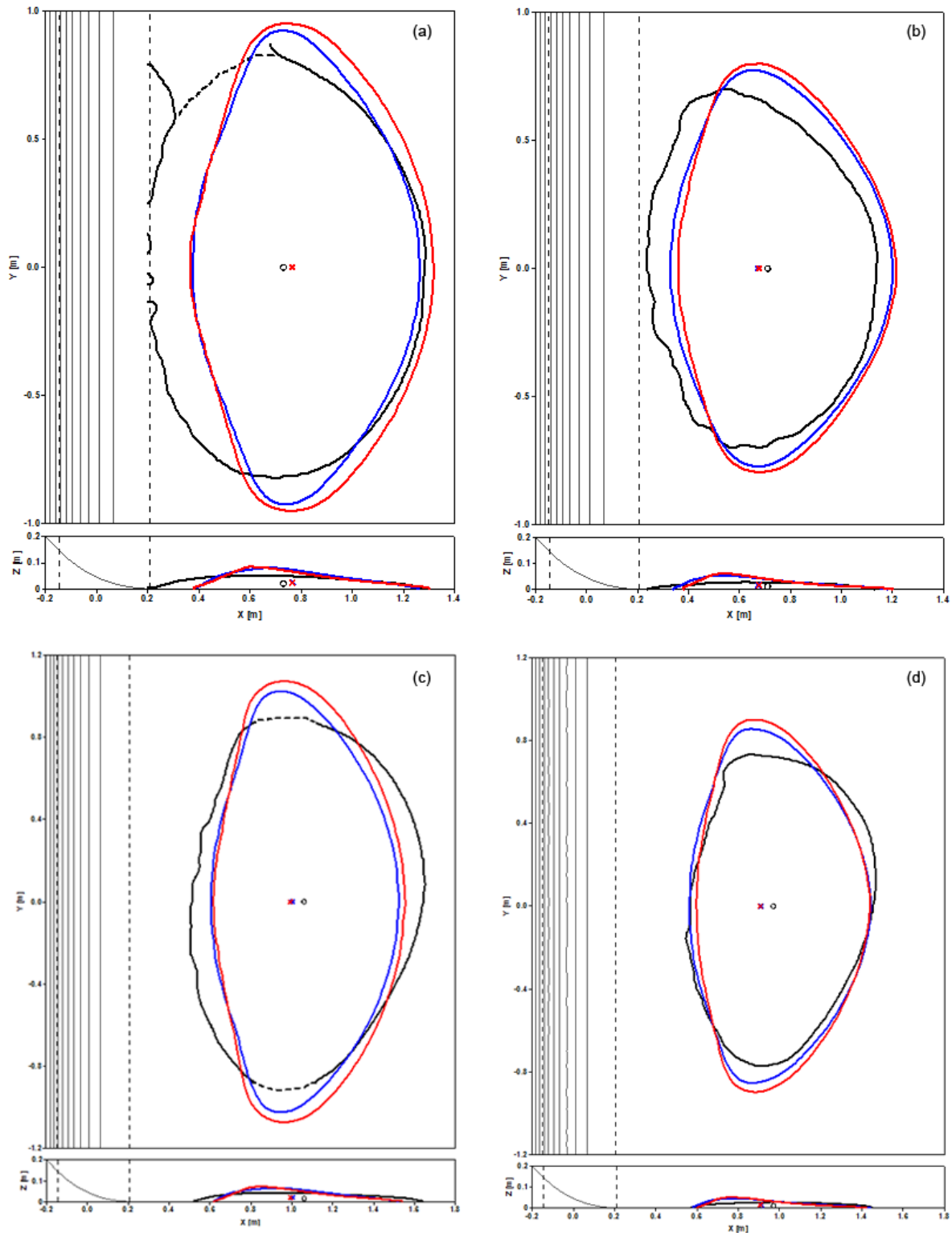


Figura 10 : Confronto risultati simulazione numerica e deposito misurato in laboratorio con $a_c \neq 0$. (a) prova 1t; (b) prova 2t; (c) prova 3t; (d) prova 4t, i cui valori sono riportati in Tab. 3. Blu: $a_c = 0$; Rosso: $a_c \neq 0$; Nero: risultati di laboratorio.

d) Confronto RASH3D - DAN3D

Le prove di laboratorio condotte presso l'EPFL sono state analizzate numericamente anche con il codice DAN3D dall'EPFL stessa.

Il codice DAN3D si basa, come RASH3D, sull'approccio della meccanica dei continui implementando numericamente le equazioni delle acque basse. Rispetto RASH3D, DAN3D utilizza il metodo SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) su uno schema di tipo lagrangiano. Si rimanda per i dettagli all'ampia letteratura disponibile (e.g. Hungr & McDougall, 2009; McDougall & Hungr, 2004; McDougall, 2006).



L'avvio di un'analisi con DAN3D richiede, oltre alla definizione dei parametri reologici, la calibrazione di una serie di parametri direttamente connessi con il metodo SPH, questi sono: il numero di particelle N, il coefficiente di smoothing B, il coefficiente di velocità di smoothing C ed il coefficiente di rigidità D.

Si presenta in questa sezione il confronto tra i risultati ottenuti con i due codici calibrando i parametri reologici sul Test 1c (Tab. 3).

La migliore combinazione di parametri per l'angolo di attrito è stata: 23.8° per DAN3D e 24.3° per RASH3D. Questi valori sono vicini tra loro e prossimi ai valori indicati da misura con tilting-test in laboratorio, valori questi ultimi compresi nell'intervallo $23.5^\circ \pm 0.5^\circ$. I risultati in pianta ed in sezione di confronto tra simulazione e test di laboratorio sono presentati nelle Figure 11a ed 12a, rispettivamente.

Il codice DAN3D riproduce correttamente il run-out del deposito finale. La lunghezza e la larghezza sono leggermente sovrastimate. Tale sovrastima è nell'intervallo di variazione di due prove di laboratorio svolte nelle stesse condizioni. Si considera quindi soddisfacente la riproduzione delle caratteristiche del deposito finale, sebbene la morfologia è meno precisamente riprodotta. I risultati numerici presentano infatti la larghezza massima e lo spessore massimo traslati in avanti rispetto a quanto rilevato in laboratorio. Mentre i punti prossimali e distali presentano forma concava anziché convessa.

Il codice RASH3D riproduce in modo soddisfacente la forma del deposito. La posizione del centro di massa è ben rappresentato così come la posizione del fronte. Tuttavia, il run-out è parzialmente sottostimato, ciò è causato da una sovrastima della parte prossimale del deposito, aspetto che porta anche all'individuazione localmente di uno spessore massimo maggiore rispetto a quello misurato.

Una volta calibrati i parametri sul test 1c, i due codici sono stati applicati a 3 ulteriori esperimenti, i cui risultati sono presentati in pianta ed in sezione nelle Figure 11b-d e 12b-d.

DAN3D riproduce molto il run-out e la posizione del centro di massa degli esperimenti 2c e 4c (Tab.3). Questi sono riprodotti in modo meno preciso per quanto riguarda l'esperimento 3c. Riguardo la variabilità della posizione del centro di massa si possono fare gli stessi commenti già fatti per l'esperimento 1c, per cui i risultati numerici possono essere considerati soddisfacenti. La stessa conclusione non si può trarre per il run-out dal momento che si rileva una differenza troppo grande. La lunghezza del deposito è ben simulata per gli esperimenti 3c e 4c, mentre è sottostimata per l'esperimento 2c. Infine, le larghezze sebbene non perfettamente rappresentate restano nel range di variabilità osservata tra test con le stesse caratteristiche. Si osserva infine come le caratteristiche del deposito finale siano sovrastimate per gli esperimenti a 20 litri mentre sono sottostimate in quelli con rilascio di 20 litri.

Come già evidenziato in precedenza, la morfologia del deposito non è correttamente riprodotta. Le altezze e larghezze massime sono traslate in avanti rispetto al deposito reale, mentre le parti prossimali e distali hanno forma concava anziché convessa.

RASH3D riproduce le caratteristiche del deposito finale degli esperimenti simulati tutti in modo piuttosto soddisfacente, anche se il run-out degli esperimenti 3c e 4c risultano leggermente sottostimati.

Nella vista in pianta larghezze e lunghezze sono infatti rispettivamente sovra- e sotto-stimate. Nelle sezioni i risultati numerici presentano delle differenze morfologiche in termini di posizione e valore di picco dello spessore massimo del deposito, che sono rispettivamente sotto- e sovra-stimati. Infine, in tutti i casi le parti prossimali e distali presentano forma concava che è in contrasto con le risultanze di laboratorio e in accordo con quanto già osservato per DAN3D.

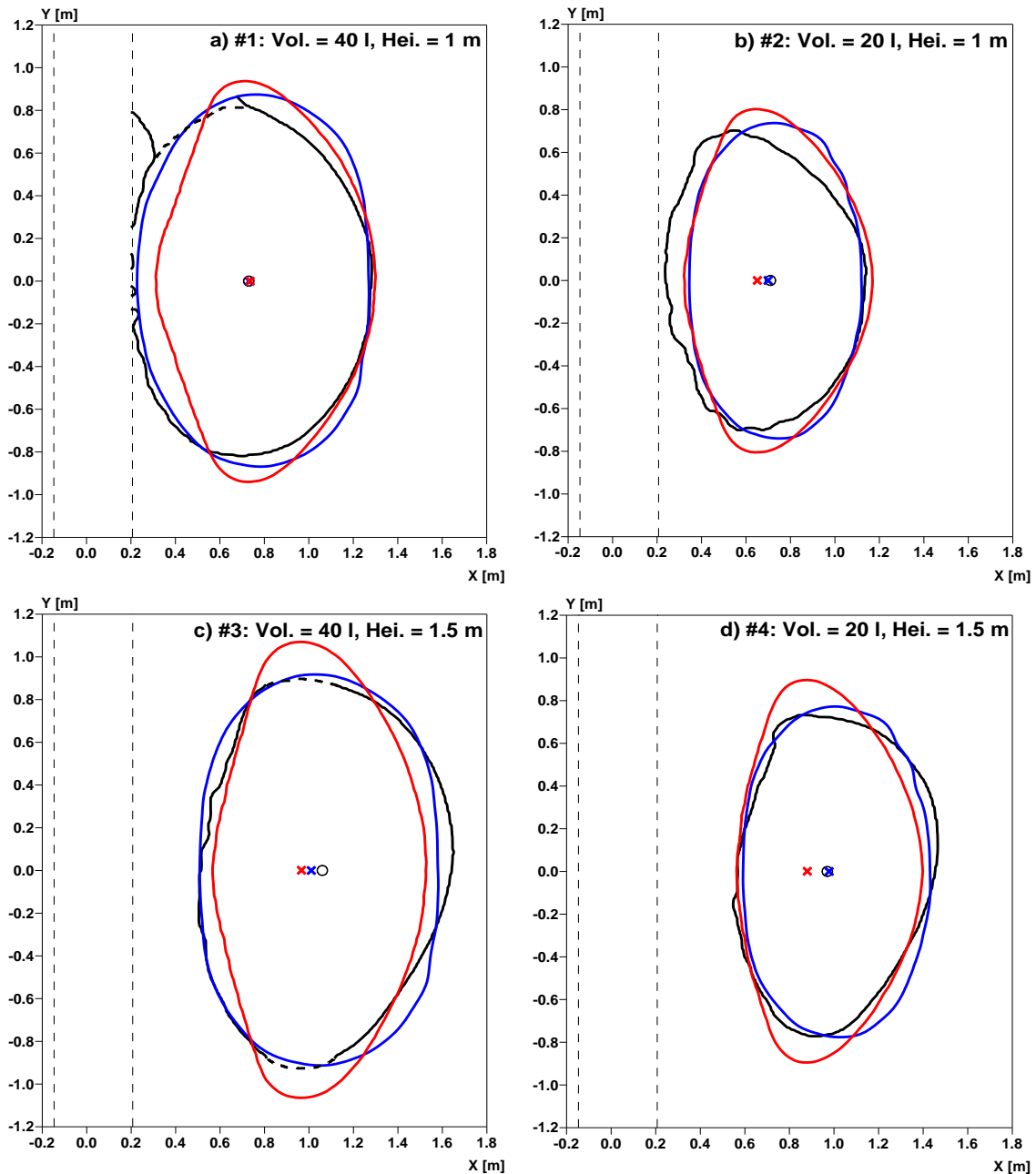


Figura 11 : Confronto in pianta tra risultati numerici e di laboratorio per i test 1c-2c-3c-4c [da a) a d) rispettivamente]. Linea e cerchio neri: dati sperimentali. Linea e croce blu: DAN3D ($N=2000$, $B=4$, $C=0.02$, $D=1$, $\varphi=23.8^\circ$). Linea e croce rosse: RASH3D ($a_c \neq 0$; $\varphi = 24.3^\circ$).

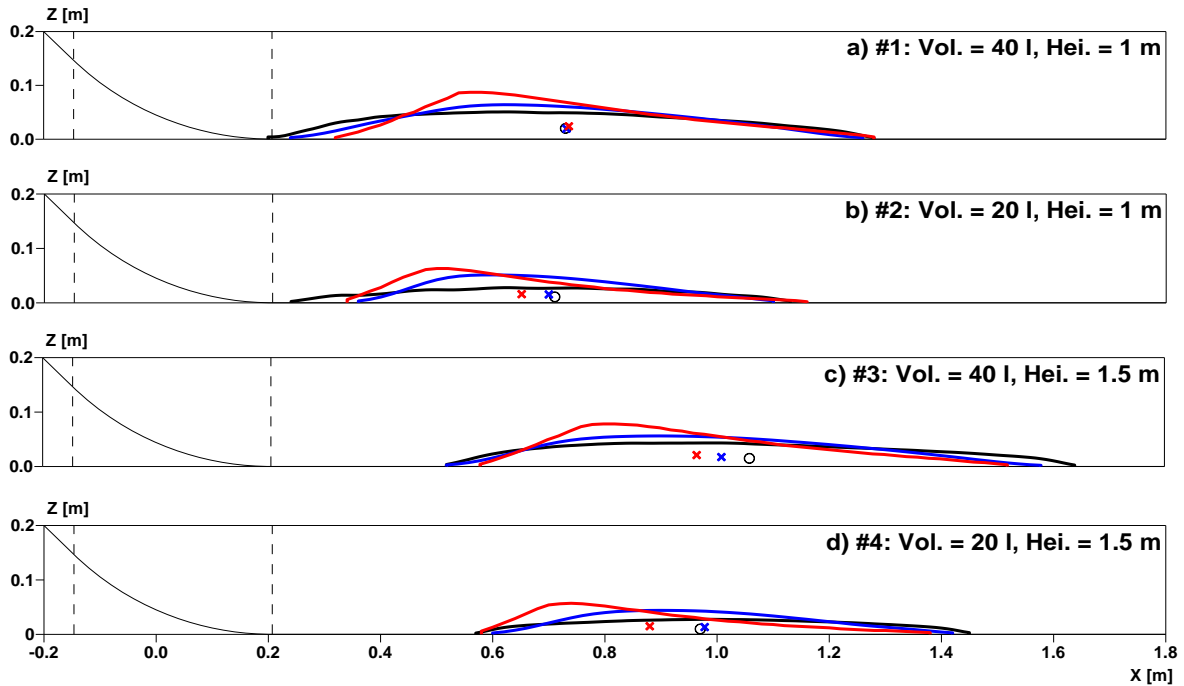


Figura 12 : Confronto in sezione tra risultati numerici e di laboratorio per i test 1c-2c-3c-4c [da a) a d) rispettivamente]. Linea e cerchio neri: dati sperimentali. Linea e croce blu: DAN3D ($N=2000$, $B=4$, $C=0.02$, $D=1$, $\varphi=23.8^\circ$). Linea e croce rosse: RASH3D ($a_c \neq 0$; $\varphi = 24.3^\circ$).

e) Risultati simulazione numerica assumendo $a_c \neq 0$ per topografia con transizione brusca

A causa dei problemi emersi nella simulazione numerica delle prove condotte su topografia con transizione brusca, nonostante l'introduzione del termine $a_c \neq 0$, si è proceduto con un'analisi di dettaglio dell'effetto della riduzione del raggio di curvatura sulla dinamica di propagazione e sulla dissipazione dell'energia della massa.

f) Analisi del raggio di curvatura

Lo studio di dettaglio sull'effetto della variazione del raggio di curvatura sui risultati delle simulazioni numeriche ha evidenziato quanto rappresentato nelle Fig.13 e 14. In particolare emerge che sia in termini di runout che di posizione del centro di massa del deposito i risultati presentano un andamento coerente per raggi di curvatura maggiori o uguali a 0.2 metri. Al di sotto di tale valore di raggio di curvatura si riscontra invece un'anomalia nel comportamento della massa.

Tale anomalia è stata in via preliminare attribuita ad una differente dinamica nella propagazione della massa, con diversa distribuzione della dissipazione di energia. Al diminuire del raggio di curvatura subentra progressivamente un effetto di impatto della massa al passaggio dal piano inclinato a quello orizzontale, fenomeno che ha caratteristiche diverse dall'effetto di accelerazione centripeta riscontrabile per i raggi di curvatura maggiori.

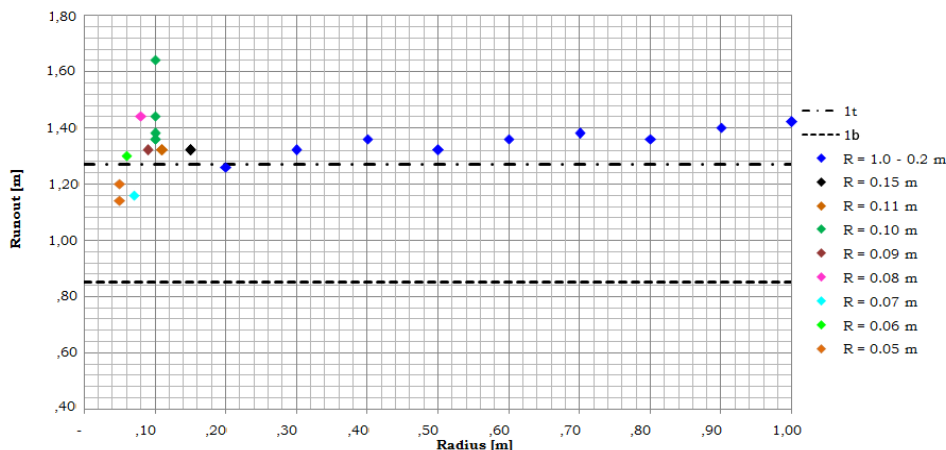


Figura 13 : Raggio di curvatura vs. runout.

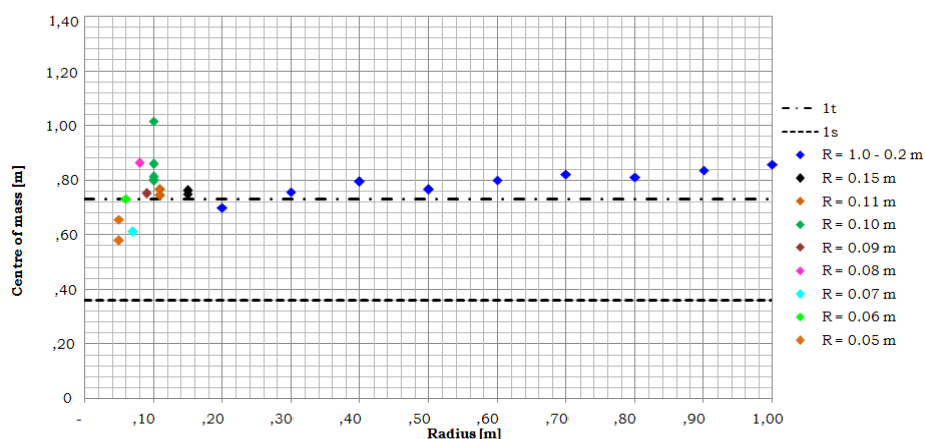


Figura 14 : Raggio di curvatura vs. centro di massa.

A seguito dei risultati ottenuti è stata avviata un'analisi di dettaglio di ogni simulazione, in modo da evidenziare la distribuzione dell'energia potenziale, cinetica e dissipata durante il processo di propagazione e deposito della massa.

Lo studio di tale problematica ha aperto un canale di confronto con i risultati ottenuti presso il laboratorio 3SR di Grenoble che, nel quadro del progetto, si occupa della simulazione dei risultati sperimentali con un approccio del discontinuo.

II.4. Confronto POLITO - 3SR risultati energia

L'approccio del 3SR di Grenoble permette di distinguere, durante il processo di propagazione, la quota di energia dissipata alla base del flusso da quella che si dissipa all'interno della massa e, per ciascuna di queste, la porzione di energia dissipata per attrito tra le particelle o tra le particelle ed il substrato rispetto a quella dissipata per impatto tra le particelle o tra le particelle ed il substrato.

Tale approfondimento ha evidenziato chiaramente che, al diminuire del raggio di curvatura, la quota di energia interna dissipata nel tratto di transizione tra piano inclinato e piano orizzontale cresce molto.

Di conseguenza, l'ipotesi di modificare il codice di calcolo RASH3D per tenere conto di una forma di dissipazione di energia che, al di là dell'effetto accelerazione centripeta, si attivasse al crescere dell'effetto "shock" ha preso forma.

Il confronto che segue si focalizza sul rilascio da un'altezza di 200cm da terra di un volume pari a 20 l su un piano inclinato a 45° che si raccorda con il piano orizzontale con un raggio di curvatura $R = 0.05 - 0.1 - 0.2 - 0.6m$.

A titolo di esempio, per la configurazione con $R = 0.2m$, in Fig. 15 viene mostrato come il modello del 3SR permetta di suddividere l'energia in cinetica, potenziale e dissipata,

permettendo inoltre di distinguere la quota dissipata in energia dissipata per attrito mattoncino-mattoncino ($WtBB$) e mattoncino-supporto ($WtBS$) e per impatto normale mattoncino-mattoncino ($WnBB$) e mattoncino-supporto ($WnBS$). Il modello del continuo POLITO, invece, è solo in grado di suddividere l'energia nelle tre quote: cinetica, potenziale e dissipata.

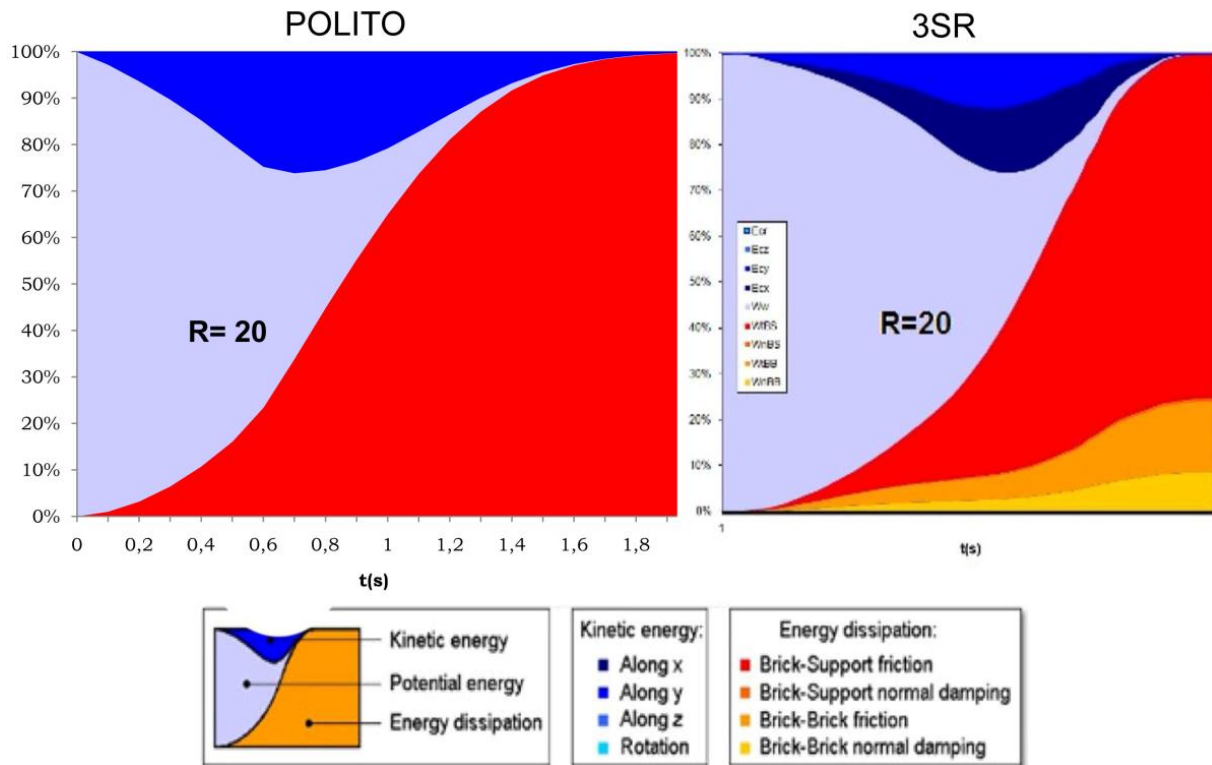


Figura 15 : Confronto distribuzione energia POLITO-3SR con $R = 20cm$.

I confronti che seguono si riferiscono ai risultati di analisi condotte per i due modelli con stessa geometria e stessi parametri calibrati. Quindi: coefficiente di attrito interno: 0.86, coefficiente di attrito alla base: 0.46 e peso di volume dei mattoncini disposti random: $10kN/m^3$.

Si evidenzia altresì che per quanto riguarda RASH3D si presentano i risultati ottenuti in condizione sia di anisotropia che di isotropia degli sforzi, così da evidenziare l'effetto dell'utilizzo o meno dell'angolo di attrito interno sulla dissipazione di energia.

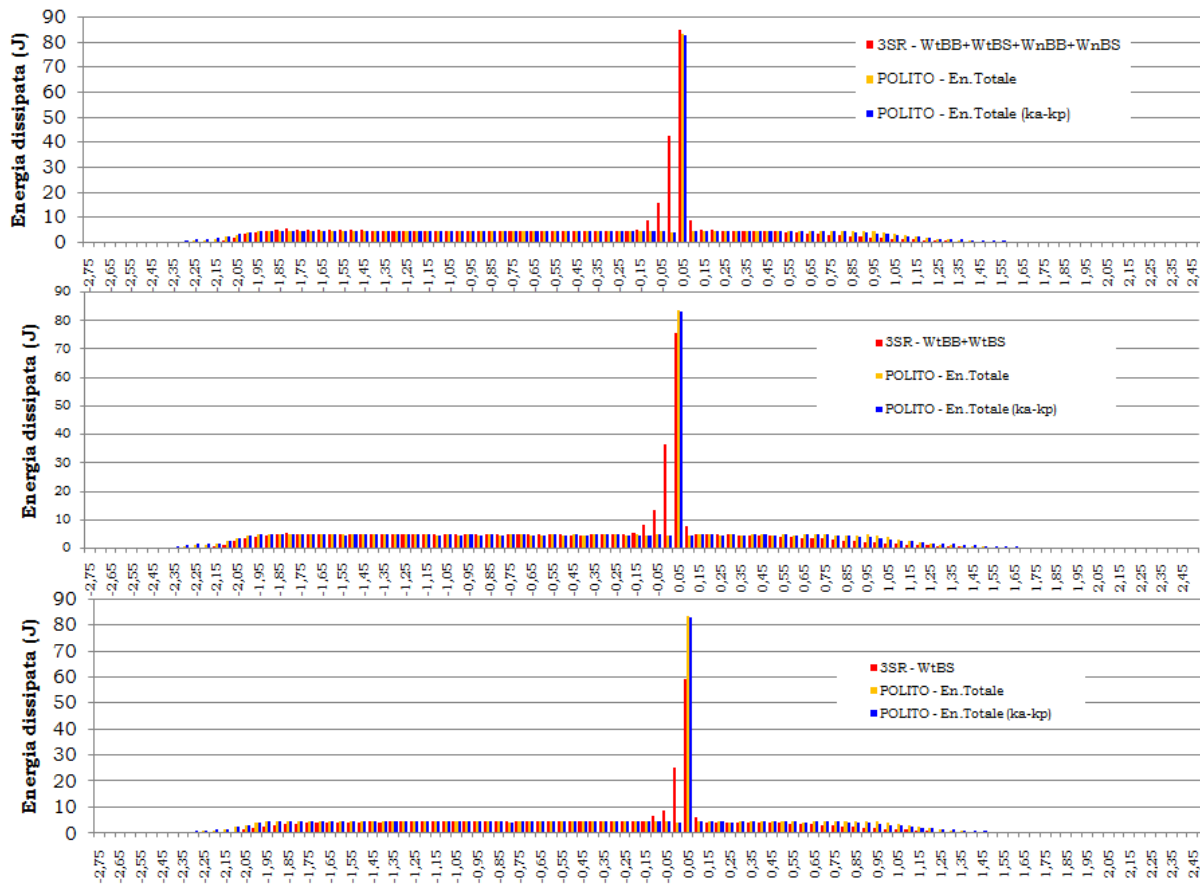


Figura 16 : Confronto distribuzione energia dissipata POLITO-3SR con $R = 0.05m$.

Dal confronto tra le figure 16-17-18-19, che differiscono in funzione del raggio di curvatura (R) utilizzato per l'analisi, emerge come, indipendentemente da R il modelli del 3SR e POLITO danno la stessa distribuzione di energia sul piano inclinato e sul piano orizzontale. Diventa quindi focalizzarsi sul comportamento in corrispondenza della parte prossimale, di quella distale e del tratto di transizione.

Per quanto riguarda la parte prossimale si può evidenziare che RASH3D dà la stessa distribuzione di energia dissipata indipendentemente che si consideri la condizione di isotropia (in giallo nelle figure) o di anisotropia (in rosso nelle figure) degli sforzi.

Confrontando per questa zona RASH3D ed il modello 3SR si rileva come, indipendentemente da R , i 2 modelli hanno un andamento molto simile confrontando l'energia dissipata da RASH3D con quella dissipata dal modello del 3SR come sommatoria di WtBB e WtBS, si rileva altresì che aggiungendo a questi termini quelli dovuti alla dissipazione per impatto normale, WnBB e WnBS, l'influenza di questi ultimi è trascurabile. Invece, considerando il solo termine WtBS si ha una notevole differenza tra i due modelli.

Per quanto riguarda la parte distale si riscontra che la distribuzione di energia dissipata come somma di WtBB e WtBS nel modello del 3SR è quella che come andamento è meglio approssimata dalla dissipazione di energia ottenuta con RASH3D. La somiglianza diventa molto vicina nell'ipotesi di anisotropia degli sforzi ed al crescere del raggio di curvatura, sebbene RASH3D tenda a dissipare maggiormente in questa zona.

Infine, per quanto riguarda la parte di transizione si osserva che in RASH3D l'estensione del tratto di dissipazione influenzato dal raggio di curvatura è ridotto rispetto a quello osservato per il modello del 3SR. Tale differenze si riduce al crescere del raggio di curvatura. Per raggi di curvatura piccoli il modello del 3SR evidenzia l'insorgenza di un diverso meccanismo di dissipazione che riguarda il comportamento della massa che si trova a transitare nella zona immediatamente a monte della transizione stessa. Tale aspetto non è colto da RASH3D. Aumentando il raggio di curvatura la variazione di dissipazione si focalizza solo sul tratto interessato dalla transizione stessa.

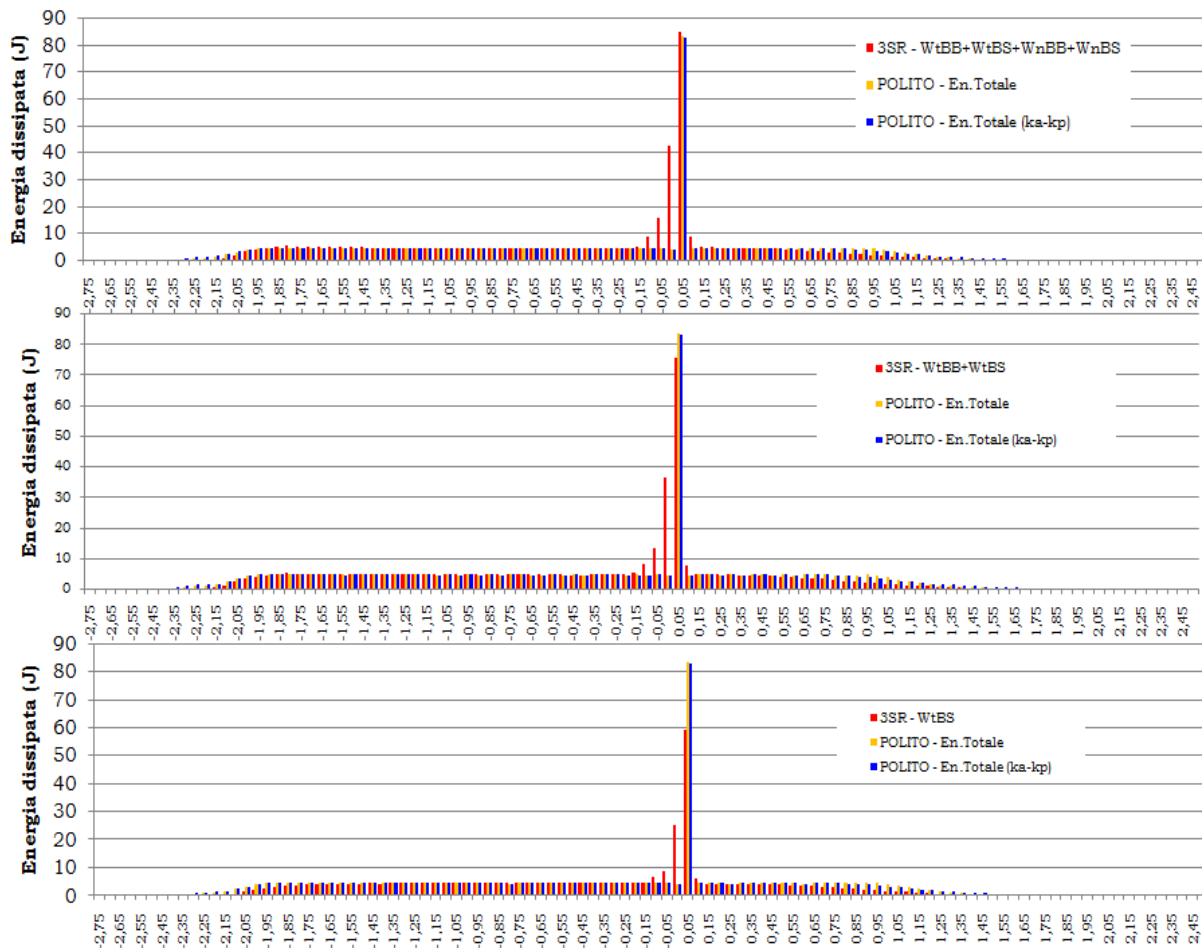


Figura 17 : Confronto distribuzione energia dissipata POLITO-3SR con $R = 0.1m$.

Dall'analisi di Fig. 20, dove viene riepilogata l'energia dissipata lungo il tratto di transizione, si rileva che al variare del raggio di curvatura, il totale dell'energia dissipata in questo tratto si discosta di poco dalla sola quota di energia dissipata nel modello del 3SR come WtBS. Tale differenza si riduce ulteriormente se si considera la versione di RASH3D con anisotropia degli sforzi.

Dalla differenza tra l'energia dissipata con $R = 0.05m$ ed $R = 0.6m$ si rileva che RASH3D sia esso in forma isotropa (riga A) sia esso in forma anisotropa (riga B) mantiene presenta un incremento di dissipazione per piccoli raggi che si aggira intorno ai 40 J. Tale valore approssima quello calcolato con il modello del 3SR come sola dissipazione per attrito mattoncino-supporto (riga C). La ridotta dissipazione di energia di RASH3D in corrispondenza della transizione per ridotti raggi di curvatura emerge particolarmente dal fatto che per il modello del 3SR la differenza di energia totale dissipata alla transizione tra piccoli e grandi raggi di curvatura è di circa 4 volte quella dovuta alla sola WtBS (134.34J vs 35.65J). Lo stesso aspetto emerge se a parità di R vengono sottratti i valori della riga E da quelli della riga B (anisotropia) o della riga A (isotropia).

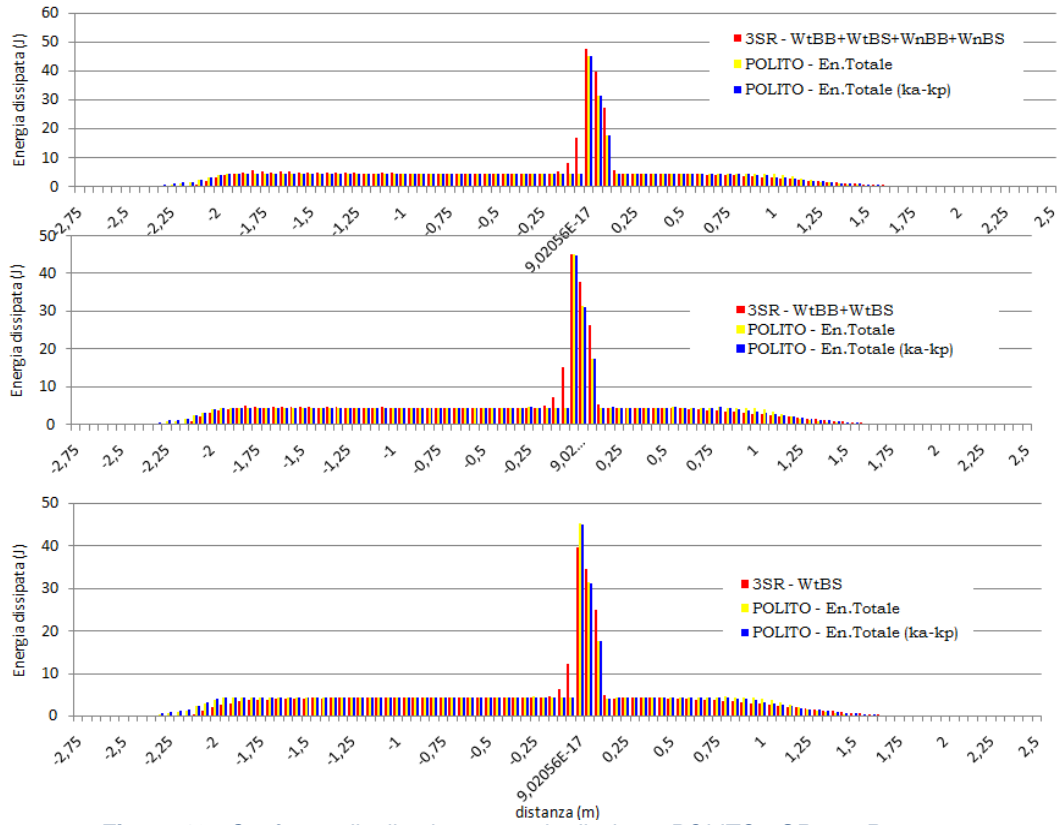


Figura 18 : Confronto distribuzione energia dissipata POLITO-3SR con $R = 0.2m$.

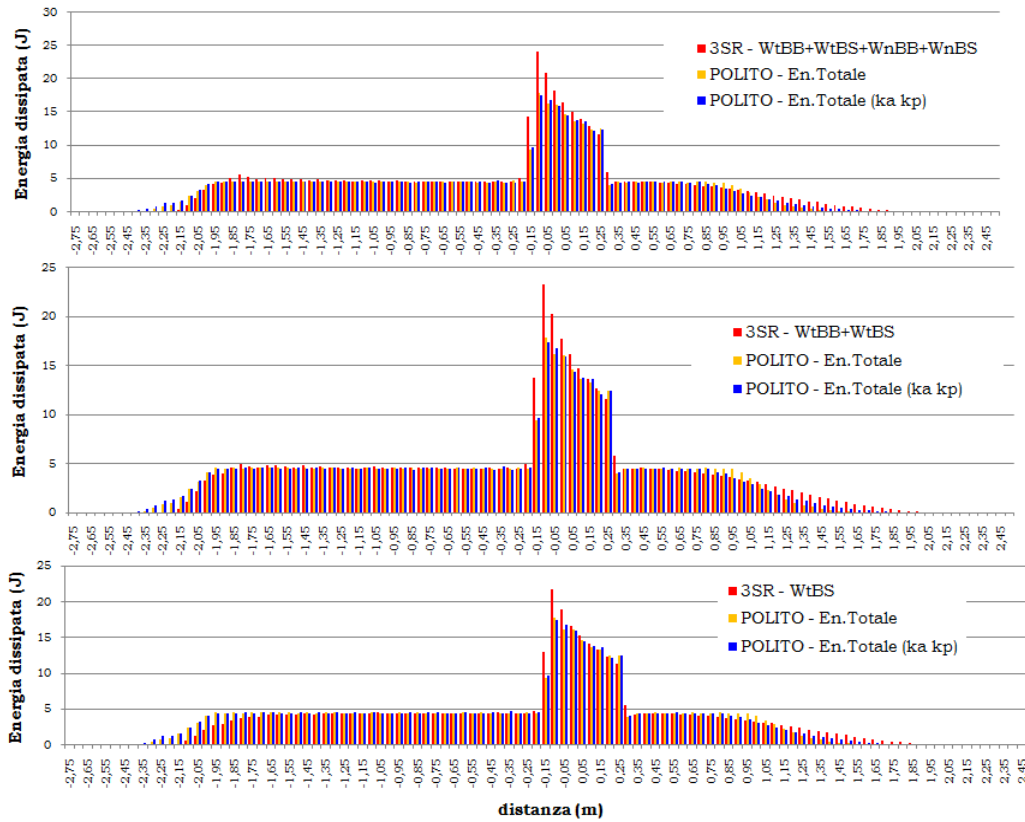


Figura 19 : Confronto distribuzione energia dissipata POLITO-3SR con $R = 0.6m$.

	F	G	H	I	F-I
	R = 0.05	R = 0.1	R = 0.2	R = 0.6	
A POLITO iso	255.40	268.96	262.88	211.56	43.84
B POLITO kakk	254.02	270.88	265.60	212.23	41.79
C 3SR WtBS	265.20	282.44	281.98	229.55	35.65
D 3SR <u>WtBS+WtBB</u>	336.41	329.67	311.76	240.55	95.87
E 3SR WtBS+WtBB+WnBS+WnBB	380.14	357.27	328.04	245.80	134.34
E-B	126.12	86.39	62.44	33.57	
D-B	82.39	58.79	46.16	28.32	
C-B	11.18	11.56	16.38	17.32	
E-A	124.74	88.31	65.16	34.24	
D-A	81.01	60.71	48.88	28.99	
C-A	9.80	13.48	19.10	17.99	

Figura 20 : Riepilogo distribuzione energia dissipata POLITO-3SR lungo la transizione.

II.5. Applicazione a dei casi reali

La falesia di La Suche si situa nel comune di Vouvry, in prossimità di Villeneuve (Fig. 21). Il versante instabile si trova nel Cantone del Valais mentre la zona di deposito dell'evento storico raggiunge il suolo del Cantone di Vaud.



Figura 21 : Il sito di la Suche.

L'area oggetto di studio è stata storicamente interessata di una grossa frana, la frana del Tauredunum, che secondo la leggenda risalirebbe all'anno 563. La violenza del fenomeno avrebbe provocato lo straripamento del Lago Lemano, portando grossi danni ai villaggi collocati lungo la costa.

Secondo la stima de M. Sartori (Università di Ginevra e CREALP) il volume di questo evento sarebbe stato verosimilmente compreso tra 70 e $100 \cdot 10^6$ m³ di materiale.

Negli ultimi decenni la falesia di La Suche è stata interessata da un'aumentata attività di caduta massi e crolli. In particolare, tra il 1969 e il 1999 si è assistito a 4 eventi maggiori. Allo stato attuale, nella zona riconosciuta come nicchia di distacco dell'evento storico si è rilevata la presenza di 2 aree principali potenzialmente instabili. Una coinvolgerebbe il distacco di un volume di materiale di circa $30 \cdot 10^3 \text{ m}^3$ (Alea 1) mentre l'altra di circa $280 \cdot 10^3 \text{ m}^3$ (Alea 2) (Fig. 22).

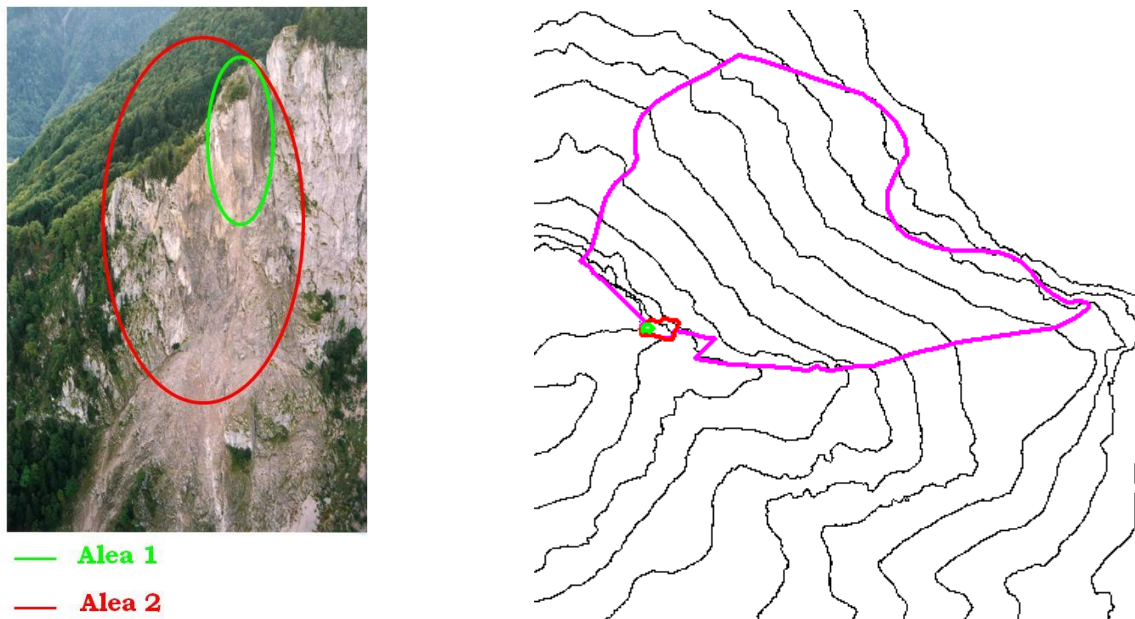


Figura 22 : Il sito di la Suche. Rosa: contorno dell'evento storico

Nell'ambito del progetto MASSA, il codice di calcolo RASH3D è stato utilizzato per svolgere l'analisi del possibile processo di propagazione e deposito dell'Alea 2. Le analisi svolte non includono esplicitamente il termine di accelerazione centripeta per cui tale effetto viene preso in considerazione indirettamente attraverso la calibrazione dell'angolo di attrito. Tale effetto emerge se, a parità di approccio, vengono messi a confronto i risultati ottenuti con RASH3D rispetto quelli ottenuti all'EPFL da Chalindar nel 2006 con il codice DAN3D (in cui l'accelerazione centripeta è presa espressamente in considerazione).

Da un confronto sia in termini di reologia attritiva (vedere equazione [3]) che di reologia Voellmy (vedere equazione [4]) emerge uno scarto nei risultati dei due codici in termini di parametri calibrati per la reologia attritiva mentre un comportamento simile emerge in termini di reologia Voellmy (Fig. 23).

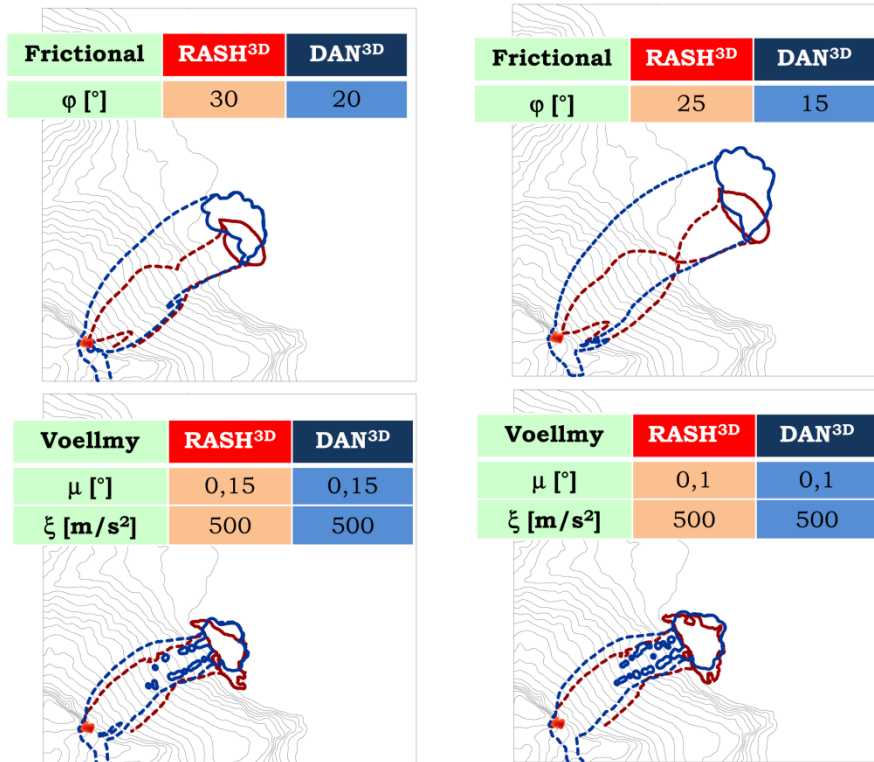


Figura 23 : Il sito di la Suche. Alea 2. Confronto RASH3D vs DAN3D.

Ne emerge che a parità di propagazione, l'effetto dell'accelerazione centripeta, che nella reologia attritiva determina un $\Delta\varphi$ di circa 10° tra i valori di angolo di attrito calibrato per i due codici, viene ad avere un'importanza trascurabile nella reologia Voellmy dove l'introduzione del termine di turbolenza è in grado di controllare e ridurre la velocità di propagazione della massa.

In accordo con tale risultanza, Chalindar (2006) evidenzia che per una reologia Voellmy, a parità di termine turbolento, una variazione del termine attritivo influenza la posizione del fronte del deposito (punto distale) ma non della posizione della sua coda (punto prossimale) (Fig. 24).

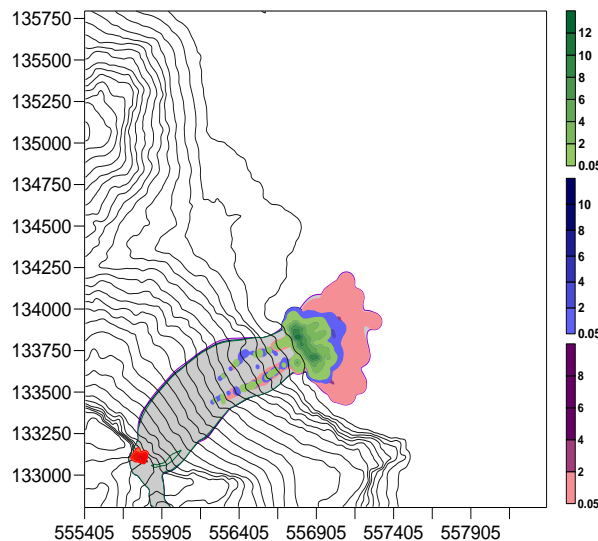


Figura 24 : Il sito di la Suche. Alea 2. Analisi parametrica dell'importanza del termine attritivo in un reologia Voellmy (a parità di termine turbolento). Verde: $\mu=0.15$ - $\xi=500\text{m/s}^2$; Blu: $\mu=0.1$ - $\xi=500\text{m/s}^2$; Rosa: $\mu=0.01$ - $\xi=500\text{m/s}^2$ (Chalindar, 2006).

Il ruolo dominante del termine turbolento nella reologia Voellmy, lo si può evidenziare anche mettendo a confronto il deposito ottenuto con la reologia Voellmy e con quella attritiva a parità di angolo di attrito (Fig. 25).

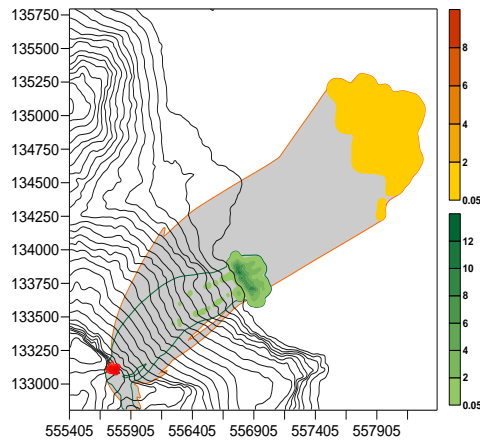


Figura 25 : Il sito di la Suche. Alea 2. Analisi dell'importanza del termine turbolento ($\xi=500\text{m/s}^2$) della reologia Voellmy attraverso confronto con reologia attritiva a parità di angolo di attrito, $\varphi=10^\circ$ (Chalindar, 2006).

II.6. Conclusioni

Un modello basato sull'approccio della meccanica dei continui è stato utilizzato e migliorato per permettere l'analisi del comportamento delle valanghe rocciose di medie e piccole dimensioni.

Le analisi svolte hanno permesso di evidenziare i vantaggi e gli svantaggi di un tale tipo di approccio nello studio di fenomeni naturali quali quelli oggetto del presente progetto. L'attività svolta ha altresì permesso di indagare ed approfondire l'importanza e il significato di alcune grandezze coinvolte nella determinazione della dinamica di propagazione e di deposito di una massa il cui moto è riconducibile a quello di un flusso.

Il vantaggio principale di un approccio della meccanica dei continui risiede nella semplificazione del problema analizzato, focalizzando l'attenzione su quelle grandezze che giocano un ruolo fondamentale nel definire il fenomeno analizzato. In particolare, si perdono gradi di dettaglio quali il comportamento del singolo grano riportando l'analisi ad una scala più grande in cui l'aspetto analizzato è quello del comportamento d'insieme del materiale che costituisce la massa in movimento.

Tali semplificazioni, nel momento in cui non inficiano i risultati e la rappresentazione del caso reale, permettono di ridurre il numero di parametri necessari alla simulazione dell'evento e rendono più agevole l'applicazione del codice allo studio di casi reali, dove normalmente il numero di incognite è tale per cui non risulta possibile conoscere il comportamento delle singole particelle.

Attraverso le simulazioni numeriche delle prove di laboratorio è stato possibile evidenziare un limite dell'approccio della meccanica del continuo, cioè la sua non applicabilità allo studio di fenomeni in cui prevale la componente traslazionale di un blocco (caso del rilascio di mattoncini impilati regolarmente). Daltronde tale dinamica non coincide con quella di un fenomeno con le caratteristiche di flusso che è alla base dell'applicazione della meccanica del continuo allo studio dei fenomeni di instabilità.

Dal punto di vista delle caratteristiche del modello numerico utilizzato, si è potuta indagare l'importanza di alcuni termini quale l'accelerazione centripeta, che se trascurata (soprattutto ragionando in termini di prove di laboratorio) determina un innalzamento del valore di angolo di attrito, rispetto al valore reale attribuibile in laboratorio al materiale analizzato. Dall'altro lato, un confronto in termini di reologie ha altresì evidenziato come tale effetto possa venire meno nel momento in cui si introduca la dissipazione per effetto della turbolenza interna del materiale. Ottenuta passando da una reologia semplice attritiva ad una reologia di tipo Voellmy.

Il codice di calcolo RASH3D ha permesso di studiare in modo soddisfacente la dinamica



che ha caratterizzato la formazione del deposito nel caso della sua applicazione alla simulazione delle prove di laboratorio. Per quanto riguarda l'applicazione del modello allo studio di casi reali, il modello ben si presta allo studio alla scala del sito, sebbene permangano i problemi connessi alla calibrazione dei parametri reologici nel momento in cui si proceda allo studio di un evento potenziale.

II.7. Pubblicazioni realizzate nell'ambito del progetto MASSA

- [1] G. Pisani, M. Pirulli, V. Labiouse, C. Scavia (2011): "Influence of bed curvature on the numerical modelling of unconstrained granular materials", in The Second World Landslide Forum, 3-9 October 2011, Rome, Italy.
- [2] C. Sauthier, G. Pisani, V. Labiouse, M. Pirulli, C. Scavia (in preparation): " Numerical modelling of gravel unconstrained flow experiments with the DAN3D and RASH3D codes". Computer & Geosciences.

II.8. Bibliografia

Audusse E., Bristeau M.O., Perthame B., 2000. Kinetic schemes for Saint-Venant equations with source terms on unstructured grids. INRIA Rep. 3989, Natl. Inst. Res. Comput. Sci. and Control, Le Chesnay, France.

Chalindar S.S., 2006. Modelisation numerique d'avalanches rocheuses (Cantons du Valais de de Glaris). Section de Genie Civil - Travail de Master 2005-2006. Ecole Polytechnique Federale de Lausanne (CH).

Hungr O., McDougall S., 2009. Two numerical models for landslide dynamic analysis. Computers & Geosciences, 35: 978-992.

Iverson R.M., Denlinger R.P., 2001. Flow of variably fluidized granular masses across threedimensional terrain. A. Coulomb mixture theory, Journal of Geophysical Research, Vol. 106, pp. 537-552.

McDougall S., Hungr O., 2004. A model for the analysis of rapid landslide motion across three-dimensional terrain. Canadian Geotechnical Journal, 41: 1084-1097.

McDougall S., 2006. A new continuum dynamic model for the analysis of extremely rapid landslide motion across complex 3D terrain. Ph.D. Dissertation, University of British Columbia, Vancouver, Canada, 253pp.

Mangeney-Castelnau A., Vilotte J.-P., Bristeau M.O., Perthame B., Bouchut F., Simeoni C., Yernini S., 2003. Numerical modelling of debris avalanche based on Saint-Venant equations using a kinetic scheme. J. Geophys. Res. 108 (B11), EPM 9, 1-18.

Manzella I., Labiouse V., 2009. Flow experiments with gravel and blocks at small scale to investigate parameters and mechanisms involved in rock avalanches. Engineering Geology, Vol. 109, pp. 146-158.

Pirulli M., 2005. Numerical modelling of landslide runout, a continuum mechanics approach. Ph.D. Thesis in Geotechnical Engineering, Politecnico di Torino, Italy.

Savage S.B., Hutter K., 1989. The motion of a finite mass of granular material down a rough incline, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 199, pp. 177-215.



III. CONTEXTE DES TRAVAUX REALISES AU LABORATOIRE 3SR

Les recherches qui ont été menées au laboratoire 3SR dans le cadre du projet MASSA ont consisté à tester les capacités d'un code de calcul par éléments discret à décrire le comportement des avalanches rocheuses de moyennes et faibles amplitudes. Ces travaux ont été menés par G. Mollon, Post Doctorant financé dans le cadre du projet MASSA, S. Cuervo dans le cadre d'un Master recherche, S.C Figueiredo dans le cadre d'une collaboration Franco-Brésilienne, sous la direction de D. Daudon, V. Richefeu, et P.Villard. Ces travaux ont été présentés dans des congrès internationaux (Second World Landslide Forum, 2011; Euromech Colloquium, 2011; Powders & Grains, 2013) et valorisés par des publications dans des revues internationales à comité de lecture (Journal of Geophysical Research – Earth Surface, 2012; Engineering Geology, 2012). D'autres travaux de valorisation sont en cours de rédaction.

Pour décrire la cinématique de propagation des avalanches rocheuses nous avons retenu la méthode des éléments discrets qui permet de discrétiser la masse en mouvement par un ensemble de particules qui interagissent entre elles en leurs points de contact. Par souci de réalisme et d'efficacité nous avons choisi de prendre en considération des formes de blocs réalistes et des lois d'interaction simples qui nécessitent un nombre restreint de paramètres et qui intègrent de manière globale les mécanismes de dissipation d'énergie. Cette méthode se distingue des modèles continus, développés par les autres partenaires du projet MASSA, qui considèrent la masse dans son ensemble en supposant une loi de comportement adaptée aux grands déplacements.

Pour valider l'approche discrète, extrêmement complexe dans le cas des avalanches rocheuses, nous nous sommes efforcés de reproduire des expérimentations de lâchers de particules réalisées en laboratoire à l'EPFL (Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne) dans des conditions bien maîtrisées. Les comparaisons ont portées à la fois sur la géométrie des dépôts obtenus après propagation et sur la dynamique de l'écoulement (propagation de la masse en fonction du temps).

Les paramètres du modèle ont été déterminés et optimisés à partir de lâchers de briques élémentaires qui ont pu être réalisés grâce à la mise à disposition par l'EPFL des éléments de base nécessaires à leur réalisation (briques et support). L'intérêt du modèle numérique est qu'il donne accès à des grandeurs difficiles à appréhender expérimentalement en tout point de la masse granulaire (vitesses et rotations des particules, énergies dissipées par frottement ou par chocs avec la pente ou au sein de la masse en mouvement, forme de l'écoulement et géométrie du dépôt final) et qu'il permet d'analyser avec précision l'influence des paramètres du modèle ou des conditions d'essais sur les mécanismes de propagation.

Pour appréhender les limites et les domaines de validité des modèles continus et discrets, des études numériques complémentaires ont été menées sur le principe de base des expérimentations réalisées à l'EPFL. Des modélisations spécifiques ont notamment été réalisées en collaboration avec le Polytechnico de Turin pour apporter des réponses quant aux mécanismes de dissipations d'énergie au voisinage d'une rupture de pente brusque ou présentant un arrondi. A terme, ces travaux toujours en cours, devraient déboucher sur un enrichissement des lois de comportement utilisées dans les modèles continus.

Des développements numériques spécifiques (pré traitement et post traitement) ont été réalisés pour permettre l'utilisation systématique du code de calcul discrets à des applications réelles. Compte tenu du manque de données et d'informations, le modèle n'a cependant pas pu être appliqué à l'ensemble des sites retenus dans le cadre du projet MASSA. Seul le site du Néron qui est le cas le plus documenté en termes de Modèles Numériques de Terrain et d'informations recueillies pendant l'éboulement a pu être abordé. Les confrontations avec les données de terrain sont en cours et les collaborations engagées toujours actives.

III.1. Description du modèle numérique

La méthode utilisée est la méthode des éléments discrets qui permet de gérer le mouvement d'un ensemble de particules par l'application, à chaque pas de temps, du principe fondamental de la dynamique. Les forces à considérer dans ce schéma de résolution sont les forces de pesanteurs, les interactions entre particules et les forces de contact aux limites du domaine étudié.

Pour pouvoir être appliqué avec succès à des événements réels, les lois d'interaction à considérer doivent être suffisamment réalistes pour que l'on puisse décrire avec une précision acceptable les mécanismes de dissipations d'énergie observés lors des chocs, sans toutefois nécessiter un nombre important de paramètres, compte tenu que leur détermination reste souvent problématique.

Nous avons donc retenu pour cette étude un modèle de contact simple (Fig.1) qui intègre de manière globale l'ensemble des mécanismes de frottement et de dissipations d'énergie qui surviennent lors d'un choc entre deux solides. Ce modèle est défini par quatre paramètres :

- un coefficient de restitution normal e_n^2 qui caractérise la quantité d'énergie perdue lors d'un choc dans la direction normale au contact,
- un coefficient de dissipation tangentielle μ qui permet de prendre en considération les forces résistives de frottement dans la direction tangentielle au contact,
- les rigidités normales et tangentielles au point de contact (respectivement k_n et k_t).

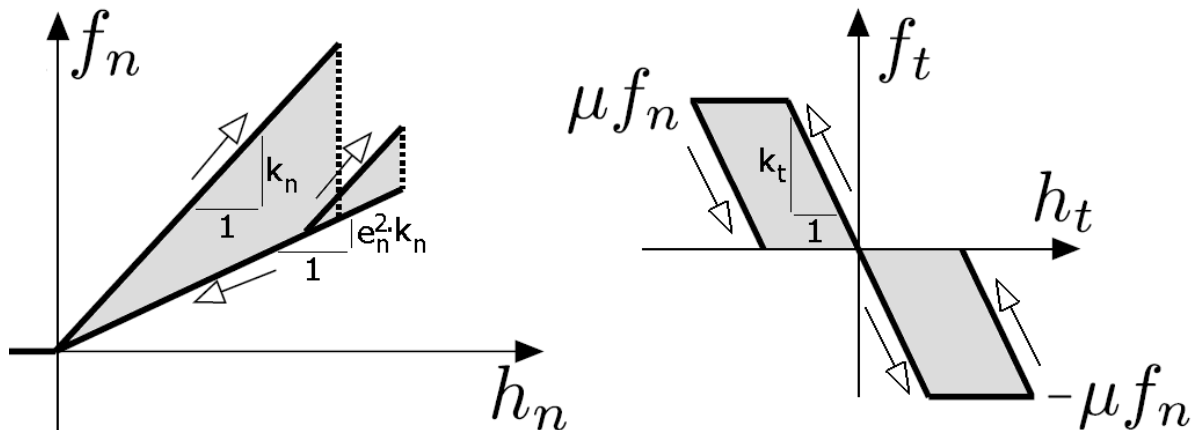


Figure 1: Lois d'interaction reliant les forces normales et tangentielles de contact (f_n et f_t) à l'interpénétration (h_n) et au déplacement relatif (h_t) entre les corps en contact.

La forme des particules en mouvement ayant une importance toute particulière sur la trajectoire des particules, nous avons pris le parti de rester fidèle aux géométries des blocs à modéliser. D'un point de vue mathématique, la géométrie retenue peut être vue comme une somme de Minkowsky de polyèdres avec une sphère (Fig.2). Cette discrétisation permet d'optimiser les temps de calcul liés à la détection des contacts tout en permettant de recréer des formes extrêmement réalistes.

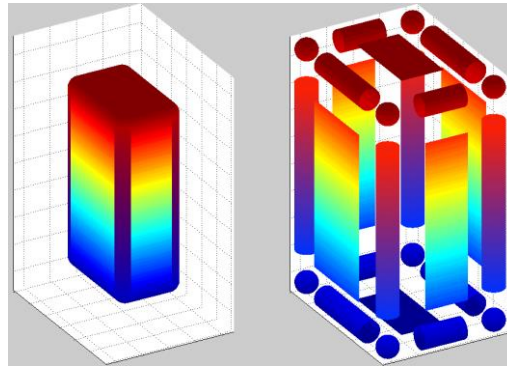


Figure 2 : Exemple de géométrie retenue pour modéliser les éléments « brique » utilisés lors des expérimentations de l'EPFL.

III.2. Procédure de calibration des paramètres

Les paramètres du modèle numérique peuvent être déterminés par l'analyse d'une série de rebonds élémentaires. L'analyse de ces données par corrélation d'images permet de déterminer avec précision la cinématique des rebonds.

La minimisation d'une fonction erreur, établie entre les résultats expérimentaux et les résultats du modèle numérique, permet de déterminer par optimisation les paramètres de contact. Une illustration de cette procédure de calibration est donnée sur la figure 3, qui présente : sur la gauche, les enregistrements vidéo obtenus à différents pas de temps, au centre, les positions déduites de la corrélation d'images, et à droite, les positions restituées par le modèle numérique avant et après rebond.

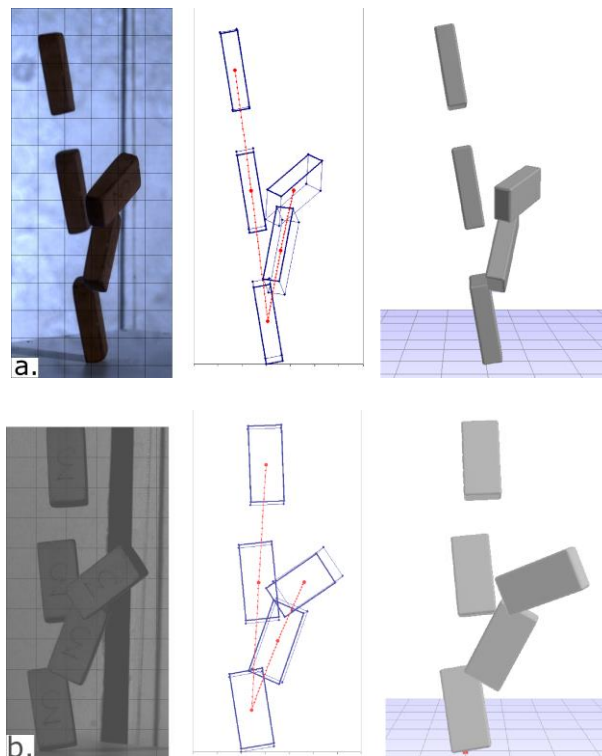


Figure 3: Trajectoires expérimentales, analytiques et numériques d'un lâcher de brique vues sous deux angles de prise de vue.

Cette procédure appliquée à plusieurs lâchers de briques permet, par minimisation d'une fonction erreur établie sur l'ensemble des résultats obtenus, de déterminer un jeu de paramètres restituant au mieux l'ensemble des rebonds étudiés. Les paramètres qui ont ainsi été obtenus pour des interactions de type brique/brique ou brique/support sont répertoriés dans le tableau 1.



	e_n^2	$\square\square$	k_n	k_n / k_s
Brique/Support	0.53	0.46	10^5	0.42
Brique/Brique	0.13	0.86	10^5	0.27

Tableau 1: Paramètres de contact du modèle numérique.

Sur ces rebonds élémentaires, la bonne corrélation entre l'expérimentation et le modèle numérique montre que le modèle d'interaction proposé est suffisant pour décrire avec une précision acceptable les mécanismes de rebond dans des cas simples. Au delà des résultats obtenus sur ces modèles analogiques, on peut penser que moyennant certaines adaptations, cette procédure puisse être appliquée à la détermination des paramètres d'interaction lors d'un impact de bloc rocheux sur une pente.

III.3. Confrontation du code de calcul avec les résultats expérimentaux de l'EPFL

Une fois paramétré, le code de calcul a été utilisé pour simuler le comportement collectif d'une assemblée de particules en interaction sur une pente à 45°. Des lâchers respectivement de 10000 et 6300 briques ordonnées ou en vrac ont été simulés (volume apparent $V_0 = 40$ litres et hauteur du lâcher $H = 1$ m). Les résultats type obtenus concernent la cinématique de l'écoulement (figure 4), l'évolution des énergies développées ou dissipées dans le système au cours du temps (figure 5), les pourcentages d'énergies dissipées par frottement ou par chocs avec le support ou au sein de la masse granulaire en différentes sections de la pente (figure 6), la géométrie des dépôts et les profils de vitesse du front de l'écoulement (figure 7).

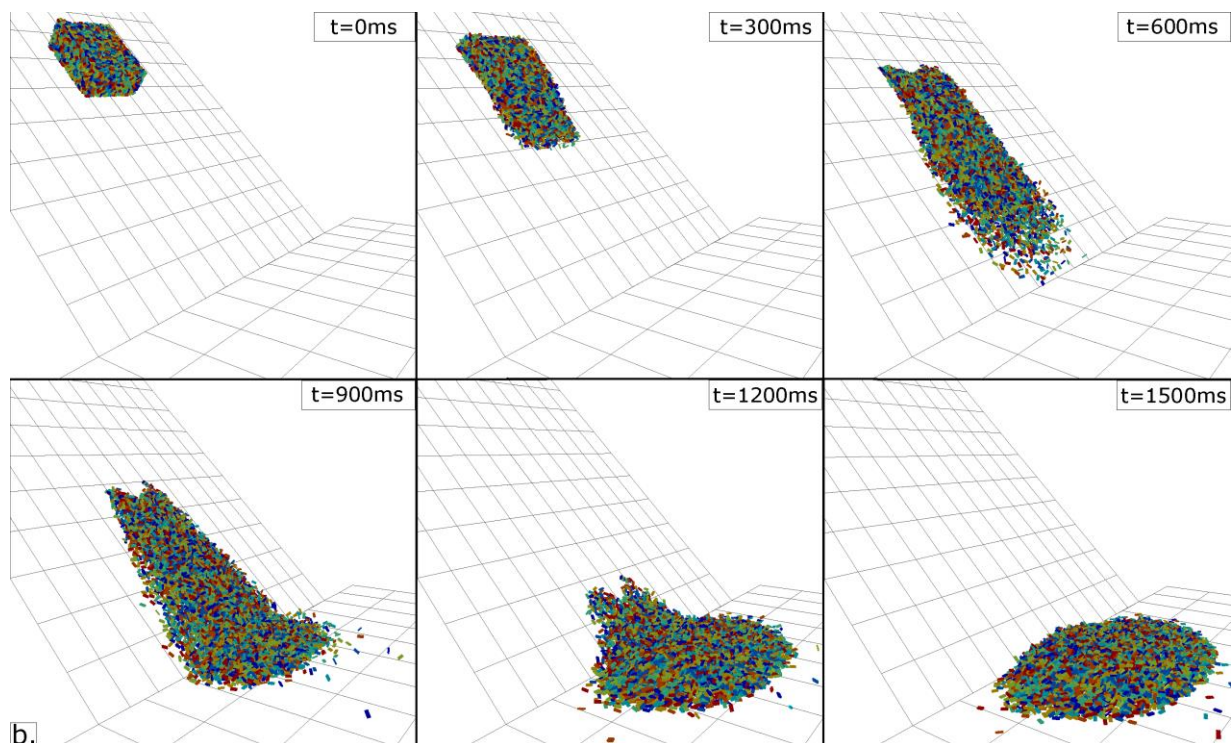


Figure 4 : Cinématique de propagation lors d'un lâcher de briques sur un biplan incliné. (briques en vrac, $H = 1$ m et $V_0 = 40$ l)

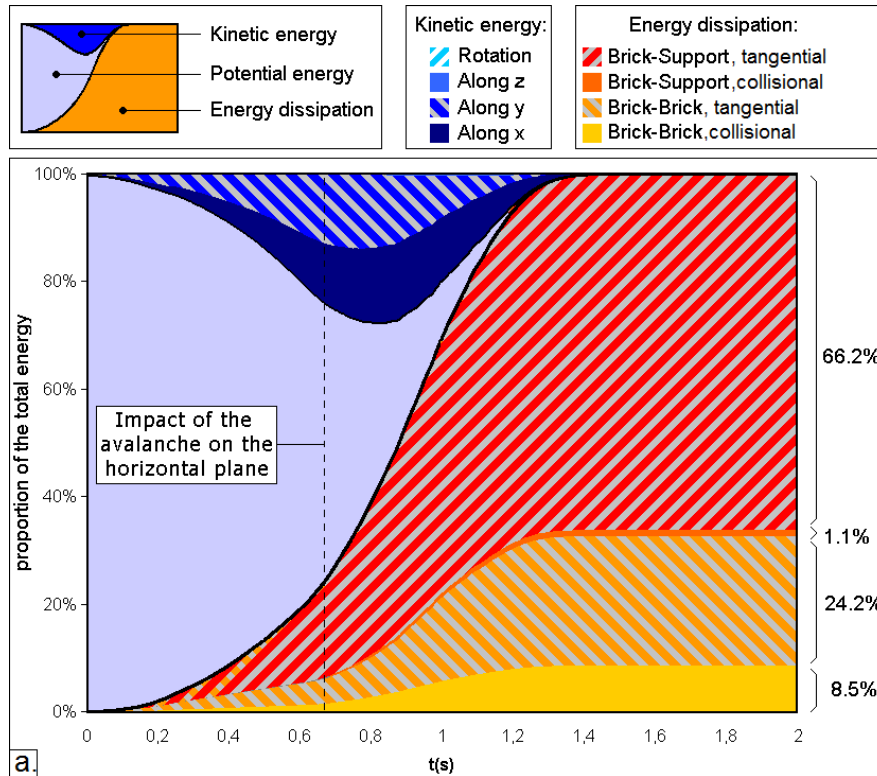


Figure 5 : Evolution des énergies développées ou dissipées dans le système au cours du temps (briques en vrac, $H = 1 \text{ m}$ et $V_0 = 40 \text{ l}$)

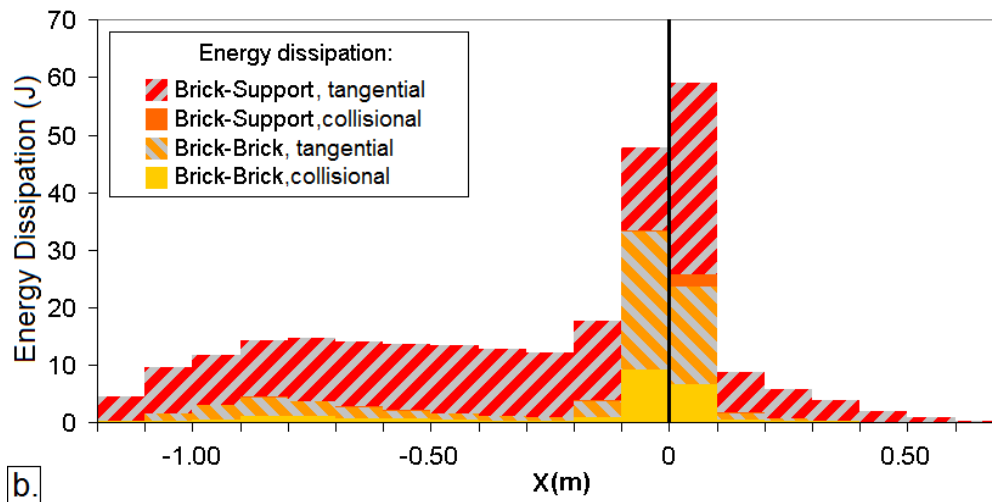


Figure 6 : Energies dissipées par chocs et par frottement entre les briques ou entre les briques et le support en différentes sections de la pente (briques en vrac, $H = 1 \text{ m}$ et $V_0 = 40 \text{ l}$)

Sur la figure 5, on constate que l'énergie potentielle initiale du système (zone représentée en violet clair sur la figure 5) décroît rapidement au cours du temps. Celle-ci est convertie en énergie cinétique de translation et de rotation ou est dissipée par frottement et par chocs au sein de la masse granulaire ou à la base de l'écoulement. Parmi les quatre modes de dissipation possibles (frottement Brique/Brique, frottement Brique/Support, dissipation par chocs entre les briques et dissipation par chocs entre les briques et le support) le frottement Brique/Support et le frottement Brique/Brique sont pour ce type d'écoulement les plus influents. Ils représentent respectivement 66.2 % et 24 % de l'énergie totale dissipée. Sur la figure 6, où sont représentées pour différentes sections de la pente (de -1.2 m à 0.5 m) les énergies dissipées par chocs et par frottement, on remarque que c'est au niveau de la rupture de pente (position 0 sur la figure 6) que l'on rencontre majoritairement de la dissipation par chocs et par frottement entre les briques. Ceci est lié au fait que la rupture de



penne génère une perturbation de l'écoulement qui favorise les chocs et l'agitation au sein de la masse granulaire.

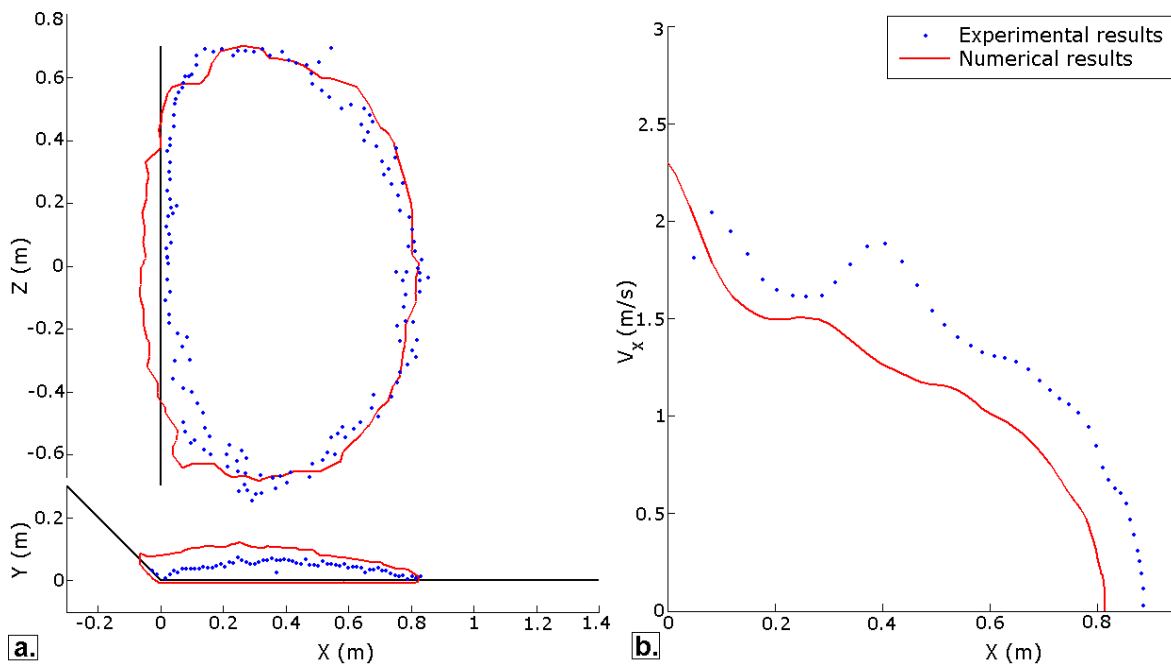


Figure 7 : Comparaison entre les résultats du modèle numérique et les résultats expérimentaux (briques en vrac, $H = 1$ m et $V_0 = 40$ l) : géométrie du dépôt et vitesses de propagation du front de l'écoulement

Sur la figure 7 sont comparées les formes expérimentales et numériques des dépôts ainsi que les vitesses. Des procédures de post traitement des données, détaillées dans Mollon et al. (2012), ont été développées et appliquées aux résultats numériques. Les comparaisons avec les résultats expérimentaux obtenus à l'EPFL sont tout à fait acceptables compte tenu des difficultés expérimentales que représentent également la détermination de la forme du dépôt et de la vitesse du front.

De même, les comparaisons effectuées sur les lâchers de briques empilées (détaillées dans Richefeu et al.,

En conclusion, l'ensemble des résultats obtenus montrent qu'une fois paramétré sur un rebond élémentaire, le modèle numérique est apte à décrire le comportement collectif d'un ensemble de briques se propageant sur un biplan incliné et horizontal et ce quel que soit son ordonnancement initial (briques en vrac ou briques ordonnées).

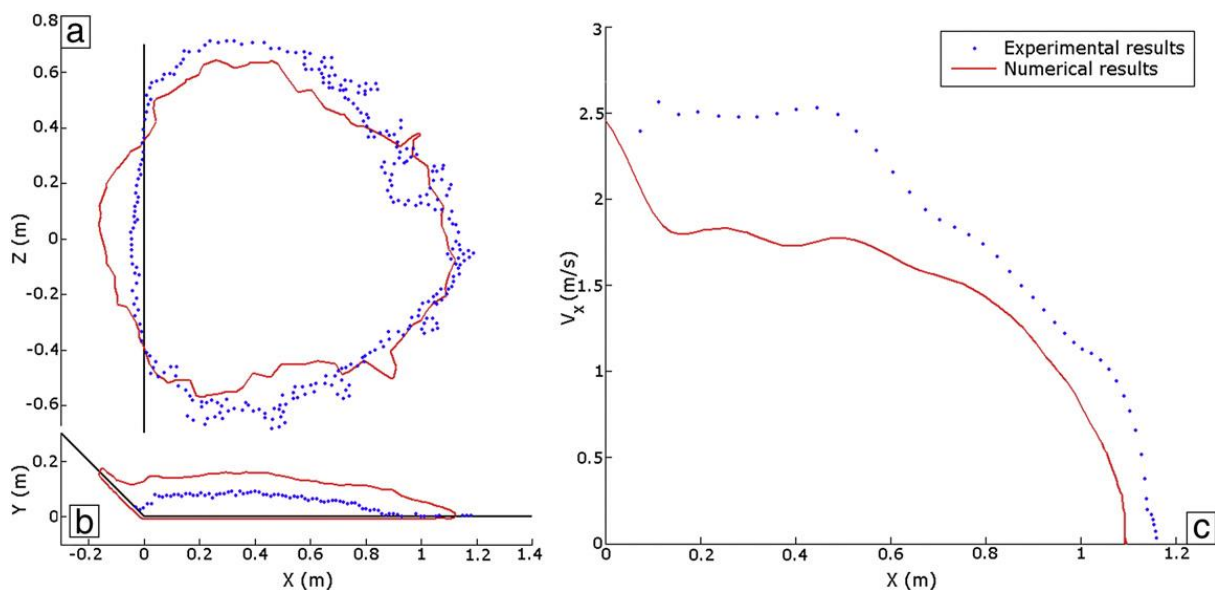


Figure 8 : Comparaison entre les résultats du modèle numérique et les résultats expérimentaux (briques ordonnées, $H = 1$ m et $V_0 = 40$ l) : géométrie du dépôt

III.4. Etude paramétrique

L'un des intérêts du modèle numérique est qu'il permet de procéder à la réalisation d'études paramétriques en s'affranchissant totalement des problèmes expérimentaux parfois difficiles à résoudre. Trois études ont été réalisées : la première visant à étudier l'incidence des paramètres du modèle de contact sur la cinématique de propagation, la position et la forme du dépôt ; les deux autres visant à déterminer l'influence des paramètres géométriques tels que, la forme, la taille ou le nombre de particules, la rugosité de surface ou l'influence d'une transition courbe entre les plans.

a) Etude de sensibilité aux paramètres du modèle de contact

L'étude de sensibilité aux paramètres du modèle de contact a porté essentiellement (Fig.9) sur la longueur d'étalement du dépôt sur le support plan (R), la largeur du dépôt (W), l'angle de propagation du centre de masse (φ_{CM}) et sur le fahrböschung (φ_{ap}). La géométrie de référence est celle définie précédemment et pour laquelle les résultats sont présentés sur la figure 7. Au total, 27 simulations ont été réalisées sur la base des paramètres de contact définis dans le tableau 2 et ce pour trois angles de pentes (37.5°, 45°, et 65°). Les résultats obtenus, détaillés dans Mollon et al., 2012., sont synthétisés sur la figure 10.

	0 (ref)	1	2	3	4	5	6	7	8
$e_{n_{BB}}^2$	0.13	<u>0.08</u>	<u>0.80</u>	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13
μ_{BB}	0.86	0.86	0.86	<u>0.30</u>	<u>0.50</u>	0.86	0.86	0.86	0.86
$e_{n_{BS}}^2$	0.53	0.53	0.53	0.53	0.53	<u>0.08</u>	<u>0.80</u>	0.53	0.53
μ_{BS}	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	<u>0.30</u>	<u>0.60</u>

Tableau 2 : Paramètres de contact du modèle numérique utilisés pour l'étude paramétrique

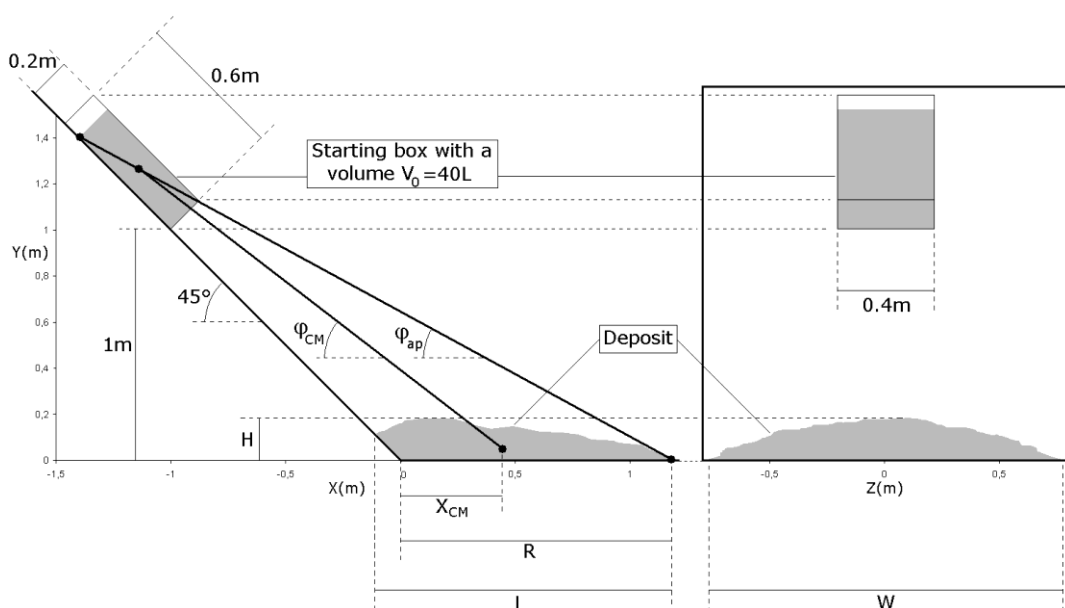


Figure 9 : Définition des grandeurs caractéristiques de la forme et de la position du dépôt

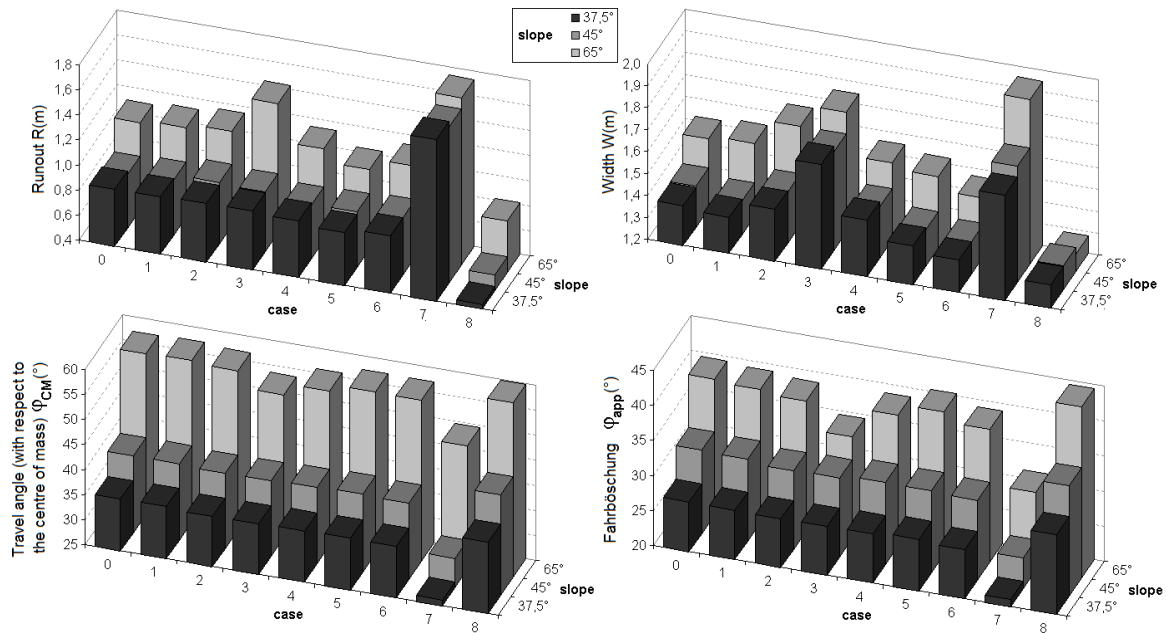


Figure 10 : Influence des paramètres de contact du modèle numérique sur la longueur du dépôt (R), la largeur du dépôt (W), l'angle de propagation du centre de masse (φ_{CM}) et le fahrböschung (φ_{ap}).

Sur cette figure, on constate que l'angle de la pente a une importance considérable sur l'angle de propagation et sur le fahrböschung mais une influence plus réduite sur les dimensions du dépôt (notamment pour les faibles pentes). Parmi les paramètres de contact du modèle, c'est le paramètre de frottement entre les briques et le support qui, pour ce type de simulation, est le plus influent (cas 7 et 8) que ce soit sur les longueurs de propagation ou sur les dimensions du dépôt. Ceci est lié au fait que les surfaces de propagation de l'écoulement sont lisses et que l'écoulement est de ce fait peu perturbé.

b) Influence de la géométrie du support sur les mécanismes de propagation

Des études complémentaires à celles présentées précédemment (briques en vrac, $H = 1$ m et $V_0 = 40$ l) ont été menées afin d'établir des analogies entre les modèles discrets et continus. Dans ce cadre, on s'est demandé s'il était possible de prendre en considération la rugosité de surface d'une pente en majorant la valeur de l'angle de frottement à la base de l'écoulement. Dans ce but, deux simulations numériques ont été réalisées. La première (Cas A) correspond à un écoulement sur pente lisse pour lequel une valeur de 0.6 du coefficient de frottement entre les briques et le support a été retenue (simulation 8 du tableau 2). La seconde (Cas B) correspond au cas de référence du tableau 2 (coefficient de frottement entre les briques et le support de 0.46 et pente à 45°) pour lequel une rugosité de surface a été simulée par l'intermédiaire d'ondulations régulières du plan incliné (Fig.11).

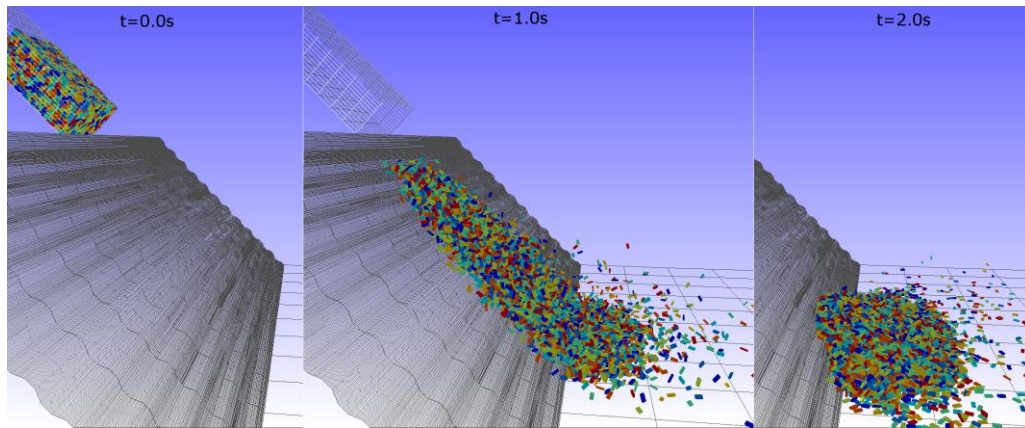


Figure 11: Cinématique de l'écoulement sur une pente ondulée (Mollon et al., 2012)

Comme on peut le constater sur la figure 12, ces deux simulations conduisent à des formes de dépôts voisines en termes de profil latéral et de distance de propagation bien que les mécanismes de dissipations d'énergie soient assez différents d'une géométrie à l'autre (Fig.13). En fait, la micro rugosité de surface de la pente ondulée engendre une perturbation de l'écoulement qui favorise les chocs et le frottement entre les particules au sein de l'écoulement. Ces perturbations sont sources de dissipations d'énergie supplémentaires que l'on peut simuler approximativement en augmentant le frottement basal dans le cas d'une pente lisse. Par voie de conséquence, les dépôts après stabilisation ont des distances de propagation assez similaires.

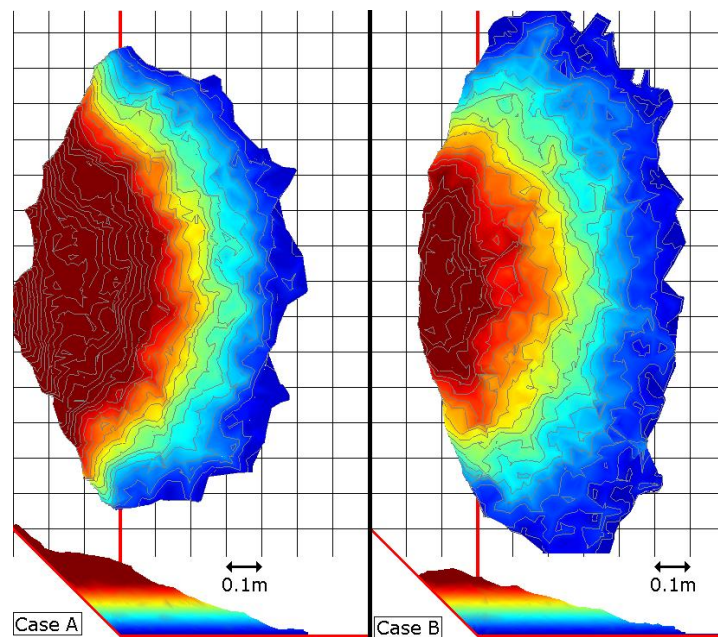


Figure 12 : Géométrie des dépôts après stabilisation : Cas A - pente lisse et frottement basal de 0.6 ; Cas B - pente ondulée et frottement basal de 0.46

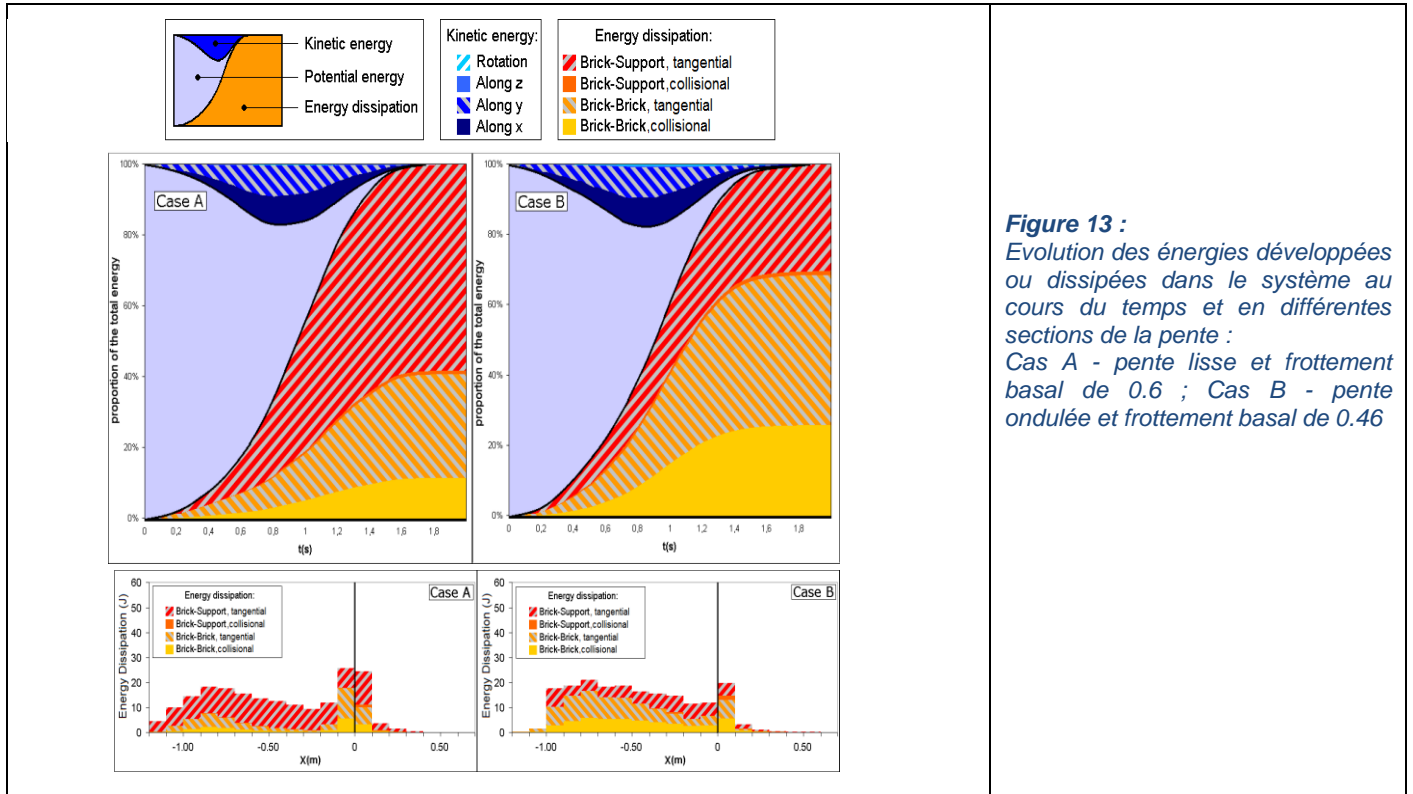
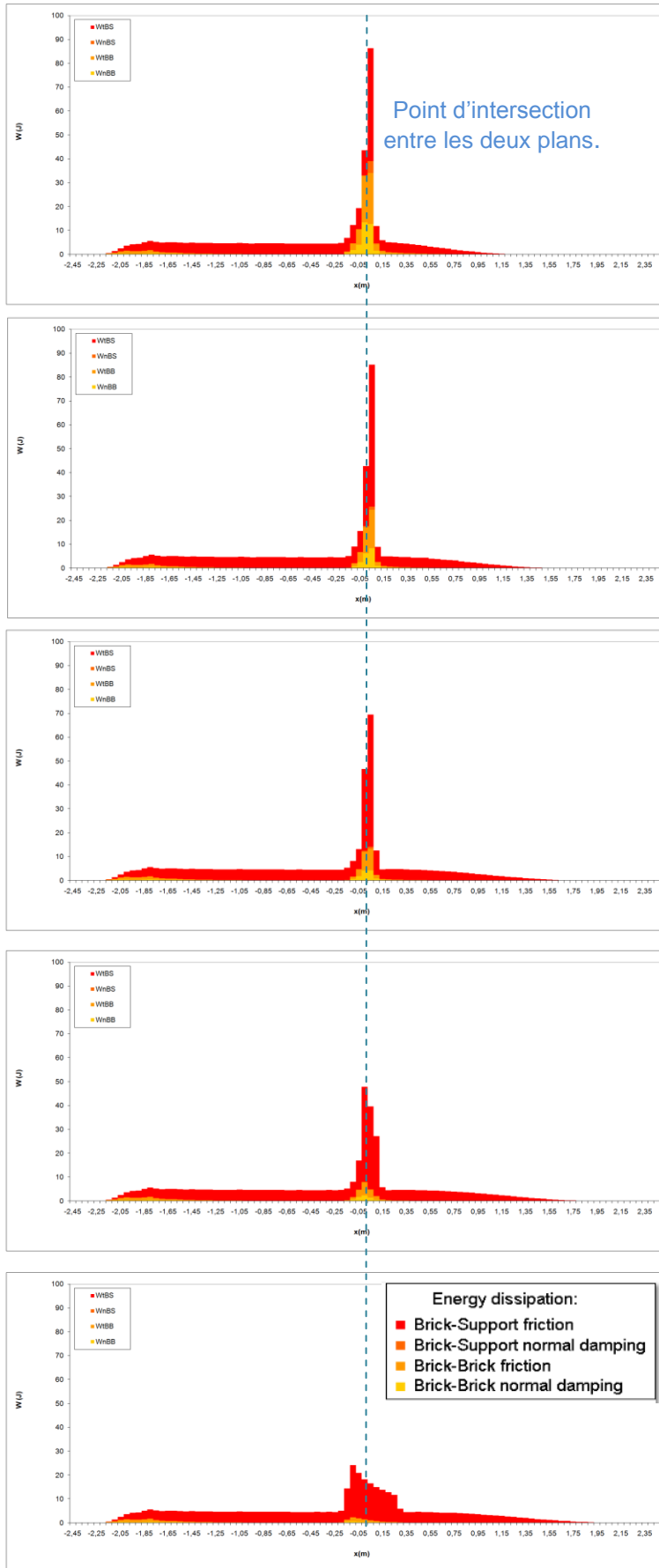


Figure 13 :
Evolution des énergies développées ou dissipées dans le système au cours du temps et en différentes sections de la pente :
Cas A - pente lisse et frottement basal de 0.6 ; Cas B - pente ondulée et frottement basal de 0.46

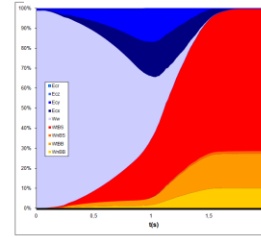
c) Influence d'un arrondi au voisinage de la rupture de pente sur les mécanismes de propagation

Il est apparu, lors des confrontations entre les résultats issus des modélisations continues et ceux issus des modèles discrets, qu'une rupture de pente brusque pouvait, pour les modèles continus, être à l'origine d'instabilité numérique. Nous nous sommes donc interrogés sur la nature des mécanismes de dissipations d'énergie aux voisinages d'une rupture de pente brusque ou présentant un arrondi. Ces travaux, menés en collaboration avec le Polytechnico de Turin, devraient permettre à terme une meilleure compréhension des phénomènes dissipatifs au sein de la masse granulaire au voisinage d'une singularité et devraient déboucher sur un enrichissement des lois de comportement utilisées dans les modèles continus.

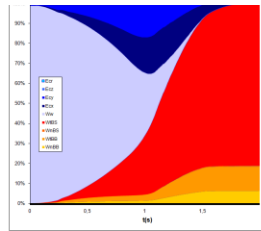
Des simulations numériques similaires à celles présentées précédemment, impliquant des briques ordonnées ou des cubes en vrac, ont été réalisées pour plusieurs valeurs de la hauteur du lâcher (H), différents volumes apparents (V_0), et en prenant en considération ou non, des transitions courbes entre les plans horizontaux et inclinés. Des rayons de courbure allant de 0 à 90 cm ont été mis en œuvre. Les résultats obtenus pour les briques ordonnées non parfaitement agencées ($H = 2\text{m}$ et $V_0 = 18\text{ l}$) sont synthétisés sur la figure 14 et dans le tableau 3 en termes de pourcentage d'énergie totale dissipée pendant l'écoulement, d'évolution des modes d'énergies dissipées dans le système au cours du temps et de caractéristiques du dépôt.



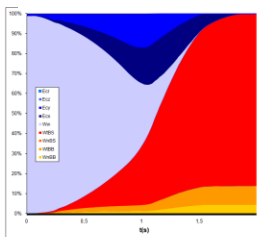
Rupture de pente brusque : $R= 0$ cm



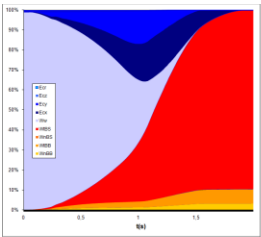
Rayon de courbure : $R= 5$



Rayon de courbure : $R= 10$



Rayon de courbure : $R= 20$



Rayon de courbure : $R= 60$

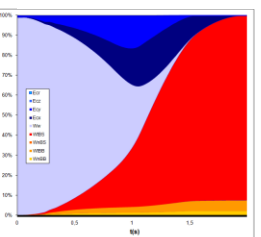


Figure 14 : Evolution des énergies développées ou dissipées dans le système au cours du temps pour différentes valeurs du rayon de courbure (briques ordonnées, $H=2m$ et $V_0 = 18 l$).



Type de dissipation : (% énergie totale)	Sans arrondi : (R0)	Arrondi: 5 cm (R5)	Arrondi: 10 cm (R10)	Arrondi: 20 cm (R10)	Arrondi: 60 cm (R60)
Energie dissipée par friction brique - support	71,3	81,1	86,1	89,5	92,5
Energie dissipée par chocs brique - support	1,3	0,4	0,2	0,1	0
Energie dissipée par chocs brique - brique	17,2	12,2	9,3	7,2	5,3
Energie dissipée par friction brique - brique	10,1	6,3	4,5	3,2	2,2
Distance de propagation R (m)	1,23	1,67	1,83	1,93	2,02
Etalement latéral du dépôt : W (m)	1,05	1,13	1,00	1,08	1,07
Hauteur du dépôt : h (m)	0,09	0,08	0,06	0,05	0,04

Tableau 3 : Mode d'énergie totale dissipée dans le système et caractéristiques du dépôt pour différentes valeurs du rayon de courbure (briques ordonnées, H=2m et $V_0 = 18$ l)

Type de dissipation : (% énergie totale)	Sans arrondi : (R0)	Arrondi: 5 cm (R5)	Arrondi: 10 cm (R10)	Arrondi: 20 cm (R10)	Arrondi: 60 cm (R60)
Energie dissipée par friction brique - support	65,8	74,5	81,5	84,3	85,6
Energie dissipée par chocs brique - support	4,2	3,7	3,4	3,0	2,8
Energie dissipée par chocs brique - brique	15,8	12,5	8,9	7,6	7,1
Energie dissipée par friction brique - brique	14,2	9,3	6,2	5,0	4,5
Distance de propagation R (m)	0,89	1,33	1,50	1,67	1,75
Etalement latéral du dépôt : W (m)	1,47	1,50	1,43	1,43	1,47
Hauteur du dépôt : h (m)	0,05	0,06	0,06	0,05	0,05

Tableau 4 : Mode d'énergie totale dissipée dans le système et caractéristiques du dépôt pour différentes valeurs du rayon de courbure (cubes en vrac, H=2m et $V_0 = 20$ l)

Sur la figure 14 et dans le tableau 3 on constate que pour des rayons de courbure élevés, l'énergie est dissipée dans le système majoritairement par frottement à la base de l'écoulement (soit 92.5 % de l'énergie totale dissipée pour un rayon de courbure de 60 cm).

Il est clair que pour un fort rayon de courbure l'écoulement granulaire est peu perturbé ce qui n'est plus le cas lorsque l'écoulement rencontre un obstacle ou est réorienté brusquement suite à une rupture de pente. Dans ce cas, c'est l'agitation générée au sein de la masse granulaire qui favorise les chocs et le frottement entre les briques et qui entraîne de la dissipation d'énergie. Pour une rupture de pente brusque, ces modes de dissipation



d'énergie atteignent jusqu'à 30 % de l'énergie totale dissipée. Au niveau de la zone de rupture de pente ces mécanismes de dissipation d'énergie par chocs et par frottement entre les briques sont prépondérants et atteignent jusqu'à 90 % de l'énergie qui y est dissipée. Pour les petits rayons de courbure, les distances de propagation du dépôt sont, comparativement aux forts rayons de courbure, beaucoup plus faibles (Fig.15).

Des lâchers de cubes en vrac ($V_0 = 20$ l) ont été réalisés dans des conditions similaires à celles des lâchers de briques empilées que ce soit pour le nombre d'éléments ou la hauteur des lâchers. Les résultats obtenus en termes d'évolution des modes d'énergies dissipées dans le système au cours du temps et de caractéristiques du dépôt sont synthétisés dans le tableau 4 et comparés à ceux obtenus avec les briques empilées sur la figure 15.

Par opposition aux briques empilées qui ont tendance à glisser plus facilement les unes sur les autres, les cubes en vrac génèrent de l'agitation au sein de la masse granulaire ce qui favorise les chocs entre les cubes et avec le support et le frottement entre les cubes. De ce fait, les énergies dissipées par chocs et par frottement entre les cubes lors de l'écoulement sont plus importants que pour les briques empilées et les distances de propagation sont pour les cubes en vrac logiquement plus faibles. A noter que dans les deux cas testés, les distances de propagation sont peu perturbées dès lors que le rayon de courbure est élevé (comparativement à l'épaisseur de l'écoulement).

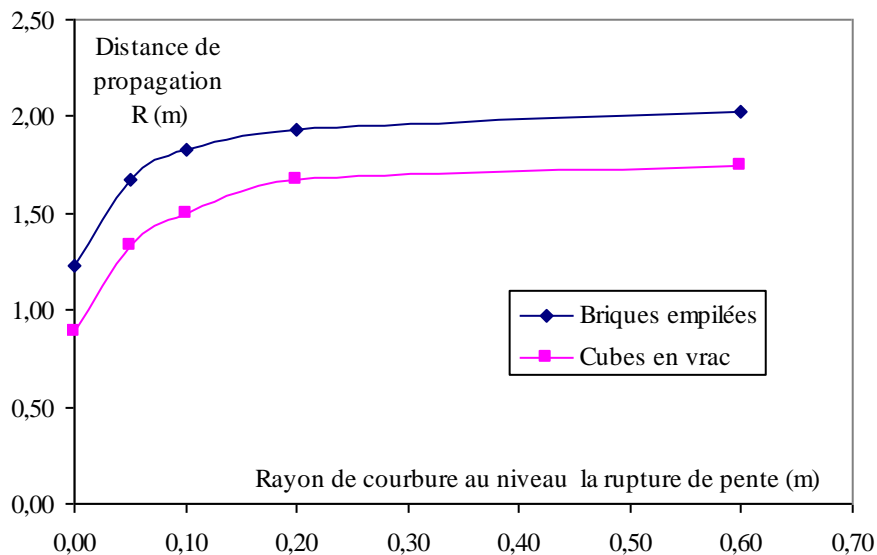


Figure 15 : Distance de propagation du dépôt en fonction du rayon de courbure au niveau de la rupture de pente (briques ordonnées et cubes en vrac, $H=2m$)

d) Influence de la taille des particules sur les mécanismes de propagation

Des simulations ont été réalisées en prenant en considération des tailles de particules différentes sans pour autant modifier les autres conditions de simulation. Pour comparaison avec le cas de référence présenté au début de ce rapport (briques en vrac, $H = 2$ m et $V_0 = 40$ l), on a réalisé deux autres simulations. Dans la première, on a multiplié toutes les dimensions des briques par deux (tout en divisant leur nombre par huit, soit environ 800 particules), et dans la deuxième on a divisé toutes les dimensions des briques par deux (tout en multipliant leur nombre par huit, soit environ 50000 particules). On a donc modifié la taille des éléments sans modifier la quantité de matière ni la densité apparente de l'assemblage initial.

Les trois dépôts obtenus sont proposés sur la figure 16 en vue de dessus et en vue de côté. Ils permettent de mettre en évidence des différences visibles induites par les différences de tailles des briques. Dans le cas des grosses briques, il apparaît que les dimensions du dépôt sont plus réduites, à la fois en largeur et en distance de propagation tandis que l'avalanche de petites particules conduit à un dépôt à la fois plus large et plus allongé. Au vu des

résultats, on peut penser que lorsque le nombre de briques est important, la probabilité qu'une particule s'éloigne du dépôt est plus forte, d'où un dépôt plus étalé et plus allongé.

La morphologie du dépôt est également influencée, puisque le dépôt de grosses particules possède une forme "ovale" avec un point haut unique localisé en avant de la rupture de pente, tandis que le dépôt de petites particules a une forme caractéristique "en éventail", avec un plateau central qui s'appuie jusque sur la pente.

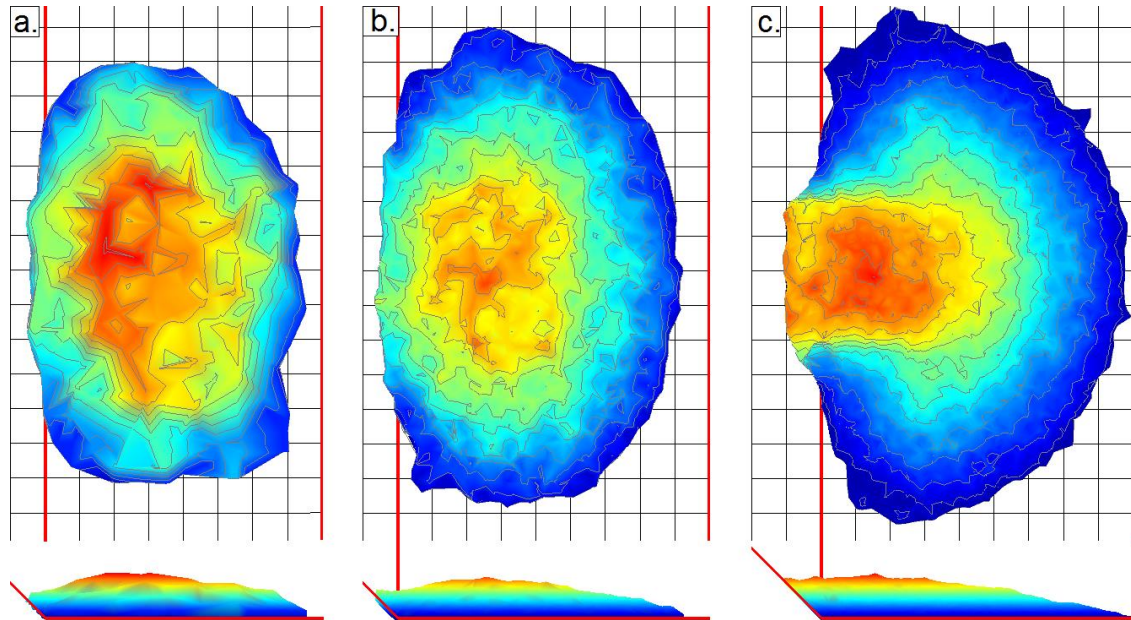


Figure 16 : Influence de la taille des briques sur la taille et la forme du dépôt : a. 800 briques de grande taille; b. 6300 briques de taille standard ; c. 50000 briques de petite taille

La figure 17 illustre l'influence de la taille des particules sur les phénomènes de dissipations énergétiques dans l'écoulement. Il apparaît sur cette figure que la taille des particules n'a pas d'influence visible sur les dissipations énergétiques se déroulant lors de l'écoulement sur la pente et lors de la décélération sur le plan horizontal, car les trois diagrammes sont identiques dans ces zones. La taille ne semble donc pas influencer le régime d'écoulement sur surface plane, même si cette conclusion pourrait être remise en cause dans le cas d'une pente ondulée.

On constate en revanche un comportement différent au voisinage direct de la transition entre la pente et le plan horizontal. Il apparaît en effet que la dissipation par perturbation de l'écoulement au niveau de cette transition est plus intense dans le cas des particules de grande taille, et plus réduite dans le cas des petites particules. Ceci est probablement à mettre en relation avec le faible nombre de particules composant l'épaisseur de l'écoulement dans le cas des grosses briques (ou plutôt de la faible épaisseur de l'écoulement relativement à la taille des briques), tandis que dans le cas des petites briques l'effet du changement brutal de pente est atténué par les nombreuses particules composant la partie inférieure de l'écoulement, les briques de la partie supérieure ne "voyant" qu'une transition progressive entre les deux plans.

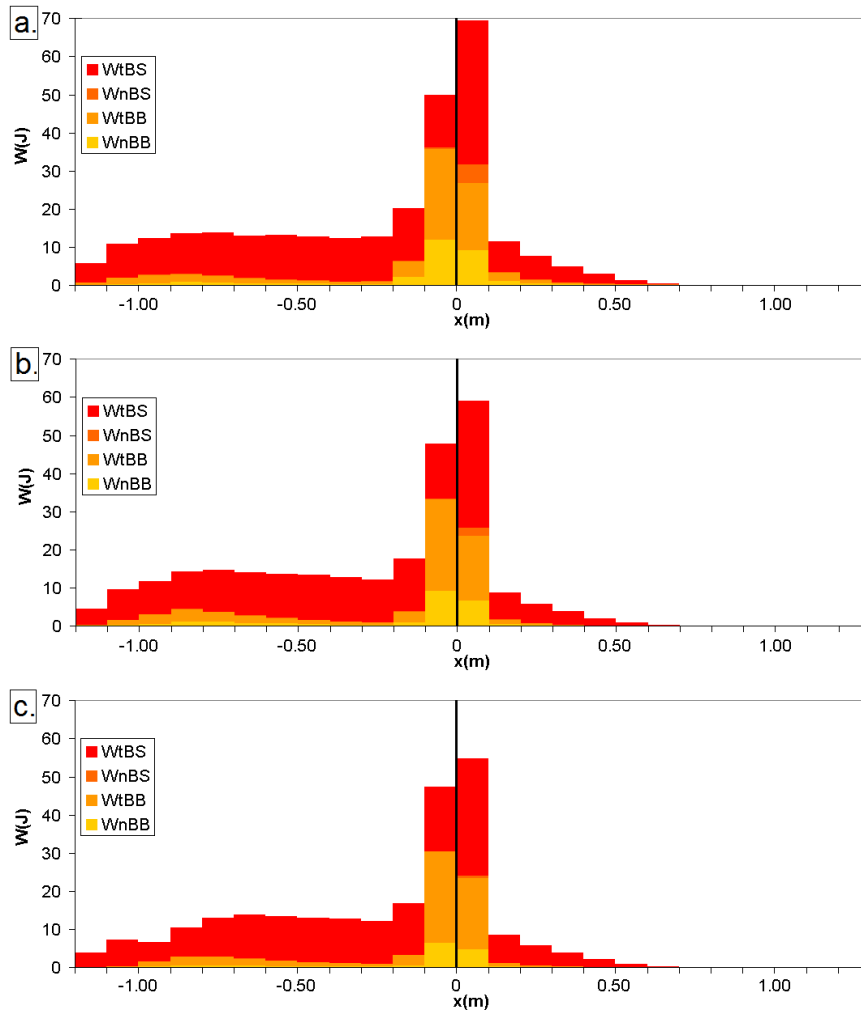


Figure 17 : Influence de la taille des briques sur la localisation et les modes de dissipation d'énergie : a. 800 briques de grande taille; b. 6300 briques de taille standard ; c. 50000 briques de petite taille

Ces observations méritent des investigations complémentaires. Certains résultats impliquant l'effet de la forme des particules sont également en cours d'analyse, et feront également l'objet d'une valorisation ultérieure par l'intermédiaire d'une publication scientifique.

III.4. Application à des cas réels

La capacité du modèle numérique à rendre compte d'un événement réel a été éprouvée grâce aux observations et mesures qui ont pu être réalisées en décembre 2011 lors du minage d'une écaille rocheuse instable de 3000 m³ située dans le massif du Néron au dessus de la commune de Saint Martin le Vinoux près de Grenoble. Des mesures in situ, avant, pendant et après l'évènement ont été réalisées pour appréhender en situation réelle la cinématique de l'avalanche rocheuse et pour déterminer la trajectographie de certains blocs isolés. Des mesures par Lidar embarqué, des prises de vues par caméras rapides et des mesures sismiques ont été effectuées.

L'analyse de toutes ces données est toujours en cours d'exploitation. Des Modèles Numériques de Terrains (MNT) avant et après minage ont pu être obtenus avec différents niveaux de précision. La trajectoire de certains blocs isolés a pu être repérée et certains rebonds analysés ce qui a permis d'appréhender certains paramètres nécessaires à la modélisation numérique. De ce fait, le cas du Néron constitue le cas le mieux documenté de tous les sites retenus dans le cadre du projet Massa avec des données obtenues, avant, pendant et après l'évènement.

Le code de calcul, testé sur des expérimentations de laboratoire, a été adapté pour que soient intégrées de manière systématique les données issues des MNT. Des développements numériques complémentaires ont été nécessaires. Notamment, des pré



processeurs permettant de discrétiser l'écaille rocheuse par un ensemble de blocs juxtaposés ont été mis au point. Les premières simulations numériques ont été réalisées à partir d'un jeu de paramètres établi au mieux à partir des données de terrain. L'analyse des résultats est en cours.

III.5. Conclusion

Un modèle numérique basé sur la méthode des éléments discrets a été utilisé pour appréhender le comportement des avalanches rocheuses de moyennes et faibles amplitudes. Par souci de réalisme et d'efficacité le modèle prend en considération des formes de blocs réalistes et des lois d'interaction simples qui nécessitent un nombre restreint de paramètres et qui intègrent de manière globale les mécanismes de dissipation d'énergie. Le modèle a été confronté à des résultats expérimentaux de lâchers de briques réalisés à l'EPFL. On a montré qu'une fois paramétré sur un rebond élémentaire, le modèle numérique était apte à rendre compte de façon très réaliste du comportement collectif d'un ensemble de briques en mouvement sur un plan incliné. Les comparaisons ont porté sur la cinématique de l'écoulement, la géométrie des dépôts et les profils de vitesse du front de l'écoulement.

Comparativement aux études expérimentales, le modèle numérique à l'avantage de permettre la réalisation d'études paramétriques, en s'affranchissant totalement des problèmes expérimentaux parfois difficiles à résoudre, et d'accéder à des grandeurs malaisées à déterminer expérimentalement, comme les taux d'énergies développées ou dissipées dans le système au cours du temps par frottement ou par chocs avec le support ou au sein de la masse granulaire. Parmi les quatre modes de dissipation possibles (frottement Brique/Brique, frottement Brique/Support, dissipation par chocs entre les briques et dissipation par chocs entre les briques et le support) le frottement Brique/Support est celui qui régit la dynamique de l'écoulement sur la pente alors que le frottement Brique/Brique et la dissipation par chocs au sein de la masse granulaire ont une influence plus marquée autour d'une rupture de pente. Dans ce cas, c'est l'agitation générée au sein de la masse granulaire qui favorise les chocs et le frottement entre les briques et qui entraîne de la dissipation d'énergie.

Pour appréhender les limites et les domaines de validité des modèles continus et discrets, des études numériques spécifiques ont été réalisées. Entre autre, nous nous sommes interrogés sur la possibilité de prendre en considération la rugosité de surface d'une pente en majorant la valeur de l'angle de frottement à la base de l'écoulement, ou sur la nature des mécanismes de dissipations d'énergie aux voisinages d'une rupture de pente brusque ou présentant une transition courbe. Si, pour les modèles continus, ces applications peuvent être source d'instabilités numériques, elles ne posent aucune difficulté majeure pour les modèles discrets. A terme, on espère que ces travaux puissent permettre un enrichissement des lois de comportement utilisées dans les modèles continus.

Si le modèle numérique, tel qu'il est défini actuellement, semble pertinent pour décrire des expérimentations de laboratoires réalisées dans des conditions bien maîtrisées, sa capacité à prédire des événements réels doit encore être confirmée. Des travaux de ce type sont actuellement en cours mais nécessitent un nombre d'informations important auquel nous n'avons pas toujours accès. Le cas du Néron semble cependant être le cas le plus propice et le mieux documenté.

A l'heure actuelle, le modèle numérique semble être un outil très performant pour analyser les mécanismes de dissipation d'énergie et le mode de propagation des avalanches rocheuses. Il peut être amélioré si nécessaire, par l'introduction de lois d'interaction plus complexes que celle proposée, pour rendre compte par exemple des mécanismes de dissipations d'énergie lors de l'impact d'un blocs rocheux sur un sol meuble ou pour simuler de la fracturation. A l'heure actuelle, seuls les temps de calcul excessifs, résultant d'une topographie complexe ou d'un nombre d'éléments trop important, semblent être un obstacle à son utilisation pour des mouvements rocheux de grande ampleur.



III.6. Publications effectuées dans le cadre du projet MASSA

G. MOLLON, V. RICHEFEU, P. VILLARD and D. DAUDON (2013) : "Dissipative Discrete Element Model Applied to Rock Avalanches". Powders & Grains (PG2013), AIP Proceedings, Balkema Publishers, University of New South Wales (UNSW), Sydney, Australia, 8-12 July 2013.

V. RICHEFEU, G. MOLLON, D. DAUDON and P. VILLARD (2012) : "Dissipative contacts and realistic block shapes for modelling rock avalanche", Engineering Geology, Accepted July 2012.

G. MOLLON, V. RICHEFEU, P. VILLARD and D. DAUDON (2012) : " Numerical simulation of rock avalanches: influence of a local dissipative contact model on the collective behavior of granular flows", Journal of Geophysical Research – Earth Surface, doi:10.1029/2011JF002202, Accepted May 2012.

G. MOLLON, V. RICHEFEU, P. VILLARD and D. DAUDON (2011a) : "Assessment of Discrete Element Modelling parameters for rock mass propagation". Proceedings of the Second World Landslide Forum, 3-7 October 2011, Rome.

G. MOLLON, S.C. FIGUEIREDE, D. DAUDON, V. RICHEFEU and P. VILLARD (2011b) : "Experimental identification of contact parameters for the simulation of rock avalanches". Euromech Colloquium [516], Nonsmooth contact and impact laws in mechanics, July 6th - 8th 2011, Grenoble, France.

IV. CONCLUSION ACTION 3

Les observations visuelles ou données acquises durant un éboulement sont extrêmement rares et il est très difficile d'obtenir de manière directe des informations sur la dynamique des éboulements ainsi que sur les caractéristiques rhéologiques des matériaux éboulés. Pour ces raisons, afin de mieux appréhender les phénomènes en jeu lors de tels événements ainsi que les facteurs influents, on peut avoir recours à des modélisations physiques et numériques. Cependant, modéliser consiste à proposer une idéalisation de la réalité. En effet, que l'on utilise un modèle physique ou un modèle numérique, on effectue un certain nombre de simplifications et de choix qui vont conditionner la qualité, voire même parfois la pertinence, des résultats. Au vu de la complexité de comportement des éboulements rocheux, il est dès lors pertinent de combiner plusieurs approches différentes afin de réduire les incertitudes relatives à la prévision des zones du territoire susceptibles d'être atteintes.

Dans le cadre du projet MASSA, des modélisations physique et numériques ont été conjointement menées afin d'étudier les mécanismes de propagation des éboulements rocheux. Les résultats expérimentaux ont permis d'éprouver plusieurs modèles numériques (modèles discrets et continus) et différents codes de calcul continus (DAN3D, RASH3D et EPAN3D). Outre les avancées scientifiques qui émanent du projet, celui-ci a permis d'initier des collaborations et des synergies entre les différents partenaires (Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Politecnico di Torino et Laboratoire 3SR) qui vont perdurer au-delà du projet.

Les expérimentations ayant servi de support aux modélisations numériques sont des lâchers de particules sur un biplan incliné (gravier et briques de petites dimensions) réalisés en laboratoire à l'EPFL dans des conditions bien maîtrisées. Plusieurs géométries ont été étudiées (hauteur du lâcher, inclinaison de la pente et nature de la transition entre le plan horizontal et le plan incliné). Les expérimentations avec des briques ont été considérées pour valider l'approche discrète, car il est possible dans ce cas de reproduire fidèlement les expérimentations de laboratoire en prenant en compte la forme réelle des particules, leur nombre et leur agencement (briques en vrac ou briques empilées). De plus, les paramètres du modèle ont pu être déterminés avec précision à partir de lâchers de briques élémentaires réalisés grâce à la mise à disposition par l'EPFL des éléments de base nécessaires à leur réalisation (briques et support). Les expérimentations mettant en œuvre du gravier et dans



une moindre mesure des briques en vrac ont servi de support à la modélisation continue (DAN3D, RASH3D et EPAN3D). Pour les deux premiers de ces codes de calcul, les expérimentations sur briques empilées ont été écartées car les empilements réguliers de briques ont été jugés peu représentatifs d'un milieu continu.

Pour appréhender les limites de validité et les domaines d'application des modèles numériques, des modélisations ont été menées sur le principe de base des expérimentations réalisées à l'EPFL. Les comparaisons ont porté à la fois sur la géométrie des dépôts obtenus après propagation et sur la dynamique de l'écoulement (propagation de la masse en fonction du temps). Dans certains cas les quantités d'énergie dissipées à la base de l'écoulement et au sein de la masse granulaire ont été évaluées.

L'ensemble des résultats obtenus montre que le principal mécanisme de dissipation d'énergie mis en jeu lors des expérimentations de laboratoire est d'ordre frictionnel à la base de la masse en mouvement, excepté à la jonction des deux plans lorsque la rupture de pente est brusque ou présente une courbure faible. De ce fait les modèles continus, prenant essentiellement en considération de la dissipation d'énergie par frottement basal, donnent dans l'ensemble, des résultats satisfaisants. Pour les modèles continus, la prise en considération d'une légère surestimation du frottement basal (qui traduit de manière globale la prise en compte de dissipation d'énergie dans la masse) permet une meilleure approche des résultats expérimentaux. Au vu des comparaisons entre les modèles DAN3D et RASH3D, il est apparu que la prise en considération des forces centripètes était indispensable pour décrire correctement la cinématique de l'écoulement au voisinage d'une courbure de la pente. De plus, il a été montré que pour les modèles continus les changements de pente brusques pouvaient être source d'instabilités numériques.

L'intérêt du modèle discret est qu'il donne accès à des grandeurs difficiles à appréhender expérimentalement en tout point de la masse granulaire (vitesses et rotations des particules, énergies dissipées par frottement ou par chocs avec la pente ou au sein de la masse en mouvement) et qu'il permet d'analyser plus dans le détail l'influence des conditions d'essais sur les mécanismes de propagation. A titre comparatif avec les modèles continus, des modélisations discrètes ont été réalisées pour appréhender les mécanismes de dissipation d'énergie au voisinage d'une rupture de pente brusque ou présentant un arrondi.

Comme observé expérimentalement lors de lâchers de briques, il est constaté que pour un fort rayon de courbure l'écoulement granulaire est peu perturbé, ce qui n'est plus le cas lorsque l'écoulement est réorienté brusquement suite à une rupture de pente. Dans ce cas, c'est l'agitation générée au sein de la masse granulaire qui favorise les chocs et le frottement entre les blocs et qui entraîne de la dissipation d'énergie, réduisant dès lors la distance de propagation de la masse.

Ces mécanismes dissipatifs au sein de la masse granulaire, qui peuvent être quantifiés aisément par le modèle discret, ne sont actuellement pas pris en compte dans les modélisations continues. Nous espérons que les travaux collaboratifs effectués dans le cadre du projet MASSA puissent déboucher à terme sur un enrichissement des lois de comportement utilisées dans les modèles continus. D'autres perspectives à ces travaux seraient la réalisation d'expérimentations de laboratoire sur des topographies moins régulières qui créeraient de l'agitation et de la dissipation d'énergie par chocs au sein de la masse granulaire. Des expérimentations permettant de simuler le décrochement d'une écaïlle rocheuse et sa dislocation au pied d'une paroi rocheuse seraient également riches d'enseignement.

Compte tenu du manque de données de terrain et d'informations précises quant à la géométrie des zones de départ ou de propagation, les modèles numériques n'ont été appliqués que marginalement aux sites étudiés dans le cadre du projet MASSA. Plus que la géométrie de la masse instable et la topographie du versant sous-jacent, le principal obstacle à l'application des modèles existants réside dans l'absence d'une méthodologie rigoureuse qui permettrait de déterminer avec suffisamment de précision les paramètres des modèles.



Si pour les modèles continus des jeux de paramètres, obtenus par rétro-analyses de cas existants, sont présentés dans la littérature, de telles bases de données n'existent pas pour les modèles discrets. On a cependant montré dans le cadre du projet MASSA qu'il était possible de déterminer, dans des conditions de laboratoire bien maîtrisées, les paramètres du modèle discret à partir d'une procédure d'analyse appliquée à une série de rebonds élémentaires. On peut penser que moyennant certaines adaptations, cette procédure puisse être appliquée à la détermination des paramètres d'interaction lors d'un impact de bloc rocheux sur une pente. Ceci nécessiterait cependant la mise à disposition de données de terrain qui actuellement font cruellement défaut. Les perspectives dans ce domaine sont vastes et encore inexplorées.

Au vu des résultats obtenus dans le cadre du projet MASSA, on peut penser que les modèles continus sont bien adaptés pour décrire les mouvements gravitaires de grande ampleur pour lesquels les mécanismes de dissipation d'énergie peuvent être pris en considération à la base de l'écoulement. Ceci suppose une topographie peu accidentée comparativement à la taille de l'évènement étudié. Ces modèles peuvent cependant être améliorés par la prise en considération de lois rhéologiques plus sophistiquées, notamment au voisinage des singularités. Des modèles rhéologiques complexes existent dans la littérature, mais ceux-ci font parfois appel à des paramètres dont le sens physique n'est pas toujours affirmé et dont la détermination reste problématique. On peut espérer des comparaisons entre les modèles continus et discrets que ces derniers puissent apporter des éclairages et des éléments de justification quant aux valeurs des paramètres à retenir dans la modélisation continue.

Par ailleurs, les modèles discrets semblent mieux adaptés pour décrire les événements de petite et moyenne ampleurs allant du décrochement d'une écaïlle rocheuse, sa dislocation en pied de paroi et sa propagation sur une pente jusqu'au mouvement collectif d'une masse granulaire se propageant sur une pente. Néanmoins, pour pouvoir être appliqués avec succès à des événements réels, les lois d'interaction à considérer doivent être suffisamment réalistes pour que l'on puisse décrire avec une précision acceptable les mécanismes de dissipation d'énergie observés lors des chocs, sans toutefois nécessiter un nombre important de paramètres, compte tenu que leur détermination reste souvent problématique. Lorsque le volume de l'avalanche rocheuse est faible au regard de la distance de propagation, le mouvement collectif de la masse granulaire peut rapidement s'orienter vers la propagation de nombreux blocs isolés. Ceci entraîne des temps de calcul importants et dans ce cas il semble plus judicieux de coupler le modèle discret avec des modèles de trajectographie pour gérer le mouvement des blocs isolés. Si le modèle numérique, tel qu'il est défini actuellement, semble pertinent pour décrire des expérimentations de laboratoire réalisées dans des conditions bien maîtrisées, sa capacité à prédire des événements réels doit encore être confirmée. Des améliorations sont possibles et les voies de recherche à explorer restent vastes.

L'étude de la propagation des éboulements de taille intermédiaire menée dans le cadre du projet MASSA confirme l'intérêt de plusieurs approches différentes. La modélisation physique et les modélisations numériques, qu'elles soient de type milieu continu ou éléments discrets, ne doivent pas être opposées, mais considérées comme des approches complémentaires. Les recherches doivent être poursuivies aussi bien sur les aspects expérimentaux pour une meilleure compréhension des mécanismes dissipatifs et de propagation que sur les aspects numériques pour un enrichissement réciproque des différentes méthodes de calcul.



Conclusions du Projet MASSA

Les phénomènes de chute de blocs, de la simple chute de pierres jusqu'aux millions de mètres cubes, représentent la typologie de mouvement de terrain la plus répandue et la plus problématique dans l'arc alpin. Les conditions de risque associées à ce phénomène augmentent sensiblement avec le développement du réseau routier, l'augmentation de la circulation et du tourisme. Des événements survenus récemment ont démontré que les critères scientifiques et administratifs qui déterminent les décisions d'ouverture/fermeture des axes routiers transfrontaliers touchés par des éboulements ne sont pas les mêmes de part et d'autre des frontières.

Les administrations françaises, suisses et italiennes ont mis au point différentes méthodologies d'évaluation expéditive de l'aléa chute de blocs sur les axes routiers de leurs réseaux qui démontrent la nécessité, commune aux trois pays, de gérer efficacement le risque lié aux chutes de blocs. Les trois méthodologies actuelles sont totalement indépendantes, pouvant entraîner des décisions peu cohérentes à l'échelle de l'arc alpin. Cette situation a mis en évidence la nécessité de comparer les différentes méthodes pour essayer d'homogénéiser les techniques d'évaluation de l'aléa chute de blocs entre les pays transfrontaliers.

Dans le cadre de l'Action 1, les partenaires ont réalisé un document opérationnel qui permet de mettre en évidence les caractéristiques et les domaines d'utilisation les plus pertinents pour chacune des méthodes. Un tableau fonctionnel a été établi, qui compare les trois méthodologies d'évaluation de l'aléa chute de blocs à l'aide d'une série de critères, regroupés en sections. Les différentes activités développées dans l'Action 1 sont synthétisées dans les fiches techniques n°2, 3, 4 et 5.

Les résultats obtenus dans le cadre des travaux de l'Action 2 attestent que la méthode d'écoute du bruit de fond peut apporter des informations sur le comportement interne de masses instables dans des contextes géologiques variés. Quelle que soit l'origine du phénomène de résonance du compartiment instable, une chute irréversible de fréquence fondamentale peut être interprétée comme résultant de l'endommagement, soit du contact le long de l'interface, soit au sein de la masse instable. Ces résultats soulignent l'intérêt de suivre la fréquence fondamentale au cours du temps, comme proxy de l'endommagement de la masse instable, en complément des techniques traditionnelles. Cette étude a aussi mis en évidence l'influence de la température sur les variations réversibles de la fréquence de résonance. Cet effet doit être corrigé afin d'isoler l'effet irréversible de l'endommagement. Cependant, la fréquence de résonance sur les différents sites présente une sensibilité très variable aux sollicitations thermiques, qui pourrait aussi caractériser le degré de découplage de la masse instable par rapport au massif. Les sites instrumentés dans le cadre du projet restent aménagés et continuent d'être suivis en accord avec les gestionnaires.

Des modélisations physique et numérique ont été conjointement menées dans le cadre de l'Action 3 afin d'étudier les mécanismes de propagation des éboulements rocheux. Les résultats expérimentaux ont permis d'éprouver plusieurs modèles numériques (modèles discrets et continus) et différents codes de calcul continus (DAN3D, RASH3D et EPAN3D). Outre les avancées scientifiques qui émanent du projet, celui-ci a permis d'initier des collaborations et des synergies entre les différents partenaires (Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Politecnico di Torino et laboratoire 3SR) qui vont perdurer au-delà du projet. En effet, les recherches doivent être poursuivies aussi bien sur les aspects expérimentaux pour une meilleure compréhension des mécanismes dissipatifs et de propagation que sur les aspects numériques pour un enrichissement réciproque des différentes méthodes de calcul.

Afin de favoriser la communication, en interne au projet MASSA, entre les partenaires, mais également en externe auprès des praticiens, différentes actions ont été mises en œuvre. Rapidement après le démarrage du projet, un site web dédié au projet a été développé, <http://massa.geoazur.eu>. Ce site propose deux sections : une section publique destinée aux



acteurs de la problématique pour informer sur les travaux et l'évolution du projet et une section dédiée aux partenaires, avec un accès sécurisé pour le dépôt et l'échange d'informations. Une plaquette de présentation du projet MASSA a été largement diffusée au premier trimestre 2011 auprès de l'ensemble des acteurs de la problématique.

Des actions de valorisation et de diffusion des résultats issus du projet ont été réalisées. Ainsi, les partenaires du projet MASSA ont cherché à rendre leurs travaux lisibles et réutilisables par les praticiens. Afin que les principaux résultats opérationnels du projet soient mis à disposition et facilement exploitables, les partenaires se sont donc attachés à synthétiser les résultats de leurs activités sous la forme de fiches techniques (disponibles en annexe). L'objectif était de mettre à disposition un document maniable, qui présente de manière concise les résultats opérationnels du projet.

Les résultats finaux du projet MASSA ont été présentés et discutés auprès de l'ensemble des acteurs transfrontaliers de la gestion des risques, lors de la journée de restitution organisée à Nice, au Conseil général des Alpes-Maritimes, le 21 février 2013 (programme en annexe). L'ensemble de la profession a manifesté son intérêt à participer à cette journée avec près de 80 participants, bureaux d'études, centres techniques, maîtres d'ouvrage, ingénieristes, laboratoires de recherche, instituts, associations et services de l'état, français, italiens et suisses. La matinée a été consacrée à la restitution des résultats du projet par les partenaires qui a suscité de nombreux échanges avec la salle. Le reste de la journée a été réservée à une session de présentation de gestionnaires de réseaux routiers français, italiens et suisses. Ces présentations ont été suivies de débats constructifs sur la prise en compte de l'aléa chute de blocs et sa gestion sur les différents territoires. La disparité des méthodes a été soulevée notamment à l'échelle d'un même territoire.

Durant cette journée, le document de synthèse opérationnelle des activités réalisées dans le cadre du projet MASSA a été distribué aux participants. Les partenaires ont construit ce document sous la forme de fiches techniques synthétiques. L'ensemble des documents relatifs au projet sont disponibles en format numérique sur le site web du projet.

En conclusion de cette journée riche en échanges, les partenaires ont fait part de leur volonté de poursuivre les travaux dans le cadre d'un nouveau projet Interreg ALCOTRA et l'ensemble des participants a été convié à s'inscrire dans cette dynamique en manifestant leur intérêt auprès du Pôle Infrastructures Durables Rhône-Alpes, INDURA (indura@indura.fr).

L'intégralité des éléments de recherche du projet se retrouve dans les comptes rendus scientifiques, qui sont disponibles dans le rapport final du projet, accessible sur le site web du projet MASSA, à l'adresse suivante : <http://massa.geoazur.eu>.



alcotra
Ensemble au-delà les frontières
Insieme oltre i confini 2007-2013



FEDER
Fonds Européens pour le Développement
Régional
FESR
Fondo Europeo di Sviluppo Regionale



<http://massa.geoazur.eu>


Ensemble au-delà des frontières
Insieme oltre i confini 2007-2013



FEDER
Fonds Européens pour le Développement
Régional
FESR
Fondo Europeo di Sviluppo Regionale

Contact

Thomas Lebourg, coordinateur scientifique du projet

Laboratoire Géoazur, bât 4, 250 rue Albert Einstein,
les Lucioles 1, Sophia-Antipolis, 06560 Valbonne

Tél : +33 (0)4 92 94 26 70

E-mail : lebourg@geoazur.unice.fr

Daniele Bormioli, Arpa Piemonte, responsable Action 1

Tél : +39 01 71 32 93 27

E-mail : daniele.bormioli@arpa.piemonte.it

Denis Jongmans, Laboratoire ISTerre, responsable Action 2

Tél : +33 (0)4 76 63 51 65

E-mail : denis.jongmans@ujf-grenoble.fr

Vincent Labiouse, LMR-EPFL, responsable Action 3

Tél : +41 021 693 23 23

E-mail : vincent.labiouse@epfl.ch

Coordination du projet

INDURA

Infrastructures
Durables
Rhône-Alpes

indura@indura.fr

www.indura.fr

<http://massa.geoazur.eu>

