

### IV.3.8. Site des Crétaux

#### IV.3.8.1. Description

L'éboulement des Crétaux est situé sur la rive gauche du Rhône, 3 km en aval du site de Bieudron présenté au point IV.3.7. Il met en jeu des masses rocheuses très importantes, de l'ordre du million de m<sup>3</sup> sur une topographie accidentée à forte pente (de l'ordre de 40°) dont la dénivellation est d'environ 950 m (Descoedres, 1990). Une accélération rapide apparut le 17 août 1985 et le phénomène dégénéra en éboulement le 26 août. Une cinquantaine de blocs de volume compris entre 30 dm<sup>3</sup> et 32 m<sup>3</sup> (en moyenne 4 m<sup>3</sup>) furent repérés dans les vignes entre la lisière de la forêt et un chemin secondaire au-dessus de la route cantonale Riddes-Aproz (Fig. IV.21).

La rive gauche de la vallée du Rhône à cet endroit est composée, de bas en haut, de schistes de Saint-Christophe, d'une série schisto-quartzitique avec écaillés du Trias (dolomies, quartzites) et de schistes noirs du Carbonifère. C'est dans cette dernière série que se trouvent les falaises de la niche d'arrachement (Fig. IV.22). D'un point de vue géomorphologique, le versant présente une nette échancrure (vallon de l'Avantché) surplombant un important cône de déjection (Rouiller, 1990). Les matériaux déposés dans le couloir sont des débris de schistes résultant de la dégradation progressive du massif supérieur. Entraînés par des résurgences d'eaux souterraines et par les pluies, ces matériaux descendent sporadiquement sous forme de coulées de boue jusqu'aux vignes situées sur le cône de déjection.

Les analyses trajectographiques sur un tel site s'avèrent un peu délicates, étant donné la complexité de la topographie :

- Présence de la barrière naturelle du Châtelet (colline) ;
- Couloir en V avec subdivision et changement d'orientation, précisément au niveau du Châtelet (750 m d'altitude) ;
- Présence d'un cône de déjection en bas de versant.

Les calculs trajectographiques effectués dans le cadre de cette étude comparative ont été faits pour des blocs de 4 à 10 m<sup>3</sup> (correspondant sensiblement aux tailles moyenne et maximale observées) lâchés de 2 à 20 m de hauteur depuis la partie sommitale Est de la niche d'arrachement. Les modélisations LMR ont été menées sur un modèle topographique tridimensionnel, tandis que les calculs bidimensionnels du CETE et de l'ADRGT ont nécessité au préalable la définition de quelques profils. Pour représenter la topographie irrégulière du versant, trois profils P1, P2 et P3 (Fig. IV-26) ont ainsi été proposés par l'ADRGT et ensuite repris par le CETE.

#### IV.3.8.2. Trajectographies

##### CETE

La modélisation de l'éboulement des CRETAUX a été effectuée sur la base de 3 profils cinématiques issus d'un plan topographique au 1/5000<sup>ème</sup> avec une équidistance de 20 m.

Les profils 1, 2 et 3 montrent des variations morphologiques et de terrains en raison d'une topographie très hétérogène (Fig. IV.23). Pour le profil 2 par exemple, on a considéré du haut vers le bas : du rocher sain ( $x = 0$  à  $x = 25.5$ ), du rocher altéré ( $x = 25.5$  à  $x = 54.6$ ), des éboulis meubles ( $x = 54.6$  à  $x = 149.3$ ), du rocher altéré ( $x = 149.3$  à  $x = 163.9$ ), des éboulis meubles ( $x = 163.9$  à  $x = 261.3$ ), du rocher altéré ( $x = 261.3$  à  $x = 271.3$ ), des éboulis meubles ( $x = 271.3$  à  $x = 606.4$ ), du rocher altéré ( $x = 606.4$  à  $x = 628.3$ ), des éboulis meubles ( $x = 628.3$  à  $x = 936.1$ ), du rocher altéré ( $x = 936.1$  à  $x = 1002.0$ ), des éboulis meubles ou du terrain meuble (2 versions envisagées) jusqu'en fin de profil.

Le point de départ de l'éboulement se situe vers la cote 1420 m. L'élançement cinématique des blocs testés a été échelonné entre 1.1 et 1.5 au pas de 0.1 unité (Tab. IV.5). Selon que l'on considère des terrains de type "terrain meuble" (TM) ou de type "éboulis meubles" (EM) pour le bas de versant, les longueurs de propagation de l'éboulement sont sensiblement différentes. Les résultats de la Fig. IV.23 sont relatifs à la variante "terrain meuble" (TM).

Ces variations montrent la sensibilité de la limite de propagation à la nature du terrain. Dans le cas présent, pour des élançements extrêmes de 1.4 et 1.5, on peut obtenir des longueurs de propagation qui présentent des écarts de 40 à 120 m selon que l'on considère simplement le bas de versant en terrain de type (EM) ou de type (TM).

## ADRG

On a établi 3 profils (Fig. IV.24) qui ont une partie commune du point de départ (altitude 1420 m) jusqu'à la cote 840 m. La taille des blocs au départ est de 4 à 10 m<sup>3</sup>. Les profils P1 et P2 sont peu déviés et franchissent une barre rocheuse. Le profil P3, côté Est, correspond aux trajectoires qui incurvent vers l'Est en suivant le couloir.

Les calculs ont été effectués sur chacun des 3 profils en fixant des  $X_{\text{limite}}$  à partir desquels les formes du terrain sont suffisamment régulières pour permettre l'extrapolation (en général ce sont les vignobles de la partie inférieure) et déterminer les probabilités d'atteinte (Tab. IV.6).

## LMR-EPFL

Contrairement aux calculs CETE et ADRGT qui ont nécessité le choix préliminaire de 3 profils bidimensionnels pour représenter la topographie irrégulière du versant, les modélisations LMR ont été menées sur un modèle topographique 3D. Bien que l'utilisation d'un modèle numérique de terrain eût été possible, on a conservé la discrétisation de la surface qui avait été utilisée lors d'une étude menée par l'EPFL (Descoedres & Zimmermann, 1987) après les événements de 1985 (Fig. IV.25). D'un point de vue couverture, une attention particulière a été portée aux débris de schistes déposés dans le couloir ainsi qu'aux terrains viticoles sis sur le cône de déjection. Une série de 300 trajectoires a été calculée avec des blocs de forme parallélépipédique d'un élancement moyen de 1.2 et de  $7 \pm 3$  m<sup>3</sup>, lâchés de  $3.5 \pm 1.5$  m de hauteur dans une zone de 40 m de largeur, représentant la partie Est de la niche d'arrachement. Une cinquantaine de ces trajectoires sont reportées à la Fig. IV.25.

### IV.3.8.3 Synthèse

Une synthèse des résultats sur un tel site s'avère délicate en raison des deux types d'analyses effectuées : d'une part des calculs 2D sur 3 profils pour le CETE et l'ADRG, d'autre part des modélisations 3D pour le LMR. Afin de faciliter la comparaison, il a été choisi de représenter les principaux résultats des calculs de propagation effectués par les trois partenaires sur une vue en plan (Fig. IV.26). On y distingue :

- en arrière-plan, les données de terrain ainsi que les blocs repérés dans les vignes (cercles de couleur mauve) ;
- en traits continus magenta, les trois profils P1, P2 et P3 utilisés par le CETE et l'ADRG pour leurs calculs bidimensionnels ;
- des carrés rouges sur chacun de ces profils, correspondant aux points d'atteinte extrêmes calculés par le CETE pour des blocs de divers élancements (variante "terrain meuble" en bas de versant). On constate, comme dans la majorité des autres sites étudiés, que plus l'élancement des blocs est élevé, plus les trajectoires limites s'étendent vers l'aval ;
- des triangles bleus sur chacun de ces profils, correspondant aux points extrêmes calculés par l'ADRG pour des probabilités d'atteinte de  $10^{-2}$ ,  $10^{-3}$  et  $10^{-4}$  (points s'étalant logiquement de l'amont vers l'aval) ;
- des ronds verts pour les 300 points d'arrêt calculés par le logiciel EBOULEMENT.

Pour une topographie complexe comme celle des Crétaux, il est important d'évaluer la répartition spatiale des points d'arrêt des blocs, tant dans le

### IV.3.8.3 Sintesi

Una sintesi dei risultati su tale sito si rivela delicata dati i due tipi di analisi effettuate: da una parte i calcoli 2D su 3 profili per il CETE e l'ADRG, dall'altra dei modelli 3D per il LMR. Per facilitare il confronto, è stato scelto di raffigurare i principali risultati dei calcoli di propagazione effettuati dai tre partners su un piano (Fig. IV.26). Vi si evidenziano:

- nello sfondo, i dati sul terreno e i blocchi individuati nei vigneti (cerchi di colore mauve);
- con tratti continui magenta i tre profili P1, P2 e P3 utilizzati dal CETE e l'ADRG per i loro calcoli bidimensionali;
- quadretti rossi su ciascun profilo sono relativi ai punti di raggiungimento estremi calcolati dal CETE per i blocchi di varie spinte (variante "terreno leggero" ai piedi del versante). Si nota, come nella maggioranza degli altri siti studiati, che più la spinta dei blocchi è elevata più le traiettorie limite si estendono verso valle;
- triangoli blu su ciascuno di questi profili sono relativi ai punti estremi calcolati dall'ADRG per le pericolosità di  $10^{-2}$ ,  $10^{-3}$  e  $10^{-4}$  (punti che si estendono logicamente da monte a valle);
- cerchi verdi per i 300 punti di arresto calcolati dal software EBOULEMENT.

Nel caso di una topografia complessa come quella dei Crétaux, è importante valutare la ripartizione spaziale dei punti di arresto dei blocchi, sia nel senso del pendio (ascisse estreme di propaga-

sens de la pente (abscisses extrêmes de propagation) que perpendiculairement à celui-ci (extension latérale). Les premières remarques que l'on peut faire portent précisément sur la répartition latérale des points d'arrêt des blocs :

- Les profils choisis par l'ADRGT (et repris par le CETE) correspondent à des trajectoires observées dans la réalité, mais leur importance relative ne peut être déterminée a priori. Cependant, en regard des profils P1 et P2 qui traversent la zone de dépôt principale (Fig. IV.26), le profil P3 pourrait presque être qualifié d'extrême pour l'extension latérale. En effet, il se situe à la limite Est de la zone de dépôt relevée dans les vignes. Il est par ailleurs intéressant de constater que, dans les modélisations du LMR, aucun des blocs n'a terminé sa course plus à l'Est de ce profil.
- Afin d'avoir une idée de la répartition spatiale des blocs entre les trois profils utilisés par l'ADRGT et le CETE, on a affecté chacun des 300 points d'arrêt calculés par le LMR au profil P1, P2 ou P3 qui lui est le plus proche. On trouve la moitié des blocs associés au profil P1, 35% au profil P2, 10% au profil P3 et le reste (soit 5%) dans la partie supérieure commune aux trois profils. Il ressort donc du calcul que 85% des blocs ont une trajectoire relativement rectiligne par effet d'inertie et franchissent la colline de Châtelet avec des longueurs et des hauteurs de vol importantes (respectivement hectométrique et décamétriques). De telles trajectoires ont effectivement été observées (et même filmées par la Télévision Suisse Romande) lors de l'éboulement.
- En procédant de manière analogue pour répartir les blocs observés à la lisière de la forêt et dans les terrains viticoles (cercles de couleur mauve aux figures IV.21 et IV.26), on compte 18 blocs dans la zone d'influence du profil P1, 11 pour le profil P2 et 3 pour le profil P3. L'importance relative des trois profils estimée à partir de ce relevé de blocs (respectivement 55%, 35% et 10%) est remarquablement proche de la répartition spatiale évaluée sur base des calculs LMR. On notera en particulier la très faible proportion de blocs terminant leur course dans les vignes à proximité du profil P3.

En ce qui concerne l'extension vers l'aval de la zone de dépôt, de nettes différences de prédictions apparaissent entre les profils P1 et P2 d'une part et le profil P3 d'autre part. Pour les profils P1 et P2, tout d'abord, on fait les constatations suivantes :

- Les abscisses extrêmes de propagation évaluées par le CETE pour des élanements cinématiques de 1.3, 1.4 et même 1.5 sont inférieures aux abscisses maximales observées (une cinquantaine

zation), soit perpendiculairement à ce profil (extension latérale). Le prime osservazioni che si possono fare riguardano appunto la ripartizione laterale dei punti di arresto dei blocchi:

- I profili scelti dall'ADRGT (poi riutilizzati dal CETE) corrispondono a traiettorie osservate nella realtà, ma la loro importanza relativa non può essere determinata a priori. Tuttavia, a fronte dei profili P1 e P2 che attraversano la zona di deposito principale (Fig. IV.26), il profilo P3 potrebbe quasi essere qualificato come estremo per l'estensione laterale. Infatti, si situa all'estremità Est della zona di deposito rilevata nei vigneti. È peraltro interessante constatare che nei modelli del LMR nessun blocco ha finito la sua corsa più ad est di questo profilo.
- Per avere un'idea della ripartizione spaziale dei blocchi tra i tre profili utilizzati dall'ADRGT e dal CETE, abbiamo attribuito ciascuno dei 300 punti di arresto calcolati dal LMR al profilo, P1, P2 o P3, che gli è più vicino. Si trova la metà dei blocchi associati al profilo P1, 35% al profilo P2, 10% al profilo P3 e il 5% rimanente nella parte superiore comune ai tre profili. Risulta dunque dal calcolo che l'85% dei blocchi hanno una traiettoria relativamente dritta per effetto inerzia e valicano la collina del Châtelet con lunghezze e altezze di volo importanti (rispettivamente ettometrica e decametrica). Tali traiettorie sono state effettivamente osservate (e anche filmate dalla televisione svizzera romanda) durante la frana.
- Con un procedimento analogo nella ripartizione dei blocchi osservati al confine del bosco e nei terreni a vigneti (cerchi di colore malva nelle figure IV.21 e IV.26) si contano 18 blocchi nella zona di influenza del profilo P1, 11 per il profilo P2 e 3 per il profilo P3. L'importanza relativa dei tre profili stimata a partire di questo rilevamento di blocchi (rispettivamente 55%, 35% e 10%) è notevolmente vicina alla ripartizione spaziale valutata in base ai calcoli LMR. Si segnala in particolare la debolissima proporzione di blocchi che hanno finito la loro corsa nei vigneti vicino al profilo P3.

Per quanto riguarda l'estensione a valle della zona di deposito, evidenti differenze di previsioni compaiono tra i profili P1 e P2 da una parte e il profilo P3 dall'altra. Per i profili P1 e P2, si devono fare le constatations seguenti:

- Le ascisse estreme di propagazione valutate dal CETE per le spinte cinematiche 1.3, 1.4 così come 1.5 sono inferiori alle ascisse massime osservate (una cinquantina di metri per  $E = 1.5$ )

de mètres pour  $E = 1.5$ ) si le terrain de bas de versant est considéré de type "terrain meuble". Par contre, pour la variante "éboulis meubles", les abscisses extrêmes correspondent aux observations, voire même dépassent les limites observées. Il est possible que le terrain réel ait un comportement intermédiaire entre ces deux affectations du terrain. Les blocs d'un élanement de 1.1 et 1.2 s'arrêtent quant à eux dans le couloir situé en amont de la colline de Châtelet.

- Les abscisses calculées par l'ADRGT pour une probabilité d'atteinte de  $10^{-2}$  correspondent sensiblement aux abscisses maximales relevées sur le terrain. Les valeurs prédites (dont certaines par extrapolation) pour des probabilités d'atteinte de  $10^{-3}$  et  $10^{-4}$  se situent respectivement 30 et 90 m en aval du bloc extrême observé dans les vignobles.
- Une vingtaine de pour cent des points d'arrêt calculés par le LMR se trouve plus loin que le bloc extrême et les abscisses maximales sont nettement supérieures (jusqu'à 250 m). En visionnant les films de la Télévision Suisse Romande tournés lors de l'événement de 1985, on constate que la forêt située sur la colline du Châtelet a considérablement freiné les blocs dans la partie basse du versant. Cet effet de freinage par les arbres n'ayant pas été considéré dans les calculs, il convient donc de relativiser quelque peu les différences mises en exergue entre modélisation et observations.

Les calculs effectués le long du profil P3 afin de couvrir les trajectoires qui s'incurvent vers l'Est conduisent aux résultats suivants :

- Les abscisses extrêmes de propagation évaluées par le CETE se situent dans la partie inférieure du versant et sur le cône de déjection. Le point d'arrêt extrême calculé pour des blocs de 1.5 d'élanement cinématique (variante "terrain meuble") se trouve légèrement plus bas que le dernier bloc observé dans cette partie des vignes (près du chemin secondaire).
- Toutes les abscisses extrêmes calculées par l'ADRGT sont significativement supérieures à l'abscisse maximale observée à proximité de ce profil ; la différence étant de 120 m pour une probabilité d'atteinte de  $10^{-2}$ , de 155 m pour une probabilité de  $10^{-3}$  et de 290 m pour une probabilité de  $10^{-4}$ . On peut néanmoins se poser la question de la représentativité des 3 blocs extrêmes, vu le petit nombre de blocs ayant réellement emprunté le profil P3.
- La méthode ADRGT (et dans une moindre mesure celle du CETE) fournit des abscisses d'arrêt sur le profil P3 supérieures à celles sur P1 et P2. Ceci doit être dû à la forme du profil P3, qui

se si considère il terreno ai piedi del versante come un terreno di tipo "mobile". Per la variante "detrimenti mobili", le ascisse estreme corrispondono invece alle osservazioni, anzi superano i limiti osservati. È possibile che il terreno reale abbia un andamento intermedio tra queste due modellazioni del terreno. I blocchi di spinta 1.1 e 1.2. si fermano nel corridoio situato a monte della collina del Châtelet.

- Le ascisse calcolate dall'ADGRT per una pericolosità  $10^{-2}$  corrispondono sensibilmente alle ascisse massimali rilevate sul terreno. I valori previsti (di cui alcuni per estrapolazione) per le pericolosità  $10^{-3}$  e  $10^{-4}$  si situano rispettivamente a 30 e 90 m a valle del blocco estremo osservato nei vigneti.
- Un venti per cento dei punti di arresto calcolati dal LMR si trova più lontano del blocco estremo e le ascisse massime sono decisamente superiori (fino a 250 m). Nel visionare i films della televisione svizzera romanda girati durante l'evento del 1985, si nota che il bosco situato sulla collina del Châtelet ha considerabilmente frenato i blocchi nella parte bassa del versante. Non essendo stato preso in considerazione nei calcoli questo effetto di rallentamento dovuto agli alberi, bisogna dunque relativizzare un po' le differenze evidenziate tra modelli e osservazioni.

I calcoli effettuati lungo il profilo P3 per coprire le traiettorie che si curvano verso Est conducono ai seguenti risultati:

- Le ascisse estreme di propagazione stimate dal CETE sono situate nella parte inferiore del versante e sul cono di deiezione. Il punto di arresto estremo calcolato per blocchi di 1.5. di spinta cinematica (variante "terreno mobile") si trova leggermente più in basso dell'ultimo blocco osservato in questa parte dei vigneti (vicino alla strada secondaria).
- Tutte le ascisse estreme calcolate dall'ADGRT sono significativamente superiori all'ascissa massima osservata in prossimità di questo profilo. La differenza è di 120 m per una pericolosità di  $10^{-2}$ , 155 m per una pericolosità di  $10^{-3}$  e 290 m per una pericolosità di  $10^{-4}$ . Ci si può tuttavia interrogare sulla rappresentatività dei 3 blocchi estremi visto l'esiguo numero di blocchi che hanno veramente percorso il profilo P3.
- Il metodo ADGRT (e in misura inferiore quello del CETE) fornisce ascisse di arresto sul profilo P3 superiori a quelle del P1 e del P2. Questo è dovuto forse alla forma del profilo P3 che non ha la sporgenza rocciosa esistente nel P1 e nel P2. I blocchi che valicano questa sporgenza

ne comporte pas le ressaut rocheux qui existe sur P1 et P2. Les blocs qui franchissent ce ressaut retombent ensuite relativement verticalement dans les pentes inférieures à faible inclinaison, entraînant des pertes importantes d'énergie par enfoncement dans le sol, d'où des distances totales parcourues qui sont moindres.

- L'abscisse maximale calculée par le LMR pour des blocs empruntant le couloir situé à l'Est de la colline du Châtelet est très proche du bloc extrême sis dans cette partie du vignoble et du point d'arrêt extrême calculé par le CETE pour un élanement de 1.5.

En conclusion, si on considère que les 32 blocs qui ont fini leur course dans les vignes sont représentatifs de conditions habituelles de propagation, on ne peut s'empêcher de souligner qu'aucune des 3 études trajectographiques effectuées ne fournit des prédictions conformes aux observations sur l'ensemble des trois profils. En effet, les abscisses maximales de propagation calculées par les 3 codes ne sont cohérentes avec les blocs extrêmes relevés dans les vignes que, tantôt sur les profils P1 et P2 (ADRGT), tantôt sur le profil P3 (CETE, LMR).

#### IV.4. CONCLUSIONS

##### IV.4.1. *Cadre du volet trajectographique de la recherche*

Ce chapitre du programme Interreg IIC "Instabilités de falaises" était consacré à la trajectographie de blocs rocheux. Dans l'esprit des contrats Interreg, une comparaison de 3 méthodes de calculs trajectographiques utilisées dans la région Alpine (CETE, ADRGT, LMR) a été effectuée et aucun travail substantiel d'amélioration de ces méthodes n'a été entrepris.

Dans la première partie, les participants ont présenté et comparé leurs logiciels respectifs (hypothèses, équations constitutives du rebond, paramètres pris en compte, spécificités) ainsi que leurs méthodologies de calcul. Des tableaux synthétiques reprennent les principales caractéristiques de ces logiciels ainsi que quelques informations relatives à d'autres codes de calcul existants.

Dans la seconde partie, les programmes ont été appliqués à 6 sites, chacun des partenaires fournissant pour deux des sites en question (déjà étudiés par lui) une description du profil (topographie, nature du terrain et de la végétation) et les informations disponibles sur l'événement (zone de départ, taille et forme des blocs, zone de dépôt avec points extrêmes atteints, autres données sur la trajectoire). Les résultats obtenus par les logiciels ont été analysés, puis confrontés entre eux et avec la réalité.

ricadono poi in modo relativamente verticale sui pendii inferiori a debole inclinazione comportando perdite importanti di energia per conficcamento nel suolo, che determinano delle distanze complessive percorse inferiori.

- L'ascissa massima calcolata dal LMR per i blocchi che seguono il corridoio ad Est della collina del Châtelet è molto vicina al blocco estremo situato in questa parte del vigneto e al punto di arresto estremo calcolato dal CETE per una spinta 1.5.

In conclusione, se si considera che i 32 blocchi che sono finiti nei vigneti sono rappresentativi di condizioni abituali di propagazione, non si può fare a meno di sottolineare che nessuno dei tre studi traietto grafici effettuati fornisce previsioni conformi alle osservazioni sull'insieme dei tre profili. Infatti, le ascisse massime di propagazione calcolate dai tre codici non sono coerenti con i blocchi estremi rilevati nei vigneti solo talvolta con i profili P1 e P2 (ADRGT), talvolta con il profilo P3 (CETE, LMR).

#### IV.4. CONCLUSIONI

##### IV.4.1. *Quadro dell'aspetto traietto grafico della ricerca*

Questo capitolo del programma Interreg IIC "Instabilità in parete" era dedicato alla traietto grafia di blocchi rocciosi. Nello spirito dei contratti Interreg, è stato realizzato un paragone tra 3 metodi di calcoli traietto grafici utilizzati nella regione alpina (CETE, ADRGT, LMR) ma nessun lavoro sostanziale per migliorare questi metodi è stato effettuato.

Nella prima parte, i partners hanno presentato e confrontato i loro rispettivi software (ipotesi, equazioni caratteristiche della fase di rimbalzo, parametri presi in considerazione, specificità) così come le loro metodologie di calcolo. Delle tabelle sintetiche definiscono le principali caratteristiche di questi software e alcune informazioni riguardanti altri codici di calcolo esistenti.

Nella seconda parte, i programmi sono stati applicati ai 6 siti, avendo ciascuno dei partners fornito per due di questi siti in questione (già studiati da lui) una descrizione del profilo (topografia, natura del terreno e della vegetazione) e le informazioni disponibili sull'evento (zona di origine, taglia e forma dei blocchi, zone di deposito con punti estremi raggiunti, altri dati sulla traietto ria). I risultati ottenuti da questi software sono stati analizzati, poi confrontati tra di loro e con la realtà.

Le présent travail représentait une tâche à la fois difficile et intéressante sous divers aspects :

- Les 3 intervenants sont des organismes très divers : le CETE de Lyon est un organisme du Ministère de l'Équipement français ; l'ADRGT est un organisme privé ; le laboratoire de Mécanique des Roches est un laboratoire de type universitaire dépendant de l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne. De ce fait, le CETE et l'ADRGT, qui ont été parmi les premiers à développer en France de telles méthodes, et qui les proposent sur un marché actuellement très concurrentiel, n'ont pas pu expliciter tous les détails de leurs modèles.
- Les quelques expériences de comparaison des résultats de calculs avec la réalité, déjà effectuées en Suisse ou en France, avaient été menées de manière plutôt cloisonnée, les organismes participants fournissant leurs résultats à un maître d'œuvre qui en assurait lui-même la synthèse. C'est la première fois que des organismes ont accepté de travailler ensemble à la synthèse de leurs propres résultats.
- Autant la comparaison des résultats de calculs avec les points d'arrêt réels sur le terrain est assez simple pour des profils 2D, autant elle devient délicate lorsque des calculs sont réalisés pour certains en 2D et d'autres en 3D. D'autre part, la comparaison des vitesses et hauteurs de passage calculées avec la réalité est difficile, faute de disposer de données objectives sur ces paramètres.

#### IV.4.2. Particularités des codes

Les 3 méthodes comparées dans le cadre de ce projet ne sont pas équivalentes, en ce sens qu'elles ne donnent pas accès aux mêmes types de résultats. La méthode CETE des trajectoires limites permet d'apprécier des limites d'extension maximale, mais ne permet qu'imparfaitement de calculer la hauteur de passage maximale en un point. En effet, les trajectoires limites pour la propagation (qui supposent une certaine "optimisation" des rebonds, favorisant la composante tangentielle de la vitesse au détriment de la composante normale) ne sont pas forcément les mêmes que celles pour les hauteurs de passage.

La méthode ADRGT, qui est une méthode 2D avec paramètres aléatoires, permet de réaliser des séries de calculs desquelles on tire des distributions de points d'arrêt, hauteur et vitesse de passage. Mais pour l'appréciation de ces dernières en un point donné, on passe souvent par l'analyse d'un seul plan de trajectoire 2D sans chercher si d'autres trajectoires ne pourraient fournir des valeurs plus élevées.

Il presente lavoro rappresentava un compito difficile e interessante per più aspetti:

- I 3 soggetti sono enti molto diversi: il CETE di Lione è un ente del *Ministère de l'Équipement* francese; l'ADRGT è un ente privato; il laboratorio di *Mécanique des Roches* è un laboratorio di tipo universitario dipendente dall'*École Polytechnique Fédérale* di Losanna. Di fatto, il CETE e l'ADRGT, che sono stati tra i primi a sviluppare tali metodi in Francia e che li propongono ad un mercato attualmente assai concorrenziale, non hanno potuto esplicitare tutti i particolari dei loro modelli.
- Alcuni esperimenti di confronto tra i risultati di calcoli con la realtà, già effettuati in Svizzera o in Francia, erano stati condotti in modo piuttosto frammentario, poiché i partners fornivano i loro risultati ad un capo fila che ne assicurava lui stesso la sintesi. È la prima volta che degli enti hanno accettato di lavorare insieme alla sintesi dei loro risultati.
- Il confronto tra i risultati di calcoli con i punti di arresto reali sul terreno è abbastanza semplice per i profili 2D, ma diventa difficile quando i calcoli sono realizzati per certi profili in 2D e per altri in 3D. Inoltre, il confronto delle velocità e delle altezze di volo calcolate in rapporto alla realtà è difficile per mancanza di dati obiettivi su questi parametri.

#### IV.4.2. Particolarità dei codici

I tre metodi confrontati nell'ambito di questo progetto non sono equivalenti in quanto non danno accesso agli stessi tipi di risultati. Il metodo CETE delle traiettorie limite permette di valutare i limiti di propagazione massima ma non consente di calcolare in modo sufficiente l'altezza di volo massima su un punto definito. In effetti, le traiettorie limite per la propagazione (che presuppongono una certa "ottimizzazione" dei rimbalzi, favorendo la componente tangenziale della velocità a dispetto della componente normale) non sono per forza le stesse di quelle per le altezze di volo.

Il metodo ADRGT, che è un metodo 2D con parametri aleatori, permette di realizzare una serie di calcoli da cui si ricavano le distribuzioni di punti di arresto, altezza e velocità di passaggio. Ma per valutare queste ultime in un punto determinato, si passa spesso tramite l'analisi di un solo piano di traiettoria 2D senza verificare se altre traiettorie possono fornire valori più elevati.

Le logiciel EBOULEMENT du LMR fait partie des méthodes dites rigoureuses qui considèrent les dimensions et forme réelles des blocs ainsi que tous leurs mouvements, y compris la rotation. La version actuelle du programme permet des analyses probabilistes, en affectant à un certain nombre de paramètres du problème une composante aléatoire pour tenir compte de leur variabilité naturelle. Bien qu'il soit fréquemment bridé pour calculer des trajectoires sur des profils bidimensionnels, le programme a été développé pour des calculs 3D et se prête à l'utilisation de modèles topographiques tridimensionnels (MNT).

Deux tableaux comparatifs (Tab. IV.1 et 2) illustrent les spécificités de ces 3 logiciels. Le premier fournit une synthèse de leurs principales caractéristiques tandis que le second compare la manière dont le phénomène de rebond est traité ainsi que les paramètres pris en compte dans sa modélisation. Finalement, un troisième tableau (Tab. IV.3), de structure analogue au premier, synthétise les caractéristiques de quelques autres programmes de calcul ayant fait l'objet de publications.

#### IV.4.3. Confrontation à des cas réels d'éboulements

Les comparaisons effectuées dans le cadre du présent travail ont apporté certains éléments :

- Sur pratiquement tous les profils, qu'ils soient simples ou plus complexes avec des ressauts et des replats, les méthodes ADRGT et LMR donnent des répartitions assez voisines, avec les mêmes zones privilégiées d'arrêt. Par contre, en règle générale, le LMR obtient des distributions plus étalées que l'ADRGT.
- Les simulations faites avec le logiciel PROPAG du CETE pour des blocs dont l'élancement cinématique est compris entre 1.1 et 1.5 ont tendance, dans une majorité des cas, à marquer les différentes zones de dépôt (confère résultats pour les sites de Comboire 1.2 et 1.3 ; Champrond 1.3 et 1.4bis ; Saint-Marcel 1.1 et 1.2 ; Barjac 1.1, 1.2 et 1.3 ; Bieudron 1.1). Au vue des cas traités dans ce projet, il semblerait donc que les simulations réalisées pour la fourchette des élancements cinématiques admissibles (entre 1.1 et 1.5) permettent d'apprécier qualitativement les zones principales de dépôt des blocs.
- Les calculs du CETE pour des blocs d'élancement cinématique de 1.5 prédisent sur la majorité des sites une trajectoire extrême plus longue que celle obtenue par l'ADRGT et légèrement plus courte que celle calculée par le LMR (séries de 300 simulations pour ces deux parte-

Il software EBOULEMENT del LMR fa parte dei metodi cosiddetti rigorosi che considerano le dimensioni e le forme reali dei blocchi così come tutti i loro movimenti, inclusa la rotazione. La versione attuale del programma permette di fare analisi probabilistiche assegnando ad un certo numero di parametri del problema una componente aleatoria per tenere in conto la loro variabilità naturale. Benché questo programma sia spesso riservato a calcolare delle traiettorie su dei profili bidimensionali, esso è stato sviluppato per calcoli 3D e si presta all'utilizzo di modelli topografici tridimensionali (DTM).

Due tabelle comparative (Tab. IV.1 e 2) illustrano le specificità di questi 3 software. La prima fornisce una sintesi delle loro principali caratteristiche mentre la seconda mette a confronto il modo in cui il fenomeno di rimbalzo è stato trattato così come i parametri presi in considerazione nella sua modellizzazione. Infine, una terza tabella (Tab. IV.3) di struttura simile alla prima sintetizza le caratteristiche di alcuni altri programmi di calcolo già pubblicati.

#### IV.4.3. Confronto con eventi franosi reali

I paragoni effettuati nell'ambito del presente lavoro hanno fornito alcuni elementi:

- Su praticamente tutti i profili, siano essi semplici o più complessi con sporgenze e ripiani, i metodi ADGRT e LMR danno delle distribuzioni abbastanza vicine, con le stesse zone di arresto privilegiate. Invece, il LMR ottiene, in genere, delle distribuzioni più estese dell'ADGRT.
- Le simulazioni fatte con il software PROPAG del CETE per i blocchi per i quali l'"élancement cinématique" è compreso tra 1.1 e 1.5 tendono, nella maggioranza dei casi, a segnalare le diverse zone di deposito (cf. risultati per i siti di Comboire 1.2 e 1.3; Champrond 1.3 e 1.4 bis; Saint-Marcel 1.1 e 1.2; Barjac 1.1, 1.2 e 1.3, Bieudron 1.1). Considerando i casi studiati in questo progetto, sembra che le simulazioni realizzate per la scala degli "élancements cinématiques" ammissibili (tra 1.1 e 1.5) permettano di valutare qualitativamente le zone principali di deposito dei blocchi.
- I calcoli del CETE per i blocchi di "élancement cinématique" di 1.5 predicono in una grande parte dei siti una traiettoria estrema più lunga di quella ottenuta con l'ADGRT e leggermente più corta di quella calcolata dal LMR (serie di 300 simulazioni per questi due partners). Tuttavia, bisogna segnalare che, diversamente del risultato del CETE, che è unico, le ascisse massime

naires). Néanmoins, il convient de noter que, contrairement au résultat du CETE qui est unique, les abscisses maximales d'arrêt calculées par les deux autres programmes dépendent sensiblement du nombre de calculs (plus ceux-ci sont nombreux, plus l'abscisse maximale est grande).

- Pour les méthodes ADRGT et LMR, la taille des blocs intervenant dans la modélisation (contrairement à la méthode du CETE), certains calculs effectués pour des fourchettes de volume de blocs données, ne représentent plus la réalité si on considère des blocs plus petits (Barjac).
- Pour le seul calcul de protection effectué (site de Bieudron au point IV.3.7), les hauteurs et vitesses de passage estimées par les 3 méthodes ont donné des résultats très divergents. En l'absence d'observation de trajectoires réelles, il est difficile d'émettre une appréciation sur la valeur de ces résultats. Il s'agit indéniablement d'un point à approfondir à l'avenir.
- Dans le cas de topographies 3D relativement complexes comme celle des Crétaux, il n'est pas toujours aisé de choisir des profils 2D représentatifs des trajectoires potentielles, surtout si l'on ne dispose pas d'un inventaire des positions d'arrêt des blocs sur le terrain. De plus, l'importance relative de ces profils 2D ne peut être déterminée a priori. Par contre, des modélisations 3D telles que celles effectuées par le LMR permettent d'estimer les chemins les plus empruntés par les blocs ainsi que la répartition spatiale des points d'arrêt.

#### **IV.4.4. Recommandations**

Parmi les conclusions d'ordre méthodologique retirées de ce travail, on peut citer :

- L'importance du recueil des données de terrain. Le caractère prédictif d'une analyse trajectographique sera d'autant plus grand que l'étude de terrain est précise et pertinente. Le chapitre IV.3.2. passe en revue diverses informations qui devraient être collectées.
- La nécessité de ne pas dissocier l'équipe qui mène les calculs de celle qui fait les observations de terrain. En effet, même si un tel relevé est effectué avec le plus grand soin, les informations transmises sont souvent sujettes à interprétation et ne sont donc pas toujours utilisées à bon escient lors des calculs trajectographiques. Ceci a été vérifié dans le cadre de ce travail, la mauvaise adéquation de certains résultats provenant parfois d'imprécisions dans les descriptions. La pratique courante de cer-

di d'arresto calcolate dai due altri programmi dipendono sensibilmente dal numero di calcoli (più questi sono numerosi, più l'ascissa massima è grande).

- Per i metodi ADRGT e LMR, dove la dimensione dei blocchi interviene nella modellizzazione (contrariamente al metodo del CETE), alcuni calcoli effettuati per delle scale di volume di blocchi determinati non rappresentano più la realtà se si tratta di blocchi più piccoli (Barjac).
- Per il solo calcolo di difesa effettuato (sito di Bieudron al punto IV.3.7.), le altezze e velocità di passaggio valutate dai tre metodi hanno dato dei risultati assai divergenti. In assenza di osservazione di traiettorie reali, è difficile giudicare il valore di questi risultati. Si tratti senza dubbio di un punto da indagare nel futuro.
- Nel caso di topografie 3D relativamente complesse come quella dei Crétaux, non è sempre facile scegliere dei profili 2D rappresentativi delle traiettorie potenziali, soprattutto se non c'è a disposizione un inventario delle posizioni di arresto dei blocchi sul terreno. Inoltre, l'importanza relativa di questi profili 2D non può essere determinata a priori. Invece, delle modellizzazioni 3D quali quelli effettuati dal LMR, permettono di valutare le traiettorie più frequenti dei blocchi così come la distribuzione spaziale dei punti di arresto.

#### **IV.4.4. Raccomandazioni**

Tra le conclusioni metodologiche ricavate da questo lavoro, possiamo citare:

- L'importanza della raccolta dei dati su terreno. Il carattere previsionale di un'analisi traietto-grafica sarà tanto più rilevante quanto lo studio sul terreno è preciso e pertinente. Il capitolo IV.3.2. illustra le varie informazioni che dovrebbero essere raccolte.
- La necessità di non separare la squadra che elabora i calcoli da quella che si occupa delle osservazioni sul terreno. In effetti, anche se tale rilevamento è effettuato con la massima cura, le informazioni trasmesse sono spesso soggette ad interpretazioni e dunque non sono sempre utilizzate con cognizione di causa durante i calcoli traietto-grafici. Ciò si è verificato nell'ambito di questo lavoro a causa di una insufficiente adeguatezza di alcuni risultati provenienti talvolta dalle imprecisioni nelle descrizioni. Alcuni stu-



tains bureaux d'études qui consiste à effectuer eux même les relevés de terrain et à ensuite sous-traiter les calculs trajectographiques à des bureaux spécialisés (façon de procéder essentiellement justifiée par des considérations financières) n'est donc pas souhaitable.

- Le souci permanent de confronter les résultats des calculs à la réalité observée sur le site en question (zones de dépôt de blocs, effets destructeurs, etc.). Si on traite d'un site où des chutes de blocs antérieures ne sont pas ou plus repérables, il convient de chercher aux environs un site présentant suffisamment d'analogies et sur lequel des observations sont disponibles afin de réaliser, à titre de calage, des calculs sur ce site de référence avant de passer au site même de l'étude. De même, en cas d'occurrence de chutes de blocs après l'étude, on ne saurait trop conseiller de relever les caractéristiques de l'événement (en particulier des trajectoires), non seulement pour valider les études faites et les mesures de protection prises sur le site en question, mais aussi pour améliorer la connaissance des phénomènes.
- L'importance du couple calculateur-logiciel. Mieux vaut un calculateur connaissant bien son logiciel, ses particularités et ses limites, qu'un logiciel très complet utilisé par un calculateur moins expérimenté.

En ce qui concerne la méthodologie d'application de ces calculs, en particulier pour l'élaboration de cartes de danger (Suisse) ou de plans de prévention des risques naturels (France), on en est conduit, pour l'instant, à une grande prudence. Les résultats d'études trajectographiques doivent toujours être considérés comme une aide à la décision et non comme un critère absolu.

De même, dans le cadre de l'implantation et du choix des caractéristiques des ouvrages de protection, il convient de rester prudent :

- D'une part, vis-à-vis des hauteurs et vitesses de passage tant que des observations n'ont pas été faites ou des essais réalisés, permettant de vérifier la conformité des résultats de calculs à la réalité.
- D'autre part, vis-à-vis des capacités nominales des ouvrages de protection annoncées par les fabricants. L'instauration d'une homologation de ces ouvrages de protection (notamment filets) devient cruciale pour déterminer objectivement quelle énergie ils sont capables d'absorber et quelle est leur surface d'interception (partie utile de la surface de l'ouvrage sur laquelle l'arrêt des blocs est effectivement assuré).

di professionali procedono loro stessi ai rilevamenti sul terreno per poi subappaltare i calcoli traiettografici ad uffici specializzati (procedura essenzialmente giustificata da considerazioni finanziarie). Questa pratica comune non è dunque auspicabile.

- La costante preoccupazione di confrontare i risultati dei calcoli con la realtà osservata sul sito (deposito di blocchi, effetti distruttivi, etc.). Se si tratta di un sito sul quale le cadute blocchi precedenti non sono o non sono più individuabili, occorre allora cercare nelle vicinanze un sito che presenta analogie sufficienti e sul quale è possibile procedere a varie osservazioni per realizzare, a titolo di taratura, dei calcoli su questo sito di riferimento prima di passare al sito oggetto di studio. Nello stesso modo, in caso di evenienza di caduta blocchi dopo lo studio, si consiglia di rilevare le caratteristiche dell'evento (in particolare le traiettorie), non solo per convalidare gli studi fatti ed i provvedimenti di protezione presi sul sito, ma anche per migliorare la conoscenza dei fenomeni.
- L'importanza della coppia operatore-software. Meglio avere un operatore che conosce bene il suo software, le sue particolarità e i suoi limiti che un software molto completo utilizzato da un operatore meno esperto.

Per quanto riguarda la metodologia applicativa di questi calcoli, in particolare per l'elaborazione di carte di pericolo (Svizzera) o di piani di prevenzione dei rischi naturali (Francia), si deve per ora agire con molta cautela. I risultati di studi traiettografici devono essere sempre considerati come un aiuto nella decisione e non come un criterio assoluto.

Nello stesso modo, nell'ambito dell'impianto e della scelta delle tipologie di opere di difesa, conviene operare con cautela:

- Da una parte, nei confronti delle altezze e velocità di passaggio fino quando non siano state fatte osservazioni o realizzate prove che permettano di verificare la conformità dei risultati di calcoli con la realtà.
- Dall'altra, riguardo alle caratteristiche tecniche delle opere di difesa comunicate dai costruttori. L'istituzione di una omologazione di queste opere di difesa (in particolare rete) diventa fondamentale per determinare obiettivamente quale energia siano in grado di assorbire e quale sia la loro superficie di intercettazione (parte utile della superficie dell'opera sulla quale c'è la sicurezza che i blocchi saranno effettivamente fermati).

Finalement, en complément de ces précautions d'application, il est bon de rappeler aux mandants d'études trajectographiques (collectivités publiques, maîtres d'ouvrage, experts) que de belles sorties couleurs (cartes, graphiques) ne constituent pas un gage de qualité des résultats fournis.

#### IV.4.5. Perspectives

##### IV.4.5.1 Utilisation des données trajectographiques

Bien que le volet trajectographique de cette recherche Interreg IIC n'ait pas eu pour objet l'élaboration d'une méthodologie d'application de ces calculs au zonage, une ébauche de réflexion a été menée par l'ADRGT. La méthodologie se baserait sur les observations, en ajustant les calculs sur des blocs extrêmes observés avec une probabilité d'atteinte  $p_0$  (calculée), et considérerait ensuite les abscisses des points correspondant à  $10^{-2} p_0$  et  $10^{-4} p_0$  comme des limites. Les implications sur l'aménagement du territoire seraient alors les suivantes :

- $p > p_0$  : pas de constructions autorisées ; protection à prévoir en urgence pour l'existant.
- $10^{-2} p_0 < p < p_0$  : pas de constructions neuves a priori ; pour l'existant, protections à prévoir avec un ordre d'urgence décroissant.
- $10^{-4} p_0 < p < 10^{-2} p_0$  : construction neuve possible moyennant protections.
- $p < 10^{-4} p_0$  : construction libre.

Il est évident que cette probabilité  $p$  devrait intégrer la probabilité de départ (ce qui demeure une question non réglée jusqu'à présent) et la probabilité de propagation (tenant compte si possible de l'aspect 3D). Tant que la probabilité de départ n'est pas chiffrable de manière univoque, on pourrait la supposer de 100%, ce qui va dans le sens de la sécurité.

De cette proposition de méthodologie, il est intéressant de relever la notion d'une distance réelle à parcourir sur le terrain pour réduire la probabilité d'atteinte dans un rapport donné. Cette distance dépendant du contexte local (topographie, couverture), la trajectographie est un bon moyen de l'évaluer.

Cependant, cette méthode (dans sa version actuelle) n'est pas préconisée par les partenaires du projet, un certain nombre de difficultés et d'inconvénients risquant, en effet, d'apparaître lors de son application :

- Son utilisation est impossible sur des sites qui n'ont pas encore subi de chutes de blocs.
- La probabilité d'atteinte  $p_0$  associée aux blocs extrêmes observés sur le terrain n'est pas univoque. Elle dépend de l'intensité et de la fréquence des événements. Or, il n'est pas aisé de

Infine, per completare queste precauzioni applicative, bisogna ricordare a coloro che commissionano studi traietto grafici (collettività pubbliche, progettisti, esperti) che le bellissime pubblicazioni colorate (carte, grafici) non garantiscono di per se stesse la qualità dei risultati forniti.

#### IV.4.5. Prospettive

##### IV.4.5.1. Utilizzo dei dati traietto grafici

Sebbene la parte traietto grafica di questa ricerca Interreg IIC non avesse come oggetto l'elaborazione di una metodologia applicativa di questi calcoli di zonizzazione, un abbozzo di riflessione è stato condotto dall'ADGRT. La metodologia si baserebbe sulle osservazioni adattando i calcoli sui blocchi estremi osservati con una pericolosità  $p_0$  (calcolata) e considererebbe poi le ascisse dei punti corrispondenti a  $10^{-2} p_0$  e  $10^{-4} p_0$  come limiti. Le conseguenze sull'utilizzo del territorio sarebbero quindi le seguenti:

- $p > p_0$  : nessuna autorizzazione ad edificare; protezione da prevedere con urgenza per l'esistente.
- $10^{-2} p_0 < p < p_0$  : nessun nuova costruzione a priori; protezioni da prevedere con un ordine di urgenza decrescente per l'esistente.
- $10^{-4} p_0 < p < 10^{-2} p_0$  : possibilità di nuove costruzioni con opere di protezione.
- $p < 10^{-4} p_0$  : edificazione libera.

È evidente che questa pericolosità  $p$  dovrebbe comprendere la probabilità di origine (ciò che rimane un problema non risolto finora) e la probabilità di propagazione (considerando, se possibile, l'aspetto 3D). Finché la probabilità di origine non sia calcolata in modo univoco, si potrebbe presupporla pari al 100%, a garanzia della sicurezza.

Da questa proposta di metodologia, è interessante notare il concetto di una distanza reale da percorrere sul terreno per ridurre la pericolosità in un rapporto determinato. Questa distanza dipende dal contesto locale (topografia, copertura) e la traietto grafia è un buon mezzo per valutarla.

Questo metodo però (nella sua versione attuale) non è raccomandato dai partners del progetto poiché alcune difficoltà e inconvenienti rischiano effettivamente di comparire nella sua applicazione:

- Il suo utilizzo è impossibile nei siti che non hanno ancora avuto delle cadute blocchi.
- La pericolosità  $p_0$ , associata ai blocchi estremi osservati sul terreno, non è univoca. Dipende dall'intensità e dalla frequenza degli eventi. Ora, non è facile determinare se il blocco estremo

déterminer si le bloc extrême relevé sur le terrain est issu d'un événement courant ou exceptionnel.

- Dans les calculs trajectographiques de type probabiliste (par exemple ADGRT, LMR), l'étalement de la fonction de répartition des blocs dépend des lois de probabilité choisies pour caractériser les variables aléatoires du problème. Or, ces lois (ainsi que leurs paramètres) n'étant pas forcément représentatives de la réalité physique, l'extrapolation de la fonction de répartition des blocs au-delà du bloc extrême observé sur le terrain peut être hasardeuse.

Ces considérations soulignent, une fois de plus, la nécessité de rester prudent vis-à-vis de l'application au zonage des résultats d'études trajectographiques. Un certain nombre de réflexions seront encore nécessaires pour élaborer une telle méthodologie d'application, tentant de concilier une certaine rigueur scientifique, le pragmatisme des personnes de terrain (qui, au sein d'un bureau d'études, devront utiliser la méthode) ainsi que les préoccupations d'aménagement du territoire des collectivités publiques.

Un tel travail de réflexion, avec exercice pratique d'établissement de cartes de danger sur quelques sites, pourrait constituer un thème intéressant dans le cadre du programme Interreg III.

#### **IV.4.5.2 Meilleure connaissance du phénomène de rebond**

Pour délimiter les périmètres menacés et déterminer l'implantation et les caractéristiques des ouvrages de protection, il est nécessaire d'avoir une bonne connaissance des trajectoires (zone d'arrêt, hauteur et longueur de vol) et des énergies des blocs. Or, le phénomène de rebond qui se produit lors de l'impact d'un bloc sur le terrain demeure actuellement très mal connu et dès lors très sommairement modélisé par les programmes de calcul.

Un certain nombre de personnes ayant expérimenté des chutes de blocs naturelles ou artificielles (p.ex. essais en carrière) s'accordent pour dire que le mouvement de rebond dépend non seulement des caractéristiques du terrain (déformabilité, résistance, inclinaison, rugosité), mais aussi de paramètres du bloc (poids, géométrie) ainsi que de la cinématique lors de l'impact (vitesses de translation et de rotation, angle et configuration). On conçoit dès lors les limitations d'une modélisation du rebond sur la base de deux coefficients de restitution en fonction uniquement de la nature du terrain. C'est néanmoins de cette façon que le rebond est traité dans bon nombre de programmes, probablement faute de mieux.

rilevato sul terreno proviene da un evento comune o eccezionale.

- Nei calcoli traietto grafici di tipo probabilistico (ad esempio ADGRT, LMR), l'estensione della funzione di ripartizione dei blocchi dipende dalle leggi di probabilità scelte per caratterizzare le varianti aleatorie del problema. Ora, se queste leggi (così come i loro parametri) non rappresentano per forza la realtà fisica, l'estrapolazione della funzione di ripartizione dei blocchi al di là del blocco estremo osservato sul terreno può essere rischiosa.

Queste considerazioni evidenziano ancora una volta la necessità di rimanere prudenti nei confronti dell'applicazione dei risultati di studi traietto grafici in rapporto alla zonizzazione. Alcune riflessioni saranno ancora necessarie per elaborare tale metodologia applicativa nel tentativo di conciliare un certo rigore scientifico, il pragmatismo degli operatori sul terreno (che dovranno utilizzare il metodo nell'ambito professionale) così come le preoccupazioni di utilizzo del territorio delle collettività pubbliche.

Tale lavoro di riflessione con l'elaborazione di carte di pericolo su alcuni siti potrebbe costituire un tema interessante nell'ambito del programma Interreg III.

#### **IV.4.5.2. Migliore conoscenza del fenomeno di rimbalzo**

Per delimitare i perimetri minacciati e determinare l'impianto e le caratteristiche delle opere di difesa, è necessario conoscere bene le traiettorie (zona di arresto, altezza e lunghezza del volo) e le energie dei blocchi. Ora, il fenomeno di rimbalzo, che si produce durante l'impatto di un blocco sul terreno, rimane attualmente assai mal conosciuto e quindi poco modellizzato dai programmi di calcolo.

Avendo sperimentato delle cadute blocchi naturali o artificiali (ad es. prove nelle cave), alcune persone concordano nell'affermare che il movimento di rimbalzo dipende non solo dalle caratteristiche del terreno (deformabilità, resistenza, inclinazione, rugosità) ma anche dai parametri del blocco (peso, geometria) così come dal cinematismo durante l'impatto (velocità di traslazione e di rotazione, angolo e configurazione). Si ammettono allora i limiti di una modellizzazione del rimbalzo in base a due coefficienti di restitutione in funzione della natura del terreno. È comunque in questo modo che più programmi illustrano il rimbalzo, probabilmente in mancanza di qualcosa di meglio.

Des progrès dans le domaine des calculs trajectographiques ne seront possibles qu'en acquérant une meilleure connaissance du phénomène de rebond :

- par l'observation d'événements naturels lors de leur occurrence ainsi que des traces laissées sur le terrain ;
- par la réalisation d'essais en vraie grandeur in situ, avec analyse des trajectoires au droit des impacts ;
- par la réalisation d'essais en semi-grandeur en laboratoire, où les conditions et les paramètres de l'impact sont plus facilement maîtrisables.

En complément de certaines campagnes expérimentales déjà réalisées et qui mériteraient d'être réinterprétées, deux programmes d'essais sont en préparation au CETE et au LMR :

- Dans un futur site expérimental destiné à l'homologation d'ouvrages de protection contre les chutes de blocs, le CETE de Lyon compte réaliser des essais en vraie grandeur en lançant des blocs sur une pente d'éboulis homogène de 150 m de dénivelée. Les trajectoires et les impacts seront analysés à partir de films.
- Dans le cadre d'une thèse de doctorat, le LMR entreprend une vaste campagne d'essais d'impacts en semi-grandeur en vue d'isoler et de comprendre l'influence des paramètres du terrain, du bloc et de la cinématique. À cet effet, de façon systématique, des blocs (jusqu'à 1 t) sont lâchés de différentes hauteurs (jusqu'à 10 m) sur des terrains inclinés de diverses natures. L'interprétation est faite à partir des enregistrements d'une caméra numérique à acquisition rapide.

En cherchant à mieux comprendre le mécanisme de rebond et en analysant systématiquement l'influence des divers paramètres de l'impact, ces études expérimentales visent à proposer à terme des formulations mathématiques permettant de mieux quantifier le rebond. L'implémentation ultérieure de ces expressions dans des programmes de calculs devrait se traduire par un accroissement de la capacité de prédiction des trajectoires de blocs rocheux.

Nel campo dei calcoli traiettografici i progressi saranno possibili solo se si acquisisce una conoscenza migliore del fenomeno del rimbalzo a partire:

- dall'osservazione di eventi naturali quando si producono, così come dalle tracce lasciate sul terreno ;
- dalla realizzazione di prove su scala naturale in situ con analisi delle traiettorie sulla perpendicolare degli impatti ;
- dalla realizzazione di prove su scala ridotta in laboratorio dove le condizioni ed i parametri dell'impatto sono più facilmente gestibili.

Per completare alcune campagne di sperimentazione già realizzate e che meriterebbero di essere reinterpretate, il CETE insieme al LMR stanno preparando due programmi di prova:

- In un futuro sito sperimentale dedicato all'omologazione di opere di difesa contro le cadute blocchi, il CETE di Lyon prevede la realizzazione di prove su scala naturale lanciando blocchi su un pendio di detriti omogenei con un dislivello di 150 m. Le traiettorie e gli impatti saranno analizzati a partire dai films.
- Nell'ambito di una tesi di laurea, il LMR inizia una estesa campagna di prove di impatti su scala ridotta nello scopo di isolare e comprendere come influiscono i parametri del terreno, del blocco e del cinematismo. A questo scopo, sono sistematicamente lanciati dei blocchi (fino a 1 t.) da diverse altezze (fino a 10 m) su dei terreni inclinati di varie nature. L'interpretazione è fatta a partire dalla registrazione di una camera digitale ad acquisizione veloce.

Nel cercare di capire meglio il meccanismo del rimbalzo ed analizzare sistematicamente l'influenza dei vari parametri dell'impatto, questi studi sperimentali mirano a proporre delle formulazioni matematiche permettendo di quantificare meglio il rimbalzo. Il contributo ulteriore di queste espressioni nei programmi di calcoli dovrebbe tradursi con un incremento della capacità di prevedere le traiettorie di blocchi rocciosi.

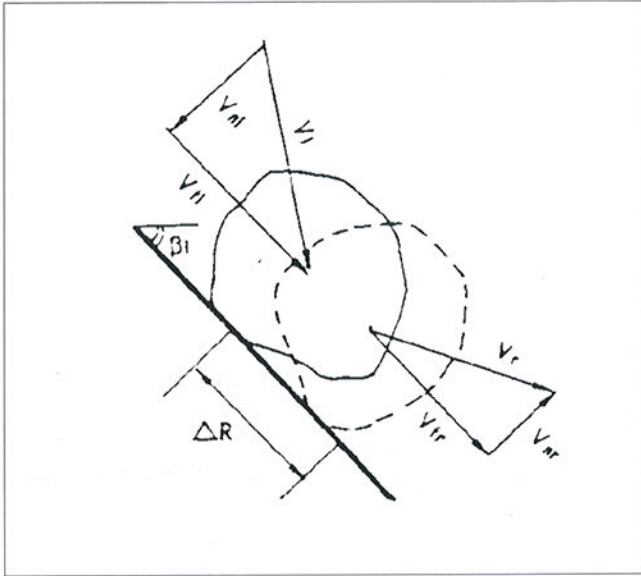


Fig. IV.1 : Impact sur un terrain rocheux.

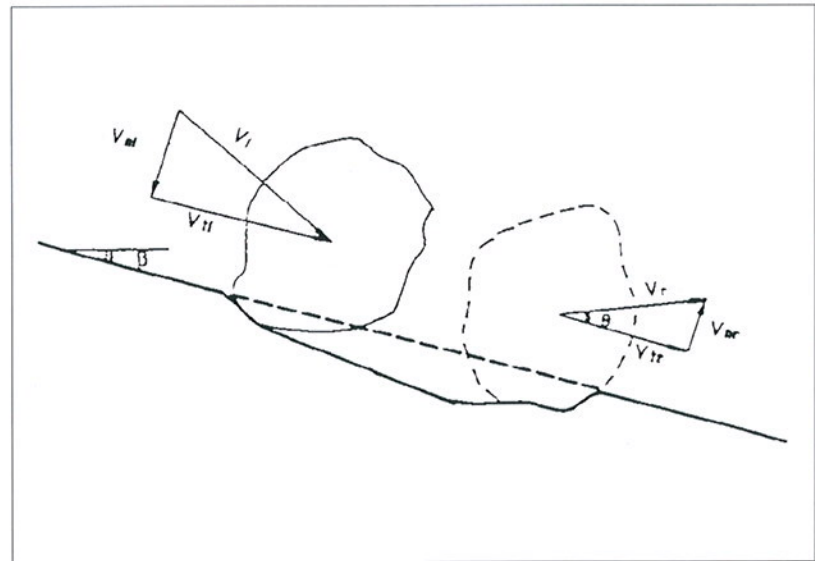


Fig. IV.2 : Impact sur un terrain meuble.

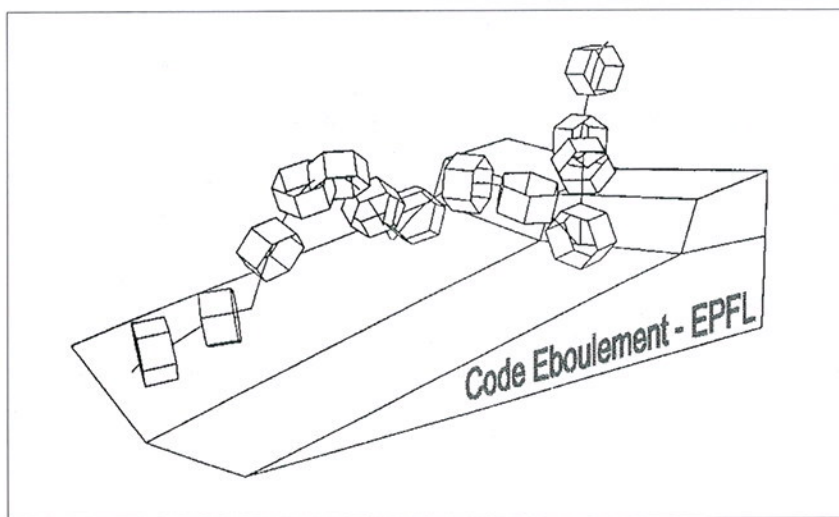
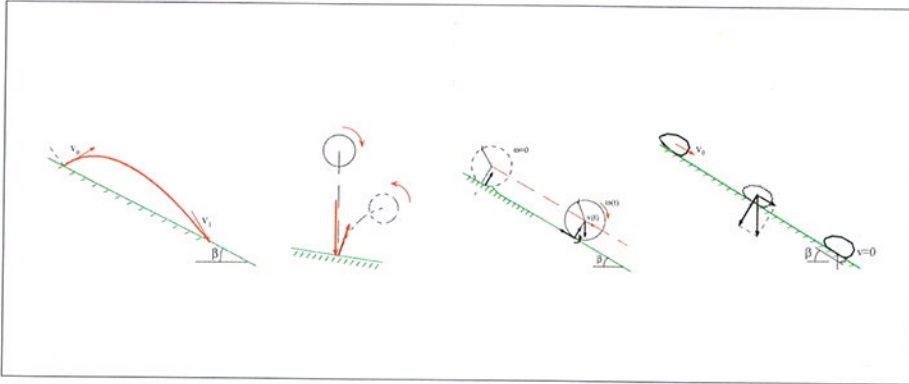
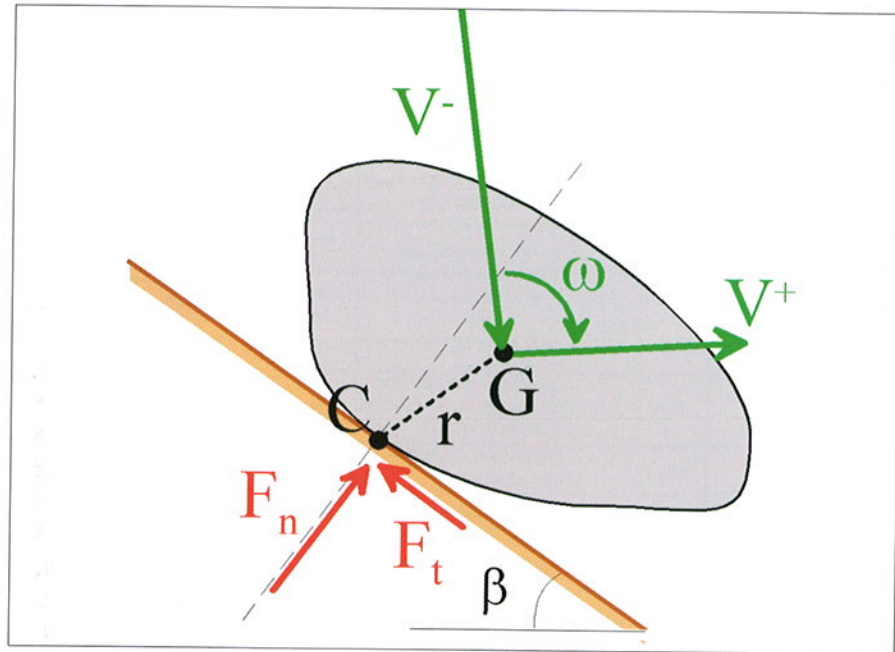


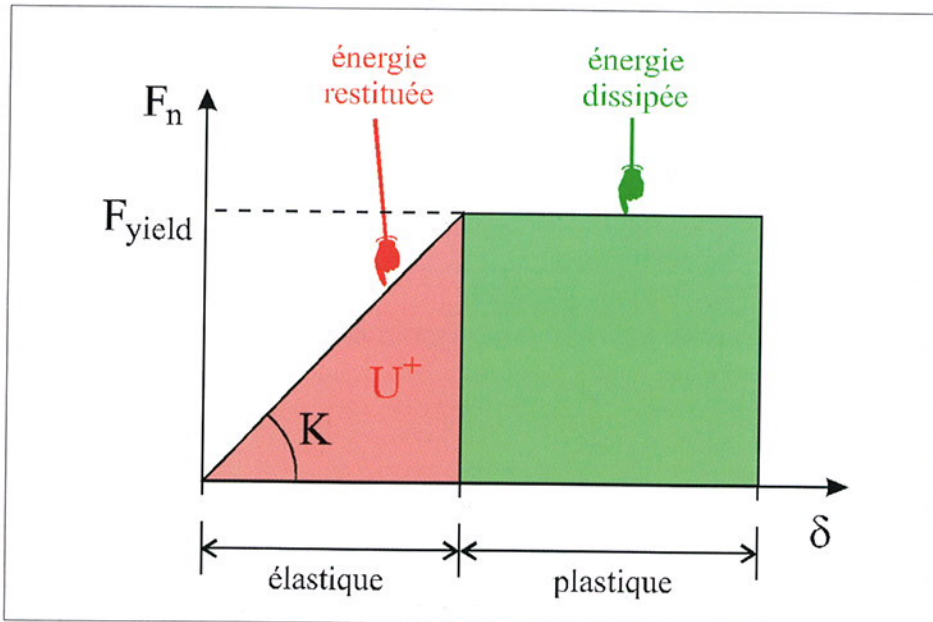
Fig. IV.3 : Modélisation tridimensionnelle de la chute d'un bloc rocheux.



**Fig. IV.4 :** Mécanismes de vol, de rebond, de roulement et de glissement.



**Fig. IV.5 :** Notations utilisées.



**Fig. IV.6 :** Plastification lors de l'impact.

Nom du logiciel	2D ou 3D	Méthode rigoureuse (1), point matériel (2), Méthode hybride (3), forme du bloc	Conditions initiales	Prise en compte de la rotation	Caractérisation des pertes d'énergie lors des rebonds	Type de calcul: probabiliste (1) ou déterministe (2)	Calage
PROPAG (CETE Lyon)	2D	(3) caractérisé par un élançement	Chute libre ou vitesse	Indirect.	Coeff. de restitution normal et tangentiel	(2) trajectoires extrêmes	A partir de cas réels
ADRGT	2D	(3) caractérisé par un coeff. d'angularité	Vitesse	Indirect.	-Coeff. de restitution normal et tangentiel -Coeff. de frottement -Possibilité de fractionnement	(1)	Sur modèle réduit et sur cas réels
EBOULEMENT (LMR-EPFL)	3D	(1) Ellipsoïde, parallélépipède, polyèdre	Chute libre ou vitesse	oui	-Coeff. de restitution normal et tangentiel -Coeff. de frottement -Seuil de plasticité du sol	(1)	A partir de cas réels

Tab. IV.1 : Principales caractéristiques des programmes CETE, ADRGT et EPFL.

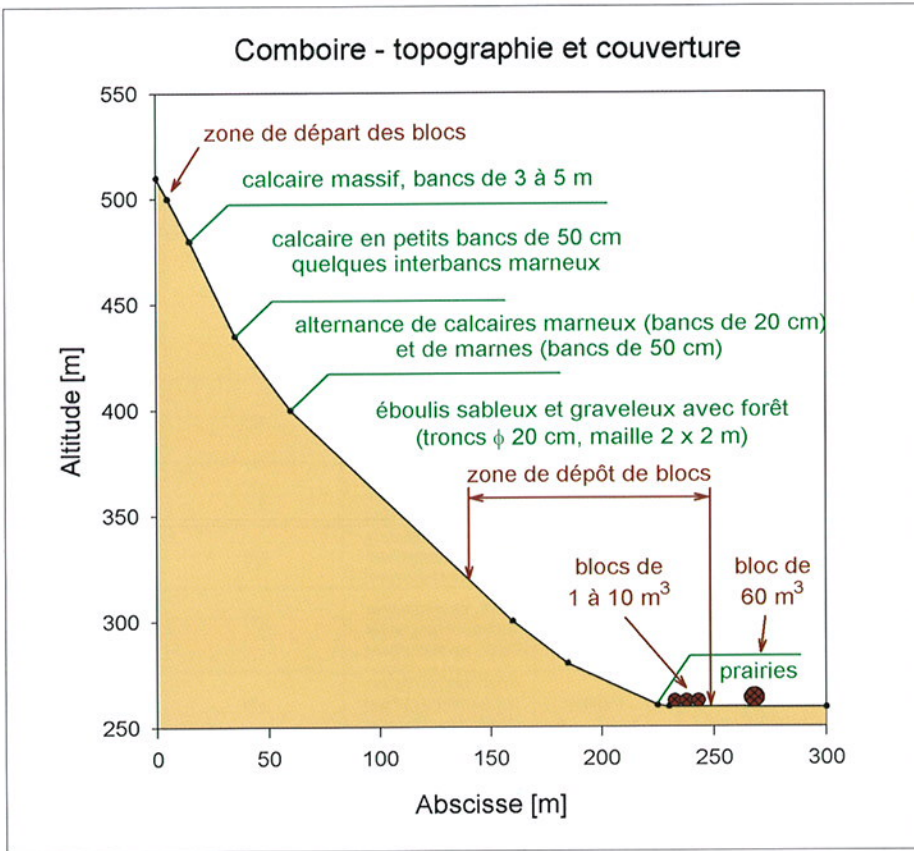
Paramètres affectant le rebond	CETE			ADRGT			EPFL			
	Prise en compte	Caractère aléatoire	Commentaire	Prise en compte	Caractère aléatoire	Commentaire	Prise en compte	Caractère aléatoire	Commentaire	
Paramètres liés au terrain	Résistance	Ind.	Non	Oui	Oui	Distinction sols rocheux/sols meubles.	Ind.	Oui	Coeff. de frottement $\mu$ , seuil de plasticité intégré dans C	
	Rigidité	Ind.	Non	Ind.	Oui	Prise en compte dans les types de terrains.	Ind.	Oui	Coeff. de restitution, raideur du terrain K intégrée dans C	
	Rugosité	Ind.	Non	Oui	Oui	Coefficient de dispersion	Oui	Oui	Intégré par le caractère aléatoire de l'inclinaison $\beta$	
	Inclinaison	Oui	Non	Sur base d'une topométrie fine dont les échelles varient du 1/200 au 1/2000	Oui	Oui	Caractère aléatoire de $\beta$	Oui	Oui	$\beta$
Paramètres liés au bloc	Résistance	Non	-	Pas de fractionnement du bloc possible	Oui	Non	Coefficient de fragilité : détermine si fragmentation	Non	-	Pas de fractionnement du bloc possible
	Rigidité	Non	-	Bloc infiniment rigide	Ind.	Non	Prise en compte dans le coefficient de fragilité	Non	-	Bloc infiniment rigide
	Poids	Ind.	Non	Pris en compte globalement dans la description de la couverture de sol	Oui	Oui	Fourchette de poids au départ, d'après la géométrie	Oui	Oui *	Poids déduit de la géométrie
	Dimensions	Ind.	Non		Oui	Oui	Fourchette de volume au départ	Oui	Oui *	Géométrie
	Géométrie	Oui	Non	Introduction de la notion d'élançement cinématique	Oui	Non	- Coefficient d'angularité - Coefficient de dispersion	Oui	-	Géométrie (ellipsoïde, parallélépipède, polyèdre)
Paramètres liés à la cinématique	Vitesse de translation	Oui	Non		Oui	Non		Oui	-	$V_n^-, V_i^-$
	Vitesse de rotation	Ind.	Non	Rotation prise en compte dans les phénomènes de rebond.	Ind.	Non	Rotation prise en compte dans les phénomènes de rebond.	Oui	-	$\omega$
	Angle d'impact	Oui	Non	Angle d'incidence et angle de réflexion	Oui	-		Oui	-	
	Configuration du bloc	Ind.	Non		Non	-		Oui	-	Géométrie
Remarques:	- = sans objet Ind. = indirectement.			- = sans objet Ind. = indirectement.			* Les dimensions du bloc demeurent inchangées tout au long d'une trajectoire, mais sont variées d'une trajectoire à l'autre			

Tab. IV.2 : Paramètres pris en compte dans la modélisation du rebond par les programmes CETE, ADRGT et EPFL.

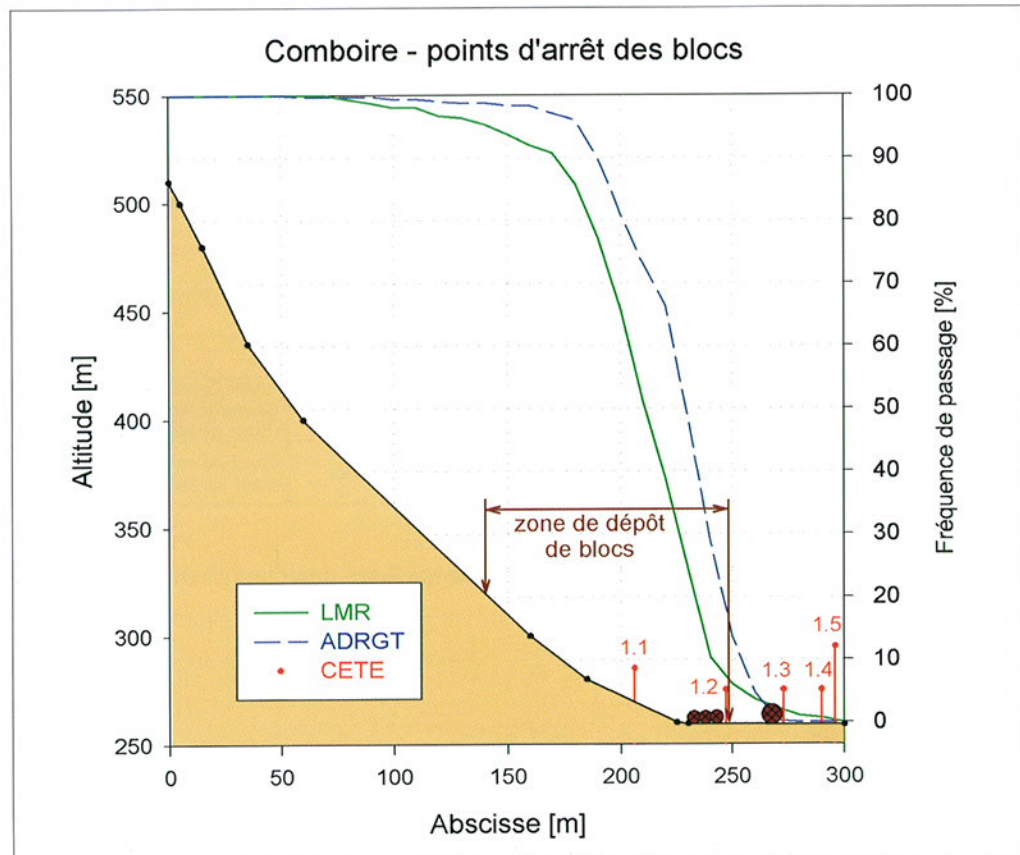
Nom du logiciel	2D ou 3D	Méthode rigoureuse (1), point matériel (2), Méthode hybride (3), forme du bloc	Conditions initiales	Prise en compte de la rotation	Caractérisation des pertes d'énergie lors des rebonds	Type de calcul: Probabiliste (1) ou déterministe (2)	Calage
Azzoni & De Freitas 1995 CADMA	2D	(3) -point matériel: simulation de la chute libre -corps rigide: simulation du choc, glissement et roulement Ellipsoïde	Chute libre ou vitesse	oui	-Coeff. de restitution énergétique -Coeff. de frottement	(1)	Essais sur modèle réduit et <i>in situ</i>
Bozzolo et al. 1988 SASS et MASSI	2D	(3) -point matériel: simulation de la chute libre -corps rigide: simulation du choc, glissement et roulement Ellipsoïde		oui	-Coeff. de restitution -Coeff. de frottement	(1)	Essais <i>in situ</i>
Falcetta 1985	2D	(1) Polyèdre	Vitesse	oui	- Coeff. de frottement - 4 coeff. d'impact - Déformation plastique du sol	(2)	A partir de cas réels
Faure et al. 1995 PIR 3D	3D	(2)	Vitesse	Indirect.	-Coeff. de restitution normal et tangentiel -Coeff. de frottement	(1)	
Guzzetti & Thibeault 2001 STONE	3D	(2)	Vitesse	Indirect.	-Coeff. de restitution normal et tangentiel -Coeff. de roulement	(2)	coeff. de restitution d'après la littérature
Hoek / Stevens 1998 RocFall 4.0	2D	(2)	Chute libre ou vitesse	Indirect.	-Coeff. de restitution normal et tangentiel -Coeff. de frottement	(1)	coeff. de restitution d'après la littérature et à partir de cas réels
Hung & Evans 1988	2D	(2)		Indirect.	-Coeff. de restitution normal et tangentiel -Coeff. de roulement	(1)	Essais en vraie grandeur et cas réels
Kobayashi et al. 1990	2D	(3) -point matériel: simulation de la chute libre -corps rigide: simulation du choc, glissement et roulement Sphère	Chute libre ou roulement	oui	-Coeff. de restitution normal et tangentiel -Coeff. de roulement	(1)	A partir de cas réels
Masuya & al. 1999	3D	(1) Sphère	Chute libre	oui	-Coeff. de restitution normal et tangentiel -Coeff. de frottement	(2)	
Paronuzzi & Artini 1999 Mobyrock	2D	(2)	Vitesse		Coeff. de restitution	(1)	
Pfeiffer & Bowen 1989 Jones et al. 2000 CRSP 4.0	2D	(3) -point matériel: simulation de la chute libre -corps rigide: simulation du choc, glissement et roulement Sphère, cube	Vitesse	oui	-Coeff. de restitution normal et tangentiel -Coeff. de frottement	(1)	A partir de cas réels
Piteau & Clayton 1978 Computer Rockfall Model	2D	(2)	Chute libre	non	Coeff. de restitution	(2)	
Ritchie 1963	2D	(2)	Chute libre	non			
Spang & Krauter 2001 Rockfall 6.0	2D	(1) Sphère, cylindre	Chute libre ou vitesse	oui	-Coeff. de restitution normal et tangentiel -Coeff. de frottement	(1)	
Zinggeler 1990	3D	(3)		oui	-Coeff. de restitution -Coeff. de frottement	(1) points de départ aléatoires	A partir de cas réels

Tab. IV.3 : Principales caractéristiques de quelques programmes trajectographiques existants.

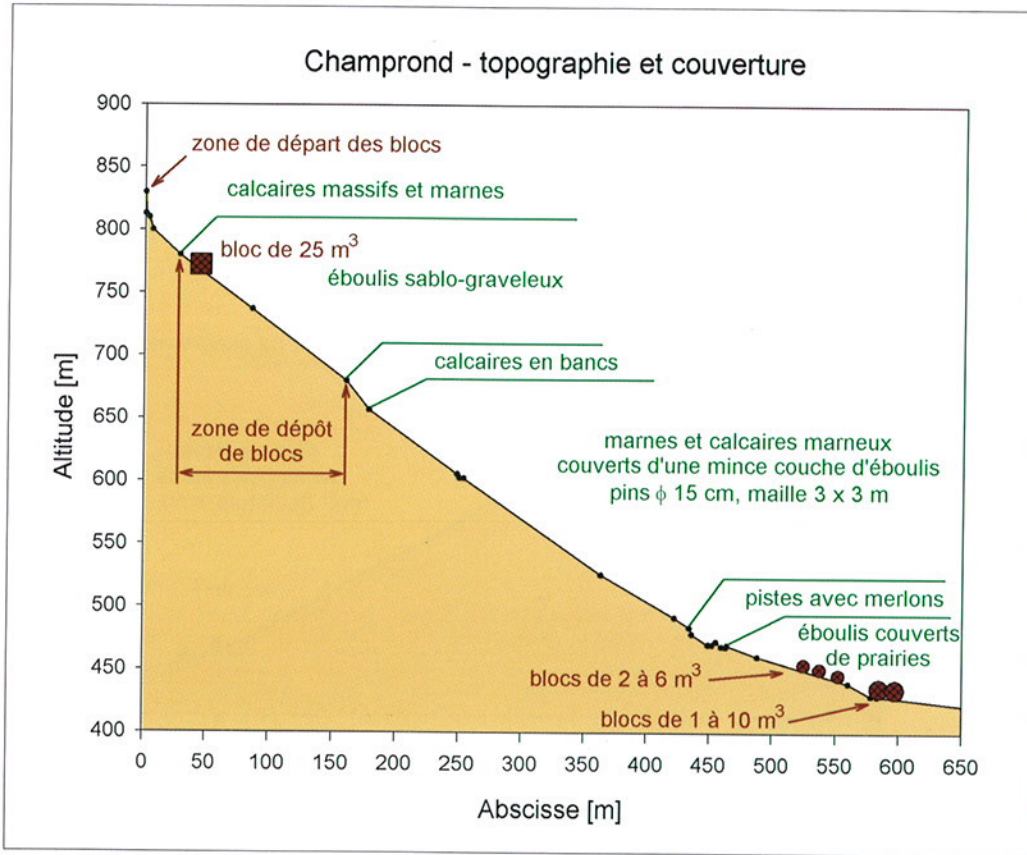




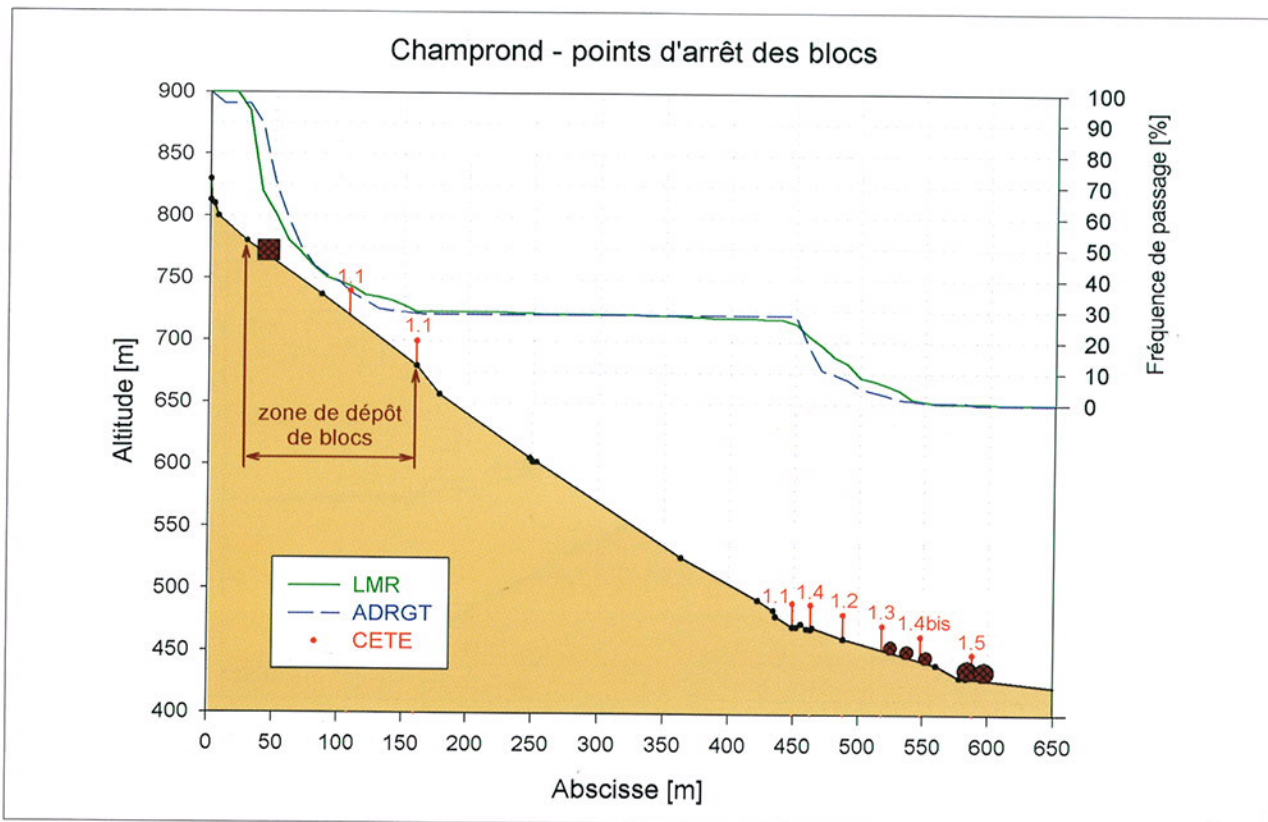
*Fig. IV.7 :* Topographie et couverture du site de Comboire.



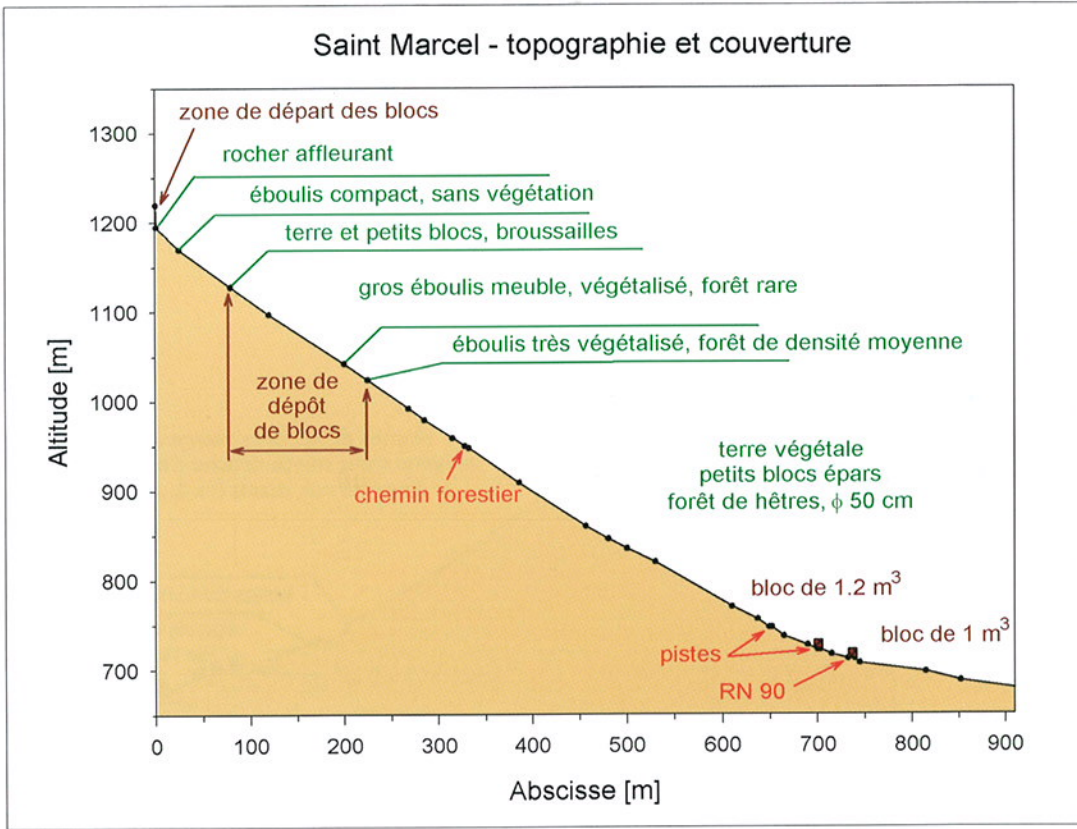
*Fig. IV.8 :* Comparaison des zones d'arrêt calculées sur le site de Comboire.



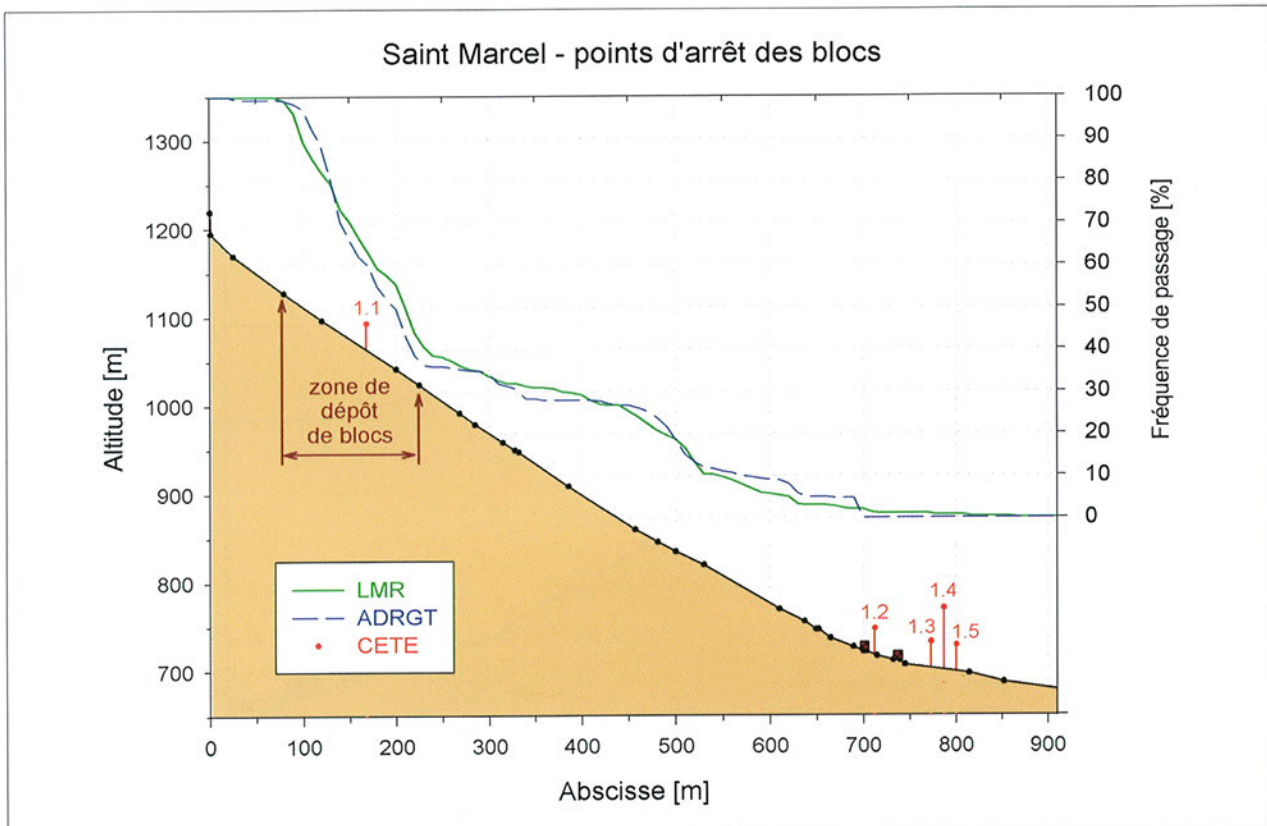
**Fig. IV.9 :**  
Topographie et  
couverture du site  
de Champrond.



**Fig. IV.10 :** Comparaison des zones d'arrêt calculées sur le site de Champrond.



**Fig. IV.11 :** Topographie et couverture du site de Saint-Marcel.

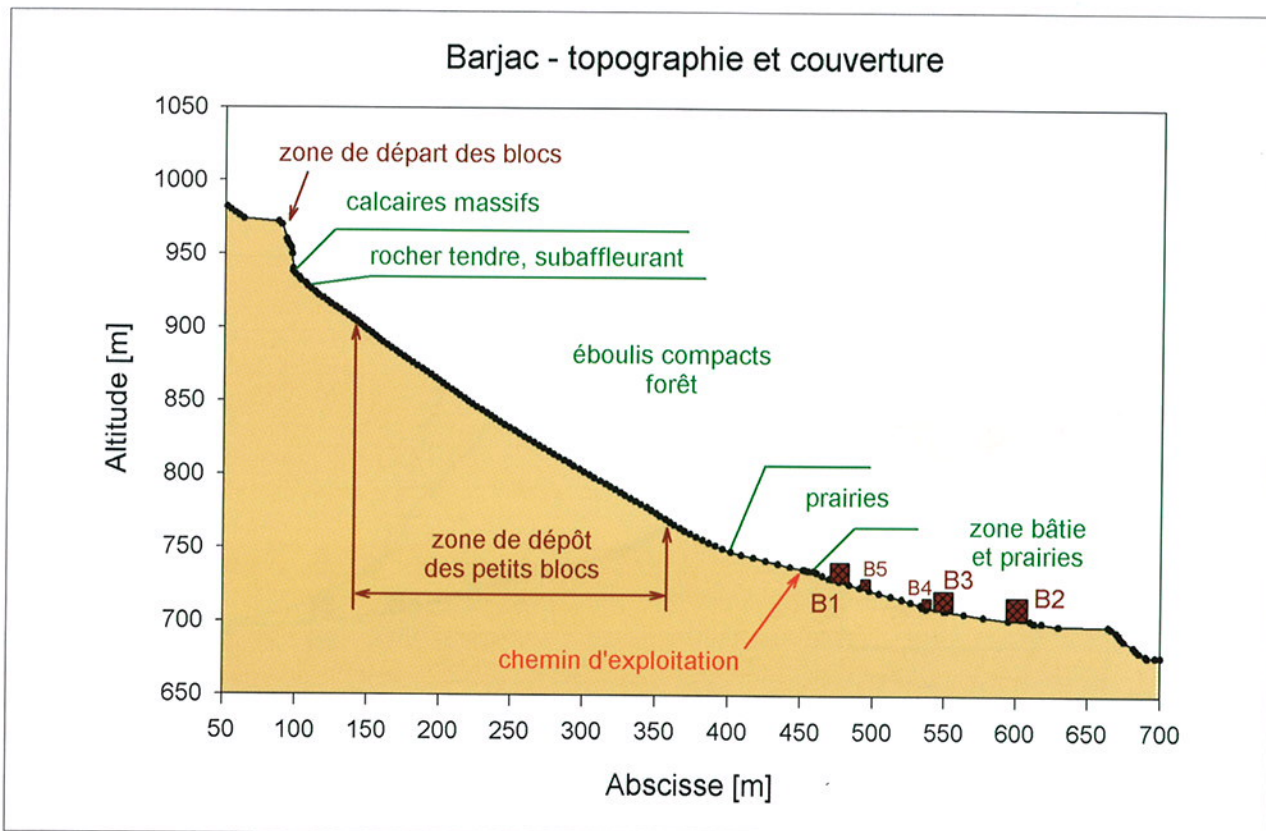


**Fig. IV.12 :** Comparaison des zones d'arrêt calculées sur le site de Saint-Marcel.

Observations du CETE		Résultats des calculs ADRGT		
Abscisse	Observation	Abscisse	Nombre de blocs	H <sub>max</sub> (m)
90 m	Arbre décapité à 2 m	79 m	298	3.0
95 m	Arbre décapité à 2.5 m	79 ou 120 m	264	2.9 - 3.0
275 m	Impact à 3 m de hauteur	268 ou 285 m	106	2.6 - 3.1
295 m	Impact à 3 m de hauteur	285 m	105	3.1
392 m	Impact à 2.5 m de hauteur	386 m	84	2.9
457 m	Impact à 1.5 m de hauteur	457 m	79	2.6

*Tab. IV.4 :* Comparaison des hauteurs de vol calculées par l'ADRGT à des traces d'impact relevées par le CETE sur le site de Saint-Marcel.

### Barjac - topographie et couverture



*Fig. IV.13 :* Topographie et couverture du site de Barjac.

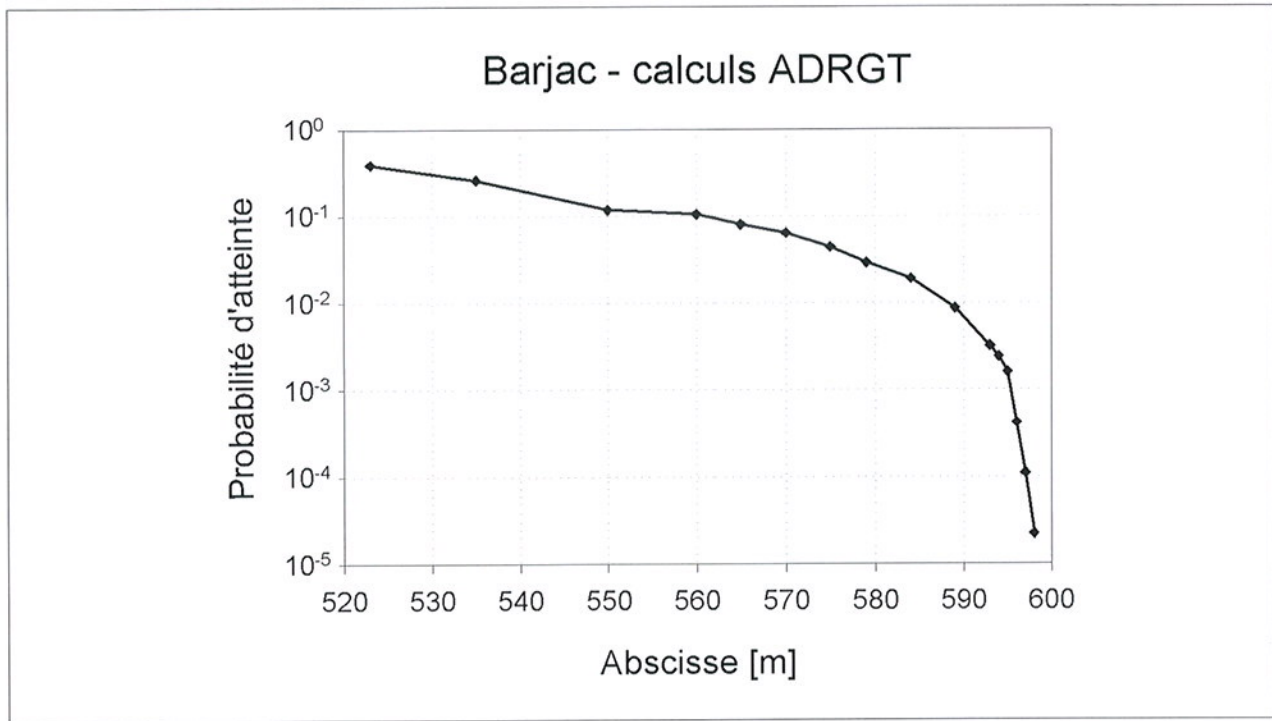


Fig. IV.14 : Abscisses limites estimées par l'ADRGT pour le site de Barjac.

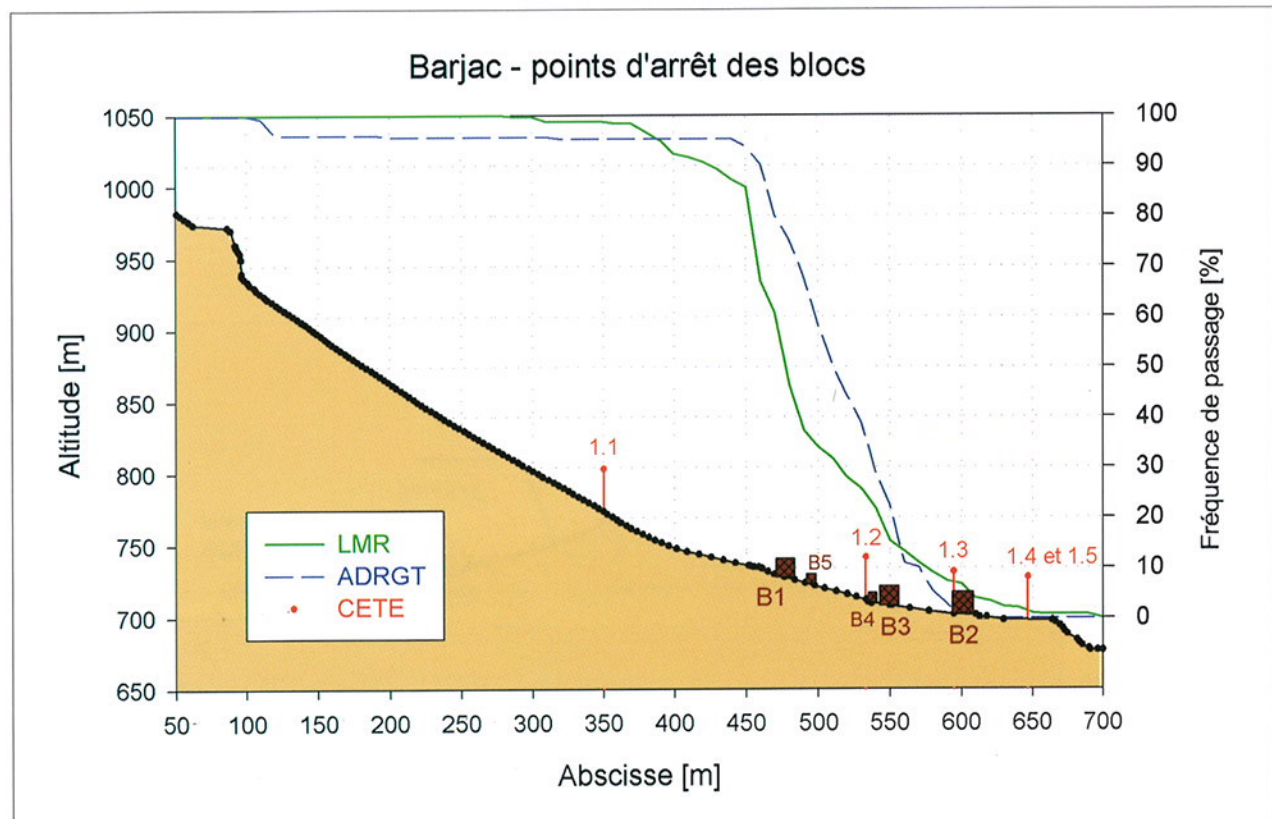


Fig. IV.15 : Comparaison des zones d'arrêt calculées sur le site de Barjac.

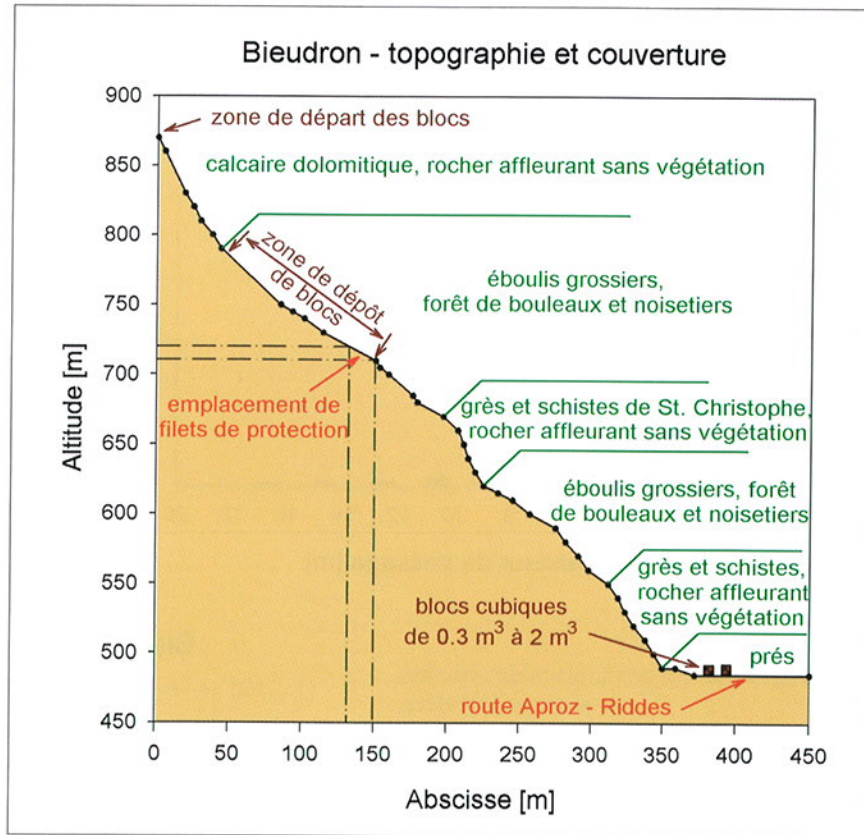


Fig. IV.16 : Topographie et couverture du site de Bieudron.

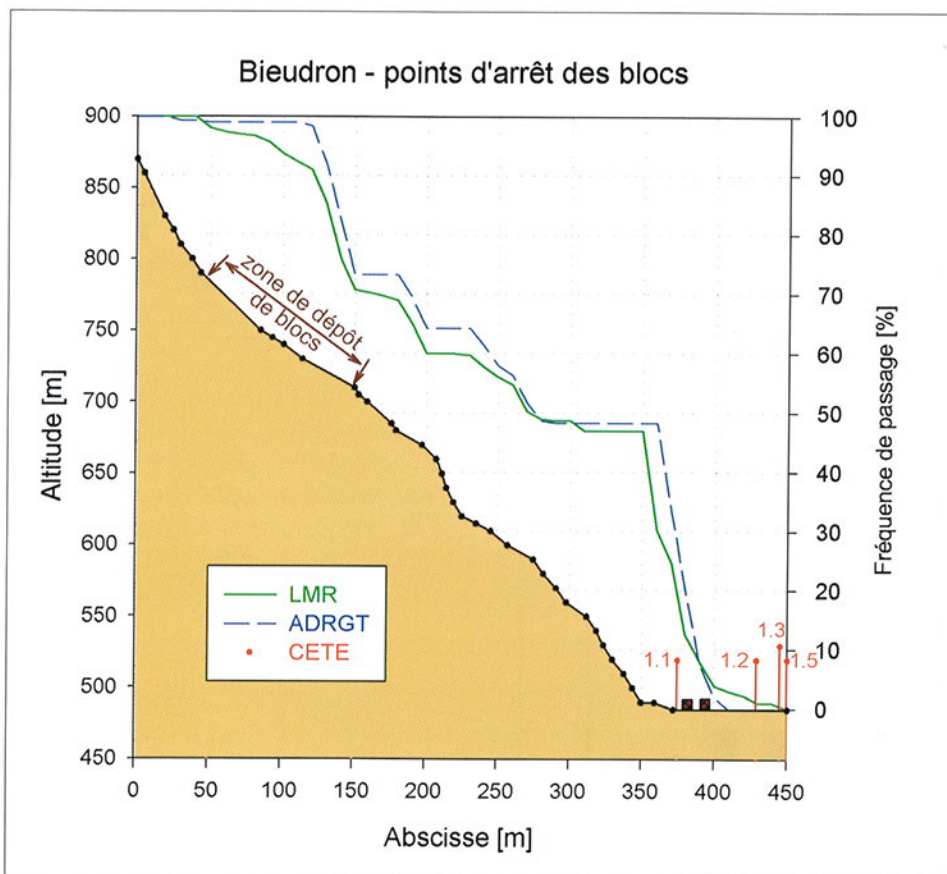


Fig. IV.17 : Comparaison des zones d'arrêt calculées sur le site de Bieudron.

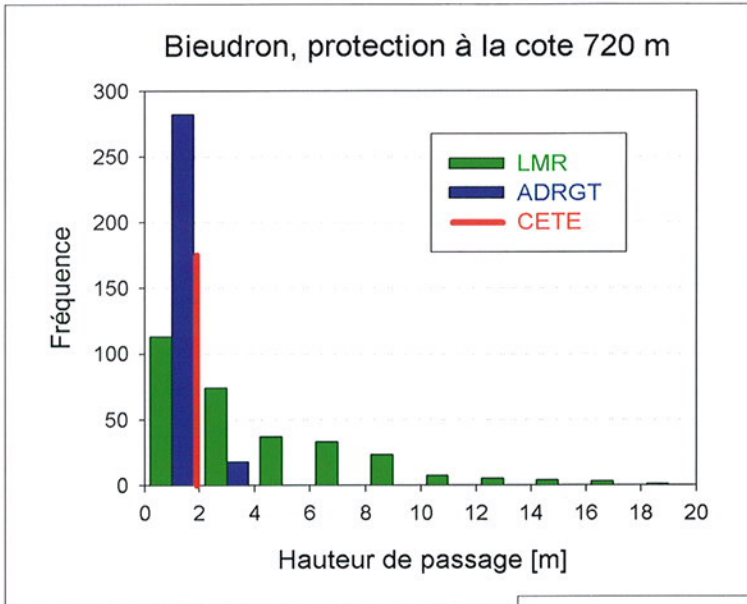


Fig. IV.18 : Comparaison des hauteurs de passage calculées.

Fig. IV.19 : Comparaison des vitesses de passage calculées.

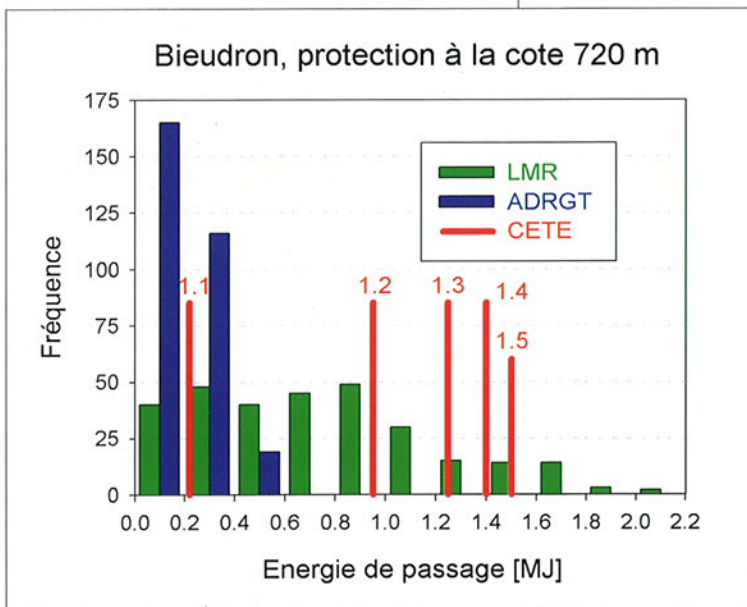
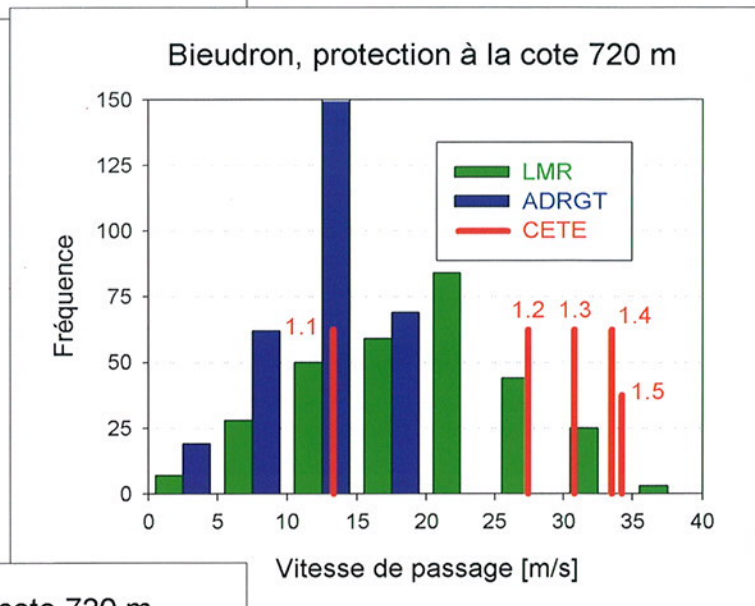
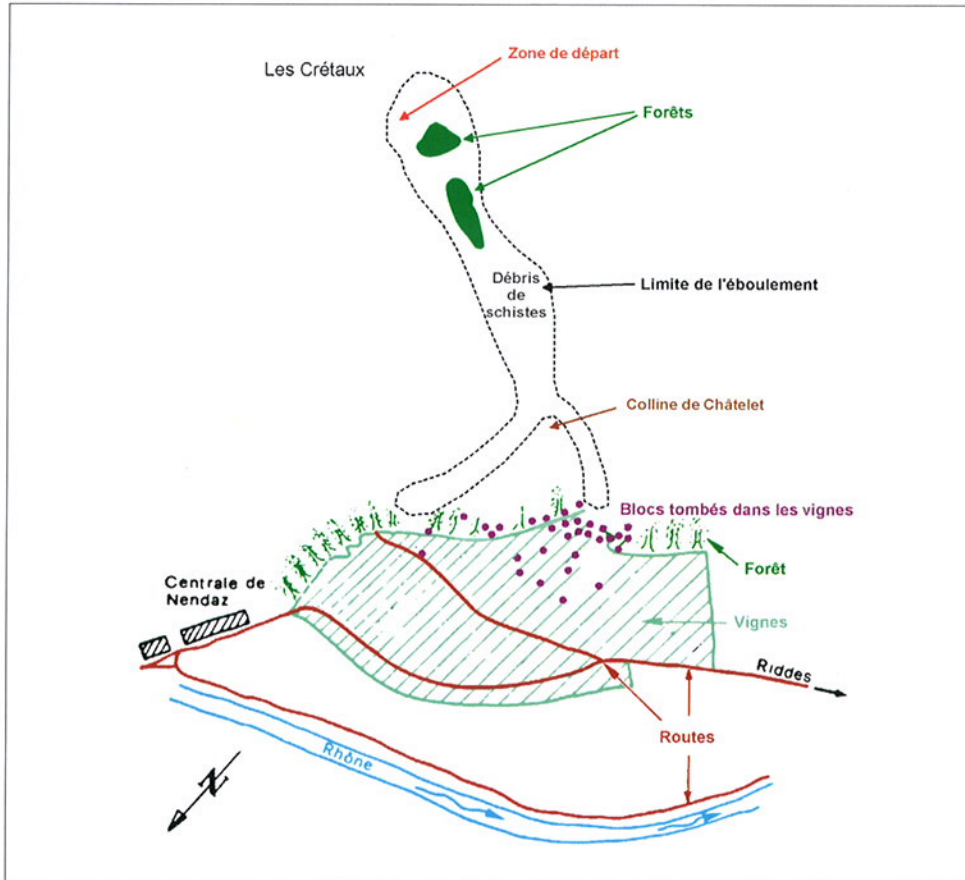


Fig. IV.20 : Comparaison des énergies cinétiques de passage calculées.



*Fig. IV.21 :*  
Carte géomorphologique  
du site des Crétaux.



*Fig. IV.22 :* Site des Crétaux.



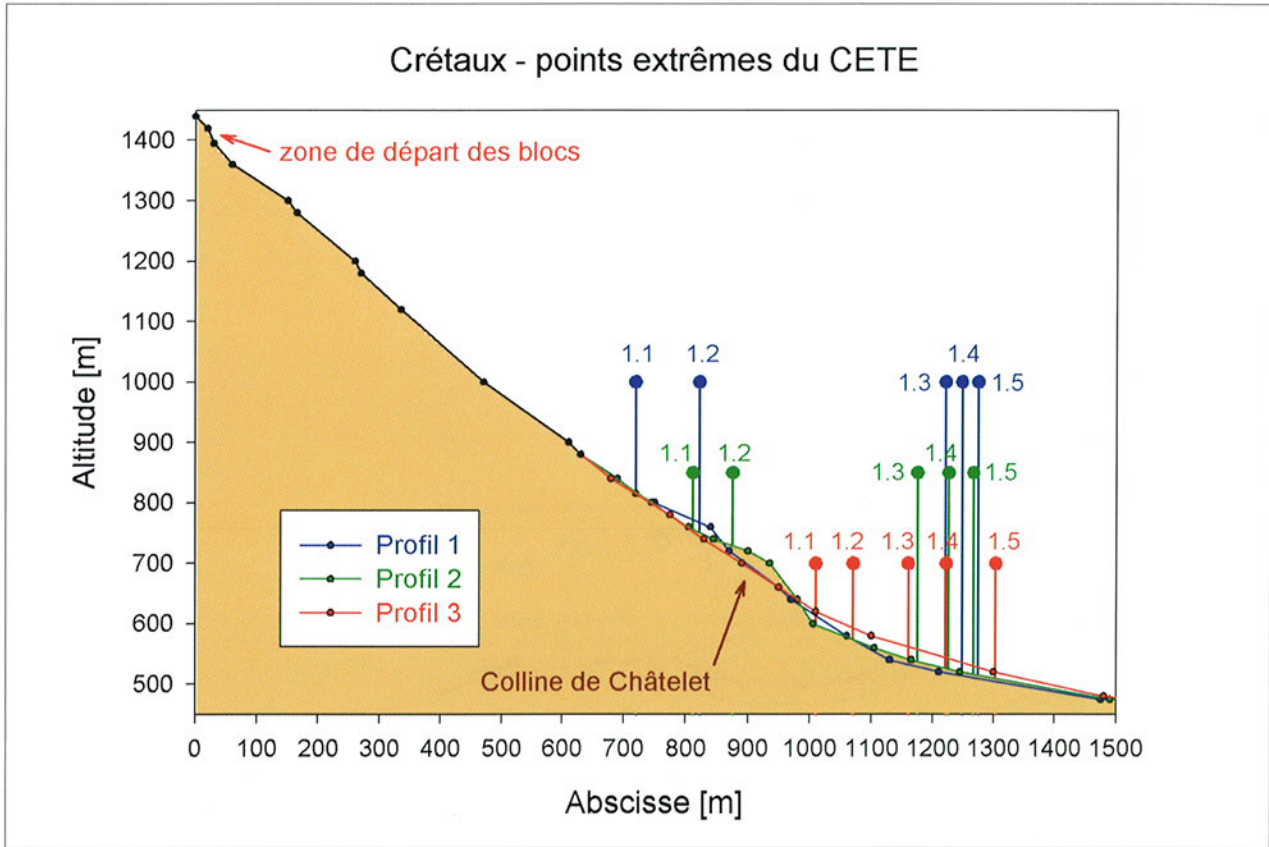


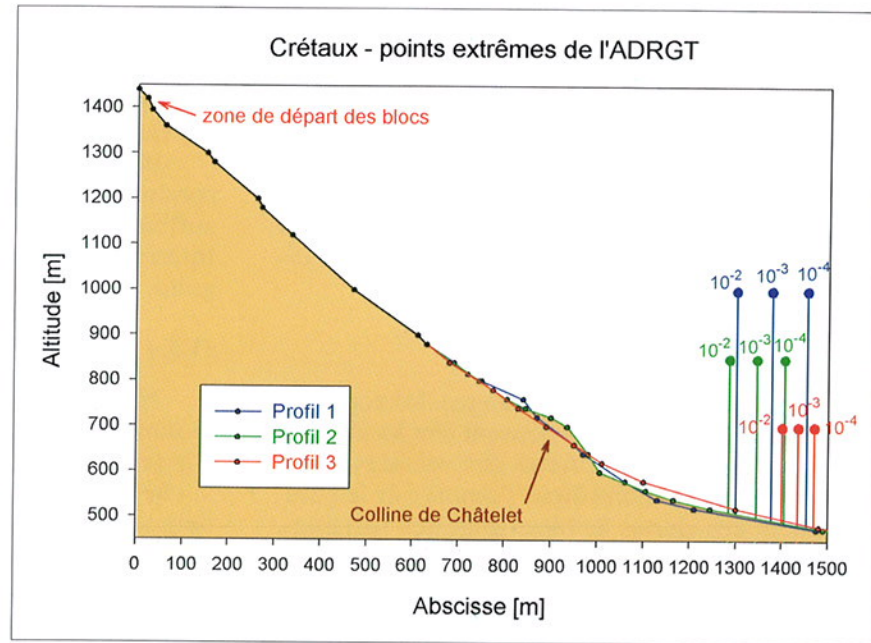
Fig. IV.23 : Points extrêmes calculés par le CETE sur le site des Crétaux (variante "terrain meuble" en bas de versant).

élançement	profil 1		profil 2		profil 3	
	TM	EM	TM	EM	TM	EM
1.1	x=720 z=815	x=720 z=815	x=812 z=756	non étudié	x=1010 z=620	non étudié
1.2	x=823 z=768	x=823 z=768	x=876 z=729	x=876 z=729	x=1071 z=593	x=1119 z=574
1.3	x=1221 z=518	x=1247 z=514	x=1175 z=537	x=1243 z=520	x=1160 z=562	x=1254 z=534
1.4	x=1248 z=513	x=1293 z=506	x=1226 z=525	x=1301 z=510	x=1222 z=543	x=1348 z=509
1.5	x=1274 z=509	x=1330 z=500	x=1267 z=516	x=1348 z=501	x=1304 z=519	x=1408 z=496

Tab. IV.5 : Résultats du CETE sur le site des Crétaux.

TM : terrain meuble en bas de versant (Fig. IV.23) ; EM : éboulis meuble en bas de versant.

Fig. IV.24 : Points extrêmes calculés par l'ADRGT sur le site des Crétaux.



	profil 1	profil 2	profil 3
$X_{lim}$	1130 m	1000 m	1100 m
Probabilité d'atteinte de $X_{lim}$	61%	59.5%	40.3%
Abscisse pour $P = 10^{-2}$	1300 m	1285 m	1400 m
Abscisse pour $P = 10^{-3}$	1377 m	1345 m (extrapolation)	1435 m (extrapolation)
Abscisse pour $P = 10^{-4}$	1454 m (extrapolation)	1405 m (extrapolation)	1470 m (extrapolation)

Tab. IV.6 : Résultats de l'ADRGT sur le site des Crétaux.

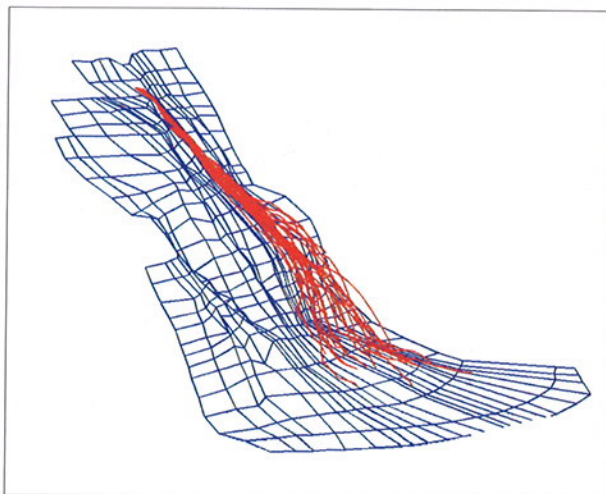


Fig. IV.25 : 50 des 300 trajectoires calculées par le LMR sur le site des Crétaux.

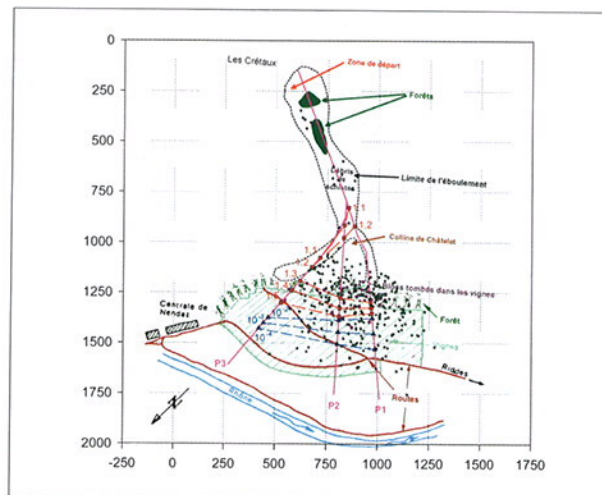


Fig. IV.26 : Comparaison des zones d'arrêt calculées sur le site des Crétaux.

#### IV.5. LOGICIEL STONE

Un logiciel pour la simulation tri-dimensionnelle des chutes de blocs (CNR-IRPI Perugia, Università di Firenze, Università di Milano Bicocca)

Tout à fait indépendamment des travaux de comparaison menés par le CETE, l'ADRGT et le LMR, un logiciel a été développé au cours du projet Interreg. Une présentation en est faite ci-après.

##### IV.5.1. Introduction

Dans les territoires de montagne, les zones sujettes à des chutes de blocs peuvent être localement très étendues et les propriétés des versants et des amas rocheux qui contrôlent l'amorce et le comportement des chutes de blocs sont très variables. Également pour ces raisons, la prévision exacte des trajectoires de chute, des zones d'invasion et des vitesses de chute reste indubitablement difficile. Dans cet ouvrage, nous décrivons les résultats préliminaires du développement du programme de calcul STONE projeté pour essayer de définir les conditions de dangerosité et de risque de chute de blocs à l'échelle régionale et locale.

Le logiciel STONE simule, en trois dimensions, la trajectoire de chute d'un bloc le long d'une pente. Le logiciel est écrit en langage ANSI C et a été projeté pour utiliser des données d'entrée extraites d'informations thématiques disponibles aussi sur de vastes territoires ou qui peuvent être acquises par des cartes géologiques, géo-morphologiques et d'utilisation des sols ou bien à travers des analyses géologico-morphologiques rapides. L'objectif du programme est de fournir des informations distribuées dans l'espace (cartes) utiles pour définir les conditions de dangerosité et de risque de chute de blocs à l'échelle régionale et locale.

##### IV.5.2. Dati di ingresso al programma

STONE richiede i seguenti dati di input:

- Un DTM per rappresentare la topografia;
- Una griglia (una mappa *raster*) con la localizzazione delle celle di partenze, ovvero le celle dalle quali possono generarsi le cadute massi. Nella griglia le celle che indicano aree sorgenti sono rappresentate da numeri interi pari a 1. Nella stessa griglia possono essere presenti valori pari a 2, ad indicare celle nelle quali la traiettoria di caduta dei massi deve, per qualunque motivo, arrestarsi. Possono ad esempio rappresentare valli, fiumi, od aree protette da altre strutture di difesa.
- Due griglie che riportano rispettivamente i valori dei coefficienti di restituzione normale e tangenziale dell'energia. Sono utilizzati per simulare la dissipazione dell'energia all'urto.
- Una griglia che riporta il coefficiente di attrito dinamico al rotolamento, utilizzato per calcolare la perdita di velocità dovuta all'attrito durante le fasi di rotolamento.

Per convenienza le 5 griglie sono fornite al programma STONE in formato testo, come file ASCII, nel formato Gridascii utilizzato da sistemi informativi geografici quali ArcInfo, od ArcView®.

#### IV.5. PROGRAMMA STONE

Un programma per la simulazione tridimensionale delle massi (CNR-IRPI Perugia, Università di Firenze, Università di Milano Bicocca)

In modo indipendente dai lavori di confronto condotti dal CETE, dall'ADRGT ed dal LMR, un software è stato elaborato durante il progetto Interreg. Ne viene fatta una presentazione di seguito.

##### IV.5.1 Introduzione

Nei territori montani le zone soggette a cadute massi possono essere localmente molto estese, e le proprietà dei versanti e degli ammassi rocciosi che controllano l'innescio ed il comportamento delle cadute massi assai variabili. Anche per questi motivi la previsione accurata delle traiettorie di caduta, delle aree di invasione e delle velocità di caduta è indubbiamente difficile. In questo lavoro descriviamo i risultati preliminari dello sviluppo del programma di calcolo STONE, progettato per contribuire a definire le condizioni di pericolosità e di rischio da caduta di massi a scala regionale e locale.

Il programma STONE simula in tre dimensioni la traiettoria di caduta di un masso lungo un pendio. Il programma, scritto in linguaggio ANSI C, è stato progettato per utilizzare dati di ingresso ricavati da informazioni tematiche disponibili anche per territori vasti, o che possono essere acquisiti da carte geologiche, geomorfologiche e di uso del suolo, od attraverso analisi geologico-morfologiche spedite. L'obiettivo del programma è quello di produrre informazioni spazialmente distribuite (mappe) utili per la definizione delle condizioni di pericolosità e di rischio di caduta massi a scala regionale e locale.

### IV.5.3. Modellazione cinematica

STONE utilizza per la modellazione l'approccio del "punto materiale". Il masso è considerato dimensionale con la massa concentrata in un punto (il centro di massa). La dimensione, la forma e la massa del blocco non vengono prese in considerazione e la modellazione è di tipo cinematico. Il vantaggio dell'approccio del "punto materiale" risiede principalmente nella sua semplicità e velocità di calcolo. Prendere in considerazione la massa, la forma e la dimensione del blocco permetterebbe una modellazione dinamica ma introdurrebbe incertezze (particolarmente a causa dell'irregolarità geometrica del blocco) e richiederebbe tempi di calcolo più lunghi. Introdurrebbe anche una variabilità nei risultati difficilmente controllabile e che renderebbe difficile analizzare la pericolosità dovuta alla caduta massi a scala di bacino.

La traiettoria di caduta è calcolata da STONE automaticamente a partire dal DTM, senza nessun intervento da parte dell'operatore. La traiettoria dipende solo dal punto di partenza, dalla topografia, e dai coefficienti utilizzati per simulare la perdita di velocità all'impatto o dove il blocco rotola (Ritchie, 1963; Broili, 1973; Piteau e Clayton, 1976; Hoek, 1987). Per descrivere la topografia, la rappresentazione del terreno basata su punti quotati regolarmente distribuiti (il DTM) viene suddivisa da STONE in triangoli regolari che, nel loro insieme, costituiscono un *Terrain Regular Network* (TRN). I triangoli sono piani e di due tipi: il primo tipo (triangolo superiore) è costruito utilizzando i punti in alto a sinistra, in alto a destra ed in basso a destra di ogni cella del DTM; il secondo tipo (triangolo inferiore) è costruito utilizzando i punti in alto a sinistra, in basso a sinistra ed in basso a destra del DTM. Il vantaggio dell'utilizzo di un TRN, ossia di una rappresentazione vettoriale della topografia basata su triangoli regolari, può essere così riassunta:

- I triangoli massimizzano l'informazione topografica contenuta nel DTM permettendo di seguire la traiettoria di un masso in modo dettagliato anche all'interno di una cella del DTM, e consentendo una maggior risoluzione spaziale rispetto all'originale DTM.
- I triangoli (piani) che descrivono la topografia sono semplici da calcolare e vengono generati da STONE solo dove questi sono necessari (ossia dove la traiettoria di un masso interseca o "vola" sopra ad un triangolo), rendendo il calcolo più veloce. Lo svantaggio risiede nel fatto che alcuni triangoli possono essere calcolati più volte, in particolare dove le traiettorie di caduta provenienti da diverse celle di partenza intersecano la stessa cella del DTM.

Per calcolare la traiettoria di caduta di un masso STONE utilizza un sistema di coordinate locali cartesiane. Gli assi x ed y del sistema locale giacciono sul triangolo locale, con l'asse delle x che punta a destra per i triangoli del tipo 1, ed a sinistra per i triangoli di tipo 2, l'asse y punta verso monte per i triangoli di tipo 1 e verso valle per i triangoli di tipo 2. L'asse z è perpendicolare ai precedenti ed al triangolo locale e punta sempre verso l'alto. L'utilizzo del sistema di coordinate locali semplifica i calcoli e li rende più veloci. Sono state sviluppate trasformazioni per passare dal sistema di coordinate locali alle coordinate geografiche e viceversa.

STONE è in grado di modellare tre dei quattro "stati" che una caduta massi può assumere: la caduta libera, il rimbalzo ed il rotolio. Lo scivolamento non è contemplato in quanto rappresenta una parte normalmente assai limitata (trascurabile) di una caduta massi. Partendo da una "cella sorgente" STONE lancia un masso orizzontalmente al di fuori della cella stessa con una velocità definita dall'utente (normalmente compresa fra 0.5 e 3 m·sec<sup>-1</sup>). Dopo la partenza (orizzontale) il blocco, guidato dalla gravità, segue una traiettoria parabolica (volo libero) fino a quando non impatta con il terreno. Per semplicità l'attrito con l'aria non viene preso in considerazione. Il punto di impatto viene determinato confrontando la quota (z) del masso con la quota del triangolo locale alle stesse coordinate planimetriche (x ed y). Se il blocco vola oltre il bordo del triangolo locale viene identificato e calcolato un nuovo triangolo. Un algoritmo specifico stabilisce quale lato del triangolo locale viene attraversato e sceglie la cella del DTM opportuna per calcolare il nuovo triangolo.

Quando il punto di impatto è stato definito, vengono calcolate la nuova direzione della traiettoria e le componenti locali della velocità. La direzione di fuga del blocco è ottenuta riflettendo la direzione di impatto, ossia l'angolo di uscita è considerato uguale ed opposto all'angolo di impatto. Per simulare la perdita di energia al punto di impatto, le componenti della velocità d'impatto vengono moltiplicate per i coefficienti di restituzione tangenziale (per le componenti planimetriche) e normale (per la componente normale). Le componenti tangenziali e normali vengono trattate separatamente da STONE. Ciò permette una simulazione migliore e più flessibile del processo di caduta (Piteau e Clayton, 1976; Hoek, 1987). Definita la direzione e la velocità di fuga il blocco inizia un nuovo tratto a volo libero (una nuova parabola) e viene ricavata una nuova intersezione, ossia un nuovo punto d'impatto.

STONE simula il rotolamento del masso su di una superficie piana (il triangolo locale) utilizzando un approccio semplice. La perdita di energia dovuta all'attrito dinamico è modellato attraverso una forza che

agisce contro la componente della gravità sul piano. Le coordinate delle traiettoria del blocco durante il rotolamento vengono calcolate per iterazioni successive, introducendo ad ogni passo la forza di attrito. Quest'ultima agisce lungo la direzione di moto ma ha verso opposto e dipende dal valore locale dall'angolo di attrito dinamico.

Siccome la traiettoria di caduta di un masso è costituita dall'unione di tratti in caduta libera, di impatti e di rotolii, sono state definite delle regole (condizioni) per passare da uno stato all'altro. Alcune delle transizioni sono semplici ed intuitive, altre richiedono decisioni da parte dell'utente. La transizione fra caduta libera ed impatto è ovvia: avviene là dove il blocco impatta (la traiettoria interseca) la superficie topografica. Dopo l'impatto il masso è forzato a "volare", a meno che la velocità del masso non sia inferiore alla velocità minima definita dall'utente (nel qual caso il masso è arrestato e la traiettoria conclusa), o la lunghezza del segmento di volo sia inferiore ad un valore di soglia definito dall'utente (generalmente compresa fra 0,1 e 2 metri, in funzione della dimensione del masso e delle irregolarità della topografia), nel qual caso il masso è assunto rotolare.

La transizione opposta, da rotolamento a volo, è controllata dalla topografia locale. Un masso che inizia a rotolare all'interno di un triangolo locale (piano) continuerà a rotolare fino a quando la velocità scende sotto il valore di soglia (ed il masso si ferma) od il masso raggiunge uno dei lati del triangolo. In questo caso la quota del masso è confrontata con la topografia nel nuovo triangolo per stabilire se il masso deve continuare a rotolare o deve iniziare a "volare" lungo una nuova parabola. Un caso particolare si ha quando il masso rotolando fuori da un triangolo locale colpisce un triangolo molto acclive (nella direzione del moto). In questo caso STONE assimila la condizione a quella di un impatto.

#### IV.5.4. Prodotti

STONE produce uscite (output) sia in formato *raster* che in formato vettoriale. Gli output *raster* sono costituiti da:

- Una matrice dei contatori delle traiettorie (Fig. IV.27). Per ogni cella del DTM viene contato il numero di traiettorie di caduta che vi transitano. Più è elevato il valore del contatore, maggiore è la probabilità che un masso transiti e quindi, a parità di altre condizioni, maggiore è la pericolosità.
- Una matrice della velocità massima (Fig. IV.28). Per ogni cella del DTM viene riportata la velocità massima fra tutte quelle calcolate nelle diverse traiettorie di caduta che transitano per la cella. Velocità elevate indicano grande energia cinetica e potenziale, e, di conseguenza, una più elevata pericolosità.
- Una matrice della massima quota di volo (Fig. IV.29). Per ogni cella del DTM viene calcolato il valore massimo (in metri) della distanza da terra di tutte le traiettorie di caduta che transitano per la cella. La matrice fornisce informazioni utili per la pianificazione di opere di difesa.

Gli output vettoriali sono costituiti da un file in formato ASCII contenente informazioni vettoriali sulle traiettorie tridimensionali di caduta. In particolare il file contiene le coordinate dei punti ed i valori di velocità e di altezza da terra di ciascun punto lungo le traiettorie di caduta.

#### IV.5.5. Definizione delle condizioni di pericolosità

Le cartografie in formato *raster* prodotte dal programma STONE forniscono utili informazioni per la stima della pericolosità connessa alla caduta di massi.

La carta dei contatori delle traiettorie riporta il numero di traiettorie di caduta transitate attraverso ciascuna

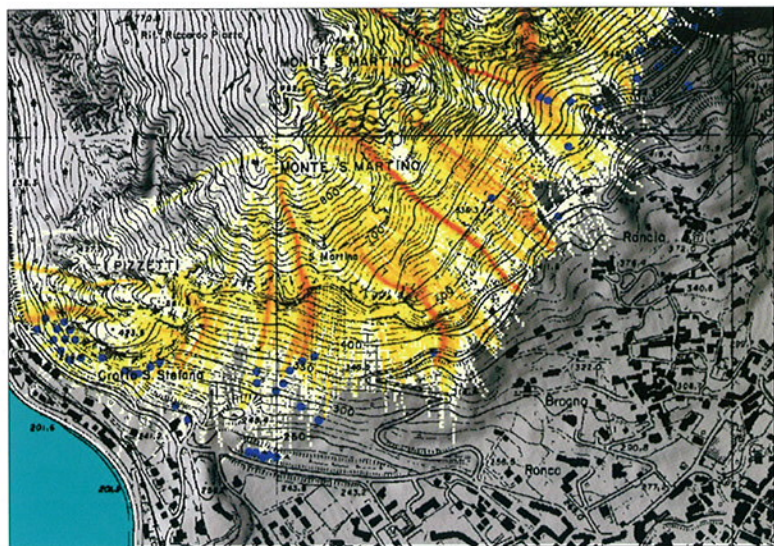
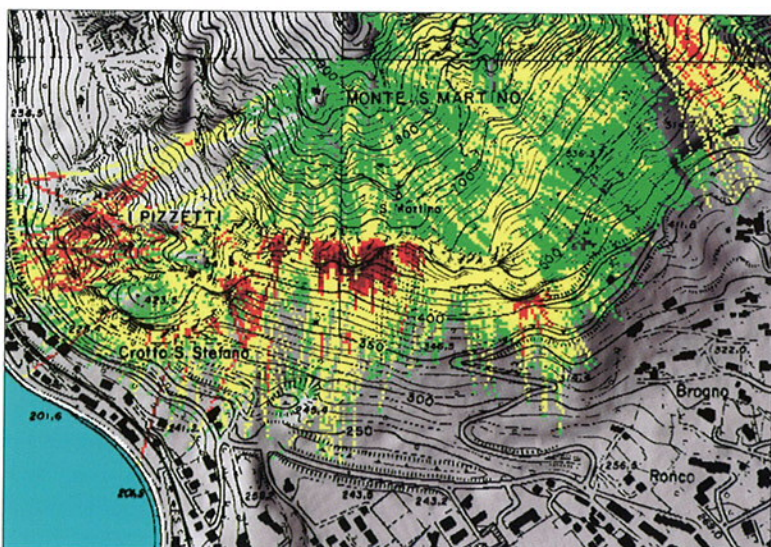
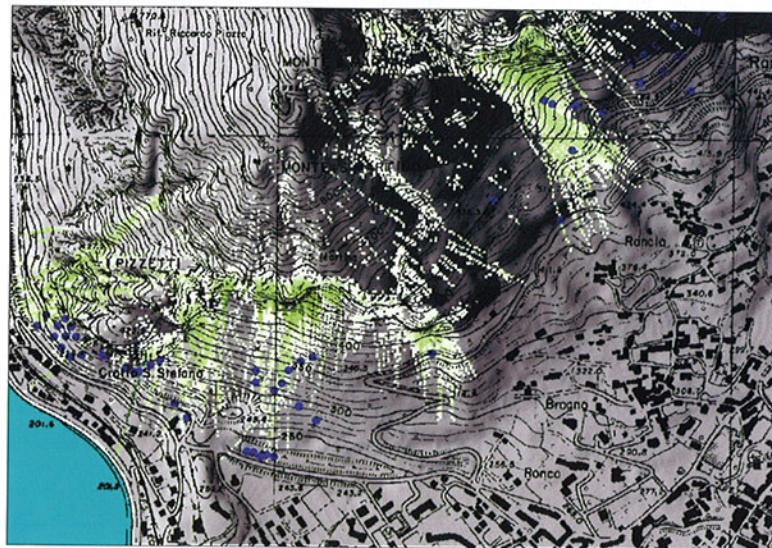
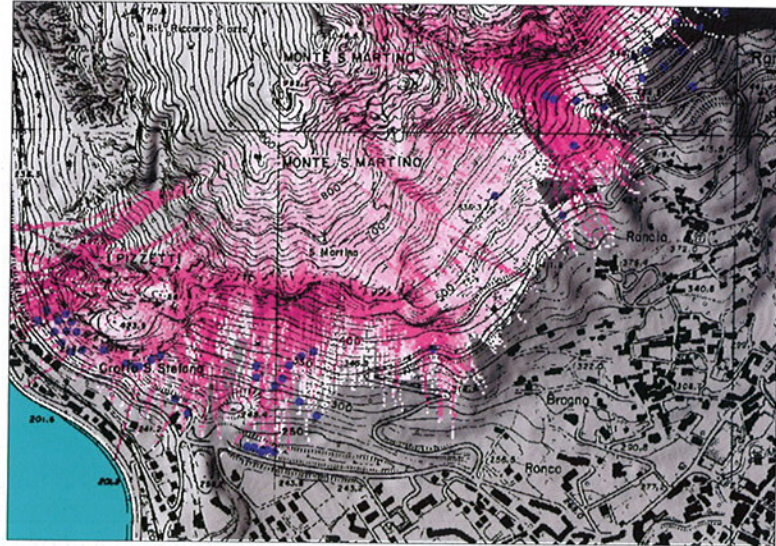


Fig. IV.27: Monte San Martino, Lecco. Carta del numero di traiettorie di caduta. I toni chiari indicano un basso numero di traiettorie, i toni scuri un elevato numero di traiettorie. I punti blu indicano i crolli già avvenuti.

**Fig. IV.28:** Monte San Martino, Lecco. Carta della massima velocità registrata lungo le traiettorie di caduta. I toni chiari indicano velocità basse, i toni scuri velocità molto elevate. I punti blu indicano i crolli già avvenuti.

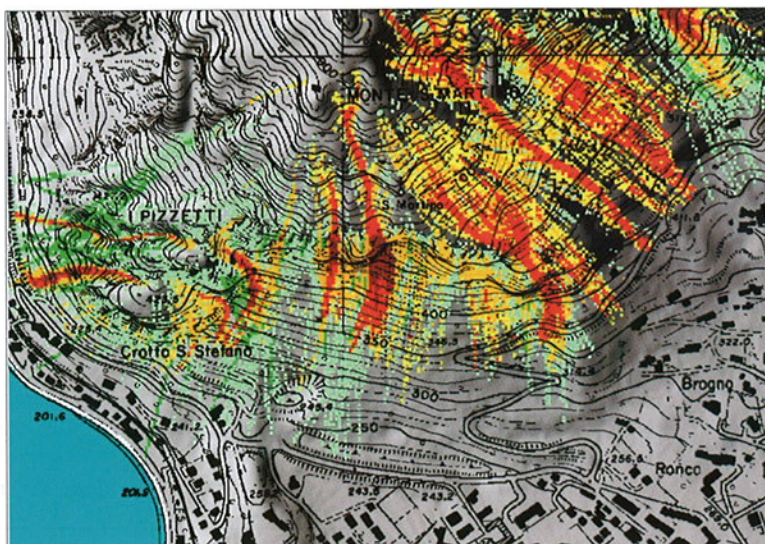
cella del DTM (Fig. IV.27). Se si assume che le celle di partenza delle cadute di massi (celle sorgenti) abbiano tutte la stessa probabilità di dare origine a crolli, la carta dei contatori delle traiettorie rappresenta una stima della probabilità che un crollo attraversi ciascuna delle celle del DTM. Per ciascuna cella, più è alto il valore del contatore, maggiore è il numero di traiettorie che transitano e, di conseguenza, più elevate sono le condizioni di pericolo. Le carte delle massime velocità (Fig. IV.28) e delle massime altezze di volo (Fig. IV.29) forniscono informazioni sulla cinematica delle traiettorie. Più è elevata la velocità, maggiori sono l'energia e l'altezza di caduta del masso e, di conseguenza, maggiore è la pericolosità. Traiettorie di volo molto alte rispetto al suolo sono difficili da arrestare con misure di salvaguardia passive (barriere, valli, ecc.) e quindi sono particolarmente pericolose. Nella stima della pericolosità dovuta alla caduta di massi la carta dei contatori fornisce informazioni sulla frequenza degli eventi, mentre la velocità e l'altezza di caduta massime forniscono informazioni sull'intensità dell'evento.



**Fig. IV.29:** Monte San Martino, Lecco. Carta della massima altezza da terra registrata lungo le traiettorie di caduta. I toni chiari indicano altezze modeste, i toni scuri altezze elevate. I punti blu indicano i crolli già avvenuti.

**Fig. IV.30:** Monte San Martino, Lecco. Carta della massima intensità attesa, ricavata combinando le mappe della massima velocità (Fig. IV.28) e della massima altezza da terra (Fig. IV.29) registrate lungo le traiettorie di caduta. Verde, bassa intensità; Rosso, alta intensità.

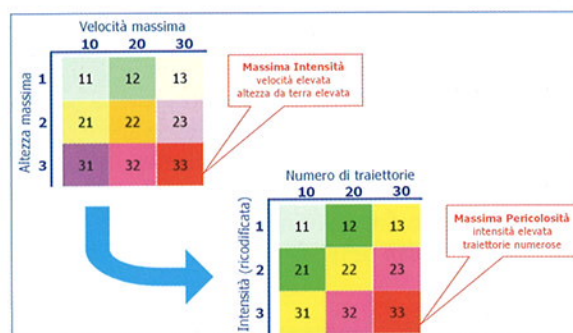
Fig. IV.31. Monte San Martino, Lecco. Carta della pericolosità, ricavata combinando le mappe del numero di traiettorie di caduta (Fig. IV.27) e dell'intensità (Fig. IV.30). Verde, bassa pericolosità; giallo, pericolosità intermedia; rosso, pericolosità elevata.



Le tre carte prodotte dal programma STONE sono fra loro complementari e, ciascuna per il proprio contenuto, forniscono indicazioni sulla pericolosità. Dove le traiettorie sono numerose, le velocità elevate e le altezze di volo sono considerevoli, il pericolo è sicuramente elevato. Allo stesso modo dove le traiettorie sono poco numerose, le velocità e le altezze di cadute sono basse, la pericolosità è bassa, anche se non nulla. Più difficile è codificare le inondazioni intermedie di pericolosità. In effetti, anche là dove le traiettorie non sono numerose ma la velocità e le altezze di volo sono elevate, il pericolo può essere elevato.

Esistono diverse strategie possibili per combinare gli output prodotti dal programma STONE, fra di loro e con altre informazioni territoriali. La strategia prescelta prevede di utilizzare due semplici matrici di correlazione (Fig. IV.32), la prima fra velocità ed altezza da terra (matrice di intensità, Fig. IV.30 e Fig. IV.32) costituisce l'input per la seconda matrice in cui viene correlata con il numero di traiettorie allo scopo di ottenere una matrice di pericolosità (Fig. IV.31 e Fig. IV.32). La strategia prevede quindi di considerare dapprima i parametri che contribuiscono all'intensità dell'evento (velocità ed altezza da terra) e successivamente di considerare la probabilità di occorrenza dell'evento (numero di traiettorie di caduta).

Fig. IV.32: Matrici utilizzate per correlare, in modo empirico, la velocità e l'altezza da terra massime ed il numero di traiettorie di caduta presenti in ciascuna cella del DTM.



#### IV.5.6. Conclusions

La détermination de la dangerosité induite par les chutes de blocs est une opération difficile et incertaine, en particulier pour de vastes zones où la variabilité des facteurs lithologiques, morphologiques et topographiques qui génèrent le processus de chute de blocs est élevée. Nous avons développé un programme de calcul pour la simulation tri-dimensionnelle de la chute de blocs qui, en dépit quelques limites, s'avère être cohérent avec les résultats des autres programmes de simulation bi-dimensionnelle. Le programme est capable de simuler la chute de blocs en milieux morphologiques tri-dimensionnels et de fournir des informations utiles à la détermination

#### IV.5.6 Conclusioni

La determinazione della pericolosità indotta dalle cadute massi è una operazione difficile ed incerta, in particolare per aree vaste, dove la variabilità dei fattori litologici, morfologici e topografici che controllano il processo di caduta massi è elevata. Abbiamo sviluppato un programma di calcolo per la simulazione tridimensionale della caduta massi che, nonostante alcune limitazioni, è risultato essere consistente con i risultati di altri programmi di simulazione bidimensionale. Il programma è risultato capace di simulare la caduta massi in ambiti morfologici "tridimensionali" e di produrre informazioni utili alla definizione della pericolosità da caduta massi

tion de la dangerosité de chutes de blocs même dans des zones très étendues et diversifiées.

Il est important de préciser que le développement d'un programme de calcul en mesure d'effectuer des simulations tri-dimensionnelles, même très détaillées à l'échelle régionale et locale, ne signifie pas nécessairement que ces simulations puissent être réalisées partout. Les données thématiques d'entrée, y compris la topographie, peuvent être obtenues à partir des cartes topographiques, géologiques et d'utilisation des sols existantes mais la qualité de la simulation dépend en grande partie de la qualité de la résolution et de l'exactitude des données d'entrée. Notamment, la résolution spatiale et l'exactitude du DTM sont des facteurs importants qui gèrent la qualité de la simulation. Pour une simulation fiable le DTM doit reporter toutes les formes morphologiques (talus, canaux, crêtes, ondulations, tendances opposées, etc.) qui contrôlent ou influent (à l'échelle de l'analyse) sur les trajectoires de chute.

Une définition fiable et exacte de la position et de l'extension des zones d'origine des chutes de blocs est un autre facteur qui détermine la qualité de la simulation. L'identification et la planification de ces zones n'est pas une tâche aisée, en particulier quand celles-ci sont vastes, mais peut être réalisée par des géomorphologues experts en combinant des techniques photo-géologiques et des relevés de terrain. Là où les zones d'origine des chutes de blocs ne sont pas identifiées (et cartographiées), les trajectoires de chute ne peuvent être calculées et la dangerosité des chutes de blocs sera sous-estimée. Au contraire, si les aires d'origine sont cartographiées dans des zones non prédisposées à la chute de blocs, les trajectoires de chute peuvent être calculées de façon incorrecte et le risque qui leur est associé sera surestimé.

Enfin, les coefficients qui contrôlent la perte d'énergie à l'impact durant le roulage et l'impact influencent aussi de manière significative les résultats des simulations. Ces valeurs généralement prises dans la littérature et plus rarement extraites de données de campagne ou d'enquêtes *in situ* ont une variabilité considérable. Leur définition correcte est donc essentielle pour obtenir une simulation valable.

si anche in aree molto estese e diversificate.

È importante puntualizzare che aver sviluppato un programma di calcolo in grado di effettuare simulazioni tridimensionali anche molto dettagliate a scala regionale e locale, non significa necessariamente che tali simulazioni possano essere realizzate ovunque. I dati tematici di ingresso, inclusa la topografia, possono essere ottenuti da carte topografiche, geologiche e dell'uso del suolo esistenti, ma la qualità della simulazione dipende in buona misura dalla qualità, dalla risoluzione e dall'accuratezza dei dati di ingresso. In particolare, la risoluzione spaziale e l'accuratezza del DTM sono fattori importanti che controllano la qualità della simulazione. Per una simulazione affidabile il DTM deve riportare tutte le forme morfologiche (scarpate, canali, creste, ondulations, contropendenze, etc.) che controllano od influenzano (alla scala dell'analisi) le traiettorie di caduta.

Una accurata ed affidabile definizione della posizione e dell'estensione delle aree di distacco delle cadute massi è un altro fattore che determina la qualità della simulazione. L'identificazione e la mappatura di tali aree non è un compito facile, in particolare in aree vaste, ma può essere realizzata da geomorfologi esperti combinando tecniche fotogeologiche e rilevamenti di campagna. Dove le aree di partenza delle cadute massi non vengono individuate (e cartografate) le traiettorie di caduta non verranno calcolate e la pericolosità da caduta massi verrà sottostimata. Al contrario, se aree sorgenti vengono mappate in aree non predisposte alla caduta massi le traiettorie di caduta verranno calcolate in modo scorretto ed il rischio a loro associato sarà sovrastimato.

Da ultimo, anche i coefficienti che controllano la perdita di energia all'urto durante il rotolio e l'urto influenzano in modo significativo i risultati delle simulazioni. Tali valori, generalmente presi dalla letteratura e più raramente ricavati da dati di campagna o da indagini *in situ*, hanno una notevole variabilità. La loro corretta definizione è quindi essenziale per una valida simulazione.

## BIBLIOGRAPHIE - BIBLIOGRAFIA

- BROILI L., 1973. In situ tests for the study of rockfall. *Geologia Applicata e Idrogeologia* 8 (1), (in Italian).
- HOEK E., 1987. Rockfall – a program in BASIC for the analysis of rockfall from slopes. Unpublished note, Golder Associates/University of Toronto, Canada.
- PITEAU D.R., CLAYTON R., 1976. Computer Rockfall Model. Proceedings Meeting on Rockfall Dynamics and Protective Works Effectiveness. Bergamo, Italy. ISMES Publication n. 90, Bergamo, Italy, pp. 123-125.
- RITCHIE A.M., 1963. Evaluation of rockfall and its control. Highway Research Board, Highway Research Record, National Academy of Sciences-National Research Council. Washington, DC, 17, pp. 13-28.