

IV. ÉTUDES TRAJECTOGRAPHIQUES

IV.1. INTRODUCTION

L'évaluation des conditions probables de propagation des masses éboulées constitue l'un des volets de l'étude des risques liés aux éboulements rocheux, qu'il s'agisse d'études de type cartographique ou a fortiori d'études spécifiques.

Pour les études de type cartographique, l'établissement de cartes de danger (Suisse) ou de plans de prévention des risques naturels (France) conduit à une délimitation et à un zonage des secteurs exposés. Dans ce cadre, une analyse trajectographique peut s'avérer intéressante, voire indispensable, comme outil d'aide à la définition des limites de zonage. Compte tenu de l'importance des surfaces couvertes lors de l'établissement de ces cartes, les études de propagation conservent alors un caractère global.

Dans le cas d'études spécifiques de secteurs exposés, les simulations effectuées au moyen de codes trajectographiques constituent un outil essentiel d'évaluation des conditions probables de propagation des blocs sur le versant. Les objectifs visés nécessitent une analyse détaillée et la prise en compte d'éléments précis (topographie, géologie, couverture, définition des blocs de référence et de leur nombre probable), ce qui se traduit par la mise en œuvre d'une étude plus lourde, mais appliquée à des zones de surface plus limitée. Les études trajectographiques doivent permettre de préciser les trois points suivants :

- Le fonctionnement du versant du point de vue de la propagation de l'éboulement : limites d'extension, axes principaux de propagation, influence de la morphologie (zones de concentration ou d'étalement, effets locaux et déviation latérale, effets de tremplin) ;
- Les caractéristiques des trajectoires probables (hauteur et longueur de vol, énergie, distribution des impacts) afin de déterminer les valeurs moyennes représentatives et les valeurs limites à prendre en compte pour la définition, le dimensionnement et l'implantation des ouvrages de protection ;
- La vérification des ouvrages de protection implantés, leur limite d'efficacité ainsi que la délimitation de la zone sécurisée.

Ce chapitre est consacré à l'étude de trois programmes de trajectographie utilisés dans l'Arc Alpin : le logiciel PROPAG (LRPC-CETE Lyon), le logiciel ADRGT et le logiciel EBOULEMENT (LMR-EPFL).

Dans la première partie, les participants ont présenté et comparé leurs logiciels respectifs

IV. STUDI TRAIETTOGRAFICI

IV.1. INTRODUZIONE

Le valutazioni delle condizioni probabili della propagazione delle masse franate costituisce una delle parti dello studio dei rischi legati alle frane, sia che si tratti di studi di tipo cartografico o necessariamente di studi specifici.

Per gli studi di tipo cartografico la realizzazione di carte di pericolo (Svizzera) o di piani di prevenzione dei rischi naturali (Francia) conduce ad una delimitazione e ad una zonizzazione dei settori esposti. In questo quadro, un'analisi traiettografica può rivelarsi interessante, addirittura indispensabile, come strumento che aiuta la definizione dei limiti di zonizzazione. Tenuto conto dell'importanza delle superfici coperte durante la realizzazione di queste carte, gli studi di propagazione rivestono allora un carattere globale.

Nel caso di studi specifici di settori esposti, le simulazioni effettuate per mezzo di codici traiettografici costituiscono uno strumento essenziale di valutazione delle condizioni probabili di propagazione dei blocchi sul versante. Gli obiettivi perseguiti richiedono un'analisi dettagliata e l'assunzione di elementi precisi (topografia, geologia, copertura, definizione dei blocchi di riferimento e del loro numero probabile), cosa che si traduce nella messa in opera di uno studio più gravoso ma applicato a zone a superficie più limitata. Gli studi traiettografici devono permettere di precisare i tre punti seguenti:

- Il funzionamento del versante dal punto di vista della propagazione del crollo: limiti dell'estensione, assi principali di propagazione, influenza della morfologia (zone di concentrazione o di rarefazione, effetti locali e deviazione laterale, effetti trampolino);
- Le caratteristiche delle traiettorie probabili (altezza e lunghezza del volo, energia, distribuzione degli impatti) al fine di determinare i valori medi rappresentativi e i valori limite da prendere in considerazione per la definizione, il dimensionamento e l'installazione delle opere di protezione;
- La verifica delle opere di protezione installate, il loro limite di efficacia così come la delimitazione della zona messa in sicurezza.

Questo capitolo è dedicato allo studio dei tre programmi di traiettografia utilizzati nell'arco alpino: il software PROPAG (LRPC-CETE Lyon), il software ADRGT e il software EBOULEMENT (LMR-EPFL).

Nella prima parte, i partecipanti hanno presentato e comparato i loro rispettivi software (ipotesi,

(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.

La conclusion générale de ce chapitre reprend les particularités des codes ainsi que les principales constatations effectuées lors de leur confrontation aux cas réels d'éboulement. Y sont également proposées des recommandations méthodologiques et des perspectives de recherches.

équations constitutives del rimbalzo, parametri presi in considerazione, specificità) così come le loro metodologie di calcolo. Delle tavole sintetiche riprendono le principali caratteristiche di tali software e le informazioni relative ad altri codici di calcolo esistenti.

Nella seconda parte, i programmi sono stati applicati a sei siti, poiché ciascuno dei partners ha fornito per due dei siti in questione (già studiati) una descrizione del profilo (topografia, natura del terreno e della vegetazione) e le informazioni disponibili sull'evento (zona di origine, dimensione e forma dei blocchi, zona di deposito con punti estremi di arrivo, altri dati sulla traiettoria). I risultati ottenuti dai software sono stati analizzati, poi confrontati tra loro e con la realtà.

La conclusione generale di questo capitolo riprende le particolarità dei codici e delle principali constatazioni effettuate nell'ambito del loro confronto con i casi reali di frane. Vi sono anche proposte delle raccomandazioni del metodo da seguire e delle prospettive di ricerca.

IV.2. DESCRIPTION DES PROGRAMMES

IV.2.1. CETE Lyon

IV.2.1.1. Introduction

Le modèle trajectographique développé par le LRPC-CETE de Lyon (logiciel PROPAG) est de type bi-dimensionnel à trajectoire enveloppe. Il ne prend pas en compte la forme du bloc mais il tient compte de son élanement.

Le modèle est de type déterministe, et a été calé à partir de trajectoires extrêmes relevées sur des éboulements réels.

Le versant est représenté par une succession de segments de droites, de manière à déterminer les intersections entre le sol et la trajectoire des blocs. Les données fournies par l'utilisateur sont :

- la définition du profil du versant,
- la nature du terrain,
- les zones de départ des blocs,
- les vitesses initiales des blocs,
- la forme du bloc caractérisée par son élanement cinématique.

Enfin, le mouvement du bloc est analysé en deux phases distinctes, le vol et l'impact.

Les résultats des simulations permettent de connaître les vitesses en tout point, les hauteurs de vol et les points d'arrêt des blocs.

Une particularité du modèle est que les phases de roulement, glissement et rebond ne sont pas explicitement séparées. Une seule relation régit l'ensemble du mouvement et plus encore, on passe de façon continue d'une phase à une autre. Ainsi, le roulement d'un bloc sur une pente est en fait modélisé comme une succession de petits rebonds. Cette modélisation est intéressante, car la forme irrégulière des blocs dans la réalité rend non pertinent un mouvement de type roulement (mode de déplacement réservé aux solides dont la frontière est C').

IV.2.1.2. Modélisation de l'impact

Le principe fondamental du modèle d'impact est l'écriture de deux équations régissant les relations entre les vitesses normales et tangentielles (par rapport à la pente) du centre de gravité du bloc, avant et après impact.

Ces relations ont été obtenues de façon empirique, elles dépendent de différents paramètres qui ont été identifiés à partir de nombreuses rétro-analyses d'éboulements réels.

Les paramètres sont explicités dans la section suivante.

IV.2.1.3. Paramètres pris en compte

Paramètres liés au terrain

Cinq types de sol, qui correspondent à un comportement type vis à vis du bloc considéré, sont proposés :

- Rocher sain ;
- Rocher altéré ;
- Éboulis compact ;
- Éboulis meuble ;
- Terrain meuble ;
- Liquide.

Pour chacun de ces types de sol, trois paramètres c_n , c_g et c_r , identifiés à partir de cas réels, interviennent dans les relations entre les vitesses incidentes et les vitesses réfléchies.

La présence de forêt n'est pas prise en compte dans ce modèle à trajectoire limite, car il est considéré que lors d'un éboulement important, il y a destruction des arbres par les premiers blocs et que les éléments suivants n'ont plus ces obstacles à franchir.

Paramètres liés au bloc

La forme du bloc est caractérisée par son élanement cinématique E qui est voisin de son élanement géométrique (rapport entre les diamètres maximal et minimal du bloc, mesuré dans le plan normal à son axe d'inertie principal majeur). Dans le modèle à trajectoire limite, on considère habituellement une valeur moyenne de celui-ci, constante sur l'ensemble de la trajectoire, tenant compte de l'atténuation apparente de l'angularité du bloc due à sa pénétration dans le sol et au poinçonnement des arêtes. Au stade actuel du développement de l'outil, la notion d'élanement cinématique, qui résulte d'un sous-modèle de poinçonnement au cours de l'impact, est limitée à une constante E .

Les valeurs de référence des fonctions de transfert ont été calées sur les valeurs limites retenues pour E , et qui se situent dans un intervalle compris entre 1.0 et 1.5.

Pour ce qui concerne le volume (le poids) des blocs, les observations de terrain ont montré qu'il n'y avait pas de différence notable dans le comportement limite de propagation, quelque soit le volume unitaire considéré. Des blocs de petite taille, ne provenant pas d'une fragmentation en phase terminale, ont été retrouvés à proximité d'éléments de taille très supérieure.

Paramètres liés à la cinématique

Les deux relations fondamentales s'écrivent sous la forme :

$$\begin{cases} V_{rx} = A(C_g, C_r, E, Y_{i-1}, Y_i) V_{ix} \\ V_{ry} = B(C_g, Y_{i-1}, Y_i, E) V_{ix} - C(C_n) V_{iy} \end{cases} \quad (IV-1)$$

où v_{ix} , v_{iy} , v_{rx} , v_{ry} représentent respectivement les vitesses incidentes et réfléchies, tangentielles et normales à la pente.

Les relations (IV-1) peuvent être analysées comme suit. La fonction $A(C_g, C_r, E, Y_{i-1}, Y_i)$ qui relie v_{ix} et v_{rx} gère le glissement et le roulement du bloc sur le sol, en fonction des paramètres de terrain c_g et c_r , de l'élanement E et de la dénivelée entre deux points d'impacts successifs y_{i-1} et y_i .

v_{ry} dépend à la fois de v_{ix} et de v_{iy} . La fonction C peut être interprétée comme la fonction de restitution normale, et la fonction B gère la contribution de v_{ix} à la composante v_{ry} . Cette contribution est fortement dépendante de l'élanement E mais aussi du paramètre c_r défini en fonction du type de sol considéré.

IV.2.1.4. Informations complémentaires

Il est intéressant de noter que la marge de manœuvre de l'utilisateur se réduit à la modification de la valeur de l'élanement cinématique du bloc et du type de comportement du sol par le biais de sa nature.

Il est à remarquer que les trajectoires limites les plus longues correspondent le plus souvent (mais pas toujours) aux élançements les plus élevés. Ceci résulte essentiellement du fait que la dissipation d'énergie croît avec le nombre d'impacts, la partie aérienne des trajectoires n'étant pas dissipative. Par ailleurs, l'incidence plus rasante des trajectoires tendues (généralement associées à des élançements plus élevés) donne des rebonds plus économes en favorisant la composante tangentielle et implicitement la composante de rotation au détriment de la composante normale très dissipative. Mais attention, les phénomènes dissipateurs sont contrôlés par l'enchaînement des impacts successifs, et il suffit d'un impact à forte incidence pour faire perdre le bénéfice des économies antérieures. C'est pourquoi, sur les versants accidentés, les trajectoires limites (c'est à dire marquant la limite d'extension) ne sont pas nécessairement celles des blocs les plus élançés, mais celles qui correspondent à une optimisation des rebonds.

Les hauteurs de passage, en un point donné, vont résulter du comportement des blocs au moment du ou des impacts précédents. En un point donné, la hauteur la plus grande ne correspondra pas obligatoirement au bloc ayant l'élançement le plus grand.

Concernant les limites de propagation, le modèle est calé sur les trajectoires observées en limite naturelle d'extension d'éboulements réels. Chaque fois que cela est possible, en fonction des observations géologiques ou de données de terrain (et de leur fiabilité), il convient de contrôler le bon calage du modèle pour un versant particulier. Actuellement, il n'a pas été constaté de discordance significative justifiant une correction des valeurs de référence des fonctions de transfert.

Le logiciel PROPAG est un modèle à trajectoire limite destiné à des spécialistes compétents pour analyser le comportement d'un versant vis à vis des chutes de blocs. Pour une étude correctement menée avec cet outil, la fiabilité est certainement comparable et homogène avec celle de l'étude de terrain qui en est la source.

IV.2.2. ADRGT Grenoble

IV.2.2.1. Introduction

Le modèle trajectographique de l'A.D.R.G.T. (Association pour le Développement des Recherches sur les Glissements de Terrain) a été élaboré par C. AZIMI à partir de 1976, puis perfectionné plusieurs fois depuis à partir d'expérimentations sur modèle réduit et de la validation d'événements de chutes de blocs. On le décrit ici dans sa forme actuelle.

La forme des blocs est introduite par un coefficient d'angularité. On distingue des formes arrondies, semi-arrondies, semi-anguleuses et anguleuses. Entre les impacts, les blocs sont en chute libre, le frottement de l'air est en général négligé (sauf dans certains cas particuliers avec de grandes hauteurs de chute libre) et les trajectoires sont paraboliques.

Le versant est représenté par une succession de segments de droite, de manière à déterminer les intersections des trajectoires avec le versant. Mais au point d'impact la pente locale du versant est introduite par un angle aléatoire β compris entre deux limites inférieure et supérieure à l'angle moyen du versant. Ces limites sont fixées à partir des observations de terrain (leurs intervalles sont plus étendus pour les pentes rocheuses que pour les pentes constituées de sols meubles).

Le poids de départ des blocs est fixé d'après les observations, de même que leur forme.

Lors des impacts, les mécanismes de perte d'énergie diffèrent selon qu'on rencontre un versant rocheux ou un sol meuble. Mais dans les deux cas la végétation est prise en compte dans le coefficient de frottement η : elle est prise en compte par la densité et le diamètre du peuplement.

On distingue :

- 3 types de terrains rocheux (roches dures, moyennes ou tendres) ;
- 3 types d'éboulis (chaos de blocs, éboulis à gros blocs, éboulis moyens) ;
- 3 types de sols (sol compact, prairies, sol meuble).

IV.2.2.2. Modélisation de l'impact

Impact sur terrain rocheux

Lors d'un impact sur terrain rocheux (Fig. IV.1), le bloc est considéré comme élasto-plastique parfait et le sol comme élastique. On introduit un coefficient de restitution qui permet de calculer la vitesse normale de réflexion à partir de la vitesse normale d'incidence. Ce coefficient est aléatoire entre deux limites encadrant une valeur moyenne. Il dépend de la nature de la roche et de la forme du bloc et de sa vitesse.

La réduction de vitesse tangentielle est liée à une série de glissements et roulements du bloc sur la pente rocheuse, durant le temps de collision Δt .

Ce temps Δt est calculé pour chaque impact ; il est fonction de la nature du bloc, du versant, de la masse et de la forme du bloc.

D'après ce mécanisme le coefficient de réduction de vitesse tangentielle $D = V_{tr} / V_{ti}$ s'exprime par :

$$D = f(V_{ni}, V_{nr}, V_{ti}, \eta, \beta, \Delta t) \quad (IV-2)$$

où :

- V_{ni} et V_{nr} sont les vitesses normales à la facette, incidente et réfléchie.
- V_{ti} est la vitesse tangentielle incidente,
- η est le coefficient de frottement global prenant en compte le roulement et le frottement,
- β est l'angle de la facette avec l'horizontale,
- Δt est le temps de collision.

Lors des impacts sur terrain rocheux, on prend en compte la possibilité de fractionnement du bloc, si l'impulsion de percussion dépasse une certaine valeur qui dépend de la résistance à la traction et de la taille du bloc. Cette valeur limite (résistance au fractionnement) est supposée augmenter après chaque fractionnement, et est ramenée après deux fractionnements à la résistance de la roche intacte. Cette procédure tient compte de la présence de fissures dans le bloc rocheux. De plus à chaque fractionnement, la forme du bloc se dégrade vers une catégorie plus anguleuse.

Si le fractionnement a lieu, une vitesse limite normale de réflexion est déterminée d'après les caractéristiques du bloc (volume, vitesse de réflexion théorique sans fractionnement, temps de collision). De plus on suppose un coefficient de réduction de masse proportionnel à la différence des énergies d'incidence et de fractionnement, et affecté d'un coefficient aléatoire.

Impact sur terrain meuble

Lors d'un impact sur un terrain meuble (Fig. IV.2), le bloc est considéré comme rigide et le sol comme parfaitement plastique. Les calculs des vitesses à la sortie de l'impact sont faits en résolvant les équations suivantes de manière incrémentale par rapport à h .

$$mV_n \cdot dV_n / dn = f(\eta, \theta, K, p, h, S(h), m) \quad (IV-3)$$

$$m \cdot dV_t / dt = f_t(\eta, \theta, K, p, h, S(h), m) \quad (IV-4)$$

$$\text{et } dt = dh / V_n \quad (IV-5)$$

où :

- m est la masse du bloc,
- n et t indiquent les directions normale et tangentielle à la facette,
- V_n est la vitesse normale à la facette,
- V_t est la vitesse tangentielle à la facette,
- h est l'enfoncement du bloc dans le sol,
- K et p sont des coefficients qui déterminent la contrainte normale σ lors de l'enfoncement du bloc dans le sol, $\sigma = f(K, p, h)$,
- $S(h)$ est la surface de contact bloc-cratère,
- η est le coefficient de frottement global (glissement et roulement) le long de la trajectoire du bloc dans le sol,
- θ est l'angle courant de la facette de contact du bloc avec le cratère, mesuré par rapport à la surface du terrain, de pente β .

Ces équations prennent en compte les phénomènes suivants :

- l'enfoncement normal au versant du bloc dans le sol tendant à accroître la surface de contact et la force normale de contact jusqu'à absorption complète de l'énergie cinétique " normale " ($1/2 m \cdot V_{ni}^2$) par déformation plastique du sol ;
- la création de ce fait d'un cratère dont la forme dépend des caractéristiques du sol, et de la vitesse d'incidence ;

- le glissement et roulement du bloc sur le fond du cratère en cours de formation qui ont pour conséquence de diminuer la vitesse tangentielle.

Ces valeurs de vitesses en sortie de cratère constituent la vitesse réfléchie.

Du fait de l'introduction des paramètres aléatoires décrits plus haut, pour un point de départ, un poids au départ et une vitesse au départ donnés, on obtient une trajectoire différente à chaque calcul. Pour modéliser numériquement les diverses possibilités de chutes, on réalise en général 300 calculs.

IV.2.2.3. Paramètres pris en compte

Paramètres liés au terrain

Comme on l'a vu plus haut, les paramètres du terrain pris en compte sont :

- La résistance du sol : (9 catégories de roches ou sols) ;
- La rugosité, prise en compte par un coefficient de dispersion qui dépend de la taille relative du bloc par rapport aux aspérités du terrain non représentées par le relevé topographique. Pour le même terrain, plus les blocs sont gros, moins cette rugosité est importante ;
- L'inclinaison du versant, lequel est représenté par une succession de segments de droite. Seuls sont pris en compte les traits morphologiques ayant une certaine importance (au moins 2 à 3 m en général). A chaque point d'impact, l'orientation de la facette représentant le plan de contact bloc-terrain est aléatoire entre 2 limites.

Paramètres liés au bloc

On prend en compte sa forme par un coefficient d'angularité (mais on ne définit pas exactement sa géométrie).

La résistance du bloc au fractionnement est également prise en compte par un coefficient de fragilité (ne jouant que lors des rebonds sur rocher) et déterminant la possibilité de fractionnement.

Les dimensions du bloc sont prises en compte indirectement par le volume. Ce dernier peut être aléatoire dans une fourchette fixée à l'avance. On introduit également un rayon équivalent $r = (3 \cdot V / 4 \cdot \pi)^{1/3}$ qui sert à déterminer la hauteur de passage du centre de gravité au dessus du sol.

Enfin l'élancement est indirectement pris en compte par un coefficient de dispersion qui tient compte en fait de la variabilité dans les contacts bloc-terrain.

Paramètres liés à la cinématique

La vitesse de translation est prise en compte directement, mais la rotation du bloc est prise en compte lors des phénomènes de rebond.

La configuration du bloc n'est pas prise en compte lors des impacts autrement que par l'orientation aléatoire de la facette sur laquelle l'impact a lieu.

IV.2.2.4. Informations complémentaires

Le phénomène physique des chutes de blocs fait intervenir de nombreux paramètres le long de la trajectoire. Par conséquent, pour un certain nombre de lâchers de blocs sur une même pente, les trajectoires obtenues et leurs caractéristiques (vitesses, hauteurs, etc.) présentent un certain caractère aléatoire.

La méthode de calcul ADRGT tend à représenter le plus fidèlement possible le phénomène physique, par le jeu d'un certain nombre de paramètres aléatoires. Par conséquent dans les résultats, on constate une certaine variabilité d'une série de calculs à l'autre. On ne doit donc pas attendre une précision excessive des résultats obtenus.

L'utilisation de cette méthode demande de la part du calculateur une expérience non négligeable relative aux phénomènes physiques réels (cette remarque est d'ailleurs valable pour toutes les méthodes de calculs trajectographiques).

IV.2.3. LMR - EPF Lausanne

IV.2.3.1. Introduction

Contrairement aux méthodes dites à masse concentrée (lumped mass) qui assimilent les blocs à un point sans géométrie et sans vitesse de rotation, les méthodes dites rigoureuses considèrent les dimensions et

forme réelles des blocs ainsi que tous leurs mouvements, y compris la rotation. Le programme EBOULEMENT développé à l'EPFL (Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne) à la fin des années '80 (Descoedres & Zimmermann, 1987 ; Zimmermann & al., 1989) peut être classé dans cette seconde catégorie des méthodes rigoureuses. Il intègre les équations fondamentales de la dynamique des solides pour modéliser le mouvement de blocs ellipsoïdaux, parallélépipédiques ou polygonaux sur une topographie tridimensionnelle (Fig. IV.3).

Le programme EBOULEMENT traite les 4 types de mouvement élémentaire susceptibles de se produire lorsqu'un bloc dévale une pente. Il s'agit des mécanismes de vol, de rebond, de roulement et de glissement (Fig. IV.4). Une description complète de leur modélisation dépassant le cadre de ce rapport (hormis le phénomène de rebond traité au point IV.2.3.2), le lecteur intéressé consultera la bibliographie relative au programme (Descoedres & Zimmermann, 1987 ; Zimmermann & al., 1989 ; Descoedres, 1997).

Même si l'étude de terrain préalable aux calculs trajectographiques doit permettre de caractériser au mieux le versant et les blocs susceptibles de s'ébouler, elle n'en demeure pas moins incomplète et imprécise, au vu de la variabilité naturelle des caractéristiques géométriques et mécaniques. Afin de tenir compte de cette dispersion naturelle, un certain nombre de paramètres sont affectés d'une composante aléatoire. Ainsi, le programme qui était initialement utilisé de façon déterministe (Descoedres & Zimmermann, 1987), permet maintenant des analyses probabilistes.

Les incertitudes que l'on cherche à intégrer dans les calculs sont de deux natures :

- Les premières sont associées à la géométrie des blocs (forme et dimensions) et aux conditions de départ (position, orientation, vitesse). Après tirage au sort dans une fourchette de valeurs, les paramètres correspondants demeurent inchangés lors d'un calcul de trajectoire, mais ils sont par contre variés d'un calcul à l'autre lors d'une série de simulations.
- Le second type d'incertitudes porte sur les caractéristiques du versant, tant d'un point de vue topographique (inclinaison, rugosité) que d'un point de vue géomécanique (résistance, déformabilité). Les paramètres correspondants varient en tout point du versant et sont choisis aléatoirement entre deux limites encadrant une valeur moyenne et dépendant du type de couverture.

Les principaux résultats fournis par le programme tendent à répondre aux attentes de toute analyse trajectographique, à savoir aider à la délimitation des zones exposées aux chutes de blocs et à la définition des valeurs de dimensionnement des ouvrages de protection à implanter. En fonction de l'objectif recherché, on représente :

- la répartition statistique des points d'arrêt des blocs dans le versant (ou encore la probabilité d'atteinte),
- les histogrammes de hauteur, vitesse et énergie cinétique de passage aux endroits prévus pour l'implantation d'ouvrages de protection.

En complément à ces données quantitatives, une représentation des trajectoires calculées s'avère utile pour avoir une première impression qualitative des axes principaux de propagation des blocs et des zones potentiellement intéressantes pour l'implantation d'ouvrages de protection.

IV.2.3.2. Modélisation de l'impact

Bien que le programme EBOULEMENT puisse modéliser l'impact de solides sur une topographie tridimensionnelle, on se contentera d'en expliciter le principe dans un plan afin de ne pas surcharger inutilement le texte. La méthode se base sur les hypothèses suivantes :

- durant le choc, le bloc est soumis à une impulsion de freinage $\{I\} = \{F\} \Delta t = m \{\Delta V\}$;
- il existe un paroxysme du choc, où la vitesse normale du point de contact est nulle et où sa vitesse tangentielle est minimale (si le frottement mobilisable est suffisant, elle est également nulle, sinon le point de contact dérape en rebondissant).

Dans le raisonnement qui suit, les notations suivantes sont utilisées (Fig. IV.5) :

- I_n et I_t composantes normale et tangentielle de l'impulsion
- F_n et F_t composantes normale et tangentielle de la force agissant au point de contact
- V_n et V_t composantes normale et tangentielle de la vitesse de translation du centre de gravité
- ω vitesse de rotation
- r_n et r_t composantes normale et tangentielle de la distance du centre de gravité G au point de contact avec le terrain C

- m masse du bloc
- J moment d'inertie de rotation du bloc
- exposant '- ' état avant le paroxysme
- exposant '* ' état au paroxysme
- exposant '+ ' état après le paroxysme
- e_n et e_t composantes normale et tangentielle du coefficient de restitution
- μ coefficient de frottement
- C constante du sol

Durant l'intervalle de temps infinitésimal $\Delta t = t_2 - t_1$ avant le paroxysme, les composantes normale I_n^- et tangentielle I_t^- de l'impulsion respectent les 3 équations aux 5 inconnues V_n^* , V_t^* , ω^* , I_n^- et I_t^- :

$$I_n^- = m (V_n^* - V_n^-) \quad (IV-6)$$

$$I_t^- = m (V_t^* - V_t^-) \quad (IV-7)$$

$$r_n I_t^- - r_t I_n^- = J (\omega^* - \omega) \quad (IV-8)$$

Le raisonnement se fait en 5 étapes :

1. On pose l'hypothèse 'sticking impact' : au paroxysme, la vitesse du point de contact C est nulle, ce qui s'exprime par les 2 équations supplémentaires : $V_n^* - r_t \omega^* = V_t^* + r_n \omega^* = 0$ qui, combinées avec (IV-6), (IV-7) et (IV-8), permettent de déduire l'impulsion $\{I^-\}$ nécessaire pour stopper le point de contact.
2. On vérifie que l'hypothèse 'sticking impact' est valide, c'est-à-dire que l'on ait bien :

$$I_n^- > 0 \quad \text{et} \quad I_t^- = \int_{t_1}^{t_2} F_t(t) dt \leq \int_{t_1}^{t_2} \mu \cdot F_n(t) dt = \mu \cdot I_n^- \quad (IV-9)$$

Si oui on passe à la phase 3 ; si non on pose l'hypothèse 'sliding impact' (au paroxysme, le point de contact dérape), et l'équation $V_t^* + r_n \omega^* = 0$ ci-dessus est remplacée par $I_t^- = \mu \cdot I_n^-$.

3. On fait l'hypothèse que l'impulsion $\{I^+\}$ restituée après le paroxysme est proportionnelle à $\{I^-\}$, c'est-à-dire que $I_n^+ = e_n I_n^-$ et $I_t^+ = e_t I_t^-$. En effet, le freinage du bloc durant l'intervalle de temps infinitésimal $\Delta t^- = t_2 - t_1$ avant le paroxysme implique une déformation du terrain et du bloc. La restitution de la partie élastique de cette énergie de déformation a lieu durant l'intervalle de temps infinitésimal $\Delta t^+ = t_3 - t_2$ après le paroxysme, provoquant une nouvelle impulsion $\{I^+\}$ s'exprimant en fonction de $\{I^-\}$ et du coefficient de restitution $\{e\}$.

Néanmoins, si le terrain (supposé élasto-plastique de module K et de limite de résistance F_{yield}) subit des déformations plastiques lors de l'impact, seule la part élastique U^+ de l'énergie de déformation peut être restituée au bloc durant l'intervalle de temps Δt^+ (Fig. IV.6).

$$U^+ = \int_{t_2}^{t_3} F_n(t) \cdot \delta(t) dt \leq U_{yield} = \frac{1}{2} \frac{F_{yield}^2}{K} \quad (IV-10)$$

Il en résulte donc que le coefficient de restitution normal e_n est borné :

$$e_n = \frac{I_n^+}{I_n^-} \leq \frac{F_{yield}}{\sqrt{K} \sqrt{m} V_n^-} = \frac{C}{\sqrt{m} V_n^-} \quad (IV-11)$$

où C [(kNm)^{1/2}] est une constante du sol à déterminer d'après des observations in situ ou des essais d'impact. Il est particulièrement intéressant de noter que le coefficient de restitution normal e_n dépend non seulement des caractéristiques du sol mais aussi de la masse m du bloc et de la composante normale de sa vitesse d'impact V_n^- .

4. On vérifie que l'hypothèse de proportionnalité faite à l'étape 3 entre les composantes tangentielles de $\{I^+\}$ et $\{I^-\}$ est bien vérifiée, c'est-à-dire que :

$$I_t^+ = \int_{t_2}^{t_3} F_t(t) dt \leq \int_{t_2}^{t_3} \mu \cdot F_n(t) dt = \mu \cdot I_n^+ \quad (IV-12)$$

Dans le cas contraire, un glissement se développe au point de contact C et I_t^+ est borné à la valeur $\mu \cdot I_n^+$, I_n^+ gardant sa valeur $I_n^+ = e_n I_n^-$.

5. Finalement, on somme les impulsions ($\{I\} = \{I^-\} + \{I^+\}$) et on en déduit V_n^+ , V_t^+ et ω^+ à l'aide des équations d'équilibre (IV-13), (IV-14) et (IV-15).

$$I_n = m (V_n^+ - V_n^-) \quad (IV-13)$$

$$I_t = m (V_t^+ - V_t^-) \quad (IV-14)$$

$$r_n I_t - r_t I_n = J (\omega^+ - \omega^-) \quad (IV-15)$$

IV.2.3.3. Paramètres pris en compte

Paramètres liés au terrain

Le comportement du terrain lors du rebond est élasto-plastique. Dans la direction normale à la pente, il présente un seuil de résistance F_{yield} (introduit par le biais de la constante C) au-delà duquel il se plastifie. De même, dans la direction parallèle à la pente, la composante tangentielle de la réaction au point de contact est limitée par la force de frottement mobilisable (coefficient de frottement μ). La rigidité du terrain est indirectement prise en compte par les coefficients de restitution et intervient également dans la constante C. Ces paramètres mécaniques sont choisis aléatoirement entre deux limites encadrant une valeur moyenne dépendant de la nature du versant.

L'inclinaison du versant est calculée à partir des données topographiques. Afin de tenir compte des variations locales et de la macro-rugosité du terrain, cette valeur est affectée d'une composante aléatoire dépendant du type de couverture.

Paramètres liés au bloc

Les blocs rocheux sont considérés comme des solides rigides et infiniment résistants (pas de fractionnement possible). Leur géométrie est idéalisée par des formes élémentaires telles que sphère, ellipsoïde, cube, parallélépipède ou polyèdre. Les dimensions sont tirées au sort dans une fourchette de valeurs au début de chaque calcul de trajectoire, variant ainsi l'élanement, le volume et le poids des blocs d'un calcul à l'autre.

Paramètres liés à la cinématique

Le programme EBOULEMENT intègre les équations fondamentales de la dynamique des solides en tenant compte des vitesses de translation et de rotation des blocs, de leur angle d'impact sur le versant ainsi que de l'orientation du bloc lors du rebond (contact sur une face, une arête ou un coin). A ce titre, il s'agit bien d'une méthode rigoureuse.

IV.2.3.4. Informations complémentaires

Bien qu'il soit fréquemment bridé pour calculer des trajectoires sur des profils bidimensionnels, le programme a été développé pour des calculs 3D. Ses potentialités s'illustrent surtout dans des situations où la topographie est complexe (par exemple niche d'arrachement en forme d'entonnoir, présence de couloirs ou de cônes de déjection). Par ailleurs, le programme se prête à l'utilisation de modèles topographiques tridimensionnels (soit digitalisés à partir des cartes topographiques nationales, soit sous forme de Modèle Numérique de Terrain à partir de photogrammétrie aérienne).

IV.2.4. Synthèse

IV.2.4.1. Tableaux comparatifs des 3 logiciels utilisés

En conclusion de cette première partie consacrée à la description des trois programmes, deux tableaux comparatifs permettent d'illustrer leurs spécificités.

Le Tab. IV.1 est une synthèse des principales caractéristiques des logiciels. On y distingue :

- Les méthodes à 2 dimensions où on force la trajectoire à rester dans un ou plusieurs plans verticaux, et les méthodes à 3 dimensions où la topographie est représentée par un MNT ;
- Les méthodes rigoureuses qui considèrent les dimensions et formes réelles des blocs ainsi que tous leurs mouvements (y compris la rotation), les méthodes dites à masse concentrée (ou point matériel) qui assimilent les blocs à un point sans géométrie et sans vitesse de rotation, et les méthodes hybrides qui tiennent compte avec certaines simplifications de la forme et de la rotation du bloc lors des impacts ;
- Les hypothèses de départ : chute libre, glissement, vitesse initiale, etc. ;

- La façon dont les pertes d'énergie sont prises en compte lors des rebonds ;
- Le caractère probabiliste ou déterministe du calcul, suivant que l'on affecte ou pas une composante aléatoire à certains paramètres pour tenir compte de leur variabilité naturelle ;
- Les méthodes de calage du programme : expérimentations sur modèle réduit ou en vraie grandeur in situ, rétro-analyse d'événements réels, informations issues de la littérature.

Parmi les divers types de mouvements (vol, rebond, roulement, glissement) susceptibles de se produire lors de la chute de blocs rocheux, le phénomène de rebond est le moins bien connu et le plus sommairement modélisé par les programmes de calcul. Il est fonction des caractéristiques :

- du terrain : résistance, rigidité, rugosité, inclinaison ;
- du bloc : résistance, rigidité, poids, dimensions et géométrie ;
- de la cinématique : vitesses de translation et de rotation, angle et configuration d'impact.

Le Tab. IV.2 reprend ces paramètres et rassemble quelques informations sur leur prise en compte (ou non) dans la modélisation du rebond par les trois programmes étudiés.

IV.2.4.2. Description succincte d'autres programmes de calcul

Vu le très grand nombre de logiciels de trajectographie utilisés dans le monde, il serait tout à fait illusoire de les lister tous. Dès lors, on se contente de rendre compte de quelques programmes dont les partenaires du projet ont connaissance et qui ont fait l'objet de publications.

Le Tab. IV.3 donne une description, certes synthétique, des principales propriétés régissant les modèles sous jacents à ces codes de calculs. Il est structuré de façon analogue au Tab. IV.1 (cf. IV.2.4.1). Etant donné les difficultés rencontrées lors de la collecte des informations et dès lors le risque d'une mauvaise interprétation des caractéristiques réelles des programmes (leurs auteurs n'ont pas été contactés), il convient d'être prudent et de rester critique vis-à-vis du contenu de ce Tab. IV.3.

IV.3. APPLICATION ET COMPARAISON SUR SIX ÉBOULEMENTS RÉELS

IV.3.1. Méthodologie de comparaison

L'objectif de cette seconde partie est la comparaison des trois programmes sur 6 cas réels d'éboulement.

Chacun des intervenants a proposé 2 sites sur lesquels il devait disposer de suffisamment de données précises pour permettre une comparaison valable avec les résultats de calculs. Il s'agit des sites de :

- Comboire et Champrond pour l'ADRGT ;
- Saint-Marcel et Barjac pour le CETE ;
- Bieudron et Crétaux pour l'EPFL.

Outre les données générales relatives au profil (topographie, nature du terrain et de la végétation), le partenaire fournissait diverses informations disponibles sur l'événement : zone de départ, taille et forme des blocs, zone de dépôt avec points extrêmes atteints, autres renseignements permettant de reconstituer certaines trajectoires.

On a veillé à ce que les profils topographiques adoptés et les zones de départ soient identiques. Ensuite, chaque intervenant a réalisé les calculs selon ses propres procédures. Ceci a nécessité des calages de manière à obtenir les résultats de calculs les plus représentatifs possible de la réalité.

Les résultats des calculs ont ensuite été comparés en termes de :

- points ou zones atteintes ;
- hauteurs, vitesses, et énergies de passage en certains points fixés d'un commun accord à l'avance.

Pour chacun des 6 cas présentés ci-après, chaque intervenant a décrit lui-même ses propres résultats alors que la présentation du site et la synthèse des résultats a été rédigée par le partenaire qui avait proposé le site.

IV.3.2. Recueil des données

Le caractère prédictif d'une analyse trajectographique est d'autant plus grand que les données recueillies sont précises et pertinentes. La liste ci-après, issue d'un travail de réflexion des partenaires, reprend diverses informations qui devraient être collectées, tantôt lors de la visite sur le terrain, tantôt sur base d'autres documents (modèle numérique de terrain, photographies aériennes ou terrestres, films, cadastres, etc.) :

- Topographie ;
- Nature des terrains (rocher, éboulis, sol meuble, etc.) ;
- Couverture végétale (type, densité d'arbres) ;
- Caractérisation de la zone de départ : localisation, état de fracturation (\Rightarrow fragmentation potentielle), volume et nombre de blocs, géométrie, vitesse initiale éventuelle ;
- Niveau d'activité : fréquence des événements survenus et observés (cadastre des événements selon les recommandations suisses) ;
- Caractérisation de la zone de dépôt : localisation et étalement des blocs, volume et géométrie, fractionnement éventuel. Cause de l'arrêt : perte de vitesse progressive due à une succession d'impacts sur le sol, obstacle naturel (arbre, rocher) ou artificiel (ouvrage de protection, bâtiment) ;
- Traces laissées lors de la propagation de l'éboulement : impacts sur le terrain (position et géométrie), sur la végétation (arbres abattus et sectionnés, hauteur de l'impact sur le tronc) et sur des ouvrages existants (dommages engendrés) ;
- Hauteur, longueur et vitesse de vol des blocs, fragmentation éventuelle lors d'un rebond (sur base d'observations visuelles ou de films) ;
- Données sur les éventuels ouvrages de protection implantés, en particulier hauteur, longueur et énergie utiles.

La description la plus précise possible de tous ces paramètres est absolument nécessaire dans le cas où les calculs ne sont pas effectués par les personnes ayant fait les observations de terrain. On a pu constater, dans le cadre du présent travail, que des résultats mal ajustés pouvaient provenir d'imprécisions dans les descriptions.

IV.3.3. Site de comboire

IV.3.3.1. Description

Le site de COMBOIRE se trouve à 3 km au Sud-Ouest de Grenoble en rive gauche du Drac. Ce site constitue la base du massif du Vercors et correspond à un petit chaînon calcaire culminant à 530 m alors que la plaine du Drac est à 240 m d'altitude.

Il s'agit d'un éboulement de 1500 m³ survenu le 6 février 1995 vers 21 h. Les blocs sont arrivés jusqu'à 40 m du pied de pente.

La description du versant est indiquée sur la Fig. IV.7. Il s'agit pour la zone de départ de calcaires massifs du Portlandien en bancs de 3 à 5 m d'épaisseur, pouvant présenter des surplombs à la faveur de quelques interbancs plus marneux.

La cote de départ est à 500 m d'altitude.

La partie supérieure du versant est constituée de calcaires en petits bancs de 50 cm environ puis d'alternances de calcaires marneux et marnes, ceci jusqu'à la cote 390 où débute une couverture d'éboulis qui était couverte d'une forêt de petits feuillus (troncs de 20 cm de diamètre). Cette forêt a été entièrement détruite par l'éboulement.

L'essentiel des blocs s'est arrêté en contrebas de la cote 320 m, et a envahi en partie une prairie horizontale à la cote 259. Le plus gros bloc, de dimensions 3.5 x 3.5 x 5 m (60 m³), a atteint l'abscisse 270 m. D'autres blocs entre 1 et 10 m³ ont envahi les 15 premiers mètres de la prairie. Les tailles des blocs au départ ont été de cet ordre. Leur élanement géométrique est compris entre 1.2 et 2.0. Leurs arêtes sont légèrement arrondies.

IV.3.3.2. Trajectographies

CETE

La modélisation de l'éboulement de COMBOIRE a été effectuée sur la base d'un seul profil cinématique sur lequel on rencontre, du haut du versant vers le bas : du rocher sain (zone de départ de l'éboulement), du rocher altéré, des éboulis compacts, des éboulis meubles, du terrain meuble (replat du pied de versant). Le point de départ de l'éboulement se situe vers la cote 500 m. L'élanement cinématique des blocs testés a été échelonné entre 1.1 et 1.5 au pas de 0.1 unité.

Résultats de la modélisation pour les divers élanements (Fig. IV.8) :

1.1 : Arrêt vers la cote 270, avant le pied de talus

- 1.2 : Arrêt à la cote 260, en fond de vallée, à une distance horizontale $x = 247$ m du point de départ. Cette zone d'arrêt correspond à une série de blocs de 1 à 10 m^3 observés sur le terrain.
- 1.3 : Arrêt à la cote 260, en fond de vallée, à une distance horizontale $x = 273$ m du point de départ. Cette zone d'arrêt correspond au bloc de 60 m^3 observé sur le terrain.
- 1.4 : Arrêt à la cote 260, en fond de vallée, à une distance horizontale $x = 290$ m du point de départ. Cette zone d'arrêt se situe 20 m plus loin que le bloc de 60 m^3 .
- 1.5 : Arrêt à la cote 260, en fond de vallée, à une distance horizontale $x = 296$ m du point de départ. Cette zone d'arrêt se situe environ 25 m plus loin que le bloc de 60 m^3 observé sur le terrain.

Pour ce site, on observe que les élancements les plus représentatifs se situent entre 1.1 et 1.3. Les modèles à partir d'élancements plus importants ne sont pas représentés sur le terrain pour cet éboulement particulier.

ADRG

Le profil comporte 10 points. Il n'a pas été tenu compte de la végétation pour représenter le fait que les derniers blocs tombés n'ont plus rencontré la forêt, celle-ci ayant été détruite.

On a supposé des blocs de 10 m^3 au départ, anguleux.

On a réalisé 2 groupes de 10 séries de 300 calculs.

Pour le 1^{er} groupe, on a considéré un coefficient de dispersion de 3, considéré comme ajusté pour ce type de blocs et de terrain. L'analyse des distributions des points d'arrivée montre que les valeurs moyennes des abscisses oscillent entre 223 et 227 m et les valeurs maximales de 269 à 277 m. Ce sont les résultats d'une des séries de ce premier groupe de calculs qui sont représentés à la Fig. IV-8 avec une abscisse maximale de 271 m.

Pour le 2^{ème} groupe on a considéré un coefficient de dispersion de 4, ce qui correspond à une augmentation de l'élancement cinématique du CETE. L'analyse des distributions des abscisses des points d'arrivée montre que :

- Les valeurs moyennes oscillent entre 220 et 226 m. Elles ne sont donc pratiquement pas changées ;
- Les valeurs maximales oscillent entre 287 et 296 m. Elles sont donc augmentées de 20 m environ.

LMR-EPFL

Une série de 300 trajectoires a été calculée avec des blocs de forme parallélépipédique de 1.6 ± 0.4 d'élancement et de $8 \pm 2 \text{ m}^3$ (\equiv tirage aléatoire des cotés du bloc suivant une distribution triangulaire de telle sorte que le volume soit compris entre 6 et 10 m^3 et de moyenne 8 m^3 , tout en respectant la gamme d'élancement spécifiée), lâchés de 3.5 m de hauteur au-dessus de la cote 500 m. Les modélisations ont été effectuées sur base des informations topographiques et de couverture transmises (Fig. IV.7). Les paramètres du terrain, dont plus particulièrement ceux relatifs à la couche d'éboulis, ont été calés pour reproduire de façon adéquate la zone de dépôt observée dans la partie basse du versant (en contrebas de la cote 320 m).

Pour évaluer l'influence de l'élancement des blocs sur les zones atteintes, deux séries de 300 calculs ont été réalisées, tantôt avec des cubes, tantôt avec des parallélépipèdes (élancement 2). La comparaison des distributions des points d'arrêt met en évidence une allure relativement semblable, bien que plus étalée (écart type plus grand) pour les parallélépipèdes, ainsi qu'une tendance pour les blocs à aller moins loin lorsque leur élancement augmente (distance moyenne de propagation un peu plus faible). Sur base des 300 calculs effectués, il n'a pas été possible de tirer de conclusion quant à l'influence de l'élancement des blocs sur leur point de propagation extrême. Seule une comparaison des résultats pour des séries avec un grand nombre de calculs (par exemple 10.000) permettrait peut-être de trancher cette question. Une telle étude n'a pas été faite dans le cadre de ce travail.

IV.3.3.3 Synthèse

Les résultats sont représentés à la figure IV.8 sous forme d'un graphique portant le profil topographique et les courbes de fréquences cumulées de passage des blocs (pour LMR et ADRGT) ainsi que les positions extrêmes atteintes d'après les

IV.3.3.3 Sintesi

I risultati sono rappresentati nella figura IV.8 sotto forma di un grafico che rappresenta il profilo topografico e le curve di frequenza indicanti l'insieme del passaggio dei blocchi (per LMR e ADRGT) così come le posizioni estreme raggiunte

calculs du CETE pour différents élançements cinématiques.

Les répartitions des points d'arrêt des blocs sont relativement analogues pour LMR et ADRGT. Toutefois la distribution obtenue par le LMR est plus étalée que celle de l'ADRGT. Néanmoins les 2 méthodes donnent des résultats qui recouvrent la réalité à plus de 90% :

- Le LMR indique 91% des blocs arrêtés entre les abscisses 150 et 270 m (zone de dépôt réelle) ;
- L'ADRGT indique 98% des blocs arrêtés entre les mêmes abscisses.

La variation de l'élançement cinématique du CETE permet d'obtenir des points extrêmes correspondant sensiblement à la moyenne des distributions ($E = 1.1$), à la position des blocs de 1 à 10 m³ ($E = 1.2$) ou du bloc de 60 m³ ayant été le plus loin ($E = 1.3$).

La distribution des fréquences représentée par l'ADRGT correspond au coefficient de dispersion de 3, généralement utilisé pour ce type de profil et de taille de blocs. Si on avait reporté la distribution des fréquences avec un coefficient de dispersion de 4, les 2 distributions ADRGT et LMR auraient été pratiquement semblables (le coefficient de dispersion ayant pour effet d'étaler davantage la distribution sans modifier sensiblement sa valeur moyenne).

En conclusion, les 3 méthodes donnent des résultats conformes aux observations puisque les blocs les plus lointains sont arrivés à $x = 270$ m et que les valeurs maximales trouvées par les calculs sont 296 m pour le CETE, 271 à 296 m pour l'ADRGT et 290 m pour le LMR.

a seguito dei calcoli del CETE per differenti spinte cinematiche.

Le ripartizioni dei punti d'arresto dei blocchi sono relativamente analoghi per LMR e ADRGT. Tuttavia la distribuzione ottenuta da LMR è più estesa di quella ottenuta da ADRGT. I due metodi danno però dei risultati che riproducono la realtà a più del 90%:

- Il LMR indica che il 91% dei blocchi si arrestano tra le ascisse 150 e 270 m (zona di deposito reale);
- L'ADRGT indica che il 98% dei blocchi si arrestano tra le stesse ascisse.

La variazione della spinta cinematica del CETE permette di ottenere dei punti estremi che corrispondono sensibilmente alla media delle distribuzioni ($E = 1.1$), alla posizione dei blocchi da 1 a 10 m³ ($E = 1.2$) o del blocco di 60 m³ che ha raggiunto il punto più lontano ($E = 1.3$).

La distribuzione delle frequenze raffigurata da ADRGT corrisponde al coefficiente di dispersione di 3, generalmente utilizzato per questo tipo di profilo e di dimensione dei blocchi. Se si fosse riportata la distribuzione delle frequenze con un coefficiente di dispersione di 4, le due distribuzioni ADRGT e LMR sarebbero state praticamente simili (avendo il coefficiente di dispersione l'effetto di propagare maggiormente la distribuzione senza modificare sensibilmente il suo valore medio).

In conclusione, i tre metodi danno dei risultati conformi alle osservazioni poiché i blocchi più lontani sono arrivati a $x = 270$ m e i valori massimi trovati tramite i calcoli sono 296 m per il CETE, da 271 a 296 m per ADRGT e 290 m per il LMR.

IV.3.4. Site de Champrond

IV.3.4.1. Description

Ce cas concerne un éboulement survenu le 31 mars 1997. Le volume de départ a été estimé à 1000 m³. Ce volume était découpé par 2 fissures quasi verticales de direction N20 et N70 (la falaise sommitale étant de direction N40). La taille des blocs au départ n'est pas connue, mais était comprise entre 25 et 150 m³. Les blocs sont plutôt anguleux, avec des élançements compris entre 1.2 et 2.0.

La description du versant est indiquée à la Fig. IV.9. La zone de départ est constituée d'une falaise de calcaires massifs du Portlandien haute de 30 m coupée par une vire plus marneuse. À sa base on note des calcaires et marnes entre les cotes 800 et 780 m.

De la cote 780 jusqu'à 680, l'éboulement a laissé sur place un éboulis contenant des blocs jusqu'à 25 m³, après avoir détruit la végétation. La majeure partie de l'éboulement s'est arrêtée dans cette zone.

En dessous, on rencontre une barre calcaire sur 20 m de haut, à 55° d'inclinaison, puis des terrains constitués de marnes et calcaires marneux subaffleurements recouverts d'une mince couche d'éboulis avec végétation de pins de petite taille. On ne note pratiquement pas de blocs arrêtés dans cette zone qui s'étend jusqu'à l'altitude 470 m.

Au niveau 470 m, on a un ensemble de 2 pistes avec petits merlons hauts de 1 à 2 m dans lequel un certain nombre de blocs ont été arrêtés.

À l'aval on trouve des zones de prés et de cultures avec des pentes de 5 à 15°. Dans cette zone, des blocs de 1 à 10 m³ se sont arrêtés entre les abscisses 520 et 595 m. La limite de la zone habitée est située à l'abscisse 583 m.

IV.3.4.2. Trajectographies

CETE

La modélisation de l'éboulement de CHAMPROND a été effectuée sur la base d'un seul profil cinématique sur lequel on rencontre, du haut du versant vers le bas : du rocher sain (zone de départ de l'éboulement), des éboulis meubles, du rocher sain sous la forme de ressauts intermédiaires, des éboulis compacts, du terrain meuble (à partir du merlon de pied de versant). Le point de départ de l'éboulement se situe vers la cote 830 m. L'élanement cinématique des blocs testés a été échelonné entre 1.1 et 1.5 au pas de 0.1 unité.

Résultats de la modélisation pour les divers élanements (Fig. IV.10) :

- 1.1 : Arrêt possible entre les cotes 720 et 680 en raison de la densité et du rapprochement des points d'impact (comme la plupart des blocs observés sur le terrain). Après passage du ressaut intermédiaire situé entre les cotes 680 et 660, poursuite de la propagation jusqu'au merlon de la cote 470, et arrêt dans l'ouvrage.
- 1.2 : Arrêt à la cote 461 ($x = 488$), après franchissement du merlon avec choc sur l'ouvrage. L'arrêt se produit une trentaine de mètres avant une série de 3 blocs observés sur le terrain.
- 1.3 : Arrêt à la cote 452 ($x = 518.4$) après choc sur le merlon et franchissement.
- 1.4 : Arrêt à la cote 469 ($x = 463$), en raison d'un choc orthogonal sur l'ouvrage.
- 1.4bis : Après recalage de la fin de trajectoire pour escamoter l'impact sur l'ouvrage qui conduit à une forte dissipation de l'énergie, l'impact se produit alors dans le fond de la fosse, comme pour les autres élanements. La propagation du bloc se poursuit alors jusqu'à la cote 443.5 ($x = 548$).
- 1.5 : Arrêt vers la cote 429 ($x = 588$) après franchissement de l'ouvrage, soit environ 6 m avant le dernier bloc observé sur le terrain. Une modélisation avec remplacement du terrain meuble situé après le merlon par un terrain de type éboulis meubles conduit à une propagation jusqu'à $x = 603$ (8 m plus loin que le dernier bloc observé).

Les trajectoires relativement rasantes des blocs dans le versant conduisent nécessairement à des impacts sur l'ouvrage situé en pied. La position de l'impact sur la fosse puis sur le merlon va influencer fortement sur la suite de la propagation du bloc au delà de l'obstacle. La taille du bloc va également être un paramètre important pour le comportement de l'ouvrage. Vis à vis d'un bloc de volume modeste, la géométrie du merlon ne va probablement pas se modifier à l'impact. Pour un gros bloc (10 m³ par exemple), la levée de terre va se détruire partiellement et le rebond en sera certainement affecté. Cette modification de géométrie n'a pas été prise en compte dans la modélisation.

ADRG

Le profil a été représenté par 28 points. On n'a pas tenu compte de la végétation entre les cotes 780 et 680 m. Au contraire on en a tenu compte entre les cotes 657 et 484 m. On a tenu compte de toutes les pistes présentes dans le versant et on a pu constater qu'elles pouvaient faire l'effet de tremplin.

La taille des blocs au départ a été supposée entre 1 et 150 m³.

On a réalisé 3 séries de calculs :

- une série de 300 calculs ($X_{\max} = 587$ m, Fig. IV.10) ;
- une série de 3630 calculs ($X_{\max} = 622$ m) ;
- une série de 45.200 calculs ($X_{\max} = 636$ m).

On constate que dans ce cas particulier de profil, un grand nombre de calculs est nécessaire à cause de 2 particularités :

- l'ensemble des pistes et du petit merlon (cote 470 m) qui arrêtent plus ou moins de blocs lorsqu'on exécute des séries de 300 calculs,
- l'existence d'un ressaut du terrain entre les abscisses 560 et 578 m à un endroit où moins de 1% des blocs parviennent. Dès qu'un bloc dépasse l'abscisse 560 m, il reprend de la vitesse ce qui fait que les limites extrêmes (abscisse maximale de la série de calculs) peuvent varier sensiblement d'une série à l'autre.

On conservera les résultats de la série de 300 calculs pour la représentation de la distribution des points d'arrêt (Fig. IV.10), même si la série de 45.200 calculs donne plus de précision pour les faibles probabilités d'atteinte.

Les principaux résultats à retenir sont les suivants :

- 64 à 68% des blocs s'arrêtent entre les abscisses 28 et 160 m, ce qui recoupe les observations de terrain.
- 0.1 à 0.2% des blocs s'arrêtent dans la pente entre les abscisses 160 et 450 m.
- 14 à 17% des blocs s'arrêtent dans les 2 pistes au niveau 470 m.
- 0,2% des blocs atteignent l'abscisse 560 m.

LMR-EPFL

Une série de 300 trajectoires a été calculée avec des blocs de 1 à 25 m³, de forme parallélépipédique avec un élanement moyen de 1.5, lâchés de 5 m de hauteur au-dessus de la cote 815 m. Les modélisations ont été effectuées sur base des informations topographiques et de couverture transmises (Fig. IV.9). Les paramètres du terrain ont été calés pour reproduire de façon adéquate les zones de dépôt observées dans la partie supérieure (cotes 780 à 680 m) et dans la partie basse (en contrebas du merlon, cote 470 m) du versant. Une attention particulière a été portée au calage de la constante C (caractéristique liée à la plastification du sol, voir point IV.2.3.2) de la couche d'éboulis supérieure. En effet, une prise en compte adéquate de la plastification de cette couche est apparue importante suite à l'observation que les plus gros blocs (jusqu'à 25 m³) se sont arrêtés dans cet éboulis sablo-graveleux situé dans la partie supérieure du versant, tandis que des blocs de plus petites dimensions (1 à 10 m³) ont poursuivi leur course vers l'aval et dépassé le merlon du bas de la pente.

Après calage de la constante C, 4 séries complémentaires de 300 calculs avec des blocs de respectivement 1, 6, 10 et 25 m³ ont confirmé que la proportion de blocs arrêtés dans l'éboulis supérieur augmente avec le volume des blocs. Il faut néanmoins noter que la faible proportion de ces blocs les plus volumineux qui franchit la barre calcaire intermédiaire a tendance à se propager plus loin que les blocs de petite taille (manifestation probable de l'influence de l'inertie des blocs).

IV.3.4.3 Synthèse

Les résultats sont représentés à la figure IV.10 sous forme d'un graphique portant le profil topographique et les courbes de fréquences cumulées de passage de blocs (pour ADRGT et LMR) ainsi que les points d'atteinte extrêmes calculés par le CETE pour divers élanements de blocs.

L'analyse des résultats permet les constatations suivantes :

- Les méthodes ADRGT et LMR donnent des résultats très voisins quant aux fréquences cumulées de passage de blocs, ce qui est remarquable sur un tel profil relativement complexe. Les deux méthodes probabilistes permettent de retrouver les deux zones d'arrêt effectivement observées : selon les calculs de l'ADRGT et du LMR, 70% des blocs s'arrêtent dans la principale zone de dépôt (cote 780 à 680 m où la majeure partie de l'éboulement s'est arrêtée) tandis que les 30% restant ne se déposent pratiquement qu'en contrebas des merlons.
- On peut remarquer que la distribution obtenue par le LMR est légèrement plus étalée que celle de l'ADRGT.
- La propension à l'arrêt de blocs dans la zone de dépôt supérieure est relevée également par le CETE pour un élanement de 1.1 (mention d'un

IV.3.4.3 Sintesi

I risultati sono rappresentati nella figura IV.10 sotto forma di un grafico che riporta il profilo topografico e le curve delle frequenze cumulate del transito dei blocchi (per ADRGT e LMR) così come i punti di arrivo estremi calcolati dal CETE per diverse simulazioni di caduta di blocchi.

L'analisi dei risultati permette le seguenti constatazioni:

- I metodi ADRGT e LMR danno dei risultati molto vicini per quanto riguarda le frequenze cumulate di transito dei blocchi, ciò che è notevole per un profilo relativamente complesso. I due metodi probabilistici permettono di ritrovare le due zone di arresto effettivamente osservate: secondo i calcoli dell'ADRGT e del LMR, il 70% dei blocchi si fermano nella zona principale di deposito (quota da 780 a 680 m dove la maggior parte della frana si è fermata) mentre il restante 30% si deposita solamente sotto il livello dei valli paramassi.
- Si può notare che la distribuzione ottenuta dal LMR è leggermente più estesa di quella del ADRGT.
- La propensione all'arresto di blocchi nella zona di deposito superiore è rivelata anche dal CETE per una spinta di 1.1 (indicazione di un riavvi-

rapprochement des points d'impact indiquant un ralentissement significatif avec possibilité d'arrêt entre les cotes 720 et 680 m). Les blocs qui franchissent cette zone poursuivent leur trajectoire jusqu'au premier merlon, ce qui correspond au début de la deuxième zone de dépôt calculée par l'ADRGT et le LMR et concordant aux observations sur le terrain. Pour les élanements 1.2 à 1.5, les points extrêmes se trouvent en contrebas des merlons, à l'instar de la seconde zone d'arrêt prédite par l'ADRGT et le LMR (1.4bis étant le point d'arrêt pour un élanement de 1.4 sans impact dans le merlon).

- La comparaison des résultats des 3 méthodes montre que l'abscisse extrême de propagation est trouvée par la méthode de l'ADRGT. A première vue, cela pourrait sembler contradictoire car on attendrait de la méthode CETE qu'elle fournisse des points d'atteinte au delà de ceux obtenus par les autres logiciels. Une explication à ce fait est que le bloc d'élanement 1.5 simulé par PROPAG a heurté le merlon, ce qui a entraîné une forte perte d'énergie.

cinamento dei punti d'impatto che indicano un rallentamento significativo con possibilità d'arresto tra le quote 720 e 680 m). I blocchi che superano questa zona proseguono la loro traiettoria fino al primo vallo paramassi, ciò che corrisponde alla seconda zona di deposito calcolata da ADRGT e da LMR e che corrisponde alle osservazioni sul terreno. Per le spinte da 1.2 a 1.5, i punti estremi si trovano sotto il livello dei valli paramassi, come per la seconda di arresto prevista da ADRGT e LMR (1.4 bis essendo il punto di arresto per una spinta di 1.4. senza impatto nel vallo paramassi).

- Il confronto dei risultati dei tre metodi dimostra che l'ascissa estrema di propagazione si rileva dal metodo ADRGT. A prima vista, ciò potrebbe sembrare contraddittorio poiché ci si attenderebbe che fosse il metodo CETE a fornire dei punti di arrivo al di là di quelli ottenuti da altri software. Una spiegazione di questo fatto è che il blocco con spinta 1.5 simulato da PROPAG abbia urtato il vallo paramassi determinando un forte calo di energia.

IV.3.5. Site de Saint-Marcel

IV.3.5.1. Description

Le site de Saint-Marcel se situe en Savoie, entre Moutiers et Aime, au niveau du grand versant qui domine la route nationale n° 90 à l'aval du tunnel routier du Siaix.

Le 3 mars 2000, vers 10h00, un bloc rocheux proche de 1 m³ a terminé sa course sur la R.N. 90, contre la glissière de sécurité au Km 55.250. Aucun dégât matériel n'est à déplorer. Dans le même temps, un second bloc de 1.2 m³ s'est immobilisé sur une voie communale située une vingtaine de mètres en contre-haut de la route nationale (Fig. IV.11).

L'origine de l'éboulement se situe entre les cotes 1200 et 1220 m, au niveau d'un escarpement rocheux très fracturé et au relief très irrégulier où ce phénomène semble très fréquent (nombreux blocs et cicatrices observés à proximité et dans la forêt).

L'élément éboulé totalisait moins de 10 m³ avec un mécanisme de départ de type glissement plan. Après une chute libre d'environ 20 m, la propagation des éboulis s'est tout d'abord effectuée dans un étroit couloir raide et dégagé (sur les premières dizaines de mètres, la végétation est en effet détruite par de fréquents éboulements), puis dans un versant éluvial régulier et planté d'une forêt de hêtres pouvant avoir des diamètres > 50 cm.

La propagation des deux blocs, de forme isodiamétrique (élanement géométrique nettement inférieur à 1.5) et faiblement anguleux, s'est poursuivie jusqu'en bas de versant (vers la côte 710 m pour la propagation la plus longue), à la sortie Nord du village de Saint-Marcel (dénivelée totale proche de 550 m).

Il est à noter que sans la présence de la glissière de sécurité, le bloc de 1 m³ aurait poursuivi sa route en direction de la rivière, via le versant situé en contre-bas de la chaussée.

Les éléments topographiques utilisés pour la modélisation sont issus pour partie d'un lever de terrain à la boussole et au clinomètre (de la piste jusqu'au point de départ de l'éboulement). La partie inférieure du versant, située à l'aval des pistes forestières, a été extraite du plan I.G.N. au 1/25.000.

IV.3.5.2. Trajectographies

CETE

La modélisation de l'éboulement de SAINT-MARCEL a été effectuée sur la base d'un seul profil cinématique sur lequel on a considéré, du haut du versant vers le bas : du rocher sain (zone de départ de l'ébou-

lement), des éboulis compacts (couloir de tête de versant), un grand versant d'éboulis meuble fortement boisé, des pistes forestières et une route analogues à des éboulis compacts, du terrain meuble (dans les pentes très faibles et dans le versant en pente douce situé en contre-bas de la route nationale). Le point de départ de l'éboulement a été situé vers la cote 1220 m. L'élanement cinématique des blocs testés a été échelonné entre 1.1 et 1.5 au pas de 0.1 unité.

Résultats de la modélisation pour les divers élanements (Fig. IV.12) :

- 1.1 : Arrêt des blocs en début de versant, vers la cote 1064 (comme la plupart des blocs observés sur le terrain).
- 1.2 : Arrêt à la cote 718, après franchissement de la piste forestière sur laquelle s'était arrêté un des blocs (1 m³).
- 1.3 : Arrêt en contrebas de la RN 90, à la cote 703 (le rail de sécurité n'a pas été modélisé).
- 1.4 : Arrêt vers la cote 701, en contrebas de la RN 90.
- 1.5 : Arrêt vers la cote 699, en contrebas de la RN 90.

Mis à part les blocs à très faible élanement qui stoppent leur progression dès le début du versant supérieur, on note une propagation générale des blocs jusqu'en bas de versant. La modélisation avec un élanement cinématique de 1.2 montre un arrêt avant la route nationale (zone également occupée par une habitation). Les élanements 1.3, 1.4 et 1.5 conduisent à des propagations longues qui vont au-delà de la route nationale. Lors du dernier éboulement, un des blocs s'est arrêté sur la RN, après avoir percuté la glissière de sécurité extérieure. Sans ce dernier impact sur un obstacle, le bloc aurait poursuivi sa propagation au niveau des terrains situés en contrebas de la route.

ADRGT

Le profil a été simplifié en le ramenant à 36 points. La taille des blocs au départ a été prise entre 1 et 3 m³. Le point de départ est sur une petite falaise de 25 m de hauteur. On a réalisé une série de 300 calculs, avec un coefficient d'angularité de 1.8 (blocs assez anguleux).

D'après les résultats des calculs (Fig. IV.12), on peut faire 2 remarques :

- Le point extrême atteint est à l'abscisse 697 m, un peu à l'amont de la route R.N. 90.
- Les blocs commencent à s'arrêter à partir de l'abscisse 80 m et une majorité (62%) s'arrête avant l'abscisse 225 m, alors que 11.6% seulement s'arrêtent entre les abscisses 225 et 457 m.

D'autre part on peut tenter de comparer les hauteurs de vol calculées à des traces d'impact sur des arbres relevées par le CETE (Tab. IV.4). La valeur maximale des hauteurs de vol calculées est toujours un peu supérieure aux observations faites, lesquelles ne représentent pas obligatoirement les hauteurs maximales lors d'un vol.

LMR-EPFL

Une série de 300 trajectoires a été calculée avec des blocs de 1 à 3 m³ de forme parallélépipédique de 1.3 d'élanement moyen, lâchés de 20 m de hauteur au-dessus de la cote 1195 m (décrochement depuis le sommet de l'escarpement rocheux). Les modélisations ont été effectuées sur base des informations topographiques et de couverture transmises (Fig. IV.11). Les paramètres de l'éboulis meuble situé dans la partie supérieure du versant ont été calés pour reproduire de façon adéquate la zone de dépôt observée entre les cotes 1128 et 1024 m. Les paramètres de la couverture végétale située dans la partie inférieure ont quant à eux été affinés pour que la distribution calculée des points d'arrêt dans cette partie de la pente soit conforme à l'observation de petits blocs épars.

IV.3.5.3 Synthèse

La figure IV.12 illustre les points d'arrêt calculés sur le site de Saint-Marcel. Comme pour les autres sites, les résultats fournis par l'ADRGT et le LMR (resp. les courbes discontinue bleue et continue verte) permettent une représentation statistique des points d'arrêt dans le versant, tandis que les résultats du CETE (points rouges) donnent les points

IV.3.5.3. Sintesi

La figura IV.12 illustra i punti di arresto calcolati sul sito di Saint-Marcel. Come per gli altri siti, i risultati comunicati dal ADGRT e dal LMR (rispettivamente le curve discontinue blu e continue verdi) permettono una rappresentazione statistica dei punti di arresto sul versante mentre i risultati del CETE (punti rossi) forniscono i punti di raggiungi-

d'atteinte extrêmes pour divers élançements de blocs.

L'analyse des résultats permet les constatations suivantes :

- Les trois logiciels détectent correctement la première zone de dépôt des blocs située entre les abscisses 75 et 220. Sur cette zone, les programmes ADRGT et EBOULEMENT prédisent l'arrêt d'environ 60% des blocs et le logiciel PROPAG indique l'arrêt du bloc d'élançement 1,1 au milieu de la zone de dépôt.
- Les programmes ADRGT et EBOULEMENT prédisent ensuite l'arrêt de la quasi totalité des blocs entre les abscisses 220 et 700 (zone où de petits blocs épars sont observés, mais sur laquelle aucun des blocs du dernier événement s'est arrêté). A partir de l'abscisse 700 le programme ADRGT ne prédit plus d'arrêt de blocs, EBOULEMENT prévoit un très faible pourcentage d'arrêt (environ 2%). En revanche, PROPAG prévoit l'arrêt des blocs d'élançement 1.2 à 1.5 entre les abscisses 700 et 800 (deux blocs ont été observés aux abscisses respectives 700 et 740).

mento massimi per i vari slanci di blocchi.

L'analisi dei risultati permette le seguenti constatazioni:

- I tre software rivelano correttamente la prima zona di deposito dei blocchi situata tra le ascisse 75 e 220. Su questa zona, i programmi ADRGT e EBOULEMENT predicono l'arresto di circa il 60% dei blocchi e il software PROPAG indica l'arresto del blocco di spinta 1.1. al centro della zona di deposito.
- I programmi ADRGT e EBOULEMENT predicono poi l'arresto della quasi totalità dei blocchi fra le ascisse 220 e 700 (area dove pochi piccoli blocchi sono stati osservati ma sulla quale nessun blocco dell'ultimo evento si è fermato). A partire dall'ascissa 700, il programma ADRGT non predice più arresto di blocchi; EBOULEMENT prevede una percentuale di arresto molto debole (circa 2%). Per contro, PROPAG prevede l'arresto dei blocchi di spinta da 1.2 a 1.5 tra le ascisse 700 e 800 (due blocchi sono stati osservati nelle rispettive ascisse 700 e 740).

IV.3.6. Site de Barjac

IV.3.6.1. Description

Le village de BARJAC est établi au pied du versant Ouest du Causse de Changefège (Lozère – France). Le bord du plateau calcaire dolomitique qui culmine entre les altitudes 900 et 1033 est marqué par une corniche abrupte formant une ligne irrégulière de falaises dominant un versant boisé à forte pente (Fig. IV.13). Au-delà, la pente s'atténue de manière variable, jusqu'à une dizaine de degrés entre les altitudes 750 et 710, dans une zone de parcelles cultivées et de lotissement.

Le 8 octobre 1995, une masse rocheuse d'un volume de l'ordre de 250 à 350 m³ s'est détachée de la falaise supérieure, vers l'altitude 960, et a dévalé la pente en direction d'un groupe d'habitations. Au cours de sa chute puis de sa propagation, cette masse s'est fragmentée en un ensemble de gros blocs, dépassant plusieurs dizaines de mètres cubes pour les plus gros, créant une trouée dans le couvert forestier. Les blocs rocheux les plus importants se sont propagés à travers la zone bâtie :

- Un bloc (B1) de 25 m³ s'est immobilisé à la cote 728, quelques mètres à côté d'une maison en contrebas d'un chemin d'exploitation, après avoir détruit deux murs de soutènement. De section trapézoïdale, ce bloc a pour dimensions moyennes L = 3.7 à 4.6 m, l = 1.8 à 3.5 m et e = 1.8 à 4 m.
- Un bloc (B5) de 1.5 m³ a terminé sa course à la cote 723 au contact du mur d'une maison. De section trapézoïdale, ce bloc a pour dimensions moyennes L = 1.7 m, l = 0.5 à 1.45 m et e = 1.7 m.
- Un bloc (B4) de 1.2 m³ a percuté le mur d'une maison vers la cote 710. De section triangulaire, ce bloc a pour dimensions moyennes L = 1.7 m, l = 0.5 à 1.4 m et e = 0.7 m.
- Un bloc (B3) de 25 m³ a percuté une maison vers la cote 709, détruisant une partie du bâtiment. De forme parallélépipédique, ce bloc a pour dimensions moyennes L = 4.0 m, l = 3.6 à 4.2 m et e = 1.8 à 2.7 m.
- Le bloc le plus important (B2) qui totalise un volume de 50 m³ a poursuivi sa course jusqu'à la cote 702 en traversant plusieurs parcelles, et en évitant quatre maisons d'habitation. De section trapézoïdale, ce bloc a pour dimensions moyennes L = 5.0 à 5.5 m, l = 3.0 à 4.3 m et e = 2.5 à 3.2 m.
- Deux blocs de plus faible volume (0.1 à 0.2 m³), provenant de l'éclatement des blocs principaux ont également atteint la zone bâtie sans provoquer de dégâts significatifs.

Le caractère massif du calcaire dolomitique formant la falaise principale explique la faible fragmentation de la masse éboulée et les gros blocs observés dans la pente (dont trois dépassent 20 m³). L'ensemble

des blocs ayant atteint la base du versant (au-dessous du chemin d'exploitation) représente plus de 100 m³, soit environ 30% du volume de la masse éboulée. Les blocs dispersés sur la pente au cours de la propagation résultent essentiellement de l'éclatement de blocs plus importants. Ces éléments dont le volume unitaire n'excède pas 0.5 m³, et plus souvent 0.1 à 0.2 m³, ont été arrêtés par les arbres. L'éboulement principal s'est propagé à travers le couvert forestier (arbres de 20 à 30 cm de diamètre). La trajectoire principale se subdivise au tiers inférieur du versant en quatre branches légèrement divergentes. La divergence observée est faible (de l'ordre de 15° de part et d'autre de l'axe moyen) et conforme aux valeurs habituellement observées en site analogue. Le relevé des impacts dans le versant médian montre que la propagation s'est effectuée avec des trajectoires rasantes et des rebonds pluridécamétriques (15 à 30 m). A l'aval, les rebonds sont plus courts ou alternent avec des phases de pseudo-roulement.

La propagation de cet éboulement ne présente aucun caractère exceptionnel. Les conditions de propagation sont très proches des conditions habituelles rencontrées dans des cas analogues.

IV.3.6.2. Trajectographies

CETE

Parmi les divers profils étudiés par le CETE lors de l'éboulement de Barjac, seul l'un d'entre eux a été retenu pour la comparaison des codes. Un plan photogrammétrique a été réalisé spécialement pour l'étude globale de propagation et de dimensionnement des protections. On rencontre, du haut du versant vers le bas : du rocher sain (zone de départ de l'éboulement), des éboulis compacts (pour tout le versant et la zone de lotissement). Le point de départ de l'éboulement se situe vers la cote 972 m. L'élanement cinématique des blocs testés a été échelonné entre 1.1 et 1.5 au pas de 0.1 unité.

Résultats de la modélisation pour les divers élanements (Fig. IV.15) :

- 1.1 : Arrêt vers la cote 774, dans le versant. C'est dans cette zone que la majorité des petits blocs (0.1 à 0.5 m³) s'est épanouie.
- 1.2 : Arrêt vers la cote 712, en position équivalente au bloc B4.
- 1.3 : Arrêt vers la cote 702, en position équivalente au bloc B2.
- 1.4 : Arrêt vers la cote 698, plus bas que la position du bloc B2 (qui a eu la plus longue trajectoire).
- 1.5 : Arrêt vers la cote 698, plus bas que la position du bloc B2 (qui a eu la plus longue trajectoire).

Avec l'étude de deux options basées sur une variation de la nature des terrains qui constituent le bas de versant, on constate que la solution qui adopterait un versant boisé composé d'éboulis compacts suivi de prairies et de terrains lotis considérés comme éboulis meubles (terrain sensiblement plus souple que celui utilisé pour la modélisation), donne des résultats tout à fait conformes à la réalité des événements enregistrés lors du dernier éboulement. Les simulations effectuées à partir d'un versant homogène, constitué de terrains de type éboulis compact (version étudiée ici), conduisent à des résultats apparemment plus défavorables (par rapport aux éléments relevés lors du dernier éboulement), mais qui correspondent à des faits enregistrés lors d'événements anciens. On relève en effet de gros blocs anciens dans le vieux village qui est situé en contre-bas du lotissement, et qui ont été laissés en place lors de la construction des maisons.

ADRGT

Le profil a été arrêté à l'abscisse 664 m à la rupture de pente, et a été simplifié avec 38 points pour ne conserver que les aspérités dépassant le mètre.

La partie haute du profil est constituée de calcaires massifs. A leur pied (entre les altitudes 938 et 928 m) on a supposé le rocher un peu plus tendre subaffleurant. Entre les altitudes 928 et 748 m les terrains sont constitués d'éboulis compacts. On n'a pas tenu compte de la végétation, car le calcul a été limité aux blocs de 20 à 60 m³ pour lesquels la forêt a un rôle pratiquement négligeable dès que les pentes sont significatives. En contrebas de l'altitude 748 m on a tenu compte des prairies, des routes et des parkings.

Le volume des blocs au départ a été pris entre 20 et 60 m³. Les blocs sont légèrement arrondis.

On a réalisé 3 séries de calculs pour 3 valeurs de X_{limite} au-delà desquelles on demande 300 blocs. On a pris $X_{\text{lim}} = 0$, $X_{\text{lim}} = 551$ m et $X_{\text{lim}} = 595$ m. On a représenté à la Fig. IV.15 les résultats de la première série de calculs. Pour l'abscisse limite de 595 m, le calcul s'est arrêté pour 45.235 blocs partis, mais seuls 65 ont dépassé l'abscisse $X = 595$ m.

Ceci permet de représenter assez précisément la répartition des abscisses d'arrêt : 83.1% des blocs s'arrêtent entre les abscisses 401 et 551 m et 12.2% des blocs entre les abscisses 551 et 600 m, ce dernier chiffre représentant l'abscisse maximale de la série.

On peut, en utilisant la répartition des blocs au-delà de 551 m, déterminer les abscisses correspondant à des probabilités d'atteinte (Fig. IV.14).

- $10^{-2} = 589$ m
- $10^{-3} = 595$ m
- $10^{-4} = 598$ m
- $10^{-5} = 600$ m (extrapolation)
- $10^{-6} = 602$ m (extrapolation)

Dans ce cas de profil avec pentes finales très douces et régulières le calcul semble montrer l'existence d'une abscisse "limite" puisque les écarts d'abscisse entre 2 probabilités dans un rapport de 1 à 10 sont de l'ordre de 2 mètres.

LMR-EPFL

Une série de 300 trajectoires a été calculée avec des blocs de 40 ± 20 m³ de forme parallélépipédique avec un élan moyen de 1.5 et lâchés de 2 m de hauteur au-dessus de la cote 970 m. Les modélisations ont été effectuées sur base des informations topographiques et de couverture transmises (Fig. IV.13). Les paramètres du terrain ont été calés pour reproduire de façon adéquate la zone de dépôt observée dans la partie basse du versant (en contrebas de la cote 785 m).

La queue de la distribution de points d'arrêt (Fig. IV.15) se développe plus de 50 m en aval du bloc B2 de 50 m³ qui s'est propagé le plus loin lors de l'événement d'octobre 1995, mais elle semble coïncider avec la zone d'arrêt dans le vieux village de quelques gros blocs provenant d'un événement ancien.

IV.3.6.3 Synthèse

La Figure IV.15 illustre les points d'arrêt calculés sur le site de Barjac. Comme pour les autres sites, les résultats fournis par l'ADRGT et le LMR (respectivement les courbes discontinue bleue et continue verte) permettent une représentation statistique des points d'arrêt dans le versant, tandis que les résultats du CETE (points rouges) donnent les points d'atteinte extrêmes pour divers élanements de blocs.

L'analyse des résultats permet les constatations suivantes :

- Le programme ADRGT prévoit une première zone d'arrêt des blocs (environ 3%) à l'abscisse 120 qui ne correspond pas à une zone de dépôt observée lors de cet événement. Il ne dépose aucun bloc jusqu'à l'abscisse 450 ; mais en revanche 95% des blocs sont déposés entre les abscisses 450 et 600 et cela en accord avec les observations fournies sur les positions d'arrêt des gros blocs.
- EBOULEMENT dépose quelques blocs à partir de l'abscisse 370 (environ 10%), mais la zone principale de dépôt se situe entre les abscisses 450 et 620 (85% des blocs) conformément aux observations faites sur les positions d'arrêt des gros blocs. Un résidu de 3% environ se dépose enfin entre les abscisses 620 et 696.
- Ces modèles de l'ADRGT et du LMR ne prédisent pas d'arrêt de blocs dans la zone de dépôt de petits blocs (0.1 à 0.5 m³) observée sur le terrain (entre les abscisses 140 et 360). Ceci

IV.3.6.3 Sintesi

La figura IV.15 illustra i punti di arresto calcolati sul sito di Barjac. Come per gli altri siti, i risultati comunicati dal ADGRT e dal LMR (rispettivamente le curve discontinue blu e continue verdi) consentono di rappresentare statisticamente i punti di arresto sul versante mentre i risultati del CETE (punti rossi) forniscono i punti di raggiungimento massimi per le varie simulazioni di caduta di blocchi.

L'analisi dei risultati permette le seguenti constatazioni:

- Il programma ADGRT prevede una prima zona di arresto dei blocchi (circa 3%) all'ascissa 120 che non corrisponde ad una zona di deposito osservata durante questo evento. Non deposita alcun blocco fino all'ascissa 450; al contrario il 95% dei blocchi sono depositati fra le ascisse 450 e 600 e ciò in accordo con le osservazioni fornite sulle posizioni di arresto dei grossi blocchi.
- EBOULEMENT deposita alcuni blocchi a partire dall'ascissa 370 (circa 10%) ma la zona principale di deposito si situa tra le ascisse 450 e 620 (85% dei blocchi) in conformità con le osservazioni fatte sulle posizioni di arresto dei grossi blocchi. Un residuo del 3% circa si deposita infine tra le ascisse 620 e 696.
- Questi modelli del ADGRT e del LMR non prevedono arresto di blocchi nella zona di deposito dei piccoli blocchi (0.1 a 0.5 m³) verificata sul terreno (fra le ascisse 140 e 360). Ciò si spie-

s'explique par le fait que ces deux partenaires ont considéré pour leurs calculs des blocs dont le volume variait entre 20 et 60 m³ afin que les simulations soient représentatives des gros blocs observés sur le terrain.

- Le logiciel PROPAG prédit à l'abscisse 350 la zone d'atteinte d'un bloc d'élanement 1.1 au droit de la zone de dépôt des petits blocs. Il prévoit un arrêt des blocs d'élanements 1.2, 1.3, 1.4 et 1.5 entre les abscisses 530 et 650, la zone d'atteinte extrême des blocs recensés dans le cadre de cet événement étant délimitée par les arrêts des blocs d'élanement 1.3.

ga dal fatto che questi due partners hanno considerato nei loro calcoli blocchi il cui volume variava tra 20 e 60 m³ affinché le simulazioni siano rappresentative dei grossi blocchi osservati sul terreno.

- Il software PROPAG prevede all'ascissa 350 la zona di raggiungimento di un blocco di spinta 1.1. perpendicolarmente alla zona di deposito dei piccoli blocchi. Prevede un arresto dei blocchi di spinta 1.2, 1.3, 1.4 e 1.5 fra le ascisse 530 e 650, essendo la zona di espansione massima dei blocchi, censiti nell'ambito di questo evento, definita dagli arresti di blocchi di spinta 1.3.

IV.3.7. Site de Bieudron

IV.3.7.1. Description

Suite aux fortes précipitations de l'automne 1992, une masse rocheuse d'un volume estimé de 100 à 150 m³ s'est détachée de la barre rocheuse supérieure des falaises de Bieudron (Vallée du Rhône). Une proportion importante des blocs déstabilisés s'est arrêtée sur la vire supérieure boisée située juste au-dessous de la zone d'arrachement de l'éboulement, couchant la forêt sur une distance d'environ 25 m et sur une largeur de 15 m. De la masse éboulée, seuls quatre blocs ont terminé leur course au pied des falaises, c'est-à-dire non loin des portails de la centrale hydro-électrique de Bieudron et en bordure de la route cantonale Aproz-Riddes. L'élanement de ces blocs était proche de 1 et leur volume compris entre 0.3 m³ (3 blocs) et 2 m³ (1 bloc).

Les données géomorphologiques sont synthétisées à la Fig. IV.16. On rencontre successivement depuis le haut :

- Une falaise de calcaires dolomitiques bréchiques à interlits schisteux (unité géologique : brèche du Télégraphe). La zone d'arrachement se situe dans cette barre rocheuse et culmine à 870 m.
- Une vire supérieure (pente moyenne de l'ordre de 35°) composée d'éboulis grossiers surmontés d'une couverture de terre végétale d'épaisseur variable (environ 0 à 30 cm). Elle est colonisée par une zone forestière de bouleaux et noisetiers.
- Une falaise intermédiaire dans les grès et schistes de Saint-Christophe.
- Une vire inférieure de caractéristiques analogues à celles de la vire supérieure.
- Une dernière falaise à forte pente (jusqu'à 60°) dans les grès et schistes de Saint-Christophe.
- Un terrain meuble subhorizontal dans lequel les 4 blocs extrêmes de l'événement de novembre 1992 se sont littéralement fichés.

En 1993, des filets de protection de 5 m de hauteur et de 2300 kJ de capacité de dissipation énergétique ont été implantés dans la partie inférieure des éboulis supérieurs (soit au-dessus de la falaise intermédiaire).

Pour les comparaisons des codes trajectographiques, des blocs cubiques de 1 m³ ont été lâchés au-dessus de la falaise de calcaire depuis la cote 880 m. Deux types d'analyses ont été faites :

- La première pour étudier la propagation des blocs dans le versant en l'absence de filets de protection ;
- La seconde pour déterminer la répartition statistique des hauteurs, vitesses et énergies de passage des blocs à la cote 720 m qui coïncide approximativement à l'emplacement des filets de protection.

IV.3.7.2. Trajectographies

CETE

La modélisation de l'éboulement de BIEUDRON a été effectuée sur la base d'un seul profil cinématique. Trois variantes de terrain ont été examinées, en fonction des coupes en travers et des annotations fournies ; puis, l'une d'entre-elles a été retenue. On rencontre, du haut du versant vers le bas : du rocher altéré (zone de départ de l'éboulement), une alternance d'éboulis meubles, d'éboulis compacts et de rocher altéré dans les pentes les plus raides, et du terrain meuble en fond de vallée. Le point de départ de l'éboulement

se situe vers la cote 870 m. L'élançement cinématique des blocs testés a été échelonné entre 1.1 et 1.5 au pas de 0.1 unité.

Résultats de la modélisation pour les divers élançements (Fig. IV.17) :

- 1.1 : Ralentissement au niveau du versant supérieur. Pour les blocs qui franchissent cette zone, la propagation s'effectue jusque dans la vallée ($x = 375$). Dans le secteur d'implantation des écrans pare-blocs, entre les cotes 720 et 690, on note des vitesses maximales de passage de 13.3 m/s en vitesse incidente (V_i) et de 11.4 m/s en vitesse réfléchie (V_r). L'énergie maximale correspondante est d'environ 220 kJoules pour un bloc de 1 m^3 .
- 1.2 : La propagation s'effectue jusque dans la vallée ($x = 429$). Dans le secteur d'implantation des écrans pare-blocs, on note des vitesses maximales de passage de 27.4 m/s en V_i et de 22.4 m/s en V_r . L'énergie maximale correspondante est d'environ 950 kJoules pour un bloc de 1 m^3 .
- 1.3 : La propagation s'effectue jusque dans la vallée ($x = 445$). Dans le secteur d'implantation des écrans pare-blocs, on note des vitesses maximales de passage de 30.8 m/s en V_i et de 23.7 m/s en V_r . L'énergie maximale correspondante est d'environ 1250 kJoules pour un bloc de 1 m^3 .
- 1.4 : La propagation s'effectue jusque dans la vallée ($x = 468$). Dans le secteur d'implantation des écrans pare-blocs, on note des vitesses maximales de passage de 33.5 m/s en V_i et de 25.4 m/s en V_r . L'énergie maximale correspondante est d'environ 1400 kJoules pour un bloc de 1 m^3 .
- 1.5 : La propagation s'effectue jusque dans la vallée ($x = 450$). Dans le secteur d'implantation des écrans pare-blocs, on note des vitesses maximales de passage de 34.2 m/s en V_i et de 25.7 m/s en V_r . L'énergie maximale correspondante est d'environ 1500 kJoules pour un bloc de 1 m^3 .

On remarque que toutes les trajectoires conduisent à une propagation des blocs jusque dans la vallée, avec des passages très aériens et des vitesses extrêmes en partie basse du versant. Le positionnement des protections au niveau du versant supérieur permet par contre d'intercepter des blocs dont la hauteur de passage n'excède pas 1.9 m (valeur minimale à laquelle il convient d'ajouter le rayon du bloc pour connaître la position du centre de gravité) vers la cote 720 et 2.7 m vers la cote 710, et qui ont des énergies maximales de 1500 kJoules pour des blocs de 1 m^3 .

ADRG

On a conservé le profil à 33 points de l'EPFL en ajoutant un point à la cote 720 de manière à y réaliser un calcul de protection (voir plus loin).

La taille des blocs au départ est de 1 m^3 . On a supposé de la forêt sur les segments $x = 85 - 197 \text{ m}$ et $x = 225 - 319 \text{ m}$.

On a effectué un calcul de propagation et un calcul de protection.

Le calcul de propagation permet de faire apparaître les zones privilégiées d'arrêt des blocs : $x = 114 - 150 \text{ m}$, $x = 179 - 197 \text{ m}$, $x = 235 - 275 \text{ m}$ et surtout $x = 358 - 405 \text{ m}$. L'abscisse maximale de la série est à 405 m.

Le calcul de protection permet de faire apparaître que la hauteur de passage maximale (sur 300 blocs passant à la protection pour 331 partis d'en haut) est de 3.2 m (hauteur du centre de gravité du bloc), et que la hauteur moyenne est de 1.2 m, avec un écart-type de 0.46 m. De même la vitesse maximale de passage est de 19.8 m/s et l'énergie maximale de 510 kJ.

LMR-EPFL

Sur ce site, deux types d'analyse ont été menées :

- une première série de 300 trajectoires pour étudier la propagation des blocs,
- une seconde de 365 trajectoires (ce qui correspond au nombre de blocs qu'il faut lancer pour que exactement 300 blocs passent la cote 720 m) pour déterminer la répartition statistique des hauteurs, vitesses et énergies cinétiques de passage des blocs à la cote 720 m.

Pour chacune de ces séries, des blocs de forme cubique (élançement 1.0) et de 1 m^3 ont été lâchés de 10 m de hauteur au-dessus de la cote 870 m. Les modélisations ont été effectuées sur base des informations topographiques et de couverture décrites au point IV.3.7.1 (Fig. IV.16). Les paramètres des éboulis grossiers ont été calés pour reproduire de façon adéquate la zone de dépôt observée sur la vire supérieure.

En complément de ces analyses avec des blocs cubiques de 1 m^3 , d'autres calculs ont été menés avec des blocs parallélépipédiques d'élançements 1.4 et 1.8 (mais de même volume) afin d'avoir une idée de l'influence de ce facteur sur les probabilités d'atteinte ainsi que sur les caractéristiques de vol au droit des ou-

vrages projetés. De cette étude paramétrique, il ressort que les blocs élançés ont plus tendance à s'arrêter sur la vire supérieure, mais que ceux d'entre eux qui franchissent la falaise intermédiaire se propagent aussi loin que les blocs cubiques. Par ailleurs, on ne note pas d'influence très marquée de l'élançement sur les hauteurs, vitesses et énergies de passage à la cote 720 m.

IV.3.7.3 Synthèse

La figure IV.17 illustre les points d'arrêt calculés sur le site de Bieudron en l'absence d'ouvrages de protection. Comme pour les autres sites, les résultats fournis par l'ADRGT et le LMR (respectivement les courbes discontinue bleue et continue verte) permettent une représentation statistique des points d'arrêt dans le versant tandis que les résultats du CETE (points rouges) donnent les points d'atteinte extrêmes pour divers élançements de blocs (à noter que le point associé à l'élançement de 1.4 se situe en dehors du graphique, à l'abscisse 468 m).

L'analyse des résultats permet les constatations suivantes :

- De 30 à 40% des blocs sont arrêtés dans les éboulis grossiers de la vire supérieure. La propension à l'arrêt de blocs dans cette zone est relevée également par le CETE (mention d'un ralentissement significatif) et confirmée par l'observation sur le terrain de nombreux blocs.
- Seule une petite proportion des blocs qui franchissent la falaise intermédiaire s'arrête dans les éboulis de la vire inférieure.
- Pratiquement la moitié des blocs se propage jusque dans la vallée, s'arrêtant pour la plupart dans une bande de 50 m de largeur depuis le pied du versant. C'est dans cette zone de prairies que les 4 blocs extrêmes de l'éboulement de 1992 ont terminé leur course. Il est à noter que ces blocs (volume total de 3 m³) sont loin de représenter les 50% de blocs partis (volume estimé de 100 à 150 m³), comme le suggérerait le calcul. Ceci est dû à l'effet bénéfique de la forêt située dans la partie supérieure du versant, puisqu'elle a arrêté une proportion importante des blocs déstabilisés.
- Les points d'élançement 1.2 à 1.5 prédits par le CETE et la queue de distribution du LMR correspondent à des blocs terminant leur course dans le Rhône. Un tel événement extrême n'a cependant encore jamais été observé.
- Au vu des constatations faites ci-dessus, l'emplacement choisi pour les filets de protection s'avère adéquat : en partie basse de la vire supérieure où les blocs ralentissent, voire s'arrêtent, et en amont de la falaise intermédiaire où ils reprennent de la vitesse.

La seconde analyse faite sur le site de Bieudron

IV.3.7.3 Sintesi

La figura IV.17 illustra i punti di arresto calcolati sul sito di Bieudron in assenza di opere di difesa. Come per gli altri siti, i risultati comunicati dal ADGRT e dal LMR (rispettivamente le curve discontinue blu e continue verdi) permettono una rappresentazione statistica dei punti di arresto sul versante mentre i risultati del CETE (punti rossi) forniscono i punti di raggiungimento massimo per le varie simulazioni di caduta di blocchi (da notare che il punto associato alla simulazione 1.4 si trova fuori del grafico all'ascissa 468 m).

L'analisi dei risultati permette le seguenti constatazioni:

- Dal 30 al 40% dei blocchi sono fermati nei detriti grossolani della cengia superiore. La propensione all'arresto di blocchi in questa zona è rilevata anche dal CETE (indicazione di un rallentamento significativo) e confermata dall'osservazione sul terreno di numerosi blocchi.
- Solo una piccola percentuale di blocchi che superano la parete intermedia si ferma nei detriti della cengia inferiore.
- Praticamente la metà dei blocchi si espande fino al fondovalle; la maggioranza di questi si fermano in una striscia di 50 m di larghezza a partire dal piede del versante. È proprio in questa zona di praterie che i quattro blocchi più grossi della frana del 1992 hanno finito la loro corsa. Bisogna segnalare che questi blocchi (volume complessivo di 3 m³) sono ben lungi dal rappresentare il 50% dei blocchi distaccatisi (volume stimato da 100 a 150 m³) così come il calcolo aveva suggerito. Ciò è dovuto all'effetto benefico del bosco situato nella parte superiore del versante poiché ha fermato una percentuale importante dei blocchi destabilizzati.
- I punti di arrivo dei blocchi con spinta da 1.2 a 1.5 previsti dal CETE e la coda di distribuzione del LMR corrispondono a blocchi che finiscono la loro corsa nel Rodano. Tale evento estremo non è mai stato ancora osservato.
- Viste le constatazioni sopra elencate, la scelta del luogo per porre le reti di protezione si rivela giusta: nella parte bassa della cengia superiore dove i blocchi rallentano, anzi si fermano e a monte della parete intermedia dove riprendono la loro velocità.

La seconda analisi fatta sul sito di Bieudron

consistait à déterminer les caractéristiques des trajectoires à la cote 720 m, soit un peu en amont de la zone où des filets de protection ont été implantés. Les figures IV.18 à IV.20 présentent respectivement les hauteurs, vitesses et énergies cinétiques de passage à cet endroit. Les histogrammes bleu et vert correspondent respectivement aux résultats de l'ADRGT et du LMR, tandis que les traits rouges reportent pour divers élançements les valeurs tirées des calculs de trajectoires extrêmes du CETE.

De nettes différences apparaissent lorsque l'on compare les hauteurs de passage (Fig. IV.18). En l'absence d'observation de trajectoires réelles, il est difficile d'émettre une appréciation sur la valeur de ces résultats. On peut néanmoins faire les remarques suivantes :

- Le logiciel de l'ADRGT prédit des hauteurs de vol d'un ordre de grandeur raisonnable (moyenne de 1.2 m et maximale de 3.2 m), quoique peut-être un peu faibles. D'un point de vue théorique, on ne peut s'empêcher de se demander dans quelle mesure un logiciel de type masse concentrée, qui ne tient pas compte de la géométrie des blocs (ou seulement indirectement via un coefficient d'angularité), est capable d'évaluer des hauteurs extrêmes de vol.
- Le logiciel EBOULEMENT du LMR conduit à des trajectoires très aériennes dont la hauteur de vol est probablement surestimée. Une autre série de 300 calculs avec des blocs sphériques ayant donné des valeurs beaucoup plus faibles (moyenne de 1.7 m et maximum de 5.9 m), les résultats présentés à la figure IV.18 sont donc liés au caractère très angulaire des blocs (cubes). Intuitivement, on peut effectivement concevoir que des blocs cubiques tombant sur un éboulis grossier (macro-rugosité importante modélisée en affectant l'inclinaison moyenne du versant d'une composante aléatoire de 30°) puissent avoir, pour certaines configurations du bloc lors de l'impact, des trajectoires très aériennes. Néanmoins, il conviendrait sans doute de limiter cette propension du programme à prédire des rebonds élevés pour des blocs parallélépipédiques en tenant compte d'un fractionnement possible des arêtes du bloc et/ou d'un poinçonnement plus significatif du terrain lors des impacts.
- Les hauteurs de vol prédites par le logiciel PROPAG du CETE ne peuvent être considérées comme des valeurs maximales. En effet, elles correspondent à des trajectoires extrêmes qui sont très tendues et très rasantes (comme expliqué au point IV.2.1.4, la composante tangentielle de la vitesse réfléchie est favorisée au détriment de la composante normale qui est dissipative).

ha consistito nel determinare le caratteristiche delle traiettorie alla quota 720 m, cioè un po' a monte della zona dove le reti di protezione sono state installate. Le figure IV.18/IV.20 raffigurano rispettivamente le altezze, velocità e energie cinetiche di passaggio in questa zona. Gli istogrammi blu e verde corrispondono rispettivamente ai risultati del ADGRT e del LMR mentre i tratti rossi riportano per varie simulazioni i valori ricavati dai calcoli di traiettorie estreme del CETE.

Delle nette differenze compaiono quando si paragonano le altezze di passaggio (Fig. IV.18) In assenza di osservazione di traiettorie reali è difficile esprimere un giudizio sul valore di questi risultati. Tuttavia, si può segnalare quanto segue:

- Il software dell'ADGRT predice altezze di volo di una misura ragionevole (media di 1.2 m e massima di 3.2 m) sebbene forse un po' basse. Dal punto di vista teorico, non si può fare a meno di chiedersi in quale misura un software di tipo massa concentrata ("lumped mass") che non tiene conto della geometria dei blocchi (o soltanto indirettamente attraverso un coefficiente di angularità) sia in grado di valutare le altezze estreme di volo.
- Il software EBOULEMENT del LMR porta a delle traiettorie molto aeree la cui altezza di volo è probabilmente sovrastimata. Un'altra serie di 300 calcoli con blocchi sferici che hanno dato valori assai più bassi (media di 1.7 m e massima di 5.9 m) fanno sì che i risultati presentati nella figura IV.18 siano dunque legati al carattere molto angolare dei blocchi (cubi). Si può in effetti intuitivamente concepire che dei blocchi cubici, cadendo su dei detriti grossolani (macro-rugosità importante modellata assegnando all'inclinazione media del versante una componente aleatoria di 30°), possono avere, per quanto riguarda alcune configurazioni del blocco durante l'impatto, delle traiettorie molto aeree. Tuttavia, converrebbe senza dubbio limitare questa propensione del programma a prevedere rimbalzi elevati per blocchi parallelepipedi tenendo conto di un frazionamento possibile degli spigoli del blocco e/o di un punzonatura più significativa del terreno durante gli impatti.
- Le altezze di volo previste dal software PROPAG del CETE non possono essere considerate come valori massimi. In effetti, corrispondono a delle traiettorie estreme che sono molto tese e molto radenti (come spiegato al punto IV.2.1.4, la componente tangenziale della velocità riflessa è favorita a danno della componente normale che tende a dissipare).

Des différences de prédiction tout aussi importantes ressortent de la comparaison des vitesses de passage (Fig. IV.19). À nouveau, à défaut d'observation sur le terrain, il est difficile d'apprécier ces résultats. Les constatations suivantes peuvent être faites :

- Les distributions de vitesse de passage prédites par l'ADRGT et le LMR ont une allure semblable et de type loi normale ; par contre leurs moyenne et écart-type diffèrent fortement (facteur de l'ordre de 2). De prime abord, ceci semble incohérent avec la bonne concordance des deux programmes pour la distribution des points d'arrêt (Fig. IV.17) ; mais une explication plausible consisterait en un nombre différent de rebonds dans les deux modélisations. Ainsi, un bloc subissant de nombreux rebonds "peu" dissipatifs descendra le versant plus lentement qu'un bloc subissant moins de rebonds "plus" dissipatifs ; par contre, leurs probabilités d'arrêt dans la pente pourraient être identiques, puisqu'elles sont en quelque sorte liées à la quantité d'énergie dissipée lors des divers rebonds (= intégration). Cette tentative d'explication est cohérente avec les différences de hauteur de vol constatées à la figure IV.18 (trajectoires plus ou moins aériennes), mais elle n'a pas fait l'objet de plus amples vérifications dans le cadre du projet.
- En comparant les vitesses maximales de passage du CETE avec les résultats des deux autres partenaires, on note également des différences. Pour l'élanement de 1.1 qui est le plus proche de celui d'un cube, la vitesse maximale de passage de 13.3 m/s est inférieure à celle de 19.8 m/s de l'ADRGT et de 37 m/s du LMR. Par contre, pour un élanement de 1.5, la vitesse maximale de passage de 34.2 m/s est bien supérieure à celle de l'ADRGT et concorde relativement bien avec celle du LMR.
- Les résultats du CETE mettent en évidence une influence très significative de l'élanement cinématique des blocs sur leur vitesse maximale de passage. Ceci n'est pas clairement ressorti de l'étude paramétrique menée par le LMR (3 séries de 300 calculs avec des blocs de divers élanements : 1 ; 1.4 ; 1.8).

Logiquement, les différences mises en évidence à la figure IV.19 pour la vitesse de passage se marquent encore plus clairement lorsqu'on compare l'énergie cinétique des blocs (Fig. IV.20). Il convient de noter qu'en plus de l'énergie cinétique de translation $E_{cin} = \frac{1}{2} m v^2$, le programme EBOULEMENT tient compte de l'énergie cinétique de rotation $E_{rot} = \frac{1}{2} m J \omega^2$. Celle-ci vaut jusqu'à $\frac{1}{4}$ de l'énergie cinétique totale représentée à la figure IV.20.

Delle differenze di previsione altrettanto importanti emergono dal paragone tra le velocità di passaggio (Fig. IV.19). Inoltre, in mancanza di osservazione sul terreno è difficile apprezzare questi risultati. Si possono fare le constatazioni seguenti:

- Le distribuzioni di velocità di passaggio previste dall'ADGRT e dal LMR hanno un andamento simile e di tipo normale: al contrario, la loro media e il loro scarto quadratico medio variano molto (fattore dell'ordine di 2). A prima vista, questo sembra incoerente con la buona concordanza dei due programmi per la distribuzione dei punti di arresto (Fig. IV.17); ma una spiegazione plausibile consisterebbe in un numero diverso dei rimbalzi nei due modelli. Così, un blocco subendo numerosi rimbalzi "poco" dissipativi scenderà lungo il versante più lentamente di un blocco che ha subito meno rimbalzi "più" dissipativi; le loro probabilità di arresto sul pendio potrebbero invece essere identiche, poiché sono in qualche modo legate alla quantità di energia dissipata durante i diversi rimbalzi (= integrazione). Questo tentativo di spiegazione è coerente con le differenze di altezza di volo constatate alla figura IV.18 (traiettorie più o meno aeree) ma non è stato oggetto di più ampie verifiche nell'ambito del progetto.
- Paragonando le velocità massime di passaggio del CETE con i risultati dei due altri partners, si notano anche alcune differenze. Per quanto riguarda la simulazione 1.1 che è la più vicina a quella di un cubo la velocità massima di passaggio di 13.3 m/s è inferiore a quella di 19.8 m/s dell'ADGRT e di 37 m/s del LMR. Per quanto riguarda la simulazione 1.5 la velocità massima di passaggio di 34.2 m è invece molto superiore a quella dell'ADGRT e concorda relativamente bene con quella del LMR.
- I risultati del CETE evidenziano una influenza molto significativa della spinta cinematica dei blocchi sulla loro velocità massima di passaggio. Questo non risulta chiaro nello studio parametrico condotto dal LMR (3 serie di 300 calcoli con blocchi di varie spinte: 1; 1.4; 1.8).

Logicamente, le differenze evidenziate nella figura IV.19 per la velocità di passaggio sono ancora più salienti quando si confronta l'energia cinetica dei blocchi (Fig. IV.20). Bisogna notare che oltre l'energia cinetica di traslazione $E_{cin} = \frac{1}{2} m v^2$ il programma EBOULEMENT tiene conto dell'energia cinetica di rotazione $E_{rot} = \frac{1}{2} m J \omega^2$. Questa ha valori fino a $\frac{1}{4}$ dell'energia cinetica complessiva rappresentata nella figura IV.20.