

Étude de la trajectographie des chutes de blocs en forêts de montagne

Céline LE HIR
CEMAGREF

Éric DIMNET *

Laboratoire central des ponts et chaussées

Frédéric BERGER
CEMAGREF

RÉSUMÉ

L'évaluation du rôle protecteur de la forêt contre les chutes de blocs rocheux nécessite un outil de simulation numérique, afin de modéliser les collisions entre un bloc rocheux et le sol ainsi que les collisions d'un bloc rocheux avec un arbre. Le moteur de calcul STAR3D, développé au LCPC, est un outil adapté à ce type de calculs trajectographiques. Les éléments théoriques utilisés par le programme font apparaître des paramètres qu'il convient d'identifier par des expériences en vraie grandeur. Les expériences réalisées par le CEMAGREF de Grenoble sur le site de Vaujany ont permis d'identifier certains de ces paramètres, les autres provenant de la littérature. Tous les paramètres étant déterminés, des simulations numériques ont été réalisées avec STAR3D qui est actuellement le seul outil de calcul trajectographique permettant de réaliser ces calculs. Les résultats obtenus pour les hauteurs de passage, les énergies et les points d'arrêt des blocs correspondent très bien aux valeurs mesurées lors des lâchers expérimentaux de blocs.

Trajectography study of rockfalls in mountain forests

ABSTRACT

Assessing the protective role of the forest preventing rockfalls requires a digital simulation tool in order to model the collisions taking place between a boulder and the ground as well as the collisions of a boulder with a tree. The STAR3D calculation engine, developed at LCPC laboratories, is adapted to this type of trajectory calculation. The theoretical elements used by the program reveal parameters that need to be identified by means of full-scale experiments; the experimental campaign conducted by Grenoble-based Cemagref institute on the Vaujany site has enabled to determine some of the parameters, while the others stem from literature. Once values were assigned to all parameters, numerical simulations were run with STAR3D, which at present constitutes the only trajectographic tool capable of performing these calculations. These results obtained for passage heights, energies and resting points of boulders correspond extremely well to the values measured during the experimental release of boulders.

* AUTEUR À CONTACTER :

Éric DIMNET
dimnet@lpc.fr

INTRODUCTION

En zone de montagne, les chutes de blocs sont la cause de nombreux dégâts (routes endommagées, destruction d'habitations, etc.). La définition, communément admise, des chutes de blocs est le mouvement d'un seul bloc d'un volume inférieur à 10 mètres cubes.

Si les ouvrages de génie civil, tels les filets pare-pierre, ont un rôle de protection connu et reconnu, peu d'études portent sur le rôle que peut aussi jouer la forêt. Pourtant, on peut recenser un nombre

important de blocs arrêtés contre des arbres dans des zones couvertes de forêts et fortement soumises à l'aléa « chutes de blocs ». Ces forêts sont communément qualifiées de forêts à fonction de protection. Elles ne représentent plus une valeur marchande intéressante, mais il reste nécessaire de les entretenir pour qu'elles remplissent au mieux cette fonction de protection. Les gestionnaires forestiers ne sont toutefois pas en mesure de déterminer la capacité d'une forêt à arrêter ou ralentir les blocs et ne connaissent pas non plus l'influence de la gestion pratiquée sur la pérennisation du rôle de protection. De ce fait, la gestion de ces forêts est actuellement effectuée sur la base de connaissances empiriques [1]. Les gestionnaires manquent en fait de méthodes et d'outils qui leur permettraient de porter un diagnostic sur la protection qu'une forêt peut et pourra offrir vis-à-vis des chutes de blocs et d'évaluer le risque résiduel pour un peuplement donné.

Pour combler ces lacunes, il n'est pas envisageable de réaliser des expériences *in situ* pour chaque configuration de peuplement. Beaucoup de paramètres sont à prendre en compte (forme du bloc, densité de peuplement, répartition spatiale du peuplement, pente, type de sol, etc.). Face à la multiplicité des expériences nécessaires, les expérimentations virtuelles se présentent comme une alternative intéressante.

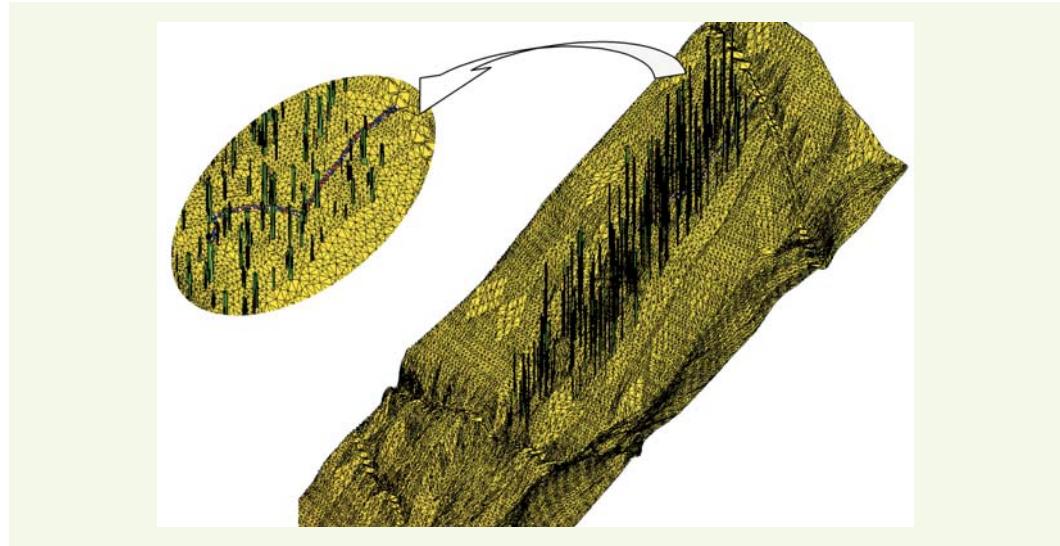
Il existe sur le marché une quinzaine de logiciels de trajectographie [2, 3]. Cependant, les simulations sont pour la plupart réalisées à partir d'un plan incliné dont l'inclinaison représente une pente moyenne [2]. Guzetti [4] insiste sur le fait qu'une modélisation sur un profil de pente néglige les effets de la topographie, donc les déviations latérales et les effets de la végétation sur la trajectoire du bloc. Pour le calcul des rebonds, les vitesses après impact sont liées aux vitesses avant impact par un coefficient de restitution. Lorsque la géométrie n'est pas prise en compte, par exemple lorsque le mouvement du bloc est traité comme le mouvement d'un point, la forme du bloc ainsi que sa position lors de l'impact sont incluses dans ce coefficient de restitution qui devient une sorte de fonction de transfert. Même si ces calculs sont considérés comme découlant de la théorie des collisions de corps rigides, la notion de coefficient de restitution n'est justifiée par aucun principe classique de la mécanique [5]. De plus, il n'est pas possible de justifier le choix d'une fonction de transfert appliquée à un point matériel pour décrire le rebond d'un bloc réel ; de ce fait, le contrôle des résultats des calculs utilisant des fonctions de transfert est impossible. Enfin, si les arbres sont parfois pris en compte dans le calcul de trajectoires, c'est par le biais de coefficients de rugosité qui prétendent remplacer la présence des arbres. De tels logiciels ne permettent pas de représenter l'implantation spatiale des arbres au sein d'un peuplement, qui constitue un paramètre influent.

Au Laboratoire central des ponts et chaussées (LCPC), un moteur de calcul trajectographique (STAR3D) est développé. Il a la particularité de simuler la chute d'un bloc, représenté en trois dimensions, sur un modèle numérique de terrain (MNT). Des arbres peuvent être intégrés dans le calcul de trajectoire. Les calculs des rebonds utilisent la théorie des Percussions [6]. STAR3D est un outil adapté pour le diagnostic des forêts à fonction de protection. On développe dans un premier temps la théorie sur laquelle est fondée le calcul des rebonds et des trajectoires de bloc. La validation du modèle à l'aide d'expériences en vraie grandeur est ensuite discutée et les résultats obtenus sont présentés. Enfin, pour que l'outil soit utilisable par un gestionnaire forestier, des perspectives d'améliorations et de développement de l'outil sont proposées.

CONSIDÉRATIONS THÉORIQUES

L'enjeu des calculs est de simuler l'évolution d'un bloc rocheux au dessus d'un terrain naturel représenté par une surface surmontée de troncs qui correspondent au couvert forestier naturel (**figure 1**). Les équations du mouvement et des lois de comportement utilisées pour décrire les chocs sont d'abord présentées. Une loi de collision possédant un seuil de rupture est ensuite développée afin de prendre en compte la rupture possible d'un arbre et son endommagement suite à une collision.

figure 1
Simulation de la trajectoire d'un bloc rocheux en forêt de montagne.



■ Évolution d'un solide rigide avec des collisions

Sur l'intervalle de temps $[t_1, t_2]$, les équations du mouvement d'un solide rigide de masse m et d'inertie I , qui peut subir des collisions avec un support immobile, sont :

$$\left. \begin{array}{l} m(\vec{U}^+ - \vec{U}^-) = -\vec{P}_c \\ I(\vec{\Omega}^+ - \vec{\Omega}^-) = -\vec{G}\vec{C} \wedge \vec{P}_c \end{array} \right\} \text{partout et} \quad (1)$$

$$\left. \begin{array}{l} m \frac{d\vec{U}}{dt} = \vec{mg} - \vec{F}_c \\ I \frac{d\vec{\Omega}}{dt} = -\vec{G}\vec{C} \wedge \vec{F}_c \end{array} \right\} \text{presque partout sur } [t_1, t_2] \quad (2)$$

\vec{U} et $\vec{\Omega}$ désignent respectivement la vitesse du centre de gravité et la vitesse de rotation du solide. Pour alléger les écritures, on ne considère ici que le cas où le contact est réduit à un point. La description du cas général se trouve dans [5]. Le système (1) décrit les collisions. \vec{P}_c est la percussion de contact, C le point de contact et G le centre de gravité du solide. Les limites à gauche et à droite des grandeurs en fonction du temps sont désignées par les exposants – et +. Ces équations sont valables partout sur $[t_1, t_2]$ mais, en dehors des collisions, elles se réduisent à l'égalité $\vec{0} = \vec{0}$.

Le système (2) décrit l'évolution du solide en dehors des instants de collision (ses vitesses sont dérivables) et \vec{F}_c est la force de contact. Cette dernière n'est non nulle que si le solide est en contact avec le support (phase de roulement ou de glissement par exemple).

> Travail des efforts de contact et des efforts extérieurs

Entre les instants t_1 et t_2 , le travail des efforts de contact, c'est-à-dire des percussions et des forces de contact, est

$$W^{\text{cont}} = - \int_{t_1}^{t_2} \vec{F}_c \cdot \vec{U} dt - \sum_{t \in Z} \vec{P}_c \cdot \frac{\vec{U}^+ + \vec{U}^-}{2} \quad (3)$$

où Z est l'ensemble des instants de collision entre t_1 et t_2 .

Le seul effort extérieur considéré ici est le poids. Son travail de t_1 à t_2 est

$$W^{\text{ext}} = \int_{t_1}^{t_2} \vec{mg} \cdot \vec{U} dt. \quad (4)$$

> Méthode de calcul pour calculer l'évolution régie par les équations (1) et (2)

La méthode de calcul utilisée pour calculer l'évolution du solide est la méthode A-CD². Cette méthode de calcul est un exemple de méthode des percussions [5, 7]. Elle consiste à approximer les efforts réguliers, ici le poids et la force de contact, par une succession de percussions, cette opération étant appelée « atomisation des efforts réguliers ». La durée de l'évolution à calculer est divisée en intervalles de temps de même longueur et, à l'intérieur de chaque intervalle de temps, ne peut avoir lieu qu'une seule collision.

Sur un intervalle de temps $[t_k, t_{k+1}]$, une force $\vec{F}(\vec{U}(\tau))$ qui dépend de la vitesse $\vec{U}(\tau)$ est approchée par une percussion

$$\vec{P}(\tau) = (t_{k+1} - t_k) \cdot \vec{F}\left(\frac{\vec{U}(t_{k+1}) + \vec{U}(t_k)}{2}\right) \delta_{\frac{t_k+t_{k+1}}{2}}(\tau). \quad (5)$$

Ainsi, le mouvement approché est tel que les vitesses sont des fonctions en escalier et les déplacements des fonctions continues et affines par morceaux. L'intervalle de discréttisation pouvant être réduit à souhait selon la précision voulue, cette méthode convient bien aux calculs envisagés. Par ailleurs, l'avantage intrinsèque de cette méthode est le fait de n'avoir à calculer que des discontinuités de vitesse qui s'écrivent comme l'équation d'une collision (1). À cette fin, il faut exprimer la percussion qui remplace la force considérée.

La force de contact est ainsi remplacée dans la direction normale au contact, \vec{N} , par la percussion

$$P_N(\tau) = (t_{k+1} - t_k) \cdot \partial I_{\left[\frac{U_N(t_k)}{2}, +\infty\right]} \left(\frac{(U_N(t_k) + U_N(t_{k+1}))}{2} \right) \delta_{\frac{t_k+t_{k+1}}{2}}(\tau) \quad (6)$$

où I_k est l'indicatrice de l'ensemble K au sens usuel de l'analyse convexe et ∂I_k son sous-différentiel. Comme la force de réaction, la percussion par laquelle on la remplace est dirigée selon la normale à l'obstacle ou au sol à l'endroit de l'impact.

En ce qui concerne la direction tangente au contact, \vec{T} , la force de frottement est également remplacée par une percussion. On appelle \vec{V} la vitesse au point de contact dans la direction tangente au contact.

La force de frottement est remplacée par :

$$P_T \delta_{\frac{t_k+t_{k+1}}{2}}(\tau) \quad (7)$$

avec

$$\left. \begin{array}{l} \|P_T\| < \mu P_N \text{ si } \left\| \frac{V^+ + V^-}{2} \right\| = 0 \\ \|P_T\| = \mu P_N \text{ si } \left\| \frac{V^+ + V^-}{2} \right\| \neq 0 \end{array} \right\} \quad (8)$$

s'il s'agit de frottement de Coulomb avec le coefficient de frottement μ . S'il s'agit du frottement visqueux avec le coefficient de frottement μ , elle est remplacée par :

$$P_T(\tau) = -v \frac{V^+ + V^-}{2} \delta_{\frac{t_k+t_{k+1}}{2}}(\tau) \quad (9)$$

Enfin, le poids est remplacé par la percussion :

$$\vec{P}(\tau) = (t_{k+1} - t_k) \cdot \vec{mg} \cdot \delta_{\frac{t_k+t_{k+1}}{2}}(\tau) \quad (10)$$

> Prise en compte des collisions

La prise en compte des collisions nécessite le choix d'une loi de comportement pour la percussion de contact. Les lois de comportement sont données sous la forme :

$$\vec{P}_C = \vec{P}^d + \vec{P}^r \quad (11)$$

où \vec{P}^d est la percussion qui résulte des phénomènes de frottement et de dissipation dans les directions tangentes et normales au contact et \vec{P}^r la réaction à la condition de non-interpénétration :

$$U_N^+ = \bar{U}^+ \cdot N \leq 0 \quad (12)$$

Pour exprimer \vec{P}^d , on utilise un pseudo-potentiel de dissipation Φ^d [6] :

$$\vec{P}^d \in \partial \Phi^d \left(\frac{\bar{U}^+ + \bar{U}^-}{2} \right) \quad (13)$$

La réaction \vec{P}^r peut elle aussi être exprimée à l'aide d'un pseudo-potentiel de dissipation :

$$\vec{P}^r \in \partial I_K \left(\frac{\bar{U}^+ + \bar{U}^-}{2} \cdot \bar{N} \right) \quad (14)$$

avec $K = \left[\frac{U_N^-}{2}, \infty \right[$.

Comme K contient l'origine, I_K est un pseudo-potentiel de dissipation.

Il est donc possible d'écrire la loi de comportement :

$$\vec{P}_C \in \partial \Phi \left(\frac{\bar{U}^+ + \bar{U}^-}{2} \right) \quad (15)$$

où $\Phi = \Phi^d + I_K$ est un pseudo-potentiel de dissipation.

Le cadre formel, qui résulte de l'utilisation des pseudo-potentiels de dissipation, permet de modéliser un grand nombre de comportements collisionnels comme le frottement visqueux ou les collisions avec adhésion. Même si le frottement de Coulomb ne rentre pas dans cette catégorie, la solution au problème du choc avec frottement de Coulomb, lorsqu'elle existe, est la limite d'une suite de problèmes entrant chacun dans la catégorie des lois de comportement avec loi associée et peut être calculée comme telle [5].

Dans le cadre de la simulation numérique de la trajectoire d'un bloc rocheux sur un flanc de montagne planté d'arbres, deux types de lois de comportement sont utilisés pour les collisions :

- la loi linéaire, pour décrire les rebonds du rocher sur les différentes classes de sol,
- la loi avec rupture pour décrire les collisions du rocher avec les arbres.

La loi de comportement est une loi linéaire si on choisit un pseudo-potentiel Φ^d quadratique :

$$\vec{P}^d = k_N (U_N^+ + U_N^-) \bar{N} + k_T (U_T^+ + U_T^-) \bar{T} \quad (16)$$

Dans le cas d'un phénomène unidimensionnel, la loi s'écrit :

$$P^d = k (U^+ + U^-) \quad (17)$$

et la percussion de contact P_C est représentée sur la **figure 2**. Le jeu de coefficients (k_N , k_T) est caractéristique du type de terrain sur lequel rebondit le rocher. De nombreuses expériences numériques ont été réalisées qui conduisent à penser que le nombre de classes de terrain à prendre en compte

est de quatre. La détermination de la valeur de ces coefficients est obtenue par identification, à partir de l'analyse des films des expériences de chutes de blocs réalisées sur le site expérimental du CEMAGREF à Vaujany.

Une loi de comportement avec endommagement et rupture permet de simuler la rupture d'un arbre après le choc avec un rocher. La percussion \vec{P}_C , qui est l'effort généré par la collision, croît avec la vitesse incidente en l'absence de limitation. Un arbre n'étant capable de supporter qu'une charge limitée, il se rompt au-delà et cesse d'être un obstacle à la propagation du rocher. Par rapport à la loi de comportement sans rupture, il apparaît ainsi un seuil de résistance $\beta\Pi$ qui est le produit de deux réels positifs β et Π . Π est la percussion (c'est-à-dire la quantité de mouvement) que peut supporter un obstacle non endommagé sans rompre. $\beta \in [0 ; 1]$ est l'endommagement de l'obstacle ; $\beta = 1$ pour un obstacle non endommagé et $\beta = 0$ pour un obstacle détruit.

Afin d'illustrer ce type de collision, considérons une collision pour laquelle la normale au contact est un axe de symétrie de rotation. La collision peut alors être considérée comme un phénomène unidimensionnel ayant lieu selon cet axe de symétrie.

Dans ces conditions, considérons la loi de choc issue d'une loi de comportement linéaire (**figure 2**). La limite de rupture, liée à ce que l'arbre ne peut supporter qu'une impulsion $\beta\Pi$, se traduit par le fait que la contrainte $|P_C| \leq \beta\Pi$ est ajoutée à la percussion de contact P_C . La loi de choc qui en résulte dépend de la valeur relative de $\beta\Pi$ et de $k|U^-|$. Les deux cas sont représentés sur la **figure 3** et les pseudo-potentiels associés à ces lois sont représentés sur la **figure 4**.

figure 2

Percussion de contact dans le cas d'une loi de comportement linéaire.

figure 3

Percussion de contact pour le choc avec rupture.

À gauche, le cas $\beta\Pi \geq k|U^-|$;
à droite, le cas $\beta\Pi \leq k|U^-|$.

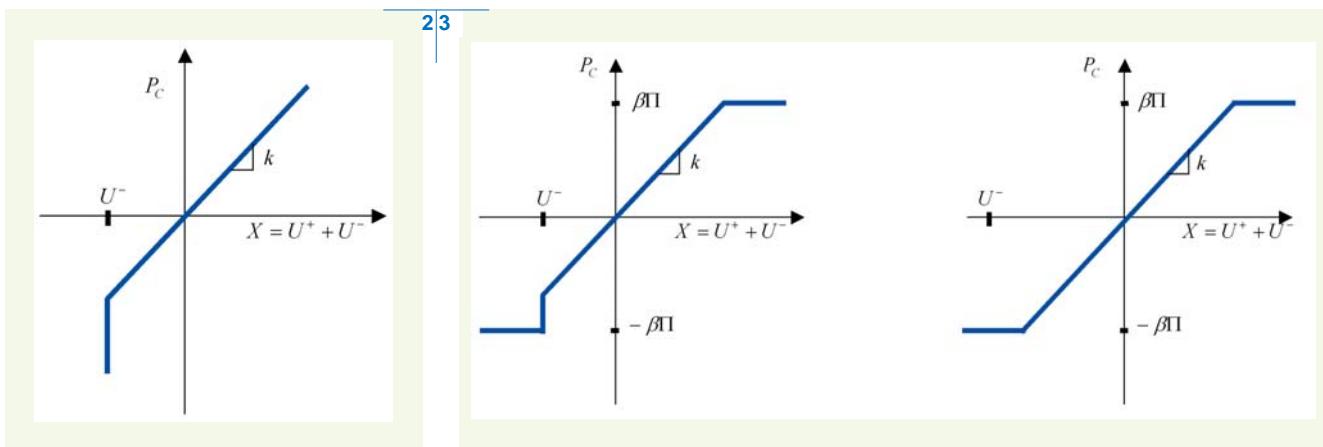
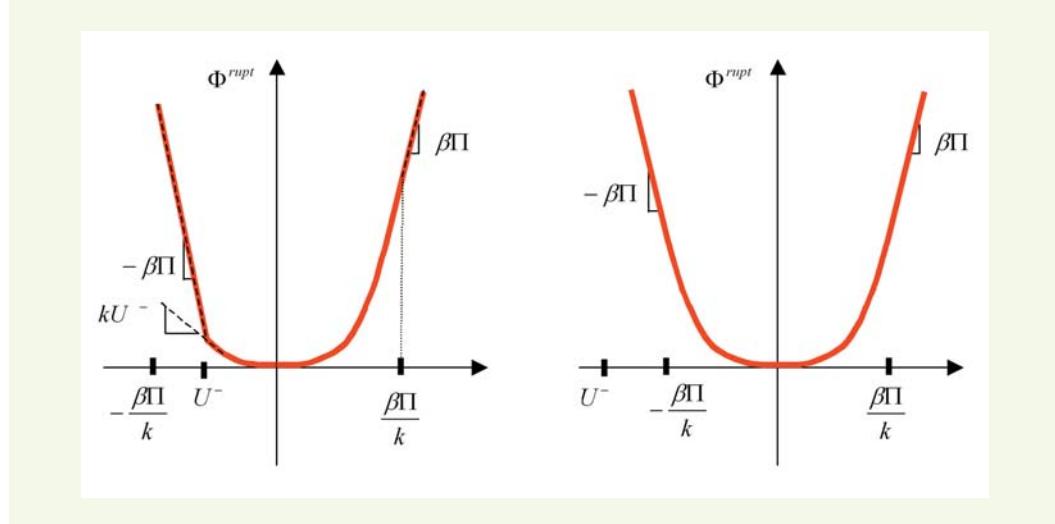


figure 4

Pseudo-potentiels de dissipation associés aux lois de choc avec rupture.

À gauche, le cas $\beta\Pi \geq k|U^-|$;
à droite, le cas $\beta\Pi \leq k|U^-|$.



■ Solution de l'équation du choc avec rupture

Étant données les hypothèses de symétrie choisies pour étudier la loi de comportement, la collision est équivalente à celle d'un mobile ponctuel de masse m avec un obstacle dont la surface est orthogonale à sa trajectoire. La solution de l'équation du choc peut s'interpréter comme une intersection de graphes [5]. Dans le cas de la loi de comportement avec endommagement et rupture, l'évolution après la collision dépend de la valeur relative de $\beta\Pi$ et $k|U^-|$. Selon que $\beta\Pi$ est plus grand ou plus petit que $k|U^-|$, la branche verticale (qui est le lieu des points pour lesquels le bloc est arrêté par l'arbre qui n'est pas détruit et reste en contact avec celui-ci) est présente ou pas.

L'équation du choc est :

$$mX + P_C = 2mU^- \quad (18)$$

avec $X = U^+ + U^-$ et $P_C \in \partial\Phi^{\text{rupt}}(X)$,

ce qu'il est plus commode d'écrire :

$$X + F(X) = 2U^- \quad (19)$$

avec $F(X) = \frac{1}{m}P_C(X)$.

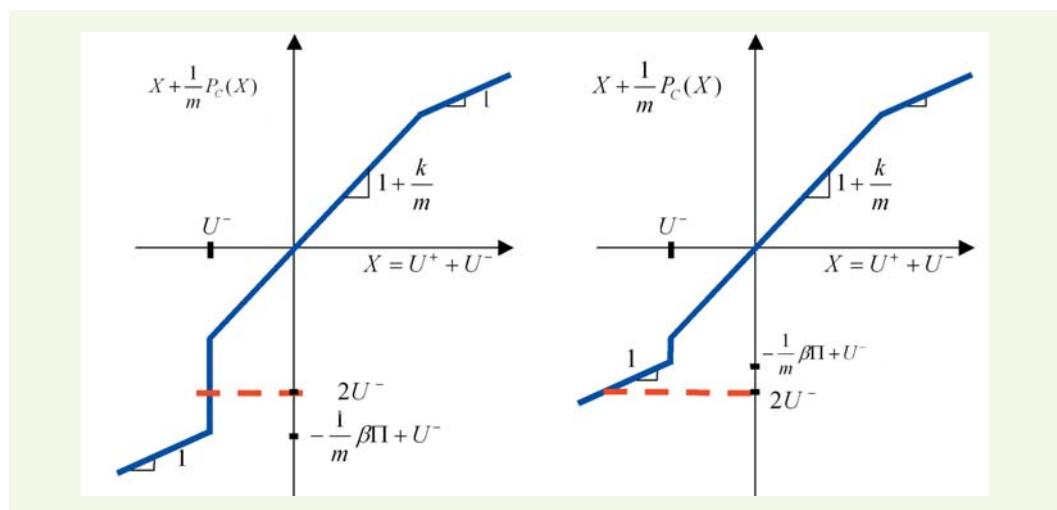
La discussion des solutions nécessite de distinguer deux cas, selon que k est plus grand ou plus petit que m . Les solutions sont discutées selon la valeur relative des grandeurs $\beta\Pi$ et $m|U^-|$.

Si $k < m$, deux configurations peuvent se présenter (**figure 5**). Si $\beta\Pi \geq -mU^-$, l'obstacle ne se rompt pas lors du choc et le mobile reste en contact avec lui après le choc ($X = U^-$ donc $U^+ = 0$). Par contre, si $\beta\Pi \leq -mU^-$, l'obstacle se rompt et il est traversé par le mobile après le choc ($X \leq U^-$ donc $U^+ \leq 0$).

Si $k \geq m$, deux configurations existent (**figure 6**). Lorsque $\beta\Pi \geq -mU^-$, l'obstacle ne se rompt pas et le mobile rebondit ($X \geq U^-$ donc $U^+ \geq 0$). La possibilité supplémentaire dans ce cas par rapport au précédent est lorsque $-\frac{m}{k}U^- \leq \beta\Pi \leq -mU^-$ où l'obstacle se rompt alors que le mobile rebondit et ne le traverse pas ($X \geq U^-$ donc $U^+ \geq 0$). Enfin, lorsque $\beta\Pi \leq -\frac{m}{k}U^-$, l'obstacle se rompt et il est traversé par le mobile après le choc ($X \leq U^-$ donc $U^+ \leq 0$).

figure 5

Solution du choc dans le cas où $k < m$. À gauche, le cas $\beta\Pi \geq k|U^-|$; à droite, le cas $\beta\Pi \leq k|U^-|$.



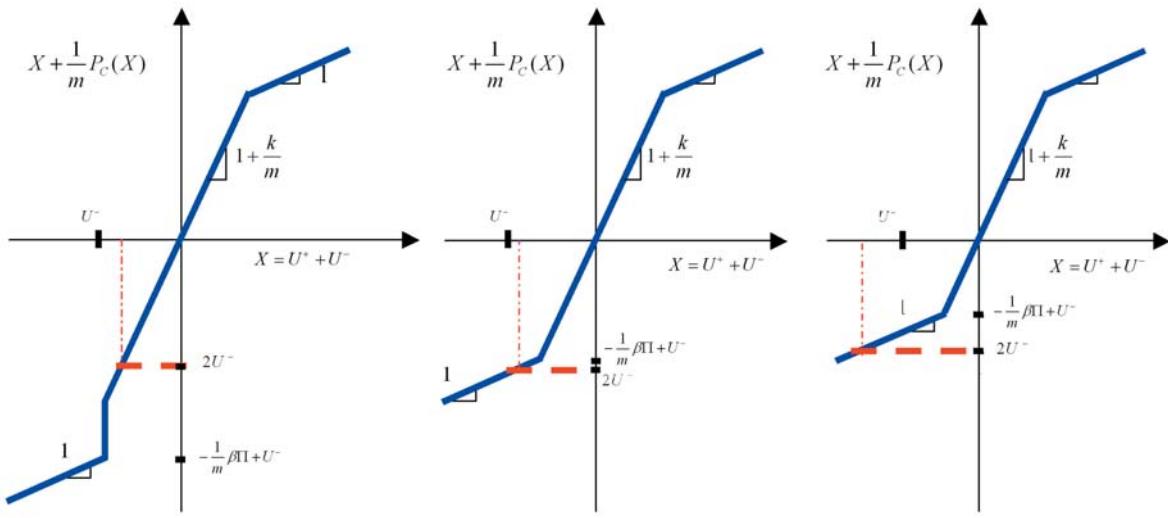


figure 6

Solution du choc dans le cas où $k \geq m$.

De gauche à droite, les cas $\beta\Pi \geq -mU^-$, $-m\frac{m}{k}U^- \leq \beta\Pi \leq -mU^-$ et $\beta\Pi \leq -m\frac{m}{k}U^-$.

■ Évolution de l'état d'endommagement

Lorsqu'un arbre subit une collision, même s'il ne se rompt pas, son état d'endommagement est modifié et son seuil de résistance pour une nouvelle collision s'en trouve abaissé. Le paramètre d'endommagement β est discrétisé selon la discréttisation $[t_n, t_{n+1}]$, les collisions sont supposées survenir aux instants $\frac{t_n + t_{n+1}}{2}$ et la percusion échangée entre l'arbre et le bloc est notée \vec{P}_c .

Ainsi, si β_n et β_{n+1} sont les états d'endommagement aux instants t_n et t_{n+1} , la loi d'endommagement utilisée est :

$$\beta_{n+1} = \beta_n - \frac{\|\vec{P}_c\|}{\Pi} \quad (20)$$

La loi de comportement assure que $\|\vec{P}_c\| \leq \beta_n \cdot \Pi$; on a donc $0 \leq \beta_{n+1} \leq \beta_n$ et particulièrement $\beta_{n+1} = 0$ si l'arbre s'est rompu.

Ces lois de comportement ont été introduites dans le moteur de calcul STAR3D. Afin de réaliser des simulations numériques réalistes, il faut préalablement identifier les paramètres qui apparaissent dans les lois de comportement.

EXPÉRIENCES EN VRAIE GRANDEUR ET PARAMÈTRES DES LOIS DE CHOC

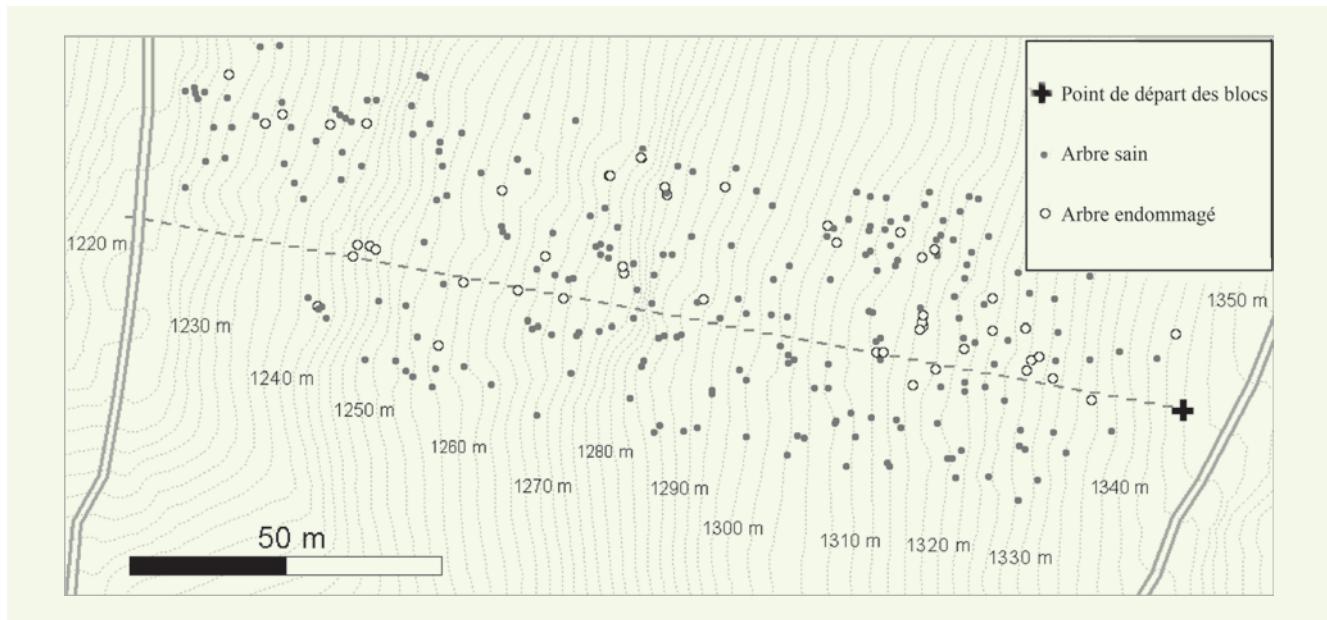
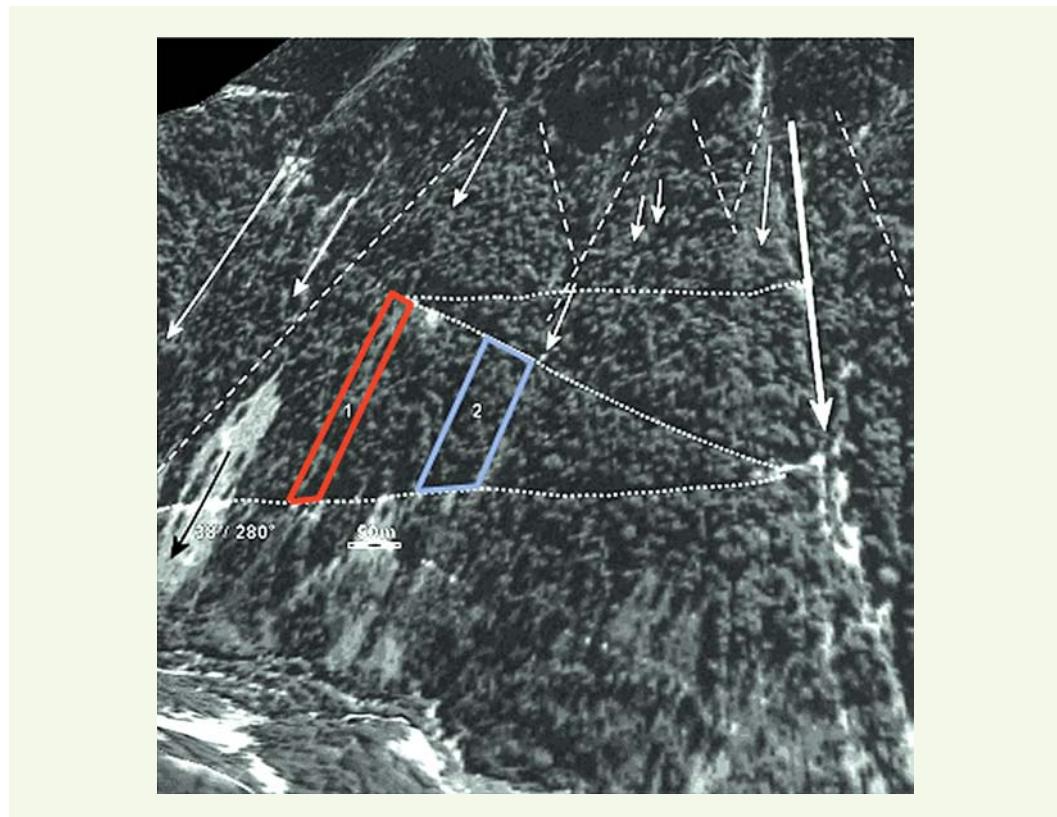
Dans le cadre du projet européen Rockfor, le CEMAGREF a mis en place un dispositif expérimental afin de réaliser des lâchers de blocs. Pour calibrer les paramètres des lois de choc utilisées par STAR3D et valider le modèle, on a utilisé les résultats de ces expériences en vraie grandeur [8].

■ Description du site d'étude et des expérimentations

Le site expérimental de chutes de blocs est situé sur un versant du Rivier d'Allemond (Vaujany, Isère) dans le massif des Grandes Rousses (figure 7). Deux parties spécifiques le composent : la première est un couloir sans végétation, appelée « terrain nu » par la suite et la seconde est une zone boisée qui a la même pente que le terrain nu, appelée « terrain boisé ». La pente moyenne des deux sites est de 38 degrés. On dispose du MNT sur la totalité du site. La résolution du MNT est de l'ordre du mètre. Une cartographie du peuplement forestier sur le terrain boisé a été effectuée. Les essences, hauteurs et diamètres des arbres ont aussi été relevés (figure 8). 271 arbres ont été recensés.

figure 7

Vue du site expérimental avec la zone terrain nu (1) et terrain boisé (2).

**figure 8**

Cartographie des positions d'arbres sur le site n° 2.

sés. L'épicéa, le sapin et le hêtre sont les essences principalement présentes sur le site. Les diamètres des arbres mesurés à 1,30 m du sol varient de 10 à 90 cm, la moyenne étant de 31 centimètres.

Les expérimentations ont utilisé 200 blocs de granit de formes similaires et d'un volume moyen de $0,8 \text{ m}^3$ (100 blocs sur chacun des types de terrain, nu et boisé). Les blocs ont été lâchés à l'aide d'un tractopelle, de 5 m de haut en terrain nu (**figure 9**), à hauteur du sol en terrain boisé et sans vitesse initiale dans les deux cas. Pour chaque site, les 100 blocs sont partis sensiblement du même point.

Après chaque lâcher de bloc, la trajectoire est suivie : chaque impact au sol ou sur les arbres est relevé au GPS, les angles de déviation ainsi que la distance entre deux impacts sont mesurés avec des instruments de topographie classiques et les points d'arrêts sont eux aussi relevés au GPS (**figure 10**). Les données statiques sont ainsi relevées.



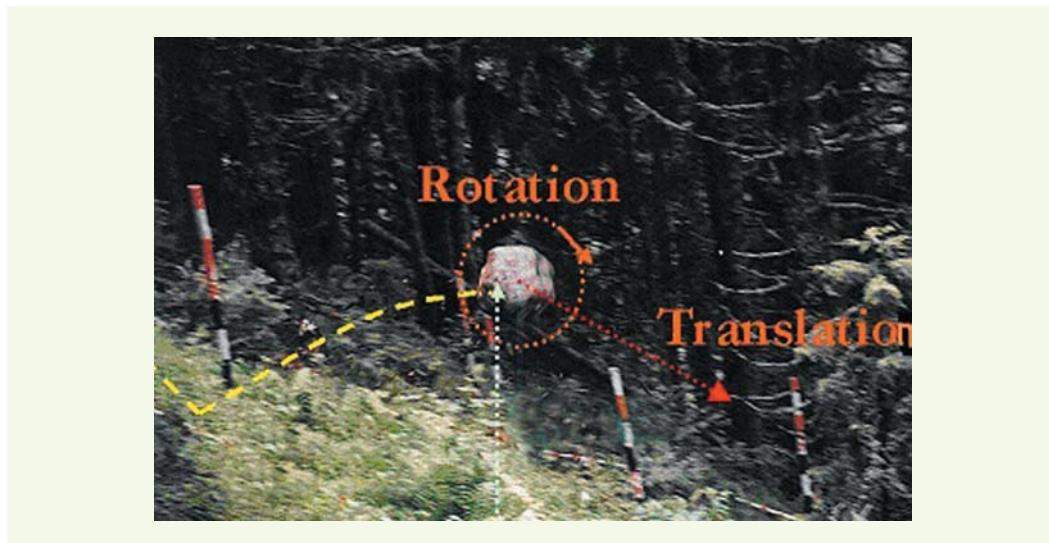
9|10

**figure 9**

Lâcher de 5 m de haut avec le tractopelle, en terrain nu.

figure 10

Relevé d'impact avec un GPS.

**figure 11**

Données issues de l'analyse des films.

Cinq caméras numériques placées le long de la pente, avec des champs de vision qui se recoupent, permettent d'assurer un suivi complémentaire des trajectoires. Avec les films, on dispose des vitesses de translation et de rotation des blocs et des hauteurs des blocs le long de la trajectoire (**figure 11**). Ils apportent des renseignements sur la cinétique du bloc au cours de sa chute. Cette donnée est intéressante pour mieux valider les modèles. Les concepteurs des logiciels de trajectographie existants ne calent leurs modèles que sur des éléments figés. En effet, les seules données auxquelles ils peuvent se référer sont les impacts de rebonds sur le sol et les points d'arrêt des blocs. Les logiciels existants sont donc rétrocités. Avec les films obtenus, il est possible de vérifier l'adéquation des données cinétiques simulées par STAR3D avec ce qui a été observé sur le terrain.

Une fois les données acquises, on peut entreprendre l'identification des coefficients utilisés dans STAR3D afin de reproduire les observations de terrain.

■ Identification des coefficients utilisés dans la loi de rebond

On dissocie l'identification des coefficients de dissipation concernant les impacts des blocs avec le sol de ceux correspondant aux impacts des blocs avec les arbres.

> Coefficients de dissipation pour le sol

Pour établir les coefficients correspondant au sol du site de Vaujany, on a analysé les rebonds des blocs sur les deux types de terrain. Chaque bloc a été assimilé à une sphère de même volume que le bloc. On a ensuite regardé les blocs pour lesquels au moins quatre rebonds étaient analysables sur

la totalité de la trajectoire. Ce choix de quatre rebonds permet de s'affranchir des erreurs induites par l'approximation sur la forme des blocs. Un rebond analysable est un rebond pour lequel on peut déterminer aisément les vitesses de rotation et de translation avant et après impact.

Les coefficients à identifier sont k_N et k_T qui interviennent dans les relations :

$$\begin{aligned} P^d_N &= k_N(V_p^+ + V_p^-)_N, \\ P^d_T &= k_T(V_p^+ + V_p^-)_T, \end{aligned} \quad (21)$$

où V_p est la vitesse du bloc au point de contact avec le sol.

D'après l'équation (1), il est possible d'obtenir P^d_N et P^d_T à partir des vitesses du centre de gravité du bloc qui sont mesurées avant et après le choc. Comme on mesure également la vitesse de rotation, il est possible de déterminer $(V_p^+ + V_p^-)_N$ et $(V_p^+ + V_p^-)_T$. L'identification de k_N et k_T est faite en représentant P^d_N en fonction de $(V_p^+ + V_p^-)_N$ et P^d_T en fonction de $(V_p^+ + V_p^-)_T$.

Sur tous les types de sol rencontrés, un lâcher vertical de bloc sans rotation sur un terrain plat (situation unidimensionnelle) produit une vitesse verticale tellement faible qu'elle ne peut être mesurée. On admet que cette vitesse est nulle, ce qui implique que k_N est égal à la masse m du bloc pour ces types de sol [5].

La détermination de k_T a ensuite été menée sur chacun des terrains étudiés.

Pour le terrain boisé, on a analysé les trajectoires toutes caméras confondues. Le graphique de la figure 12 présente les résultats obtenus sous couvert forestier. On obtient, en recherchant une interpolation linéaire des résultats, un rapport $\frac{k_T}{m}$ qui est de 0,35 kg.

Pour le terrain nu, le couloir de Vaujany présente des disparités de composition le long de la pente et il a donc semblé intéressant de séparer l'étude des rebonds caméra par caméra. L'inconvénient de cette méthode est que le nombre de rebonds par bloc et par caméra est moins important que pour la méthode du terrain boisé pour laquelle on a confondu toutes les caméras. La figure 13 représente $\frac{P^d_T}{m}$ en fonction de $(V_p^+ + V_p^-)_T$ pour chacune des trois caméras.

On peut noter que, sur les deux premières caméras qui correspondent au début de la pente, les coefficients sont du même ordre de grandeur. La troisième caméra donne un coefficient sensiblement différent. Sur le terrain, on observe effectivement une différence de structure du sol entre les deux premières caméras et la troisième. De même que pour le terrain boisé, ces courbes donnent un ordre de grandeur du coefficient, plus qu'une valeur fixée.

figure 12

Variation de $\frac{P^d_T}{m}$ en fonction de $(V_p^+ + V_p^-)_T$ pour le sol du terrain boisé (une seule caméra).

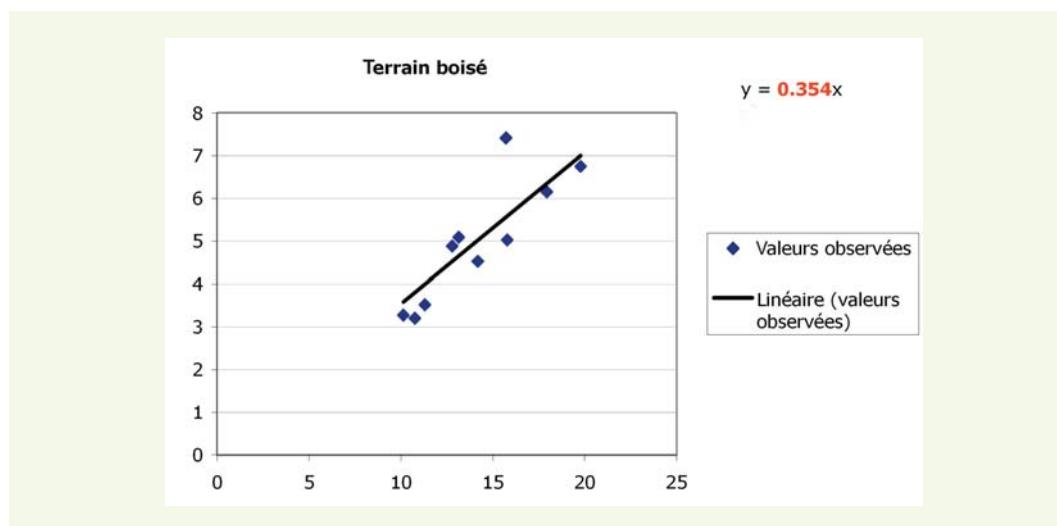
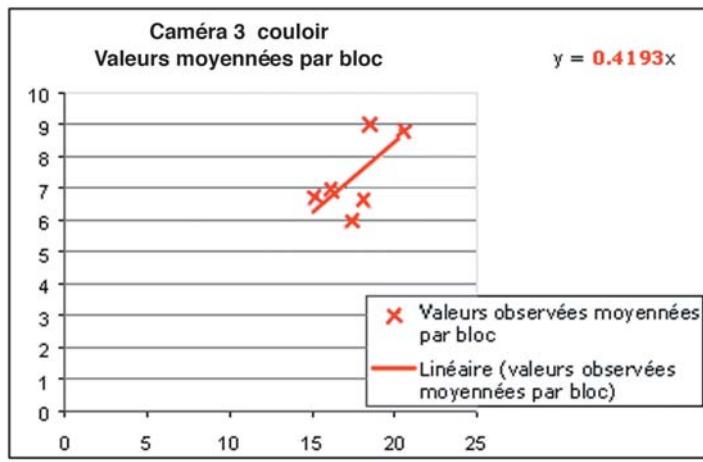
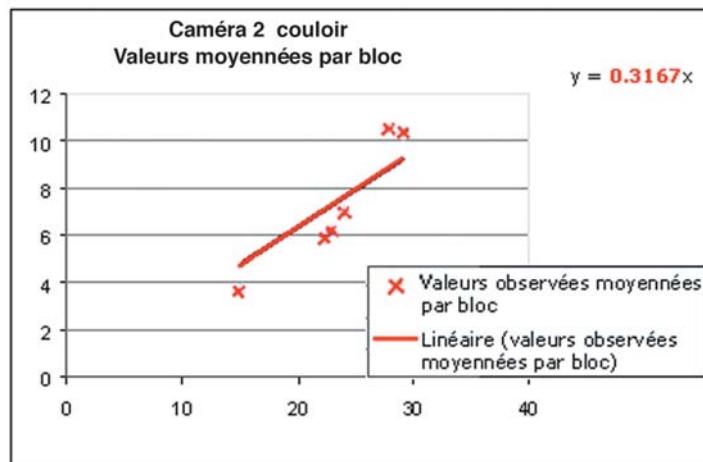
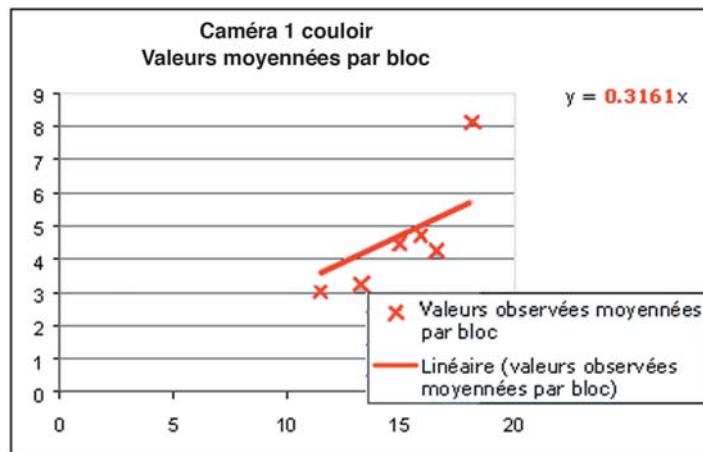


figure 13

Variation de $\frac{P^d}{m} T$ en fonction de $(V_p^+ + V_p^-)T$ pour le sol du terrain nu (trois caméras placées en trois endroits du couloir).



> Coefficients de dissipation pour les arbres

Les coefficients de dissipation pour les arbres dépendent de leur essence et de leur diamètre. Les expériences menées sur le site de Vaujany n'ont pas fourni suffisamment de données pour déterminer ce coefficient. Les impacts contre les arbres ne sont pas tous analysables et ne sont pas homogènes. STAR3D peut intégrer une limite de rupture des arbres Π qui est une quantité de mouvement.

Comme les expériences réalisées mesurent l'énergie maximale qu'un arbre peut assimiler avant de se rompre, il convient, dans le moteur de calcul, de convertir cette énergie en quantité de mouvement en tenant compte de la masse du bloc et de sa vitesse avant l'impact.

Les premières expériences de rupture du bois ont été effectuées en laboratoire sur des éprouvettes de bois (**figure 14**) [9]. Si elles ne sont pas utilisables en tant que telles car les racines et le houppier ne sont pas pris en compte lors de ces expériences, elles ont permis de classer les résistances des bois en fonction de l'essence (**tableau 1**).

Avec les expériences en vraie grandeur, les ruptures observées ont permis d'évaluer la quantité d'énergie nécessaire pour rompre un arbre. On a constaté des ruptures principalement pour l'épi-

figure 14
Dispositif pour la détermination de la limite de rupture du bois.

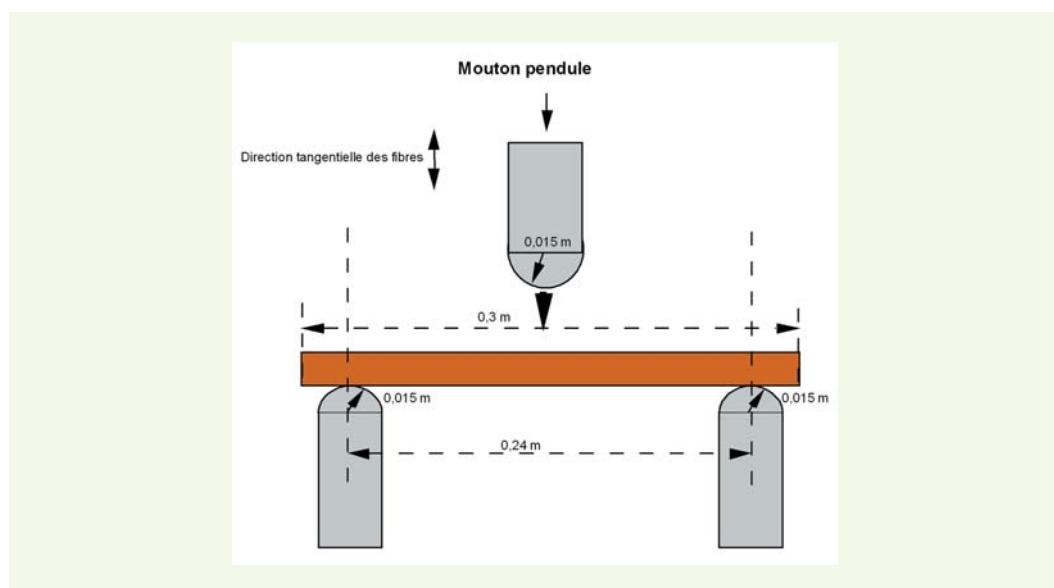
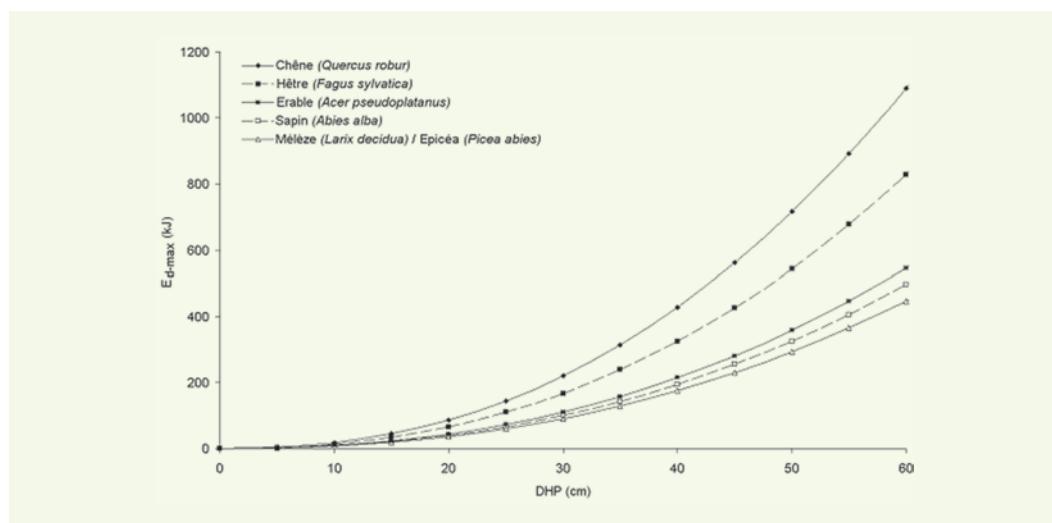


tableau 1
Résultats de test de résistances sur différentes essences.

Essence	Énergie (en J) absorbée lors du choc sur éprouvette de référence ($S = 0,004 \text{ m}^2$)
Pin à crochets	12,9
Cèdre	13
Pin maritime	14
Épicéa	16 à 19
Mélèze	16 à 19,3
Sapin	17 à 22
Pin noir	21,8
Pin sylvestre	22
Douglas	22
Érable	22
Frêne	29
Charme	30
Merisier	30
Hêtre	30 à 35
Chêne	35 à 50
Robinier faux acacia	46 à 61

figure 15

Relation pour différentes essences entre le diamètre (DHP) et l'énergie maximale dissipable (Ed-max) lors de l'impact d'un bloc rocheux sur un arbre (d'après [10]).



céa. Une corrélation a été établie entre le diamètre de l'arbre et l'énergie nécessaire à la rupture de l'arbre (**figure 15**). On a ensuite extrapolé les résultats obtenus pour l'épicéa aux autres essences en utilisant la classification obtenue avec les tests en laboratoire. Ces données ont été intégrées dans les calculs de trajectoires : si un bloc, lors d'un choc avec un arbre, développe une énergie supérieure à l'énergie maximale que l'arbre peut absorber, il y aura rupture et l'arbre ne sera plus pris en compte dans les calculs de trajectoires suivants.

Une fois les coefficients calibrés, on a effectué une centaine de simulations sur chacun des deux terrains. Les résultats de ces simulations sont présentés ci-après.

■ Résultats des simulations

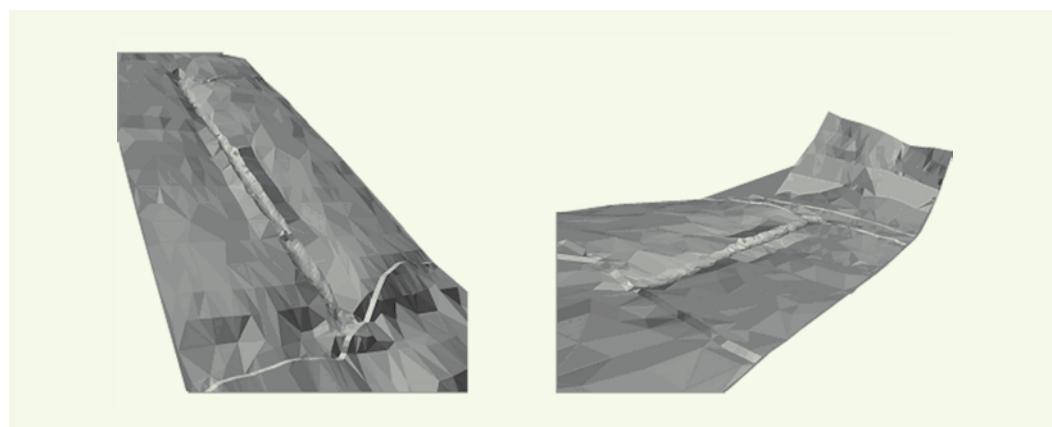
STAR3D effectue un calcul de trajectoire déterministe. On a créé un module de calcul qui permet d'effectuer un nombre de trajectoires fixé par l'utilisateur, trajectoires pour lesquelles l'orientation et la position du bloc varient légèrement autour d'une position initiale donnée. On obtient ainsi un éventail de trajectoires pour des conditions initiales de lâcher similaires mais non identiques.

> Simulations sur terrain nu

STAR3D offre la possibilité de choisir trois coefficients de sol différents sur un MNT. On a donc décomposé le MNT du terrain nu en trois parties : la partie supérieure a été affectée du coefficient observé sur la caméra 1, la partie intermédiaire, de celui observé sur la caméra 2 et la partie inférieure de celui observé sur la caméra 3. On a ensuite simulé cent trajectoires sur le terrain nu de Vaujany. Sur la **figure 7**, on constate que le couloir 1 est entouré de végétation. Comme on ne dispose pas de la cartographie de la position des arbres en dehors du couloir et en dessous de la partie filmée (**figure 16**), les résultats obtenus par simulation ont été comparés aux observations

figure 16

Modèle numérique de terrain sur le site n° 1 (vue de face et de dessus). Le couloir est bien marqué ; on observe aussi les pistes forestières qui font un replat.



uniquement sur la première partie de la pente, avant la piste forestière indiquée. Une première analyse des données a porté sur les énergies cinétiques. La **figure 17** présente la répartition de l'énergie cinétique des blocs à 10 m de distance du point de départ, issue de la simulation. Pour les observations de terrain, on obtient, pour une même distance de parcours, une valeur moyenne de l'énergie cinétique de 143 kJ, avec pour valeur maximale de 229 kJ. Les résultats simulés sont donc très proches des résultats observés.

La seconde analyse a porté sur les hauteurs de passage des blocs. Les simulations génèrent des hauteurs de passage plus importantes que les observations, en particulier en partie basse. Cependant, les différences restent dans une fourchette de 10 % autour des valeurs observées. La **figure 18** illustre la répartition spatiale des résultats obtenus par simulation. Du fait que l'on n'a pas pris en compte la végétation, les trajectoires simulées se dispersent plus que les trajectoires réelles. Cependant, une dispersion a tout de même été observée lors des expériences, alors que des modèles qui utilisent uniquement des profils de pente ne permettent pas de reproduire ce phénomène. De même, quelques blocs sont sortis du couloir marqué. Ce phénomène a été reproduit par les simulations.

> Simulations sur terrain boisé

Afin d'étudier la répartition spatiale des zones d'arrêt des blocs, il est nécessaire de tenir compte de la population arboricole qui borde le couloir. Les coefficients de rebond sur les arbres ont été choisis égaux aux coefficients de rebond sur le sol pour toutes les essences d'arbre. La **figure 19** présente les trajectoires obtenues. En termes de hauteur et de vitesses aux endroits instrumentés, les simulations correspondent aux observations. En ce qui concerne la répartition spatiale d'arrêt des blocs, les simulations numériques prévoient que 73 % des blocs s'arrêtent en forêt et les résultats expérimentaux en donnent 65 %.

figure 17

Répartition de l'énergie cinétique à 10 m d'après les simulations sur cent trajectoires.

figure 18

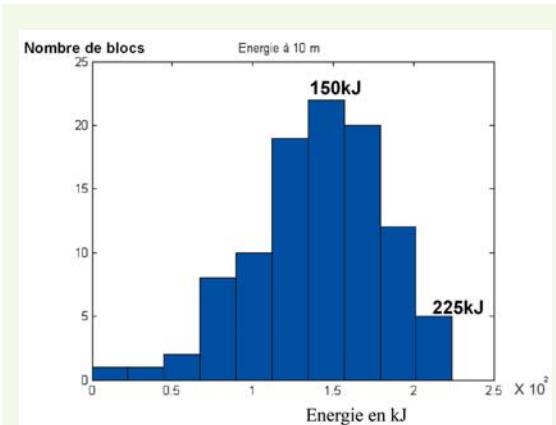
Répartition des trajectoires obtenues après simulation sur terrain nu.

figure 19

Trajectoires simulées sur le terrain boisé.

■ Discussion du modèle

Les résultats obtenus pour la simulation sur terrain nu permettent de valider le modèle sur plusieurs points. Effectivement, en termes d'énergie, les valeurs obtenues par la simulation correspondent



17|18
19



aux valeurs observées. De plus, la dispersion des trajectoires observée sur le terrain est reproduite par les simulations. STAR3D permet de rendre compte des déviations latérales. De même, les points d'arrêts des blocs sont similaires aux points d'arrêt observés sur le terrain.

En ce qui concerne les rebonds sur les arbres, seuls les paramètres liés à la limite de rupture ont pu être utilisés. Les coefficients de dissipation k_N et k_T sont encore inconnus pour les chocs sur les arbres et il est nécessaire de faire des expériences d'impact afin de les déterminer. À cette fin, on a réalisé un dispositif expérimental permettant de mesurer des impacts de bloc sur un arbre (**figure 20**). Le dispositif consiste à guider un bétier avec des câbles pour qu'il impacte un arbre à un endroit donné. Des caméras sont placées de manière à obtenir les vitesses avant et après l'impact. Ce type de dispositif permettra de déterminer les coefficients de dissipation des arbres en fonction des essences et des diamètres.

Les coefficients de rebond sur le sol mesurés sont des valeurs qui caractérisent le sol du site expérimental de Vaujany. Une étude est en cours sur différents terrains afin de déterminer le nombre de classes de terrain à distinguer pour les rebonds de bloc et les coefficients de rebond qui caractérisent chacune d'entre elles.

Enfin, on a pu constater sur le terrain que le moindre replat (piste, chemin, etc.) freine considérablement les blocs, voire les arrête. Or, les simulations ont mis à jour que, pour les simulations avec un MNT sur lequel les replats des routes n'étaient pas marqués, peu de blocs s'arrêtent à ces endroits. Par contre, sur des profils où les replats sur le MNT ont été accentués pour marquer les pistes forestières (**figure 21**), plusieurs trajectoires simulées s'arrêtent sur les triangles plats qui forment la piste. On peut donc en conclure que tout élément de rupture de pente doit être intégré dans le MNT afin que le phénomène de frein soit reproduit lors des calculs numériques.

Les simulations sur terrain boisé laissent augurer de bons résultats. Sur les cent simulations de trajectoires, on a pu reproduire de nombreuses trajectoires observées. On note plus particulièrement les trajectoires qui sortent du couvert forestier. Les modèles bidimensionnels ne peuvent simuler les déviations occasionnées par des chocs sur des arbres, alors qu'avec STAR3D, on a pu simuler ces déviations importantes qui provoquent parfois une sortie du couvert forestier à des endroits spécifiques. Si des ajustements au niveau des coefficients utilisés pour les chocs sur les arbres sont encore nécessaires, on peut d'ores et déjà considérer que le modèle sera utilisable pour reproduire des trajectoires sous couvert forestier.

figure 20

Dispositif expérimental pour mesurer les vitesses lors d'un impact avec un arbre.

figure 21

Intégration de replat dans le MNT.

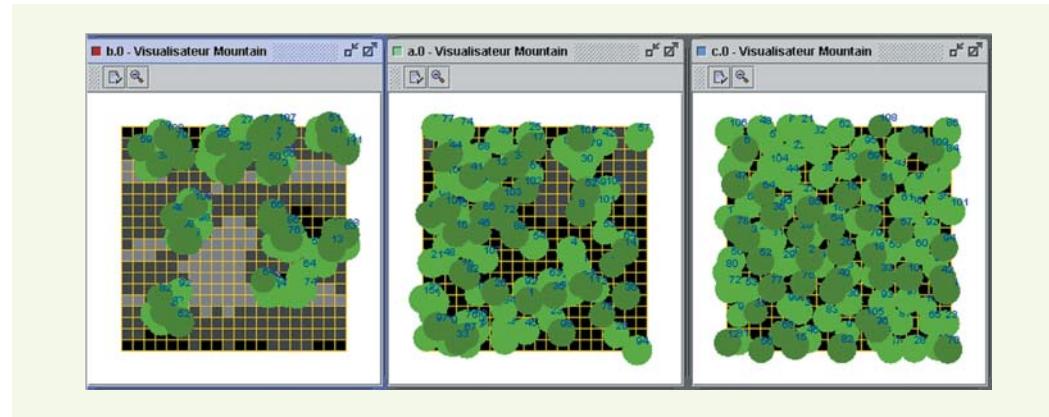


CONCLUSION ET PERSPECTIVES D'UTILISATION

Le moteur de calcul STAR3D permet de prendre en compte l'influence d'un peuplement forestier sur la trajectoire d'un bloc. Il a été validé avec les données d'un site expérimental (le site de Vaujany) et d'autres validations sont en cours sur des sites différents.

En ce qui concerne l'étude systématique du rôle protecteur de la forêt face aux chutes de blocs, il est envisagé de coupler STAR3D avec un logiciel de génération de peuplement virtuel [11]. Un

figure 22
Simulations de répartitions spatiales agrégées, aléatoires ou régulières avec les mêmes caractéristiques dendrométriques pour un peuplement donné.



tel couplage permettra d'étudier l'influence des paramètres que sont la densité et la répartition des diamètres ainsi que la régularité des peuplements (**figure 22**). On pourra ainsi simuler différents types de peuplements en utilisant STAR3D pour déterminer les trajectoires des blocs dans ces peuplements.

L'ensemble de ces études permettra de déterminer les paramètres pertinents (peuplement, pente) à l'évaluation du rôle de protection d'un peuplement d'un site donné.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1 REY F., BERGER F., QUÉTEL C., LE HIR C., Le rôle de la protection passive de la végétation forestière vis-à-vis de l'érosion et des chutes de pierres, *Ingénieries EAT*, 2003, n° spécial « Risques naturels et aménagements du territoire », pp. 165-178.
- 2 DORREN L.K.A., A review of Rockfall mechanics and modelling approaches, *Progress in Physical Geography*, 2003, 27(1), pp. 69-87.
- 3 HEIDENREICH B., Small- and half-scale experimental studies of rockfall impacts on sandy slopes, Thèse de doctorat, École polytechnique fédérale de Lausanne, Génie civil, 2004, 231 p.
- 4 GUZZETTI F., STONE : a computer program for the three-dimensional simulation of rockfalls, *Computers & Geosciences*, 2002, 28(9), pp. 1079-1093.
- 5 DIMNET É., *Mouvement et collisions de solides rigides ou déformables*, Thèse de mécanique, 2002, École nationale des ponts et chaussées.
- 6 FRÉMOND M., Rigid bodies collisions, 1995, *Physics Letters A*, 204, pp. 33-41.
- 7 DAL PONT S., DIMNET É., A theory for multiple collisions of rigid solids and numerical simulation of granular flow, *International Journal of Solids and Structures*, 2006, vol. 43, 20, pp. 6100-6114.
- 8 DORREN L.K.A., BERGER F., LE HIR C., MERMIN E., TARDIF P., Mechanisms, effects and management implications of rockfall in forests, 2005, *Forest Ecology and Management* (à paraître).
- 9 RUPÉ C., *Étude du peuplement forestier de protection du canton de la Sauisse Saint-Martin le Vinoux*, 1991, rapport d'étude, CEMAGREF, 35 p.
- 10 DORREN L.K.A., BERGER F., Stem breakage of trees and energy dissipation during rockfall impacts, 2005, *Tree Physiology* (à paraître).
- 11 COURBAUD B., GOREAUD F., DREYFUS P., BONNET F.R., Evaluating thinning strategies using a tree distance dependent growth model : some examples based on the CAPSIS software « uneven-aged spruce forests » module, *Forest Ecology and Management*, 2001, 145(1-2), pp. 15-28.