

Étude des interactions mécaniques entre un bloc en mouvement et le milieu extérieur

François Nicot

La notion de risque naturel est apparue depuis fort longtemps. Définie comme l'intersection des notions d'aléas et de vulnérabilité, on pourrait admettre d'une façon primale que la notion de risque naturel intervient dès lors que le genre humain se heurte au milieu naturel. La méconnaissance d'un environnement dont les effets peuvent se manifester de manière imprévue, parfois violente, et viennent compromettre les projets de l'homme, induit l'idée de risque.

Phénomènes gravitaires et territoires de montagne

En régions de montagne, les risques naturels revêtent une importance toute particulière. Les caractéristiques de ces régions se déclinent sous des aspects climatiques et géomorphologiques auxquels on peut associer une qualification structurale qui repose en partie sur l'histoire tectonique du massif considéré. Ces faits sont à l'origine des phénomènes gravitaires qu'il est usuel de rencontrer dans de telles régions : mouvements de terrains et instabilités nivologiques. On remarquera que les mouvements de terrain comprennent à la fois les instabilités rocheuses (chutes de blocs et éboulements), les glissements de terrain, mais aussi les coulées boueuses. On rappellera pour mémoire l'éboulement du Mont-Granier (1248), la survenue de laves torrentielles à Bourg-Saint-Maurice (1981), ou les menaces actuelles d'éboulement sur Séchilienne

(département de l'Isère). Les hauteurs souvent considérables des versants, associées aux volumes importants de matériaux mobilisables, confèrent aux phénomènes d'origine gravitaire une forte énergie potentielle, et donc une réelle capacité destructrice.

Il convient de noter que les matériaux mobilisables visés ne sont pas manufacturés, mais résultent au contraire de processus de formation naturels complexes. Puisqu'ils constituent la frange supérieure de l'écorce terrestre, qu'il s'agisse de roches consolidées, de sols ou d'un manteau neigeux, ces éléments méritent la dénomination générique de géomatériaux.

Un contexte socio-économique sensible

Si une chaîne de montagne telle que les Alpes est restée jusqu'au début du vingtième siècle un territoire enclavé, l'explosion industrielle et touristique a au contraire induit au cours du siècle dernier une forte pression d'aménagement des mêmes régions qu'elles abritent. Dans une logique de libre échange économique entre les divers pays de l'Union européenne, de nombreux axes de communication ont été tracés et parcourent aujourd'hui les vallées alpines. Par ailleurs, afin d'exploiter la présence abondante de l'eau, mais tirant aussi profit de la morphologie des lieux, des installations hydroélectriques ont été implantées en aval d'ombilics de retenue. Il convient également de souligner les ressources

Contact

Cemagref,
UR Érosion torrentielle
neige et avalanches,
Domaine universitaire,
2, rue de la Papeterie,
BP 76,
38402 Saint-Martin-
d'Hères Cedex

minières (argent, plomb, cuivre...) présentes dans de nombreux secteurs ; elles ont conduit au développement d'un tissu industriel conséquent orienté sur l'électrochimie.

La conquête industrielle d'une partie du territoire alpin s'est accompagnée d'un accroissement de la fréquentation touristique. À partir des années 1950, la société urbaine s'est emparée de certaines zones de ces régions de montagnes, dans un but de loisir et de repos : le tourisme hivernal a été le moteur de cette migration saisonnière massive.

L'introduction dans les régions de montagne d'une pensée nouvelle, jointe à un mode vie et à une économie moins traditionnels, bouleverse considérablement la manière dont les risques naturels sont appréhendés. Si à l'origine la prévention et la protection contre les risques naturels s'inscrivaient dans une démarche individuelle, il n'en est plus de même à l'heure actuelle ; la seconde moitié du vingtième siècle a plutôt connu une évolution vers une déresponsabilisation généralisée des populations citadines vis-à-vis de la gestion du patrimoine naturel. De plus, l'idée même de risque ne fait plus l'objet d'une acceptation sociale. Cette évolution a sous-tendu une prise en charge effective de la gestion des risques naturels de la part des divers organismes de gestion ou de recherche.

Aménagements et vulnérabilité

Les événements liés à l'épisode avalancheux du mois de février 1999 (Montroc, dans la haute-vallée de l'Arve ; Tacconnaz, en aval de Chamonix ; Evolène en Suisse ; Galtür en Autriche) démontrent de façon cruciale le degré de vulnérabilité des infrastructures de génie civil face aux aléas naturels. Qu'il s'agisse d'habitations ou d'ouvrages de protection, les dommages constatés invitent à conclure à une évaluation encore insatisfaisante de l'aléa, comme de la sollicitation imposée sur un obstacle, de même qu'à un dimensionnement incorrect des structures exposées. Ainsi que l'ont enseigné les épisodes pluvieux de l'automne 1999 (département de l'Aude), ce constat peut très légitimement être transposé aux autres aléas gravitaires tels que les glissements de terrain ou les coulées de boue.

L'aménagement des régions de montagne, marquées par des contraintes naturelles fortes dans un espace réduit, a conduit au développement

d'équipements et à l'implantation de bâtiments dans des zones exposées aux aléas. Afin d'assurer la protection des usagers et des biens, il incombe aujourd'hui de développer des outils et des stratégies qui offrent une évaluation rationnelle des différents aléas gravitaires, de même qu'une analyse sérieuse de l'interaction de ces mêmes aléas avec une structure de génie-civil.

Objectifs de l'article

Il est d'usage de décliner les phénomènes liés aux instabilités gravitaires sous trois phases successives :

- une première phase d'initialisation, susceptible de mobiliser un volume donné de matériaux ;
- une seconde phase d'interaction des matériaux mobilisés avec l'environnement extérieur naturel au cours de leur déplacement ;
- une troisième phase d'arrêt des matériaux.

La réduction du risque peut être opérée à différentes étapes du processus d'instabilité gravitaire. La stratégie active vise à prévenir la mobilisation d'un géomatériau ; au contraire, la stratégie passive vise à contrôler l'écoulement d'un géomatériau. Toutefois, l'une ou l'autre de ces deux stratégies conduit bien souvent à l'implantation d'ouvrages spécifiques sur le site. En regard du contexte d'implantation, il convient de souligner les points suivants.

Conditions géotechniques difficiles

Il s'agit souvent de sols hétérogènes (formations de pentes, moraines...), encore peu étudiés jusqu'à présent. De plus, la reconnaissance *in situ* du terrain se heurte à l'accès souvent difficile des sites.

Sollicitations dues aux aléas encore mal connues

La sollicitation due à un aléa sur une structure ne peut être évaluée qu'à travers l'analyse de l'interaction entre le géomatériau associé à l'aléa et la structure.

Des ouvrages atypiques

La recherche d'une efficacité fonctionnelle pour les ouvrages de protection conduit parfois à concevoir des ouvrages très déformables (nappes de filets), dont le comportement des matériaux de constitution achoppe encore (filets Anti-Sous-Marin, merlons renforcés...).

Il importe de noter que les deux dernières phases du processus sont étroitement liées, puisque la dissipation de l'énergie cinétique des matériaux en interaction avec le milieu extérieur peut conduire à l'arrêt du bloc. Par ailleurs, l'étude de l'interaction entre un bloc rocheux et une structure impose de connaître au préalable les caractéristiques cinématiques du bloc ; cela justifie qu'une analyse trajectographique des matériaux mis en mouvement soit menée. Or, la trajectoire des matériaux est gouvernée par les mécanismes intervenant lors de leur interaction avec le milieu extérieur naturel (terrain naturel, peuplements forestiers). Ce sont donc ces mécanismes dont il convient de proposer une description raisonnable.

L'objet de cet article est de proposer un aperçu des travaux de recherche récemment conduits sur l'étude de ces deux phases. Dans cette perspective, trois volets seront abordés :

- interaction entre un bloc rocheux et un terrain naturel composé d'éboulis ;
- interaction entre un bloc rocheux et un arbre ;
- interaction entre un bloc rocheux et une structure souple de protection.

Modélisation numérique de l'impact d'un bloc rocheux sur un éboulis

Analyse phénoménologique et méthodologie

POSITION DU PROBLÈME

Désignons par D_b la taille caractéristique du bloc, et D_e la taille caractéristique moyenne des éléments constitutifs de l'éboulis. Si $D_b \ll D_e$ l'impact peut être assimilé à celui d'un bloc sur une dalle ; ce cas de figure semble assez bien maîtrisé aujourd'hui. Si $D_b \gg D_e$ il s'agit de l'impact d'un bloc sur un milieu fin, tel un peu une boule de pétanque sur un tas de sable. De récents travaux menés à l'université polytechnique de Turin tendent à montrer que le sol peut être représenté par un milieu continu, rendant possible l'utilisation d'outils numériques classiques basées sur des approches continues. Le cas intermédiaire, pour lequel D_b et D_e sont du même ordre de grandeur, est en revanche mal documenté. Dans ce cas de figure, au cours de l'impact, le bloc est en contact avec un faible nombre d'éléments. La réflexion du bloc est alors fortement gouvernée par la forme locale des objets au droit de la zone

de contact (angle, arête, plan). Dans le cadre de cet article, nous nous intéressons à ce cas de figure, en proposant une approche discrète (Cundall, 1992). Ce type d'approche permet de décrire de manière aisée la cinématique d'une collection d'objets, pouvant interagir les uns avec les autres au droit des zones de contact.

HYPOTHÈSES SIMPLIFICATRICES

L'utilisation du logiciel PFC-2D impose les restrictions suivantes :

- modélisation bi-dimensionnelle ;
- forme circulaire des objets.

Par conséquent, l'influence de la forme des objets n'est pas prise en compte. Il s'agit d'une limitation importante, qui ne peut être acceptée que dans le cadre présent d'une première approche. En revanche, l'influence de la compacité du milieu, de sa texture, de son étalement granulométrique peut être examinée.

Par ailleurs, le cas d'un milieu semi-infini est considéré, occultant l'éventuelle présence à faible profondeur du substratum.

CADRE MATHÉMATIQUE ET OBJECTIFS DES SIMULATIONS

On cherche à établir la relation liant les vitesses incidentes et réfléchies au point d'impact. Cela conduit à proposer une estimation de l'opérateur permettant de déduire les vitesses normales, tangentielles et angulaires réfléchies en fonction des mêmes vitesses incidentes :

$$\begin{pmatrix} u^+ \\ v^+ \\ \omega^+ \end{pmatrix} = \tilde{f} \begin{pmatrix} u^- \\ v^- \\ \omega^- \end{pmatrix} \quad (1)$$

où u désigne la vitesse normale, v la vitesse tangentielle, et ω la vitesse de rotation ; les symboles + et - indiquent respectivement qu'il s'agit de grandeurs réfléchies ou incidentes. En admettant que l'opérateur est suffisamment régulier, il peut être développé en séries entières, de telle sorte que l'on puisse écrire :

$$\begin{aligned} u^+ &= \sum_{i,j,k} a_{ijk} (u^-)^i (v^-)^j (\omega^-)^k \\ v^+ &= \sum_{i,j,k} b_{ijk} (u^-)^i (v^-)^j (\omega^-)^k \\ \omega^+ &= \sum_{i,j,k} c_{ijk} (u^-)^i (v^-)^j (\omega^-)^k \end{aligned} \quad (2)$$

Jusqu'à présent, nous nous sommes limités au cas où seule la composante incidente u^- est non nulle, de sorte que :

$$\begin{aligned} u^+ &= \sum_i a_{i100} (u^-)^i \\ v^+ &= \sum_i b_{i100} (u^-)^i \\ \omega^+ &= \sum_i c_{i100} (u^-)^i \end{aligned} \quad (3)$$

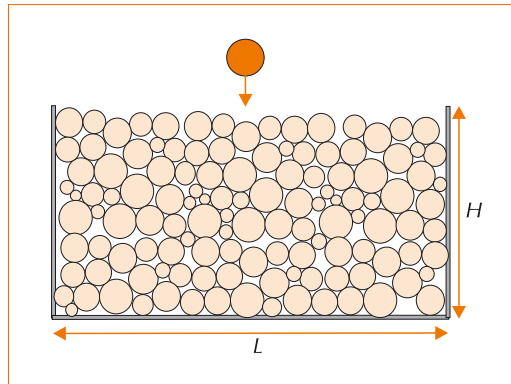
L'objet des simulations a été de :

- montrer que le développement de u^+ peut être limité à un ordre n ;
- déterminer les coefficients a_{i100} , b_{i100} , c_{i100} pour $i = 1, \dots, n$.

DESCRIPTION DES SIMULATIONS

Le sol est modélisé par un volume fini rectangulaire de hauteur H et de largeur L (figure 1). Les déplacements sur les bords latéraux et le fond sont imposés nuls. H et L sont définies comme les dimensions minimales à partir desquelles le résultat n'est plus influencé par les conditions aux limites.

► Figure 1 – Description géométrique du massif de sol considéré.



Le milieu est défini par sa courbe granulométrique, et sa compacité. Le bloc incident est défini par sa masse, sa position et sa vitesse initiales.

Analyse des résultats

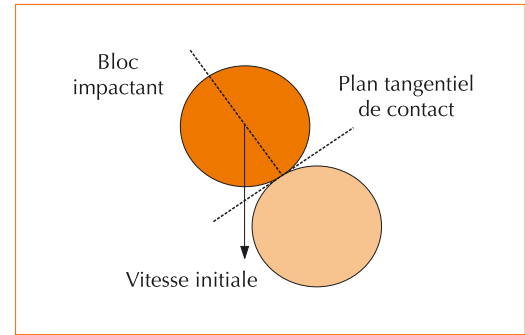
FORME LINÉAIRE DE L'OPÉRATEUR DE RÉFLEXION

Les premiers résultats tendent à montrer que les vitesses réfléchies varient linéairement avec la vitesse normale incidente :

$$\begin{aligned} u^+ &= a_{100} u^- \\ v^+ &= b_{100} u^- \\ \omega^+ &= c_{100} u^- \end{aligned} \quad (4)$$

En revanche, les coefficients a_{100} , b_{100} , c_{100} apparaissent très sensibles à la position de l'impact. Cette dépendance peut être interprétée de la façon suivante :

- les dimensions du bloc impactant et des éléments de l'éboulis sont du même ordre de grandeur ; la réflexion du bloc dépend donc fortement de l'orientation du plan tangentiel de contact par rapport à la direction verticale (figure 2) ;

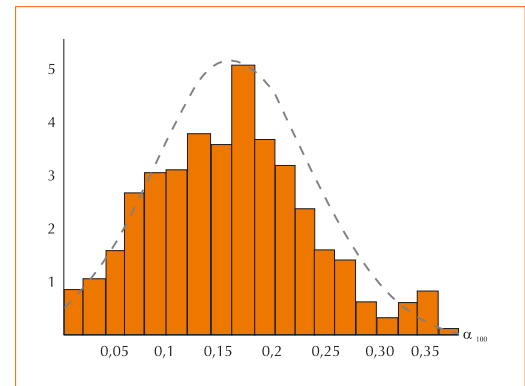


▲ Figure 2 – Influence de l'orientation du plan de contact.

- la réflexion du bloc est également liée à la texture locale du milieu, celle-ci contrôlant le développement de réseaux de forces de contact.

APPROCHE STOCHASTIQUE

La forte sensibilité des coefficients de restitution à la position du point d'impact justifie que leur soient associées des densités de probabilité. Au stade actuel, seule l'analyse stochastique du coefficient a_{100} a été menée. Pour le type de milieu considéré, il apparaît que ce coefficient suit une distribution normale, centrée autour de la valeur moyenne $a_{100} = 0,17$ (figure 3).



▲ Figure 3 – Loi de distribution du coefficient a_{100} .

Premiers éléments de conclusion

Cet article a porté sur la modélisation de l'impact d'un bloc rocheux sur un éboulis composé d'éléments dont la taille moyenne est voisine de celle du bloc. Les relations macroscopiques reliant les vitesses incidente et réfléchie du bloc au point d'impact ont été approchées à partir d'une investigation locale prenant en compte la micro-structure du milieu. Dans le cadre d'une première approche, considérant un sol horizontal sollicité par un impact normal, il a été établi qu'il existait une relation linéaire entre la vitesse incidente normale, et les vitesses réfléchies normale, tangentielle et de rotation.

Par ailleurs, les simulations réalisées ont également révélé que les coefficients de réflexion intervenant dans ces relations linéaires étaient fortement sensibles à la position du point d'impact, c'est-à-dire à la texture locale du milieu au droit de l'impact, de même qu'aux variations locales de la topographie de surface de l'éboulis. Cette propriété a justifié l'introduction d'une approche stochastique pour décrire ces coefficients de réflexion. Cette approche a fourni des premiers éléments permettant de penser que, sous impact normal, le coefficient de réflexion normale peut être décrit par une loi de distribution normale. Il semble de plus que les éléments caractéristiques de cette loi soient peu sensibles à l'arrangement spatial des éléments constituant le sol.

Ce sont bien sûr là des premiers éléments, qui exigent pour être confirmés, des simulations complémentaires ; en particulier, l'influence de la compacité moyenne du milieu et de la distribution granulométrique de l'assemblage granulaire n'a pas été examinée. Par ailleurs, l'extension au cas d'impacts non normaux, avec une vitesse de rotation incidente, devra être envisagée.

Néanmoins, ce type d'approche semble fructueux, en permettant par changement d'échelles, d'évaluer les relations gouvernant les vitesses incidentes et réfléchies en intégrant les mécanismes locaux pilotés par la micro-structure du milieu. Il s'agit là d'une avancée importante, établissant par ailleurs qu'il est nécessaire de traiter ces relations dans un cadre stochastique. C'est un résultat tout à fait fondamental, signifiant que la trajectographie des chutes de blocs, au moins dans le cas de sols constitués d'éboulis, ne peut être traitée dans un cadre déterministe.

Néanmoins, il importe de souligner que les domaines suivants restent à couvrir :

- prise en compte des composantes incidentes v et ω ;
- influence de la compacité et de la granulométrie locales ;
- extension tri-dimensionnelle.

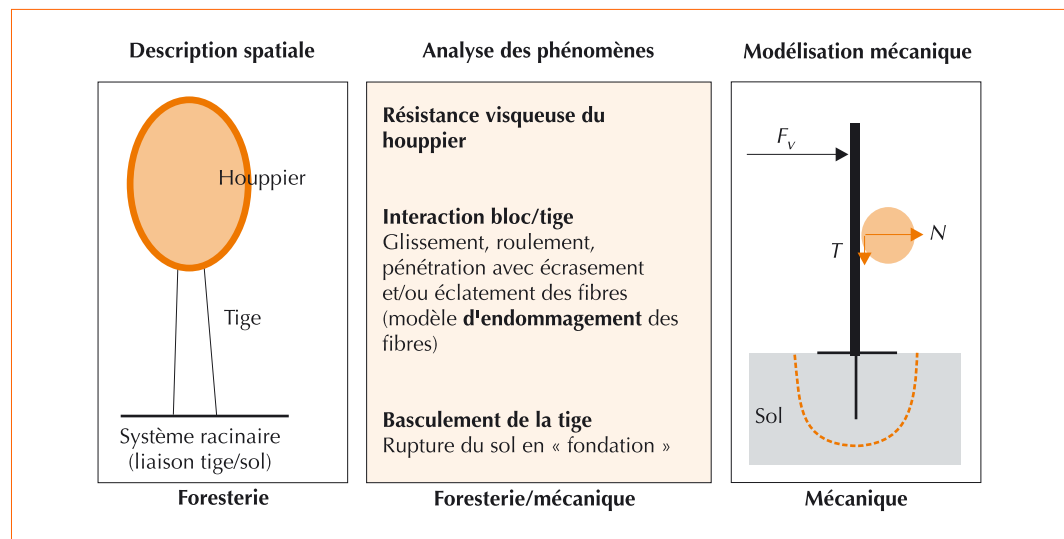
Interaction entre un bloc rocheux et un peuplement forestier

Plusieurs études portant sur le rôle de protection de la forêt contre les chutes de blocs ont été réalisées au cours des années antérieures. Cependant, au cours de ces études, l'énergie dissipée lors d'un impact par un arbre en place, sur le terrain et en conditions réelles, n'a jamais été évaluée de façon précise. Ainsi, outre quelques données qualitatives et générales qui ont pu être recueillies, on ne dispose encore que d'informations très partielles sur l'impact d'un bloc contre un arbre en forêt.

En effet, nos connaissances relatives à la capacité de dissipation d'énergie des arbres proviennent essentiellement d'expériences (de type résistance des matériaux) menées en laboratoire et sur des éprouvettes de bois. C'est l'une des raisons pour lesquelles il n'existe, à l'heure actuelle, aucune modélisation du comportement mécanique du système « arbre » (ensemble houppier + tronc + système racinaire) lors d'un choc. De plus, au regard des résultats obtenus au cours des premières expériences réalisées sur des arbres *in situ*, il apparaît que les coefficients calculés à partir des expériences menées en laboratoire sous-estiment la capacité de dissipation des arbres d'un facteur 100. Cette divergence pourrait être liée au fait que lors d'un impact d'un bloc sur un arbre, des mécanismes dissipatifs complémentaires interviennent : flexion de la tige amortie par le frottement du houppier dans l'air, déformation du système racinaire, etc.

Or, les coefficients obtenus en laboratoire sont ceux utilisés dans les rares logiciels de trajectographie qui intègrent la végétation forestière. Par conséquent, lors des simulations de trajectoires, le rôle de la végétation forestière est encore mal pris en compte. Ces modèles, on le sait, représentent des outils indispensables afin d'apprécier l'aléa, puis de dimensionner les ouvrages de protection. Il convient donc de proposer une intégration réaliste de la végétation forestière dans ces modèles.

► Figure 4 – Interaction bloc-arbre. De la description spatiale à la modélisation mécanique.



Approche pluri-disciplinaire

Comme illustrée figure 4, cette analyse s'est positionnée à l'interface des sciences forestières et des sciences mécaniciennes. En effet, la connaissance de l'objet (l'arbre) emprunte aux sciences forestières, alors que la représentation de l'objet et des phénomènes physiques associés à l'interaction implique une contribution typiquement mécanique.

CONNAISSANCE DE L'OBJET

On considère qu'un arbre se compose de trois parties distinctes :

- le système racinaire, en liaison avec le sol ;
- la tige ;
- le houppier.

ANALYSE PHÉNOMÉNOLOGIQUE

L'interaction matérielle entre le bloc rocheux et l'arbre sera portée par la tige. Au cours de cette interaction, les phénomènes suivants peuvent être invoqués :

- pénétration du bloc dans la tige avec écrasement et/ou éclatement des fibres ;
- déformation par flexion de la tige ;
- roulement et/ou glissement avec frottement du bloc sur la tige ;
- mécanisme de rupture au niveau de la tige ;
- réaction de l'air au déplacement du houppier ;
- basculement du système racinaire en liaison avec le massif de sol.

Une approche multi-échelles

L'interaction entre un bloc rocheux et un arbre introduit deux échelles spatiales, auxquelles sont associées deux échelles de temps. On peut tout d'abord distinguer une première échelle locale, au droit de l'impact ; les phénomènes mis en œuvre sont liés à la pénétration du bloc dans l'arbre, leur durée est de l'ordre du dixième de seconde. Ensuite, une seconde échelle, globale, peut être évoquée ; celle-ci concerne l'arbre dans sa globalité, et l'échelle de temps associée est de l'ordre de la seconde. L'impact induit une flexion dynamique de la tige. Notons que la déformation locale de l'arbre au droit de l'impact génère des efforts de contact entre le bloc et l'arbre, responsables de la modification de la trajectoire du bloc, et de la réponse dynamique de l'arbre à l'échelle globale.

Cette analyse suggère de découpler le problème en deux parties complémentaires.

• Analyse locale de la pénétration du bloc au sein de la tige d'un arbre

Cette partie doit fournir l'évolution temporelle de la distribution des pressions de contact entre le bloc et la tige, l'évolution de la trajectoire du bloc au cours de l'impact, de même qu'une estimation de l'endommagement local de la tige.

• Analyse globale de la réponse dynamique de l'arbre

La prise en compte de la distribution de pression établie dans la partie précédente permet de simuler la réponse dynamique de l'arbre, en tant que structure en interaction avec le sol. En utilisant

un critère de rupture raisonnable, on peut espérer vérifier si l'arbre est susceptible de rompre au niveau de la tige ou au droit de l'encastrement avec le sol.

ANALYSE LOCALE DE L'INTERACTION

S'appuyant sur un modèle de déformation locale de la tige, et admettant que le bloc peut être considéré en première approximation comme sphérique, une première modélisation a été développée afin d'évaluer le champ de contrainte généré localement. Cette modélisation, qui a intégré une loi de comportement élasto-plastique du bois, permet de simuler au cours de l'impact, l'évolution des pressions de contact appliquées au projectile, de même que la modification de la trajectoire du projectile. À terme, cela conduira à l'élaboration d'une loi reliant les vitesses incidentes et réfléchies du bloc rocheux, paramétrée par les conditions d'impact (position, incidence, essence).

À l'échelle locale, la connaissance de la vitesse réfléchie du bloc constitue l'information suffisante pour être intégrée au sein d'un logiciel de trajectographie. À l'échelle globale, la simulation de la réponse dynamique de l'arbre réalisée à partir du champ de pression de contact, de manière indépendante de l'analyse trajectographique, fournit des éléments d'information relatifs à l'évolution du peuplement forestier (l'arbre reste sain ou est endommagé). Il s'agit là d'un point essentiel à la fois pour le gestionnaire forestier, mais également afin de simuler dans le temps l'évolution d'un écran naturel vis-à-vis des chutes de blocs.

MODÉLISATION DE LA RÉPONSE DYNAMIQUE DE L'ARBRE

Dans le cadre d'une première approche 2D, la tige a été représentée par une poutre à section variable encastrée dans le massif de sol. En première approximation, l'encastrement a été modélisé par une liaison élasto-plastique. Le houppier a été pris en compte à travers une pression visqueuse de réaction répartie le long de la portion de tige le supportant.

La réponse mécanique de l'ensemble a été déterminée à l'aide d'une méthode de discrétisation classique mettant en œuvre le principe d'Hamilton (encadré 1).

Approche expérimentale

IDENTIFICATION DES PARAMÈTRES MÉCANIQUES

Les approches locale et globale précédentes nécessitent la connaissance de paramètres mécaniques associés à la tige, tels que par exemple les modules d'Young longitudinaux et transversaux, le coefficient de Poisson, et leur éventuelles dépendance spatiales. Dans cette perspective, des essais de traction statique ont été pratiqués sur des arbres placés en situation de versant, afin de mesurer l'évolution de la déformée de la tige en fonction du chargement appliqué. À partir de calculs en retour, il a été possible d'estimer un premier ordre de grandeur pour le module d'Young longitudinal de la tige.

VALIDATION GLOBALE À ÉCHELLE RÉELLE

Plusieurs campagnes expérimentales ont été effectuées afin d'étudier la trajectoire de blocs lâchés sur un versant (Berger, 2003).

Encadré 1

Le principe d'Hamilton... en quelques mots

Le mouvement d'un corps parfaitement rigide est décrit par la loi de Newton qui relie l'accélération du corps aux forces extérieures auxquelles il est soumis. Dans le cas de milieux déformables – ce qui est finalement le cas réel – les équations de la dynamique s'expriment de manière un peu plus complexe sur le plan mathématique, faisant intervenir en particulier des dérivées partielles.

Le traitement analytique direct de ces équations n'est en principe pas envisageable, ce qui impose de recourir à des méthodes numériques appropriées. La méthode de Hamilton, voisine de la Méthode des Éléments Finis, est un exemple de traitement numérique, fondé sur l'hypothèse que la déformée (forme de l'objet une fois déformé) d'une petite portion de cet objet (une petite longueur de la tige de l'arbre, par exemple, assimilée à une poutre) peut être estimée simplement par un polynôme.

La précision de ce type de méthode est bien sûr d'autant meilleure que l'objet (la tige de l'arbre) est découpée en de nombreuses portions élémentaires de petite taille. Dans un problème de dynamique, le nombre de portions élémentaires doit être tel que les modes principaux de vibration de la poutre soit correctement représentés.

Un enregistrement cinématographique des blocs, de caractéristiques connues (dimensions, volume, positions initiales), sur un terrain préalablement cartographié (modèle numérique de terrain, mode d'occupation du sol, position de tous les obstacles [arbres, blocs en place, etc.]), ainsi qu'un relevé cartographique précis des impacts (position, nature, distance et azimut entre deux impacts) après le passage d'un bloc, ont été menés. À partir de ces informations, il a été alors possible de déterminer les vitesses (de translation et de rotation) d'un bloc en tout point de sa trajectoire. Par ailleurs, il convient de remarquer que le site expérimental sélectionné (commune de Vaujany, Isère) permet de réaliser pour les mêmes conditions de pentes, les expériences en terrain nu et en terrain boisé. Il s'agit désormais d'une base de données précieuse qui permettra à terme de valider de manière globale les précédentes approches.

Interaction entre un bloc rocheux et un ouvrage souple de protection

Parmi les ouvrages de protection classiquement mis en œuvre, les filets pare-pierres constitue une solution souvent convenable : leur profil linéaire s'adapte souvent bien à la configuration topographique des versants, et leur comportement mécanique d'ensemble permet de dissiper des énergies cinétiques des blocs incidents de niveau élevé (plusieurs kJ). D'autres solutions pertinentes, telles que les galeries déflectrices, ont fait l'objet de travaux approfondis sur le plan expérimental (Montani-Stoffel, 1998) et justifient la poursuite actuelle de recherche dans le domaine de simulation numérique de la réponse et de l'endommagement de l'ouvrage (Mazars, 2002). Le présent article traite essentiellement des ouvrages constitués de nappes de filet (Smith, 1990 ; Peila, 1998 ; Nicot, 1999). S'appuyant sur les travaux antérieurement réalisés (Akkaraju, 1994 ; Hearn, 1995), une méthode d'analyse originale a été développée. Celle-ci a conduit au développement d'un code de calcul dont la portée pratique pour l'ingénieur représente un réel enjeu.

Même si ces ouvrages présentent quelques différences d'un constructeur à l'autre (type de filet, dispositif de support de la nappe de filet, organes dissipateurs d'énergie), leurs principes de fonctionnement restent très similaires. De cette manière, bien que le travail ait porté sur un type de protection (nappes de filet constituées d'anneaux Anti Sous-Marins), les concepts manipulés demeurent très généraux et peuvent être étendus à la modélisation des autres types de filets pare-pierres. Par ailleurs, les nappes de filets Anti-Sous-Marin (ASM) constituent d'un point de vue technologique le type d'écran métallique le plus complexe à l'heure actuelle. Par conséquent, les outils qui ont été développés pourraient rapidement être étendus au cas des structures composées de nappes de filets différentes. La démarche retenue s'est articulée autour de trois étapes.

- Analyse physique :

- identification des objets (structure, bloc rocheux, terrain naturel) ;

- description spatiale des objets.

- Analyse mécanique :

- description constitutive des objets ;

- analyse mécanique des objets ;

- prise en compte des conditions aux limites du problème réel.

- Analyse numérique :

- construction d'un schéma numérique explicite ;

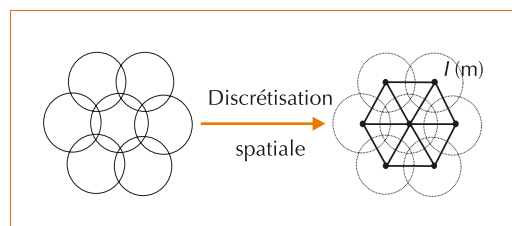
- implémentation au sein d'un code de calcul ;

- validation du code de calcul à l'aide d'essais expérimentaux effectués en grandeur réelle.

Analyse physique

Le bloc rocheux est décrit par une sphère homogène parfaitement rigide. Le terrain naturel est représenté par un plan incliné. La structure est décrite par un ensemble de nœuds, fixes ou mobiles. Par exemple, les ancrages sont modélisés par des nœuds fixes. Au contraire, chaque anneau est décrit par un nœud mobile situé en son centre, en lequel la masse de l'anneau est concentrée. La liaison qui existe entre deux anneaux en contact est prise en compte par l'intermédiaire d'une barre fictive joignant les deux nœuds modélisant les anneaux. De cette façon, la structure réelle est remplacée par une structure modèle composée seulement de nœuds et de barres (figure 5).

► Figure 5 – Représentation spatiale de la nappe de filet.



Analyse mécanique

La déformation des anneaux au cours d'un impact induit des efforts au contact de ceux-ci. Ce sont ces forces de contact qui sont à l'origine de la réaction de la nappe sur le projectile. Pour prendre en compte ce phénomène, une force de rappel est introduite dans chaque barre fictive ; son évolution est fonction de l'allongement de cette barre. Par conséquent, entre deux nœuds voisins I et J , il existe une force F_{IJ} dont l'évolution est fonction de l'allongement x_{IJ} de la distance IJ : $F_{IJ} = f(x_{IJ})$.

En s'appuyant sur les campagnes expérimentales effectuées par le CETE de Lyon, une formulation élasto-plastique avec écrouissage de la loi a pu être proposée (Nicot, 2001). Par conséquent, il est possible de calculer la force de rappel qui existe entre les différents nœuds voisins du maillage en fonction de l'évolution de l'allongement de la distance les séparant.

Il a été alors possible de mener l'analyse mécanique du problème complet, en prenant en compte les conditions réelles du problème :

- description de la structure porteuse constituée de poteaux, de câbles et d'ancrages ;
- analyse du contact entre le projectile et les nœuds de la nappe ;
- possibilité de contact entre le projectile et le terrain naturel.

Exploitant la discrétisation spatiale des objets qui a été retenue, cette analyse mécanique a introduit la méthode des éléments discrets. L'équilibre mécanique de chaque objet est décrit de façon distincte, en prenant en compte les efforts de contact qui lui sont imposés par les objets avec lesquels il est en contact. En particulier, le contact entre le projectile et les nœuds de la nappe est géré au travers d'une loi de contact unilatéral avec frottement (loi de Coulomb). Contrairement à d'autres approches qui sont parfois préférées, il ne s'agit pas ici d'un modèle de choc, mais d'un modèle de contact ; ce sont les forces développées dans les différentes barres fictives qui sont à l'origine des efforts de contact.

Analyse numérique

La complexité des équations d'équilibre, fortement non-linéaires, a imposé la mise en œuvre d'une résolution numérique. Dans cette perspective, chaque opérateur différentiel

temporel (vitesses, accélérations) a été discrétisé à l'aide d'un schéma aux différences finies. Cette discrétisation a permis de construire un schéma numérique de type explicite qui permet à chaque pas de temps, et à partir de la connaissance de la position de tous les nœuds aux instants antérieurs, de déterminer leurs nouvelles positions. À chaque étape, il est également possible de calculer explicitement les efforts dans les différents organes de la structure (poteaux, câbles, ancres, filet).

Cet algorithme de résolution a été intégré au sein d'un code spécifique, structuré en trois parties.

PARTIE PRÉ-PROCESSEUR

Elle permet la saisie de toutes les données du problème concernant le bloc rocheux (volume, positions et vitesses initiales), la structure (nombre de modules, dimensions, caractéristiques des organes dissipateurs) et le terrain naturel (pente, type de sol).

PARTIE PROCESSEUR

Elle intègre directement l'algorithme de résolution qui calcule à chaque pas de temps la position des tous les objets.

PARTIE POST-PROCESSEUR

Elle permet l'exploitation des résultats du calcul, en proposant :

- l'évolution cinématique des différents objets (nappe de filet, projectile) ;
- l'évolution des efforts dans les différents organes de l'ouvrage ;
- le dimensionnement des différentes pièces.

Un exemple de transfert à l'usage des gestionnaires

Grâce aux conditions initiales très générales du problème, il est possible de traiter un grand nombre de problèmes, en jouant en particulier sur la position du bloc, sa vitesse de rotation, ou l'incidence de l'impact. De cette manière, des études paramétriques peuvent être pratiquées afin d'examiner l'influence d'un paramètre particulier.

Par ailleurs, trois aspects fondamentaux peuvent être explorés :

- notion d'efficacité d'un ouvrage ;
- notion d'endommagement d'un ouvrage ;
- notion de vieillissement d'un ouvrage.

ANALYSE DU RISQUE RÉSIDUEL

Cet axe vise à estimer l'efficacité d'un ouvrage, vis-à-vis de l'aléa pressenti, en analysant la probabilité :

- pour qu'un projectile ne soit pas arrêté par l'ouvrage (risque résiduel d'origine cinématique) ;
- pour qu'une partie de la structure soit ruinée, et compromette l'arrêt du projectile (risque résiduel d'origine dynamique). Ce dernier point renvoie à la notion d'endommagement des structures.

Exemple de simulation : impact d'un bloc rocheux dans le bandeau supérieur du filet (figure 6).

1. Projectile

Masse 2 000 Kg

Vitesse initiale

2. Données topographiques

Pente moyenne $\beta = \frac{\pi}{6} \text{ rad}$

Nature du sol éboulis

3. Structure de protection

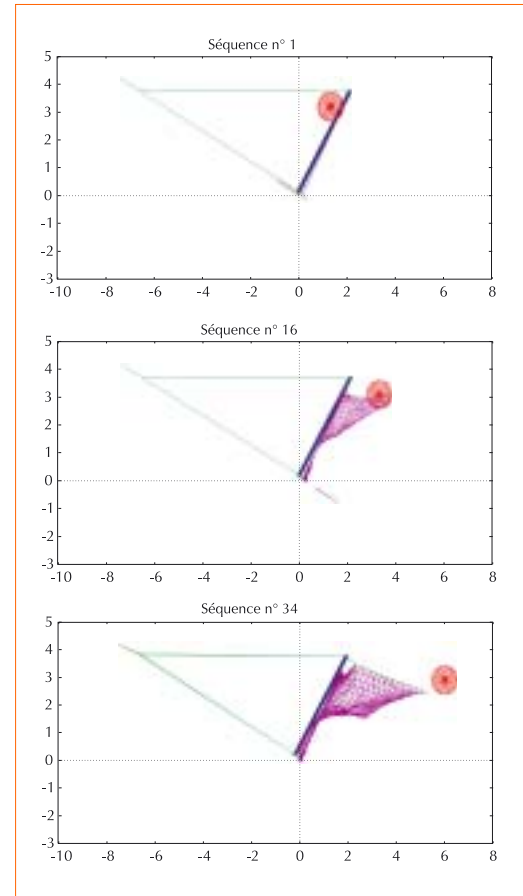
3 modules de filet 4 x 10 mètres

Hauteur des poteaux 5 mètres

Les résultats issus de l'analyse cinématique (figure 7) montrent que le projectile, après avoir heurté la nappe, parvient à effacer celle-ci.

La structure, dimensionnée de cette façon, n'est donc pas en mesure de contrôler la trajectoire d'un tel impact. Son efficacité peut alors être évaluée comme la probabilité d'occurrence des impacts de projectiles que l'ouvrage n'est pas en mesure de contrôler.

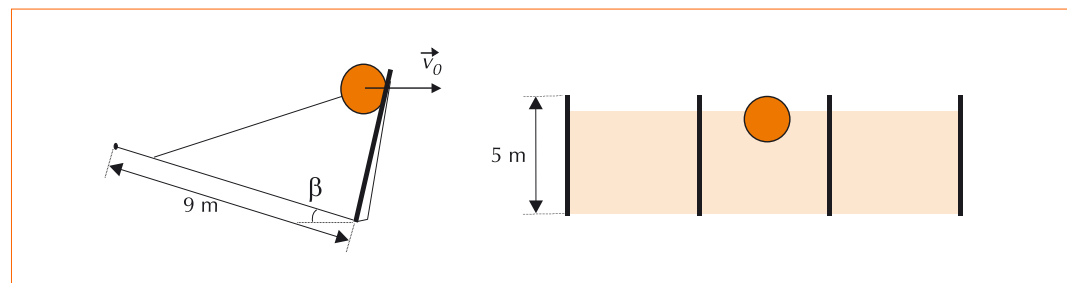
▼ Figure 7 – Évolution cinématique du bloc rocheux en interaction avec l'ouvrage.



Il convient de souligner qu'une telle investigation ne peut que très difficilement être envisagée par voie expérimentale ; en effet, la maîtrise précise des conditions d'impact impose un dispositif expérimental dont le coût paraît prohibitif.

Dans un tel contexte, la simulation numérique devient l'outil complémentaire indispensable.

► Figure 6 – Données géométriques du problème.



ÉVOLUTION DES EFFORTS AU SEIN DE LA STRUCTURE AU COURS DE L'IMPACT

Cette partie a pour objet de proposer le dimensionnement des différentes pièces de la structure, en fonction des conditions d'impact auxquelles elle est soumise.

Exemple de simulation : cas d'un bloc heurtant le terrain naturel au cours de l'impact avec la structure (figures 8, 9, 10 et 11).

1. Projectile

Masse	2 000 Kg
Vitesse initiale	$\vec{v}_0 = (30 \ 0 \ -15) (m/s)$

2. Données topographiques

Pente moyenne	$\beta = 0 \text{ rd}$
Nature du sol	couvert végétal

3. Structure de protection

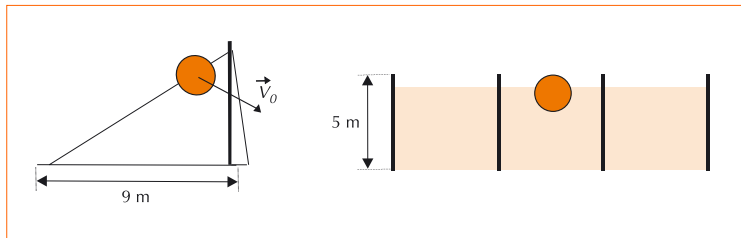
3 modules de filet	4 x 10 mètres
Hauteur des poteaux	5 mètres

$$\vec{\Omega}_0 = \vec{0} \text{ rd/s}$$

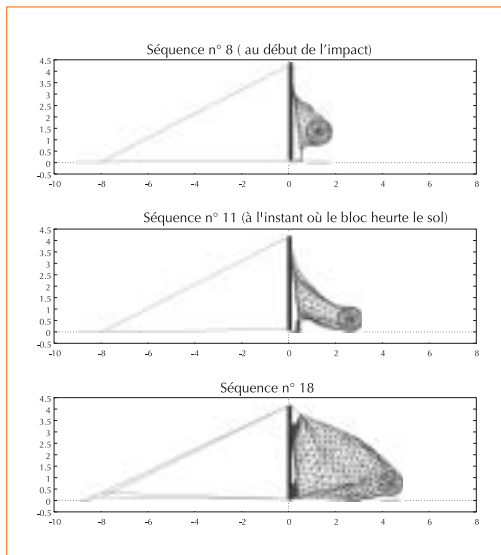
Cette simulation, qui propose l'interaction entre les trois objets (terrain naturel, bloc rocheux et structure), souligne encore l'intérêt de l'investigation numérique afin de recueillir des informations dynamiques qui seront exploitées pour dimensionner *a priori* l'ouvrage.

COMPORTEMENT DE LA STRUCTURE APRÈS PLUSIEURS IMPACTS

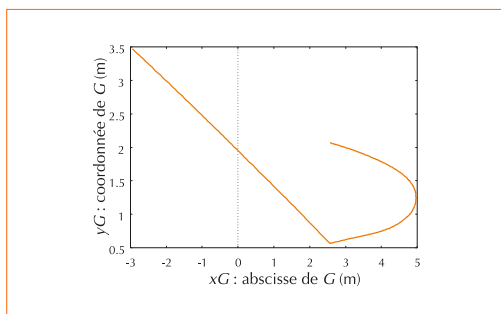
Le vieillissement d'un ouvrage en service demeure aujourd'hui un problème encore très ouvert, pour lequel les informations dont on dispose résultent en partie d'observations de terrains.



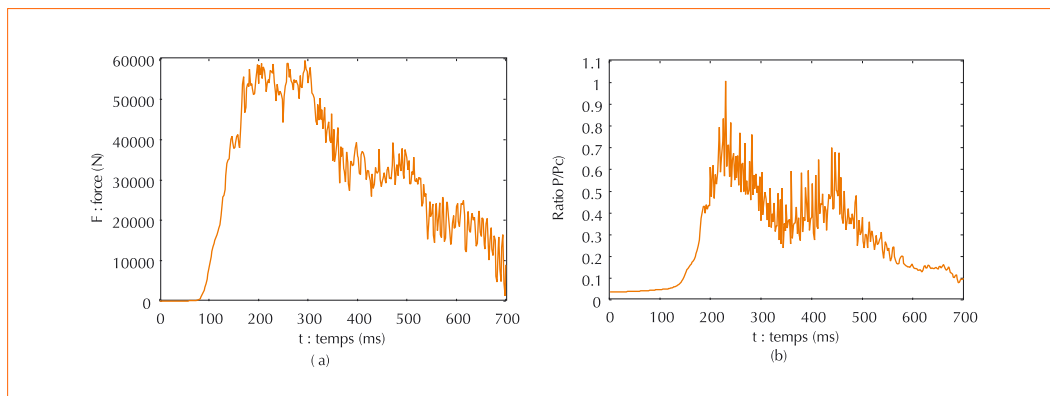
▲ Figure 8 – Données géométriques du problème.



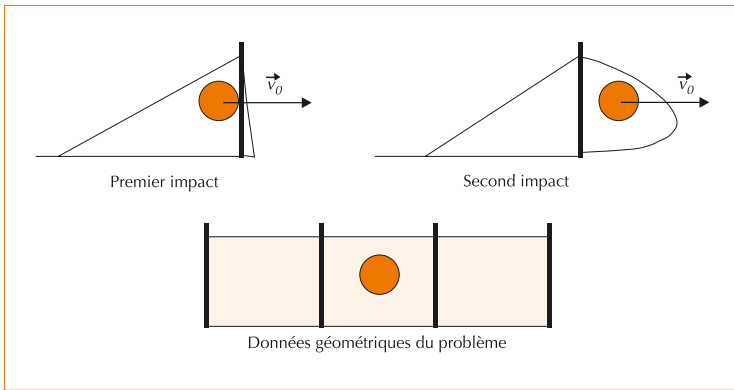
◀ Figure 9 – Évolution des déformations dans la structure au cours de l'impact.



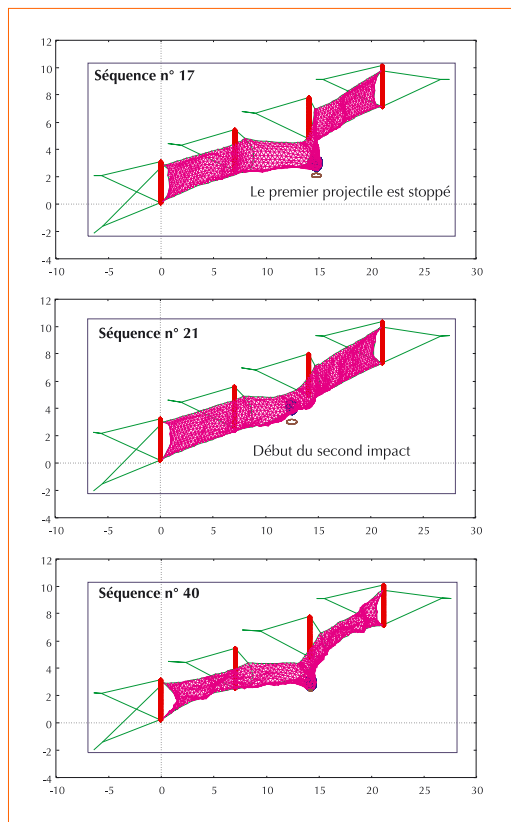
◀ Figure 10 – Analyse des efforts dans la structure.



◀ Figure 11 – Analyse des efforts dans la structure. (a) Évolution de la force de tension dans le câble de rive supérieur. (b) Analyse du flambement dans le poteau intermédiaire.

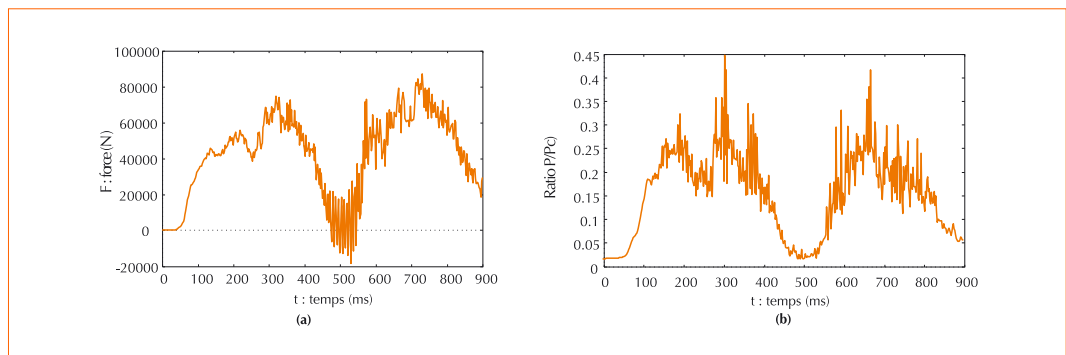


▲ Figure 12 – Données géométriques du problème.



► Figure 13 – Évolution des déformations dans la structure au cours de deux impacts successifs.

► Figure 14 – Analyse des efforts dans la structure. (a) Évolution de l'effort de tension dans le câble supérieur de rive. (b) Analyse du flambement dans le poteau intermédiaire.



Et pourtant, il s'agit d'une question essentielle afin de prévoir l'évolution dans le temps de l'efficacité d'un ouvrage.

Deux notions mécaniques doivent intervenir :

- la fatigue des matériaux, au cours de sollicitations successives, et en prenant en compte les agressions climatiques sévères imposées par l'environnement ;
- les déformations résiduelles permanentes au sein de la structure qui modifient son comportement.

Exemple de simulation : Impact multi-blocs (figures 12, 13 et 14).

1. Projectile

Masse 2 000 Kg
 Vitesse initiale $\vec{v}_0 = (30 \ 0 \ 0) (m/s)$

2. Données topographiques

Pente moyenne $\beta = 0 \text{ rd}$
 Nature du sol éboulis

3. Structure de protection

3 modules de filet 4 x 10 mètres
 Hauteur des poteaux 5 mètres

Au cours de cette simulation, un second impact (identique au premier) se produit après que le premier bloc rocheux ait été stoppé. Les résultats cinématiques et dynamiques démontrent que l'ouvrage a été en mesure de contrôler la trajectoire du second bloc ; on notera toutefois que l'augmentation des efforts est plus forte au cours du second impact. En revanche, le niveau maximal des efforts reste du même ordre de grandeur.

L'augmentation plus forte des efforts traduit une plus grande raideur de la structure liée aux déformations résiduelles développées au cours du premier impact. On notera que les freins (organes dissipateurs) n'ont pas atteint leur limite de course au cours des deux impacts. L'efficacité d'un ouvrage est en effet très dépendante de sa capacité dissipative ; si un impact intervenait sur une structure dont le système de freins était désamorcé, l'augmentation sévère des efforts au niveau des ancrages compromettrait de façon certaine l'efficacité de l'ouvrage.

Perspectives

Cette contribution permet de démontrer le rôle fondamental que peut offrir la simulation numérique dans l'analyse de l'interaction entre un aléa et un ouvrage. Le code de calcul qui a été développé constitue un outil qui devrait pouvoir à terme guider le gestionnaire, dans le choix et la définition d'une stratégie performante.

Quelques pistes restent toutefois à explorer :

- impacts multi-blocs simultanés ;
- rupture d'un organe (ancrage, poteau, anneau...).

On rappellera également la nécessité de conduire des essais expérimentaux sur des ouvrages réels instrumentés, afin de compléter la démarche de validation qui a déjà été amorcée.

Conclusions et perspectives

Cet article a eu pour objet de démontrer l'intérêt des méthodes numériques modernes associant une approche multi-échelles pour avancer dans

la compréhension et la gestion de phénomènes naturels tels que les chutes de blocs.

D'une façon plus générale, cette action invite à réfléchir sur la nécessité d'une construction plus large visant à aborder à travers un même projet fédérateur l'ensemble des risques naturels rencontrés en montagne : phénomènes gravitaires (instabilités rocheuses, nivologiques, phénomènes torrentiels, glissements de terrains), et aléa sismique. Outre le dernier aléa, les autres phénomènes sont tous subordonnés à un géomatériau (eau, neige, sol, roche), et leur manifestation dans le temps implique les trois processus de production des phénomènes, de dynamique des mouvements gravitaires rapides, et d'interaction phénomène-ouvrage. Sur un même versant, plusieurs de ces phénomènes peuvent s'observer, parfois de manière dépendante. Dans cette logique, l'aléa sismique apparaît à la fois comme un facteur déclenchant, participant en association avec la gravité à la production des phénomènes, mais aussi comme un facteur dimensionnant pour les ouvrages affectés par cet aléa.

Le choix d'un schéma de gestion robuste doit intégrer cette dimension multi-aléas, à laquelle il convient d'adjoindre l'analyse économique dont l'objet est d'évaluer le coût des actions envisagées, en regard de celui lié à l'interaction entre les phénomènes et les enjeux.

Une telle perspective pourrait s'articuler à travers le groupement fédératif RNVO (Risques naturels & vulnérabilité des ouvrages) actuellement en cours de structuration sur la région Rhône-Alpes.



Résumé

Les instabilités rocheuses figurent parmi les aléas rencontrés fréquemment en zone de montagne. Afin de réduire le risque associé, la stratégie dite passive vise à mettre en place des techniques de protection qui permettent de contrôler la trajectoire des blocs rocheux en mouvement. Parmi ces techniques de protection, l'usage des filets pare-pierres constitue une solution particulièrement efficace. Le choix de l'emplacement et le dimensionnement de ces ouvrages imposent toutefois d'être capables de décrire : (i) la trajectoire antérieure des blocs rocheux et (ii) leur interaction avec la structure. Par ailleurs, l'analyse trajectographique des chutes de blocs nécessite d'aborder deux volets complémentaires : l'interaction des blocs rocheux (impacts) avec (i) le terrain naturel (éboulis...) et (ii) une éventuelle couverture forestière. Cet article se propose de présenter les avancées récentes dans l'étude des interactions entre un bloc rocheux en mouvement et le milieu extérieur, tant sur le plan expérimental que numérique, et son application à la trajectographie des éboulements rocheux et au dimensionnement des filets pare-pierres.

Abstract

At the present time there is a real tendency to fight natural phenomena, which are sometimes not foreseeable, by using systematic accuracy in both the analysis and management of the risk associated to rockfalls. In particular, frequent rockfall occurrence has resulted in the development of passive protection methods such as rockfall restraining nets. These are specific structures, located below rocky cliffs, to protect both people and infrastructures. Designing of these structures requires to describe both the trajectory of the boulders, and their interaction with the protective structure. Furthermore, rockfall analysis should encompass the description of the interaction between boulders and natural ground and forest stands. This paper gives significant insight about both experimental and numerical modelling of interaction between a falling block and external obstacles. Application to the design of rockfall protective structures is thus discussed.

Bibliographie

- AKKARAJU, L., 1994, *Dynamic analysis of cable structures*, Ms Thesis, Univ. of Colorado, Boulder.
- BERGER, F., REY, E., QUETEL, C., 2003, Le rôle de protection passive de la végétation forestière vis-à-vis de l'érosion et des chutes de pierres, *EAT*, numéro spécial ASS.
- CUNDALL, P.-A., ROGER, D.-H., 1992, Numerical modelling of discontinua, *Engineering computations*, vol. 9, p. 101-113.
- HEARN, G., AKKARAJU, L., 1995, Analysis of cable nets for boulder impacts, ASCE 10th EMD, Boulder, Colorado, p. 289-292.
- HEARN, G. et al., 1995, Testing and modelling of two rockfall barriers, *Transportation Research Record*, p. 1-11.
- MAZARS, J., BERTHET-RAMBAUD, P., DAUDEVILLE, L., NICOT, F., 2002, *Rockfall protection, impact effects on structures - Analysis and modelling*, Invited lecture, Eurock 2002 Conference, Proceeding, in press.
- MONTANI-STOFFEL, S., 1998, *Sollicitation dynamique de la couverture des galeries de protection lors de chutes de blocs*, Ph. D., EPF Lausanne.
- NICOT, F., 1999, *Étude du comportement mécanique des ouvrages souples de protection contre les éboulements rocheux*, Ph. D., École Centrale de Lyon.
- NICOT, F., CAMBOU, B., ROCHET, L., MAZZOLENI, G., NOUVEL, P., 1999, Étude du comportement mécanique des ouvrages souples de protection contre les éboulements rocheux, *Revue Française de Génie Civil*, vol. 3, n° 5, p. 295.
- NICOT, F., CAMBOU, B., MAZZOLENI, G., 2001, Design of rockfall restraining nets from a discrete element modelling, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, vol. 34, n° 2, p. 99-118.
- NICOT, F., CAMBOU, B., MAZZOLENI, G., 2001 From a Constitutive Modelling of Metallic Rings to the Design of Rockfall Restraining Nets, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, n° 25, p. 49-70.
- PEILA, D., PELIZZA, S., SASSUDELLI, F., 1998, Evaluation of behaviour of rockfall restraining nets by full scale tests, *Rock Mech. Rock Engng.*, 31 (1), p.1-24.
- SMITH, D.-D., DUFFY, J.-D., 1990, *Field tests and evaluation of rockfall restraining nets*, California Department of Transportation, Final report.