

Un outil de dimensionnement des filets pare-pierres : le logiciel ECRANS

En zone de montagne, les chutes de blocs rocheux sont nombreuses et peuvent causer des dégâts et parfois même, faire des victimes. Afin d'assurer la protection des usagers et des biens, il est nécessaire de mettre en place des techniques de protection efficaces. Dans cet article, les auteurs présentent un outil numérique de dimensionnement des filets pare-pierres, technique utilisée pour contrôler la trajectoire des chutes de pierres en mouvement.

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 sur-

nue 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.

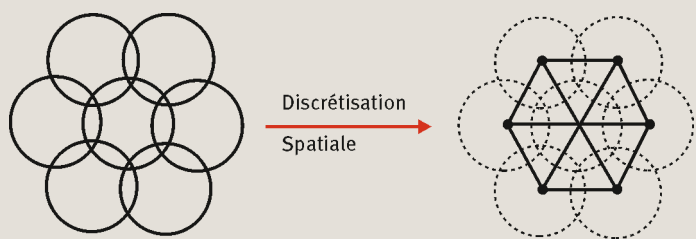
L'aménagement des régions de montagne, marquées par des contraintes naturelles fortes dans un espace réduit, a conduit au développement d'équipements et à l'implantation de bâtiments dans des zones exposées aux aléas*. Afin d'assurer la protection des usagers et des biens, il incombe aujourd'hui de développer 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.

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

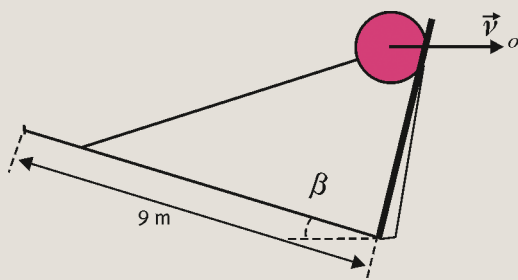
- une première phase d'initialisation, susceptible de mobiliser un volume donné de matériaux ;
- une seconde phase d'interaction des matériaux mobilisés avec l'environnement extérieur naturel au cours de leur déplacement ;
- une troisième phase d'arrêt des matériaux.

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

1 Représentation spatiale de la nappe de filet



2 Données géométriques du problème



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).

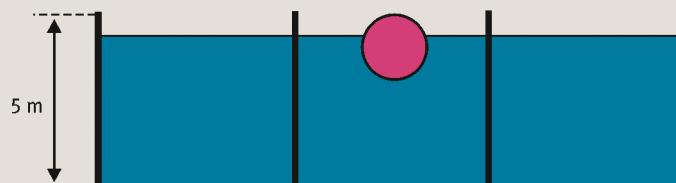
Ce sont donc des mécanismes fondamentaux qu'il est nécessaire de prendre en compte afin de disposer d'une description raisonnable des processus déterminant les conditions d'impact d'un bloc sur un ouvrage. Ces aspects ne seront toutefois pas abordés dans le cadre de cet article, mais seront évoquées ailleurs au sein de ce numéro spécial.

Cet article se propose de présenter un outil de dimensionnement des filets pare-pierres, en veillant à faire ressortir sa portée pratique en vue d'applications opérationnelles.

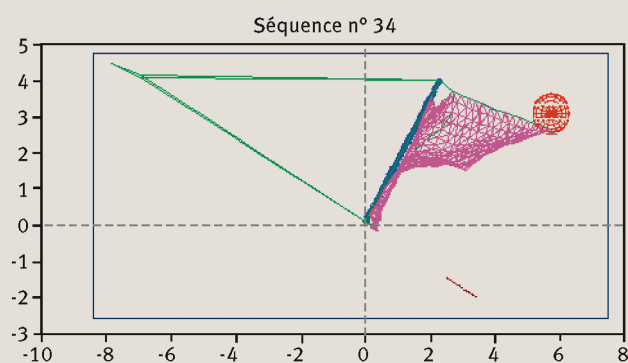
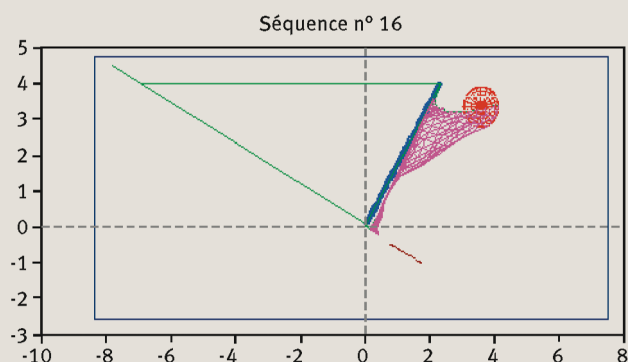
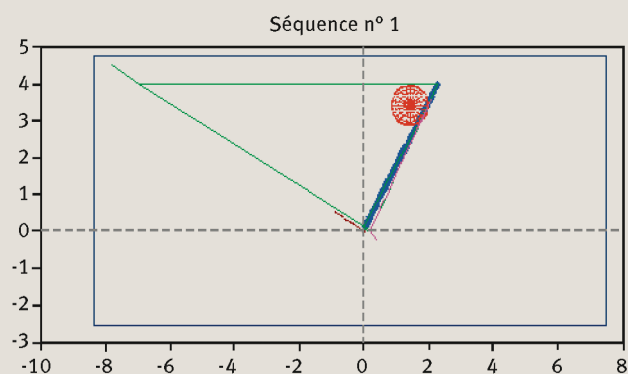
Une description « multi-échelle » de la structure

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 kilojoules). D'autres solutions pertinentes, telles que les galeries défectrices, 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.

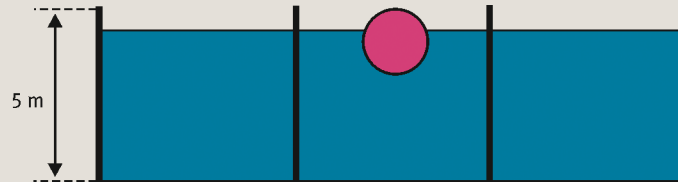
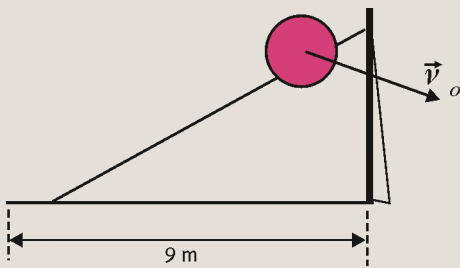
Même si ces ouvrages présentent quelques différences d'un constructeur à l'autre (type de filet, dispositif de support de la nappe de filet, organes dissipateurs d'énergie), leurs principes de fonctionnement restent très similaires. De cette manière, bien que le travail ait porté sur un



3 Évolution cinématique du bloc rocheux en interaction avec l'ouvrage



4 Données géométriques du problème



► 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 :

1. l'analyse physique :

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

2. l'analyse mécanique :

- description constitutive des objets,
- analyse mécanique des objets,
- prise en compte des conditions aux limites du problème réel ;

3. l'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.

L'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 noeuds, fixes ou mobiles. Par exemple, les ancrages sont modélisés par des noeuds fixes. Au contraire, chaque anneau est décrit par un noeud 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 noeuds modélisant les anneaux. De cette façon, la structure réelle est remplacée par une structure modèle composée seulement de noeuds et de barres (figure 1).

L'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 noeuds 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 (Centre d'études techniques de l'équipement), une formulation élasto-plastique avec écrouissage de la loi f a pu être proposée (Nicot, 2001). Par conséquent, il est possible de calculer la force de rappel qui existe entre les différents noeuds 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 :

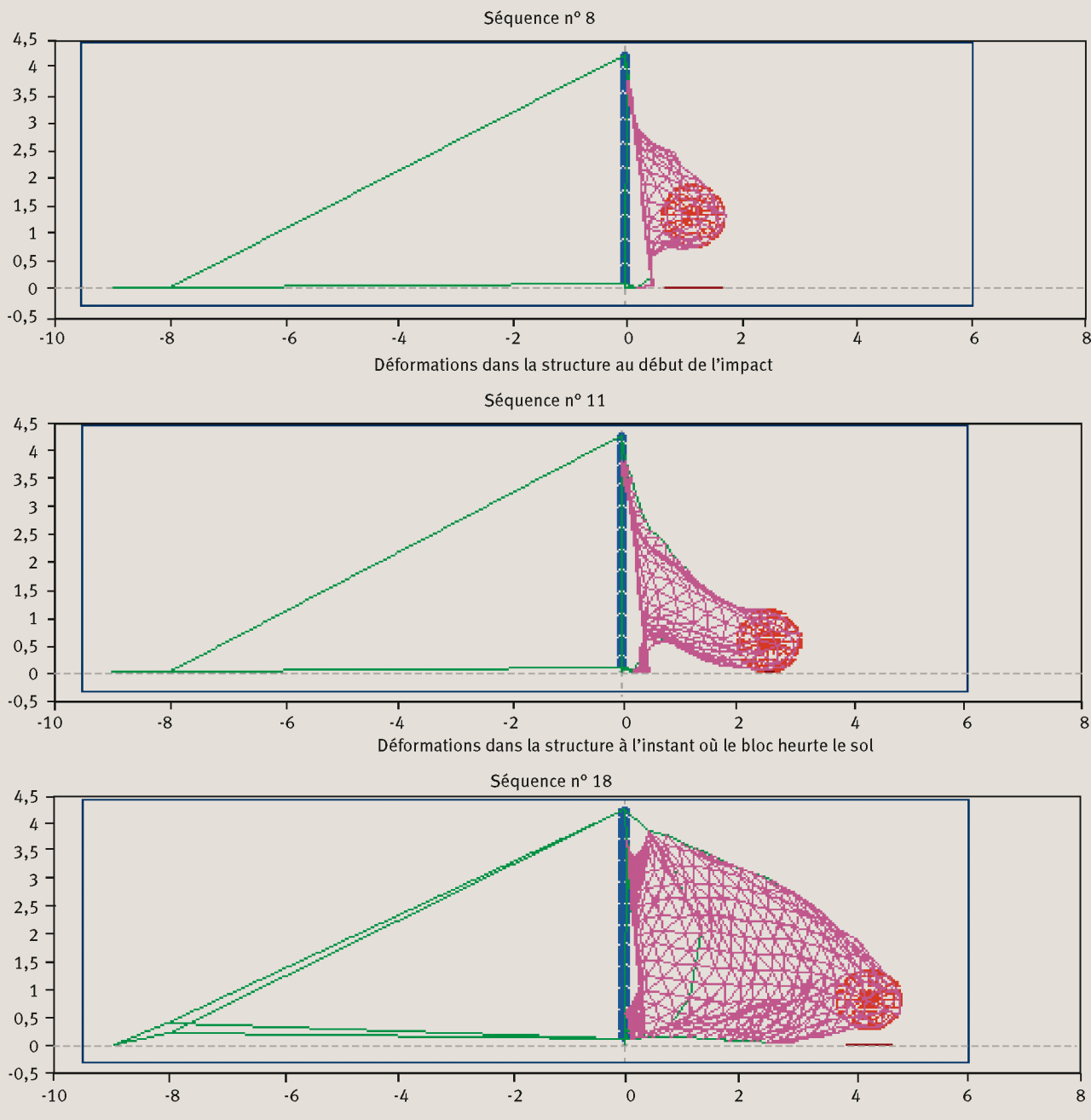
- description de la structure porteuse constituée de poteaux, de câbles et d'ancrages,
- analyse du contact entre le projectile et les noeuds de la nappe,
- possibilité de contact entre le projectile et le terrain naturel.

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 noeuds 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.

L'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 noeuds 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, ancrages, filet).

5 Évolution des déformations dans la structure au cours de l'impact



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

1. la partie pré-processeur, qui 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) ;
2. la partie processeur, qui intègre directement l'algorithme de résolution qui calcule à chaque pas de temps la position des tous les objets ;
3. la partie post-processeur, qui 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 :

- la notion d'efficacité d'un ouvrage,
- la notion d'endommagement d'un ouvrage,
- la notion de vieillissement d'un ouvrage.

L'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 2)

1. Projectile :

- masse : 2 000 Kg
- vitesse initiale : $\vec{v}_o = (30\ 0\ 0)$ (m/s)
- $\vec{\Omega}_o = \vec{0}$ rad/s

2. Données topographiques :

- pente moyenne : $\beta = \frac{\pi}{6}$ rd

• nature du sol : éboulis

3. Structure de protection :

- 3 modules de filet : 4 x 10 m
- hauteur des poteaux : 5 m

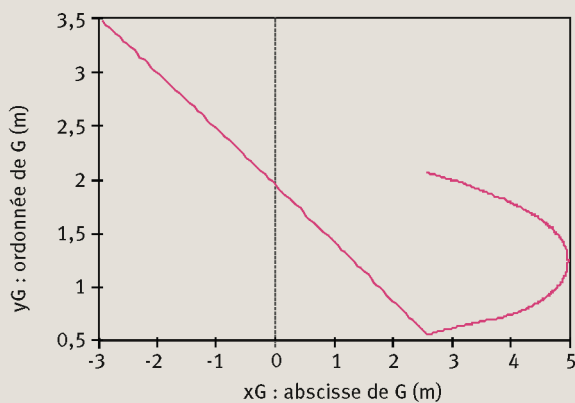
Les résultats issus de l'analyse cinématique (figure 3) montrent que le projectile, après avoir heurté la nappe, parvient à effacer celle-ci. La structure, dimensionnée de cette façon, n'est donc pas en mesure de contrôler la trajectoire d'un tel impact. Son efficacité peut alors être évaluée comme la probabilité d'occurrence* des impacts de projectiles que l'ouvrage n'est pas en mesure de contrôler.

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.

L'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.

6 Analyse des efforts dans la structure



Exemple de simulation : cas d'un bloc heurtant le terrain naturel au cours de l'impact avec la structure (figures 4 à 7)

1. Projectile :

- masse : 2 000 Kg
- vitesse initiale : $\vec{v}_o = (30\ 0\ -15)$ (m/s)
- $\vec{\Omega}_o = \vec{0}$ rad/s

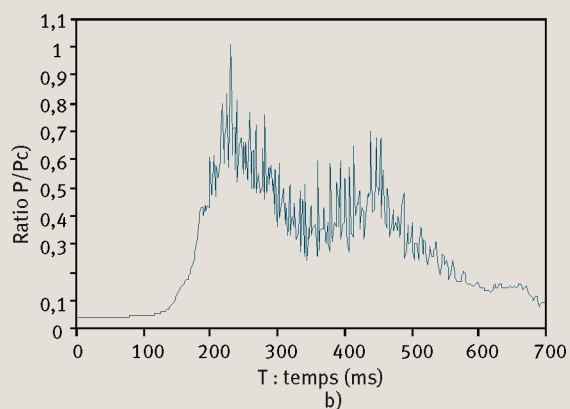
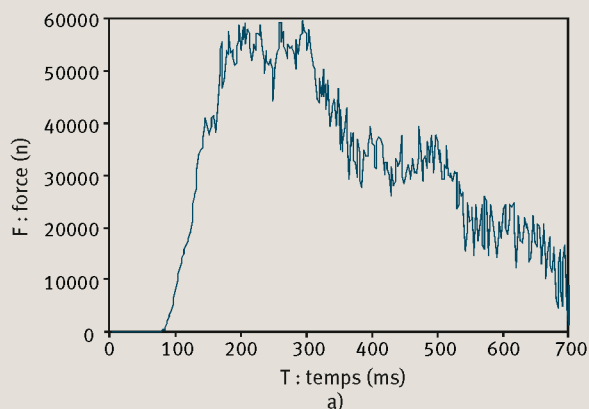
2. Données topographiques :

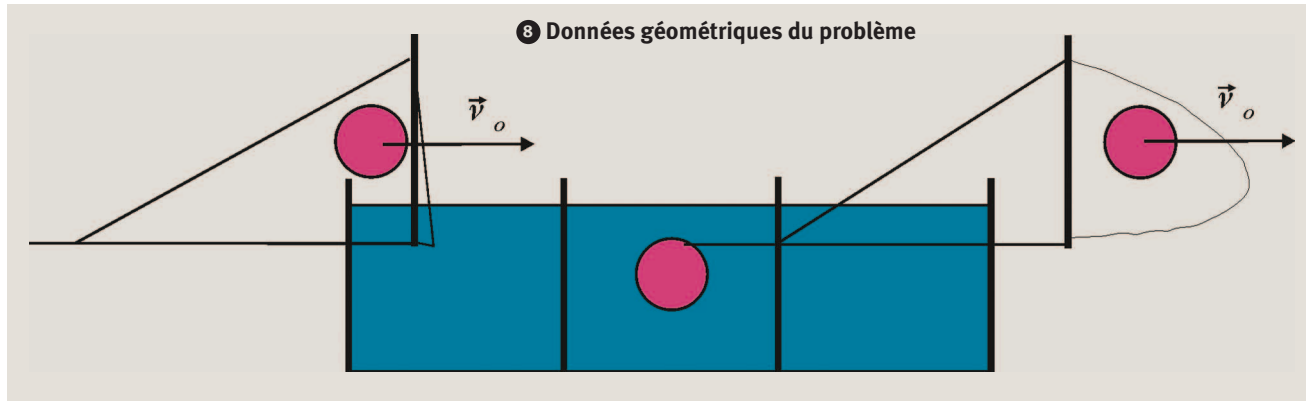
- pente moyenne : $\beta = 0$ rd
- nature du terrain : couvert végétal

3. Structure de protection :

- 3 modules de filet : 4 x 10 m
- hauteur des poteaux : 5 m

7 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





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.

Le 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. 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.

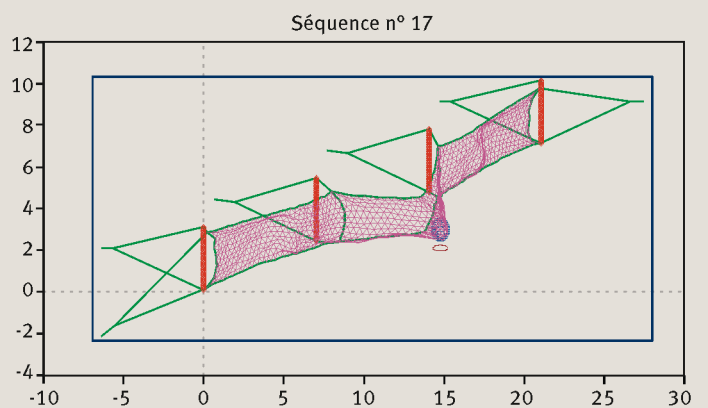
Exemple de simulation : impact multi-blocs

(figures 8 à 10)

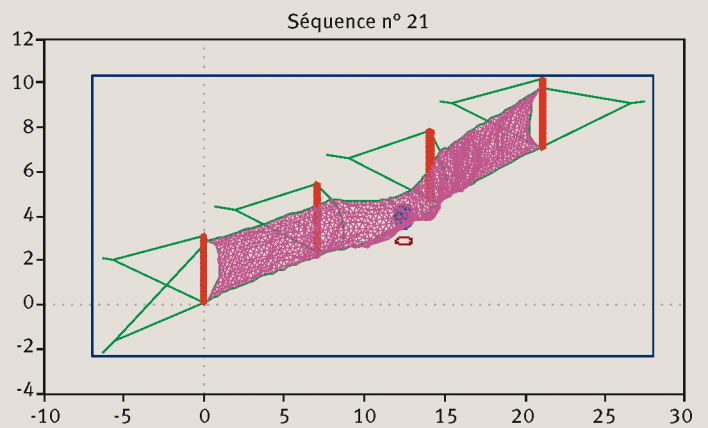
1. Projectile :
 - masse : 2 000 kg
 - vitesse initiale : $\vec{v}_o = (30\ 0\ 0)$ (m/s)
 - $\vec{\Omega}_o = \vec{0}$ rad/s
2. Données topographiques :
 - pente moyenne : $\beta = 0$ rd
 - nature du sol : éboulis
3. Structure de protection :
 - 3 modules de filet : 4 x 10 m
 - hauteur des poteaux : 5 m

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.

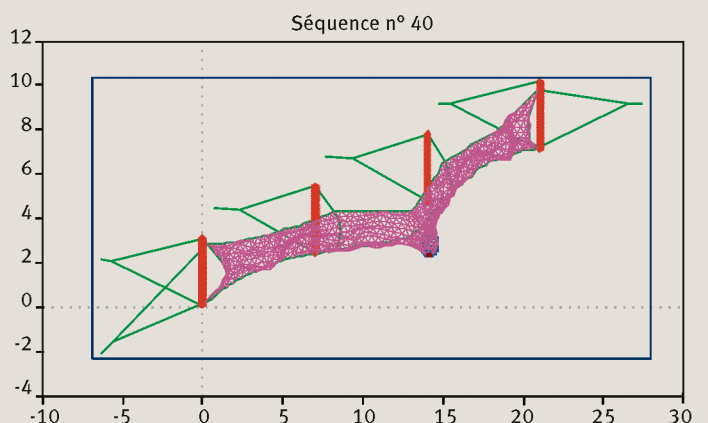
9 Évolution des déformations dans la structure au cours de deux impacts successifs



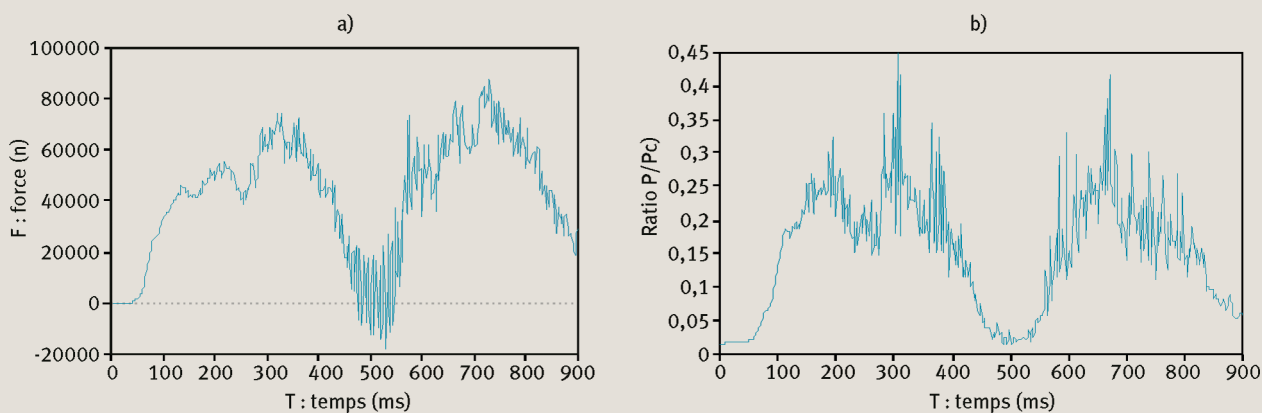
Le premier projectile est stoppé



Début du second impact



10 Évolution 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



► 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 désamorçé, l'augmentation sévère des efforts au niveau des ancrages compromettrait de façon certaine l'efficacité de l'ouvrage.

souplesse d'utilisation permet au gestionnaire de mener de nombreuses simulations en testant des cas de chargement (position d'impact, vitesse, orientation), et des types de structures différents. C'est notamment au travers de tels outils, qui constituent une application du savoir-faire de la recherche dans le domaine de l'ingénierie, qu'on parviendra à progresser dans l'analyse des risques naturels. ■

Conclusions et perspectives

Cet article a démontré 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.

Les exemples de simulation proposés ont permis 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 pour guider le gestionnaire, dans le choix et la définition d'une stratégie performante. En particulier, il est possible d'explorer la performance résiduelle d'un ouvrage après impacts, de même que l'effet de la rupture d'un organe (ancrage, poteau, anneau...) sur le comportement d'ensemble de la structure.

Un tel outil numérique est un complément indispensable aux essais sur structures expérimentaux réels. Sa

L'auteur

François Nicot

Cemagref, centre de Grenoble,
UR ETGR, Érosion torrentielle,
neige et avalanches,
2 rue de la Papeterie,
BP 76, 38402
Saint Martin d'Hères Cedex
francois.nicot@cemagref.fr

QUELQUES RÉFÉRENCES CLÉS...

- **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, *Ingénieries-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, in : *ASCE 10th EMD*, Boulder, Colorado, p. 289-292.
- **HEARN, G., BARRETT, R.K., HENSON, H.H.**, 1995, Testing and modelling of two rockfall barriers, *Transportation Research Record*, p. 1-11.

► Consulter l'ensemble des références
sur le site de la revue www.set-revue.fr



Filet pare-pierres.