

Les merlons pare-blocs : de l'expérimentation à la simulation numérique

Chaque année en montagne, des routes sont bloquées, des bâtiments détruits, voire des vies humaines perdues à cause de chutes de pierres ou de rochers. Afin d'optimiser les ouvrages de protection, il est nécessaire de développer des techniques nouvelles de conception et de dimensionnement. Ici, il est question d'une nouvelle génération d'ouvrages : les merlons pare-blocs modulaires construits à partir de géo-cellules. Les auteurs nous présentent la démarche de recherche suivie, et les méthodes expérimentales et numériques mises en œuvre pour l'élaboration de ce nouvel outil.

Les merlons pare-blocs : quelques repères

Les falaises ou escarpements rocheux sont à l'origine de chutes de pierres et de blocs, phénomènes brutaux impliquant des volumes de roche de quelques dm^3 à quelques m^3 . Ces phénomènes surviennent lorsque la roche présente une certaine prédisposition liée, par exemple, à sa stratigraphie*, son hétérogénéité ou à son altération et qu'elle est exposée à l'action d'un ou de plusieurs facteurs aggravants tels que les précipitations, les cycles gel/dégel ou encore les séismes. Ces événements sont les aléas* naturels les plus fréquents en zones montagneuses, mais concernent également les zones d'altitude plus modestes présentant des falaises. Chaque année, et principalement en hiver, ils sont à l'origine d'interruptions de circulation, de destructions d'infrastructures, voire d'atteintes mortelles aux personnes, même lors d'événements de faible énergie.

Les parades structurelles mises en œuvre pour protéger les enjeux contre cet aléa peuvent être de nature active, et placées dans la zone de départ, ou de nature passive, par une action sur le phénomène une fois développé. Dans le premier cas, il s'agit d'empêcher le départ des blocs, par exemple par des filets plaqués sur la falaise. Dans le second, qui nous intéresse ici, l'objectif est d'agir sur la trajectoire du volume de roche en mouvement, soit pour le dévier, soit pour l'immobiliser.

Différents types de structures passives peuvent être mises en œuvre, dont les écrans de filets*, les galeries* et les merlons*. Les premiers sont des structures composées d'une nappe de grillage ou de filets, supportée par des haubans, fixes ou mobiles. Les galeries sont des ouvrages en béton armé couvrant les voies de circulation routières et ferroviaires. Les merlons sont des ouvrages en remblais auxquels on associe une fosse de réception, du côté du versant à l'origine de l'aléa. Ces différents types de

parade ont leurs propres contextes d'application. Ainsi, les merlons ne peuvent être implantés sur des versants à très forte pente ou en pied de falaise, contrairement aux galeries. Ils ont également leur propre domaine d'efficacité en termes d'énergie cinétique* et de hauteur de passage du bloc à intercepter, à l'emplacement prévu pour l'ouvrage. Ces deux paramètres sont issus de l'étude trajectographique et sont des données d'entrée essentielles au dimensionnement de ces ouvrages.

Dans leur conception classique, les merlons sont constitués des matériaux issus de l'excavation de la fosse de réception. Ce remblai est renforcé par des inclusions de type géosynthétique*, permettant notamment de raidir le parement exposé à l'impact, dans le but de réduire le risque de franchissement par le bloc. Une particularité française consiste à utiliser des pneus soit en renforcement de remblai, soit uniquement en parement à l'amont (photo 1).

Les merlons sont utilisés de plus en plus fréquemment depuis la fin des années quatre-vingt ; leur nombre actuel en France dépasse les deux cents unités. Ces ouvrages ont une longueur allant de quelques dizaines de mètres à 800 mètres pour une hauteur allant de 3 à 10 mètres, voire plus. Parce qu'ils nécessitent un terrassement important et mobilisent des grands volumes de matériaux, ces ouvrages sont relativement coûteux, avec un coût moyen rapporté au mètre carré de parement d'environ 150 euros, études et travaux compris.

Un dimensionnement souvent perfectible

Malgré le rôle important qu'ils assurent en termes de protection, la conception et le dimensionnement de ces ouvrages demeurent très simplifiés. Ainsi, l'efficacité des merlons est réputée liée à leur masse : l'ouvrage doit être suffisamment pesant pour arrêter le bloc. En conséquence



1 Merlon pare-blocs, suivant le procédé Pneutex®, en cours de construction.

de cette simplicité de principe fonctionnel, les merlons sont d'emprise au sol et de volume très importants.

Pour ce qui concerne le dimensionnement courant, les merlons sont principalement calculés au regard de critères statiques, les sollicitations dynamiques étant rarement prises en compte. La première étape consiste à vérifier la stabilité locale de l'ouvrage, compte tenu de son enveloppe géométrique, au sens conventionnel de la géotechnique*, c'est à dire vis-à-vis du renversement, du poinçonnement et du glissement. Puis, on vérifie la stabilité externe, c'est-à-dire la stabilité globale du talus en considérant la surcharge apportée par le merlon. Pour ce qui concerne plus spécifiquement le comportement de l'ouvrage lors de l'impact, plusieurs approches, de niveau de complexité croissant, peuvent ensuite être retenues :

- niveau 0 : consiste à supposer que l'ouvrage, par sa masse, est capable d'arrêter le bloc rocheux ;
- niveau 1 : consiste à évaluer la stabilité de l'ouvrage en considérant un équivalent pseudo-statique à la force dynamique appliquée par le bloc (considérant une valeur moyenne). On associe à ces calculs des coefficients de sécurité élevés, traduisant la réserve sur l'hypothèse faite en retenant un équivalent statique ;
- niveau 2 : consiste à appréhender les principaux mécanismes survenant au sein de l'ouvrage lors de l'impact (compactage, frottement) et à comparer, par une approche analytique, l'énergie cinétique du bloc avant impact avec l'énergie dissipée par ces mécanismes ;
- niveau 3 : consiste à recourir aux outils numériques pour simuler l'impact et évaluer la déformation de l'ouvrage.

Cependant, aucune des méthodes visant à prendre en compte les sollicitations dynamiques n'est pleinement satisfaisante, parce que les phénomènes mis en jeu sont complexes et que les déformations engendrées peuvent

être très importantes, mais aussi parce que les données issues de cas réels et permettant leur validation sont peu nombreuses.

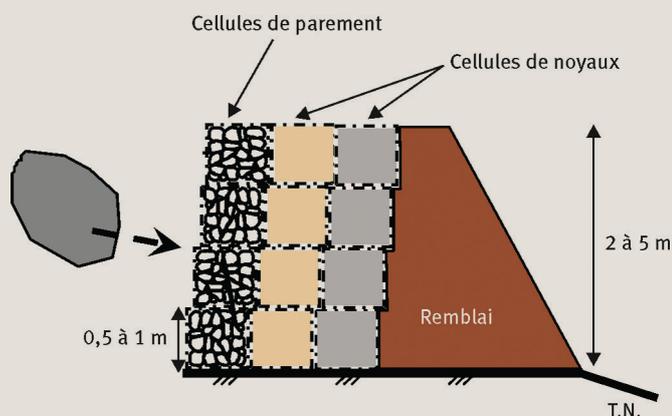
De fait, le dimensionnement se limite le plus souvent au niveau 0, voire 1, c'est-à-dire sans réel dimensionnement dynamique. Et lorsque c'est le cas, les méthodes employées sont propres aux quelques bureaux d'études qui les ont développées et souffrent d'un manque de validation.

Dans ce contexte, il existe un fort besoin d'optimisation technico-économique des ouvrages de protection de type merlon, qui soit appuyé sur une meilleure compréhension de leur réponse à l'impact et portant à la fois sur leur principe fonctionnel et sur leur dimensionnement.

Des structures cellulaires pour mieux amortir l'impact

Le principe du merlon pare-bloc cellulaire consiste à construire tout ou partie de l'ouvrage à partir de géocellules*. Les géocellules sont des structures tridimensionnelles associant une enveloppe manufacturée à un matériau de remplissage granulaire. Dans ce cas d'étude, ces cellules sont des gabions*. L'intérêt de recourir à de telles cellules est de pouvoir adapter les caractéristiques du matériau de remplissage en fonction de l'emplacement occupé par la cellule au sein de l'ouvrage. On peut ainsi construire un ouvrage « sandwich » dont les couches successives sont constituées de cellules remplies de différents matériaux. L'objectif est alors de favoriser la dissipation et la diffusion de l'énergie transmise par le bloc lors de l'impact, avec déformation voire dégradation de l'ouvrage dans des zones prévues à cet effet, à l'instar de nombreux dispositifs de protection utilisés dans d'autres domaines.

1 Coupe type d'un merlon pare-blocs à technologie cellulaire



► La figure 1 illustre ce principe avec des cellules de parement remplies de matériaux grossiers et des cellules de noyau remplies de matériaux fins. Les déformations sont concentrées sur ces cellules, réduisant les sollicitations sur le remblai. Ce remblai est alors un massif d'appui qui peut être renforcé pour assurer sa stabilité propre et augmenter ses pentes à l'amont et à l'aval.

En cas d'événement important, une partie de l'ouvrage est alors endommagée. La possibilité de réparation est prise en compte dès la conception, répondant aux attentes des opérationnels. Cette réparation est rendue plus facile par l'utilisation des géo-cellules, contrairement aux ouvrages monolithiques renforcés par des nappes de géosynthétiques ; les travaux ne concernent que la zone endommagée et ne mobilisent pas de moyens lourds.

Par rapport à la démarche globale d'étude du comportement de ces structures (encadré 1), on présente par la suite des résultats relatifs aux échelles de la cellule et de l'ouvrage. Les cellules considérées ici sont remplies de matériaux grossiers, sachant que des matériaux fins ont également été considérés (sable, mélanges de sable et de déchets de pneus) pour des cellules de différentes dimensions.

Caractéristiques des matériaux constitutifs de l'ouvrage

La cellule

Les géo-cellules sont constituées d'une enveloppe grillagée dite « double torsion » dont la maille élémentaire est de forme hexagonale avec pour dimensions 80 et 100 mm suivant la largeur et la hauteur, respectivement. Pour des raisons de symétrie lors des essais, les cellules utilisées sont de forme cubique. Habituellement, les gabions sont de forme parallélépipédique rectangle et sont segmentés en trois sections cubiques, lesquelles peuvent être assimilées aux géo-cellules considérées. Pour la même raison, les cellules sont montées sans les tirants qui, en pratique, relie toute face exposée à son

opposé pour limiter les déformations latérales. Enfin, les cages utilisées ont des arêtes de 500 mm.

Les matériaux grossiers sont issus d'un calcaire ayant un module d'Young de 58 000 MPa. Les granulats de remplissage, résultant du concassage en carrière de la roche, ont une granulométrie* de 60-180 mm.

Un coffre de confinement est utilisé lors du remplissage des cages pour limiter leur déformation avant essai. Les granulats sont disposés manuellement « à plat », de telle sorte que leur plus petite dimension soit suivant la verticale.

Réalisation d'expérimentations physiques

Dans le but d'approcher le comportement des cellules au sein de l'ouvrage et de disposer de données pertinentes pour le calage et la validation du modèle numérique des cellules, des expérimentations physiques spécifiques ont été mises en œuvre.

Il s'agit d'essais de chargement pseudo-statique et d'essais dynamiques d'impact. Lors de ces essais, les cellules sont soit libres de se déformer latéralement, soit confinées par une structure rigide, pour des essais respectivement qualifiés de non confinés et confinés. Ces deux situations constituent les extrêmes des conditions aux limites des cellules au sein de l'ouvrage ; celles-ci pouvant être en contact les unes avec les autres ou éventuellement espacées.

Les essais pseudo-statiques consistent en des essais de compression uni-axiale, menés jusqu'à une déformation axiale maximale de 30 % pour les essais non confinés. Les mesures concernent principalement le déplacement axial et la force de chargement.

Les essais d'impact sont réalisés par largage en chute libre d'un impactant de 54 cm de diamètre et 260 kg, depuis des hauteurs allant jusqu'à 5,5 m (figure 2). L'impactant est équipé d'un accéléromètre placé en son

1 LES MERLONS CELLULAIRES : UNE TECHNOLOGIE INNOVANTE À ÉTUDIER

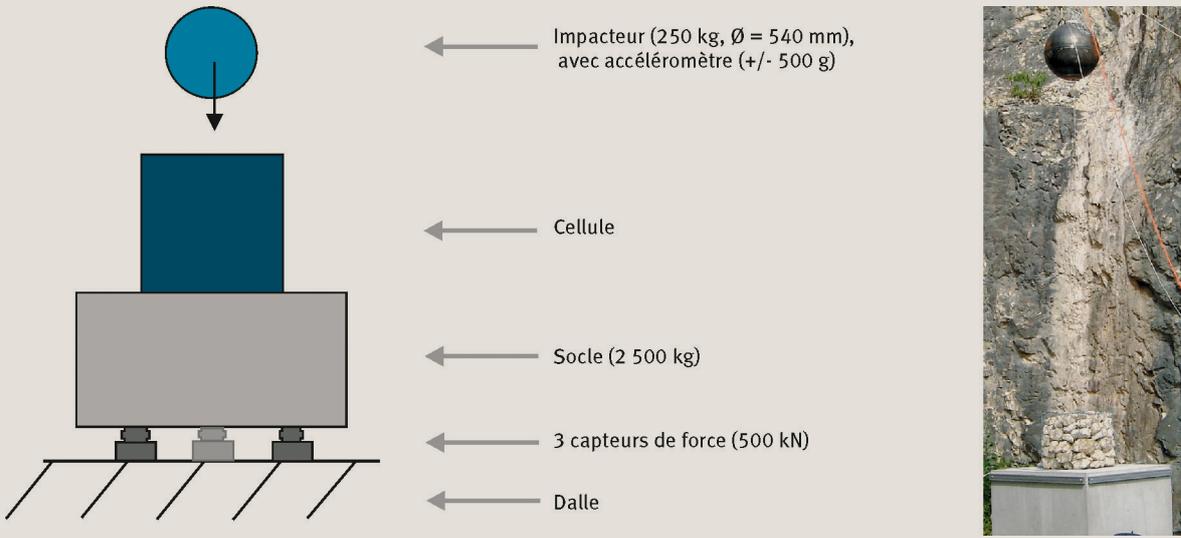
Le travail de recherche entrepris pour vérifier la pertinence de cette technologie innovante porte sur l'analyse du comportement d'une telle structure lorsqu'elle est soumise à une sollicitation d'impact.

L'approche mise en œuvre est une approche dite « multi-échelle », allant des matériaux constitutifs à l'ouvrage. L'étude associe étroitement développements numériques et expérimentations physiques, à ces différentes échelles, sous sollicitations statiques et dynamiques.

Cette démarche a été engagée dans le cadre d'une collaboration entre le Cemagref, l'Université Joseph Fourier et France Maccaferri, recevant le soutien du Pôle grenoblois des risques naturels (PGRN*, conseil Général de l'Isère) et du Groupement d'intérêt scientifique « Vulnérabilité des ouvrages aux risques » (VOR*).

En 2007, ce partenariat a donné naissance au projet de recherche REMPARE* (Re-ingénierie des merlons de protections par composants anthropiques recyclés : www.rempare.fr) soutenu par l'Agence nationale de la recherche et regroupant douze partenaires privés et publics.

2 Schéma de principe et mise en œuvre du dispositif d'impact par lâchers verticaux



centre permettant de déterminer, par le principe fondamental de la dynamique, la force opposée par la cellule à la pénétration de l'impactant (Lambert, 2007 ; Lambert *et al.*, 2007). Trois capteurs placés sous le socle en béton supportant la cellule permettent de mesurer la force transmise par la cellule à son support.

La modélisation numérique

La géo-cellule assemble des éléments de type surfacique fortement anisotropes* (leur réponse mécanique à une sollicitation dépend de l'orientation de celle-ci), le grillage constituant l'enveloppe, à un matériau granulaire grossier. Cette particularité structurale a guidé le choix vers une approche de modélisation numérique privilégiée dite « méthode aux éléments distincts », plutôt que vers l'approche par éléments finis, plus largement répandue dans le domaine du génie civil.

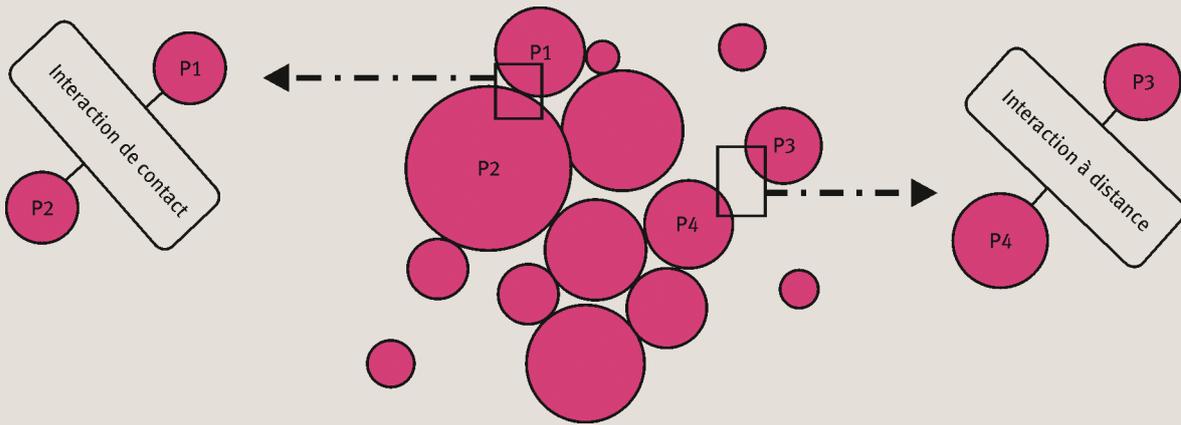
La modélisation aux éléments distincts (MED*), qui s'appuie sur une technique de discrétisation temporelle par différences finies, a la particularité de traiter le milieu

étudié comme un assemblage de particules indépendantes. Le matériau est décrit à une échelle microscopique, c'est-à-dire une échelle liée à la taille de l'élément distinct, par opposition à une approche continue qui traite le matériau d'un point de vue macroscopique à travers des lois de comportement issues de la mécanique des milieux continus. Les particules interagissent les unes avec les autres par l'intermédiaire de modèles faisant intervenir les paramètres de la MED (figure 3). Ces interactions peuvent soit se faire par contact ou à distance. Les déplacements et les rotations des particules sont calculés à chaque pas de temps grâce au principe fondamental de la dynamique.

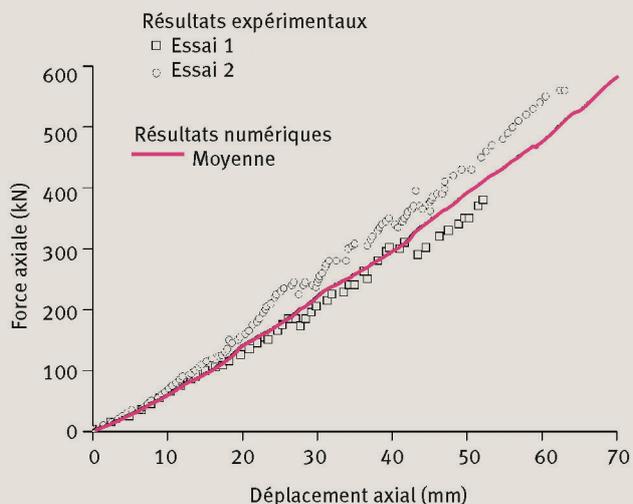
Cette méthode permet de gérer dans un même environnement de calcul les deux types de matériaux constitutifs des cellules (grillage et matériau de remplissage), même si des grandes déformations se développent.

Dans le cas présent, les granulats sont modélisés par des agrégats insécables de particules sphériques. Ils sont initialement de forme parallépipède rectangle et de distribu-

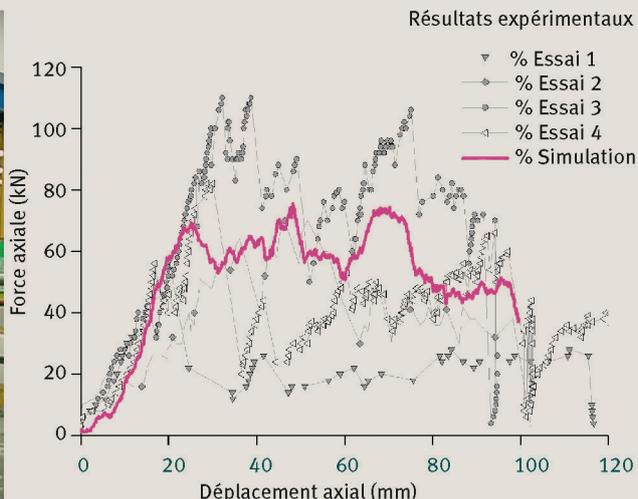
3 Les deux types d'interaction entre particules par la MED et paramètres les régissant



4 Cellule confinée et sa réponse en force déplacement sous chargement pseudo-statique



5 Cellule non confinée et sa réponse en force déplacement sous chargement pseudo-statique



► tion granulométrique identique aux granulats utilisés pour les expérimentations physiques. Lors de leur mise en place dans la cellule, les agrégats sont positionnés de manière aléatoire et leurs arêtes sont coupées pour reproduire l'angularité des granulats. La dégradation lors du chargement de l'assemblée granulaire, principalement par fracturation, est prise en compte grâce à un modèle de contact inter-agrégats élastique parfaitement plastique. Ce modèle limite la valeur de force dans la direction normale au plan de contact. Les déformations plastiques sont localisées aux zones voisines des points de contact sans affecter le reste de l'agrégat. Au final, ce modèle permet de reproduire l'influence de la détérioration des granulats sur le comportement macroscopique de l'assemblée granulaire.

Le grillage est décrit par un ensemble de particules positionnées aux nœuds physiques de la maille, c'est-à-dire à l'intersection des brins. Les interactions physiques entre ces nœuds sont modélisées par le biais de forces d'interaction à distance, entre les particules. Le modèle différencie les brins simples des brins torsadés, caractéristiques du grillage double torsion. Le comportement

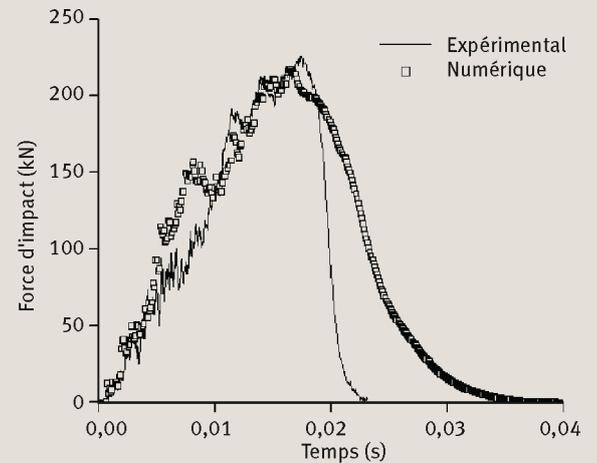
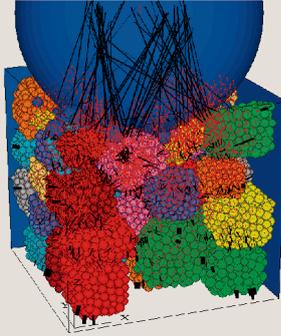
mécanique des brins est modélisé par une loi élasto-plastique avec rupture, calibrée à partir du comportement réel des brins observé lors d'essais de laboratoire. Les paramètres du modèle de grillage ont été identifiés, puis l'ensemble du modèle a été validé à partir d'essais expérimentaux de traction effectués à l'échelle d'une nappe de grillage (Bertrand *et al.*, 2008).

La cage cubique grillagée est obtenue par repliement de bandes de ce grillage, avant d'être remplie avec les agrégats par pluviation. Cette cellule numérique est ensuite vibrée dans le but d'atteindre une porosité similaire à celle des essais expérimentaux.

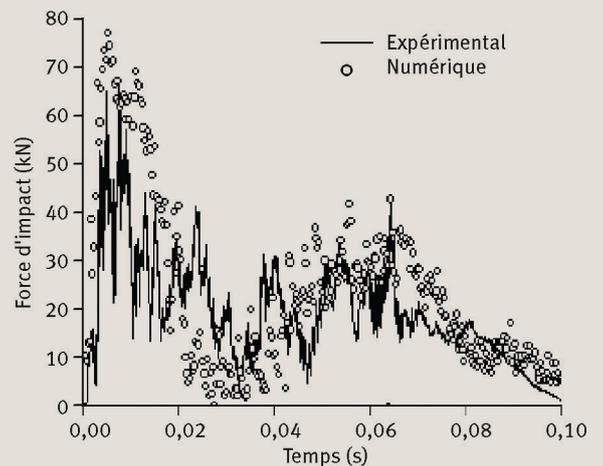
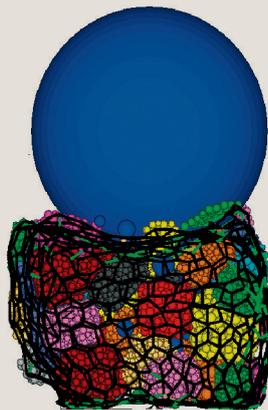
Des résultats satisfaisants à l'échelle de la cellule...

La figure 4 présente les courbes expérimentales obtenues lors de la compression de deux cellules confinées. Cette réponse, relativement linéaire, est représentative du comportement de l'assemblée de granulats, l'enve-

6 Cellules physique et numérique après impact en condition confinée et leurs réponses



7 Cellules physique et numérique après impact en condition non confinée et leurs réponses



loppe grillagée ne jouant aucun rôle. Elle traduit notamment la dégradation de cette assemblée par fracturation et attrition* des granulats, dans une configuration où leur mouvement est très restreint. Ces courbes ont permis le calage des paramètres du modèle numérique relatifs aux agrégats, dont le résultat est présenté sur cette même figure 4. En particulier, le modèle de contact entre agrégats permet de rendre compte à l'échelle de la cellule de l'influence des nombreuses fracturations de granulats observées expérimentalement.

Lorsque la cellule est non confinée, les granulats ont une plus grande latitude de mouvement et l'enveloppe est sollicitée. La réponse de la cellule n'est plus linéaire : les courbes présentent une croissance initiale régulière, puis la force chute brutalement après avoir atteint un maximum et marque un pseudo plateau au-delà d'un déplacement axial d'environ 30 mm (figure 5). De plus, les réponses présentent une forte variabilité, imputable à l'arrangement initial des granulats.

Les fortes chutes de force observées sont imputables aux fracturations de granulats et aux perturbations qu'elles

engendrent sur la stabilité des pseudo colonnes de granulats, orientées axialement, et intervenant fondamentalement dans la reprise de l'effort axial appliqué sur la cellule. La simulation numérique de ces essais, faite sur la base des calages précédents, se révèle tout à fait satisfaisante. La figure 5 présente le résultat d'une des dix simulations qui révèlent la même variabilité et les mêmes tendances que celles observées expérimentalement.

Sous sollicitations dynamiques d'impact, la réponse des cellules en termes de force d'impact montre également une forte dépendance aux conditions aux limites (figures 6 et 7). Les résultats des simulations numériques sont en bonne correspondance avec les résultats expérimentaux. Le temps caractéristique du phénomène est bien reproduit. L'amplitude de la force agissant sur le bloc impactant, que ce soit la valeur au pic ou les oscillations post pic (en condition non confinée) sont en accord avec les données expérimentales. Le jeu de micro paramètres calibrés avec les simulations quasi statiques permet ainsi de décrire le comportement macroscopique de la cellule en conditions dynamiques.



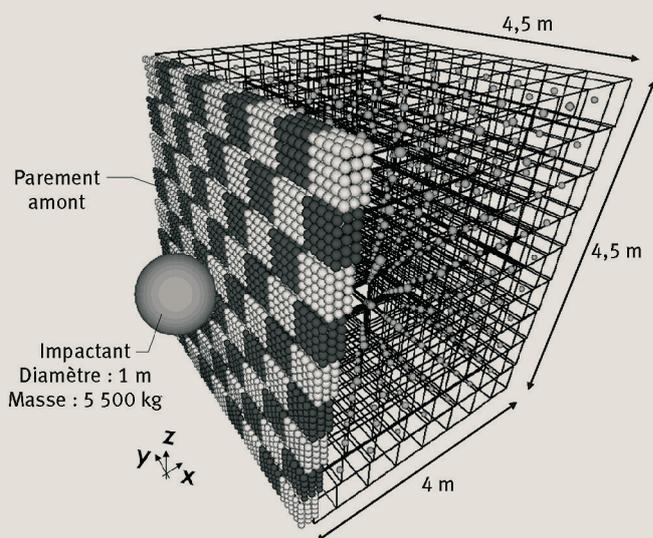
► Les expérimentations à l'échelle de la cellule mettent en évidence à la fois la forte influence des conditions aux limites et celle de la fracturation des granulats sur la réponse de la cellule, sous sollicitations pseudo-statiques et dynamiques. Le modèle numérique de ces cellules apparaît robuste, les résultats présentant une bonne concordance avec les expérimentations, quelles que soient les conditions de chargement. Ces données permettent une meilleure compréhension du comportement mécanique des cellules sous sollicitations sévères. Elles sont essentielles au passage à l'échelle de l'ouvrage, dont les cellules sont en quelque sorte les unités constitutives élémentaires.

...Pour une meilleure prise en compte du comportement de l'ouvrage

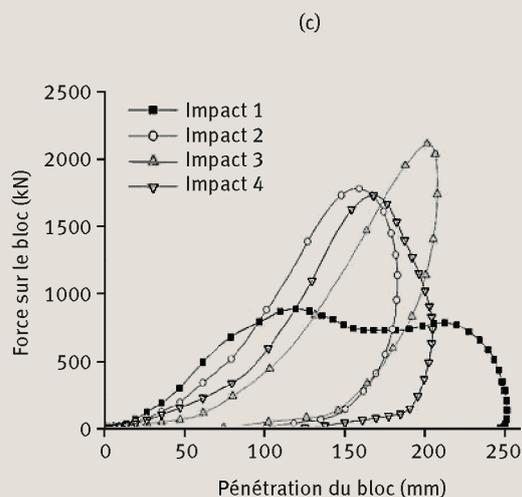
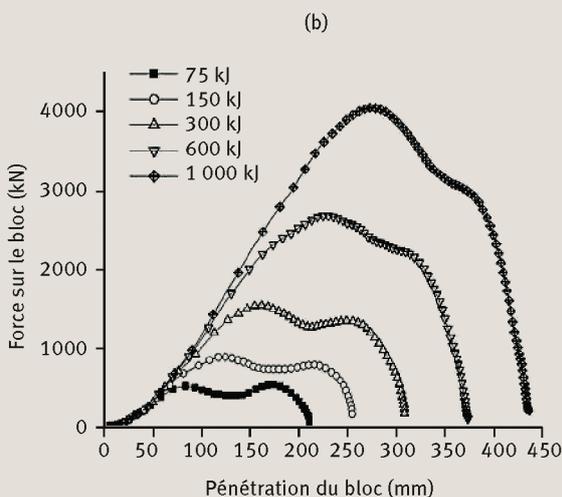
Dans le cadre de l'approche numérique, le passage à l'échelle de la structure consiste à remplacer chaque cellule par un élément placé en son centre (figure 8). Les éléments sont positionnés dans l'espace un à un pour reproduire la géométrie de la structure. Des particules sphériques sont placées en parement pour une bonne gestion du contact entre le bloc et le corps de l'ouvrage.

L'interaction entre les particules représentant les cellules de la structure est décrite à partir du modèle constitutif

8 Modélisation numérique d'un ouvrage cellulaire « modèle » simple



9 Simulation numérique de la réponse de l'ouvrage « modèle » pour des énergies d'impact croissantes (à gauche) et pour des impacts successifs localisés au même point du parement (d'énergie 150 kJ)



de la cellule. Celui-ci décrit la réponse en force d'une cellule avec un comportement élastique parfaitement plastique, lorsque celle-ci est sollicitée en compression. Les interactions tangentées aux faces de la cellule sont traitées à partir d'un modèle de frottement de Coulomb classique (Nicot *et al.*, 2007).

La robustesse de ce modèle simple d'ouvrage a été évaluée dans différentes configurations dont celles présentées en figure 9. L'évolution de la force d'impact maximale en fonction de l'énergie d'impact a été comparée à celles obtenues à partir d'approches existantes (Bertrand, 2006).

Un modèle plus riche est en cours de développement dans le cadre du projet de recherche REMPARE. Il sera validé par comparaison avec les mesures faites lors des expérimentations sur ouvrages en semi-vraie grandeur et vraie grandeur programmées dans ce projet.

Conclusion

Les merlons cellulaires regroupent des constituants jusque là peu étudiés, tout particulièrement sous sollicitations dynamiques d'impact. De fait, l'étude à l'échelle des matériaux et à celle de la cellule est indispensable pour l'appréhension de la réponse mécanique de l'ouvrage.

La réponse des cellules apparaît fortement dépendante des conditions aux limites et des caractéristiques des matériaux de remplissage. La fracturation se révèle être un phénomène d'influence majeure, réduisant à la fois la force d'impact et la force transmise au support (Lambert *et al.*, 2007).

L'investigation à ces échelles a également fourni les données nécessaires à la définition d'un modèle constitutif des cellules. Dans la démarche retenue d'une approche multi-échelle, ce modèle constitutif est utilisé pour le passage à l'échelle de l'ouvrage et sa modélisation numérique.

Les expérimentations à l'échelle de l'ouvrage entreprises dans le cadre du projet de recherche REMPARE apporteront les données nécessaires à la validation du modèle numérique et à son adaptation pour une utilisation opérationnelle et validée dans un cadre d'ingénierie. ■

QUELQUES RÉFÉRENCES CLÉS...

- BERTRAND, D., NICOT, F., GOTTELAND, P., LAMBERT, S., 2008, Discrete element method DEM numerical modeling of double-twisted hexagonal mesh, *Canadian Geotechnical Journal*, n° 45, p. 1104-1117.
- BERTRAND, D., 2006, *Modélisation du comportement mécanique d'une structure cellulaire soumise à une sollicitation dynamique localisée, Application aux structures de protection contre les éboulements rocheux*, thèse de doctorat, Université Joseph Fourier Grenoble 1, 197 p.
- LAMBERT, S., 2007, *Comportement mécanique de géocellules – application aux constituants de merlons pare-blocs cellulaires*, thèse de doctorat, Université Joseph Fourier Grenoble 1, 237 p.
- LAMBERT, S., GOTTELAND, P., BERTRAND, D., NICOT, F., 2007, Comportement mécanique de géo-cellules sous impact – application aux ouvrages pare-blocs, *Revue française de géotechnique*, n° 119, p. 51-63.
- NICOT, F., GOTTELAND, P., BERTRAND, D., LAMBERT, S., 2007, Multi-scale approach to geo-composite cellular structures subjected to rock impacts, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, n° 31, p. 1477-1515.

Les auteurs

Stéphane Lambert

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

David Bertrand

Institut national des sciences appliquées de Lyon,
LGCI, Laboratoire de génie civil
et d'ingénierie environnementale,
Bâtiment Coulomb,
20 avenue Albert Einstein,
69621 Villeurbanne Cedex
david.bertrand@insa-lyon.fr

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

Philippe Gotteland

Laboratoire 3S-R, « Sols, solides, structures –
Risques », Université Joseph Fourier/
Institut national Polytechnique de Grenoble/
Centre national de la recherche scientifique,
Domaine universitaire,
BP 53,
38041 Grenoble Cedex 9
philippe.gotteland@hmg.inpg.fr

Adeline Heymann

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

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier l'Institut universitaire de technologie de Génie civil de Grenoble et le LOCIE-ESIGEC* (Laboratoire « Optimisation de la conception et ingénierie de l'environnement » – École supérieure d'ingénieurs de Chambéry) de l'université de Savoie pour leur contribution technique dans la réalisation des essais expérimentaux, en statique et dynamique respectivement.