

Projet National de Recherche **REMPARE** - (RE-ingénierie des Merlons de Protection par composants Anthropiques REcyclés) Projet financé par L'agence National de Recherche

Contexte et enjeux

Le projet REMPARE a pour objectif d'apporter des réponses opérationnelles pour la conception de merlons de protection contre les impacts localisés. Il vise tout particulièrement l'amélioration des méthodes d'ingénierie des ouvrages de défense passive vis-à-vis des chutes de blocs, d'énergie faible à moyenne, en intégrant la valorisation de résidus anthropiques recyclés de type pneumatiques usagés dans un concept innovant dissipatif d'énergie.

Les approches traditionnelles de dimensionnement sont fondées sur des méthodes pseudo-statiques conservatrices et ne permettent pas de répondre aux développements technologiques intégrant un noyau dissipateur qui minimise l'emprise des ouvrages par leur Re-ingénierie.

La stratégie du projet repose sur une approche scientifique et pragmatique à trois niveaux basée sur la conception et la réalisation de modélisations pointues, la validation/calage par l'approche expérimentale et le transfert technologique vers l'Ingénierie opérationnelle.

Une approche multi-échelle du matériau dans l'ouvrage est retenue : pour les modélisations et les expérimentations réalisées en laboratoire et sur un site réel instrumenté.

Les objectifs visés permettront :

- de développer des modèles numériques évolués de merlons cellulaires sous impacts
- d'optimiser leur conception, dimensionnement, l'emprise au sol et la réparabilité
- de démontrer l'intérêt technique et économique de la valorisation de matériau recyclé
- d'améliorer les méthodes d'ingénierie de dimensionnement des merlons
- de valider l'impact environnemental

L'enjeu majeur du projet REMPARE est d'apporter des éléments scientifiques pour (re)définir la technologie de dimensionnement des merlons de protection contre les impacts localisés et valider un concept innovant par le couplage d'approches numérique et expérimentale complémentaires.

Au delà de l'innovation technologique, la valorisation d'un sous produit anthropique recyclable, granulats de pneumatiques usagés, apparaît comme une plus value importante au projet.

L'opérationnalité est l'enjeu important du programme : développement à terme de méthodes utilisables par les bureaux d'étude (code, ou abaques), méthodes simplifiées et validées par des approches plus approfondies de recherche coûteuses en temps de calcul.

Le développement de modélisations numériques de pointe permet maintenant de modéliser les comportements à l'échelle du matériau local, mais aussi à l'échelle d'un ouvrage, sans nécessairement recourir à une simplification déraisonnable du comportement des matériaux. Les méthodes par éléments discrets rentrent dans cette catégorie et offrent de nombreuses perspectives.

L'enjeu de les rendre opérationnelles pour l'évaluation du comportement des ouvrages est réel. Il apparaît dès lors essentiel de confronter les résultats issus des modèles avec des approches physiques bien calibrées et instrumentées, pour valider les paramètres et les lois de comportement retenus.

La modélisation peut alors être employée pour le dimensionnement et l'investigation prévisionnelle du comportement (niveau supérieur d'énergie, impacts répétés, concepts technologiques, matériaux dissipatifs différents, évaluation de l'efficacité, ...).

La réalisation d'un ouvrage de référence instrumenté est un enjeu technique fort du projet REMPARE.

Les compétences regroupées permettront l'instrumentation originale et encore jamais réalisée de ce type d'ouvrage en sol impacté (instrumentation extérieure, et intérieure à la structure) afin d'alimenter les modèles.

Le calage pour des énergies faibles (de type service courant), puis l'endommagement fort pour des énergies fortes (exceptionnelles) permettront d'aller vers le comportement ultime de l'ouvrage (destruction). L'aspect réparabilité est vérifié et validé.

* * *

Description de l'innovation

Si l'on accepte qu'il est difficile voir impossible de détecter ou de prévoir l'occurrence de chutes de blocs rocheux, alors des méthodes pour protéger les enjeux exposés doivent être considérées. Pour les instabilités gravitaires, la réduction du risque peut être opérée à différentes étapes du processus d'instabilité.

La stratégie dite « active » vise à prévenir le départ des matériaux en participant à leur stabilisation. En stratégie active, les gradins sont des moyens très efficaces d'arrêter des blocs et sont fréquemment employés sur les pentes de petite taille et bien accessibles pour les engins d'excavation. Dans les cas de pentes moins accessibles, un système alternatif est l'utilisation de filets de recouvrement. Cette solution technique est généralement employée pour les pentes escarpées. Le filet recouvre le rocher et il est attaché à plusieurs endroits le long de la pente. Le but du filet n'est pas d'arrêter les chutes de blocs mais d'emprisonner la roche et de réduire ainsi la composante horizontale de la vitesse qui fait rebondir la roche.

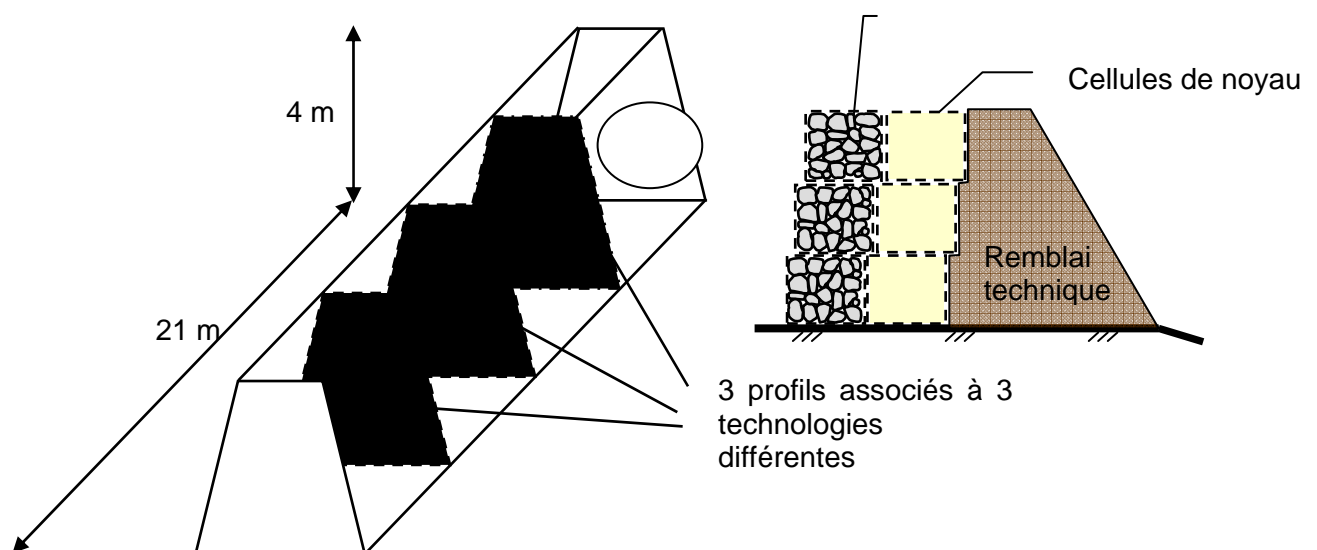
Dans le cas où la zone qui génère la chute des blocs rocheux n'est plus accessible ou de taille trop importante, il faut alors concevoir des structures localisées capables de stopper cette chute ; la stratégie alors utilisée est dite « passive ». En fonction de l'énergie cinétique que ces ouvrages peuvent dissiper, différents types de structures ont été développées durant ces deux dernières décennies.

Les filets pare pierres ont connu un développement très soutenu durant ces 25 dernières années, car ils bénéficient d'un ratio coût/efficacité d'absorption très intéressant. Ceux-ci sont très répandus sur les pentes raides au-dessus des routes. Les filets pare pierres les plus robustes ont une capacité d'absorption d'énergie allant jusqu'à 5000 kJ (ils pourraient arrêter un bloc de 10 tonnes se déplaçant à approximativement 30 mètres par seconde).

L'alternative à cette technologie exclusivement « métallique », est l'utilisation d'ouvrages composites dissipatifs. Cela conduit au développement d'une technologie cellulaire associant des critères d'efficacité fonctionnelle, d'allègement et de diminution de l'emprise de l'ouvrage, de réparabilité en cas d'événements avérés, innovations technologiques auxquelles d'intéresse le projet REMPARE (figure 2). Notons également que la mise en place d'une structure cellulaire dissipative à l'amont d'un ouvrage existant à requalifier (ouvrage fragilisé, ouvrage insuffisant pour les risques nouveaux, vulnérabilité nouvelle liée aux aménagements aval) peut être une solution alternative et économique à la reconstruction complète de l'ouvrage.

Vue du site expérimental de Malaussène

Illustration de principe du merlon testé en vraie grandeur



Pour valider le concept technologique et définir l'énergie d'impact nominale de ce type de structure le comportement des ouvrages sera évalué pour des énergies d'impact croissantes, jusqu'à leur état limite ultime.

Instrumentation mise en œuvre

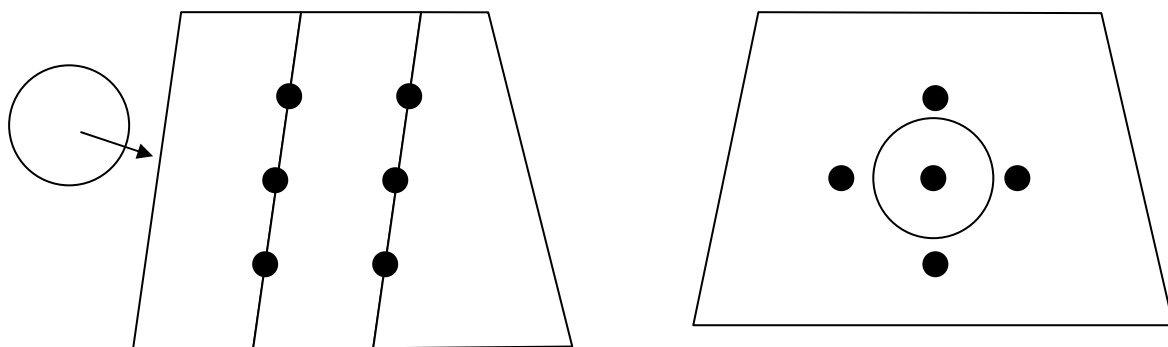
Les données nécessaires à la compréhension phénoménologique du comportement des structures cellulaires et au calage des modèles numériques sont acquises par différentes méthodes.

Lors de l'impact, on mesure l'accélération de l'impactant par le biais d'un *accéléromètre placé au sein de l'impactant*. Cette mesure essentielle est confirmée par *une analyse par imagerie rapide*, faite par deux caméras numériques, disposées de part et d'autre de la trajectoire de l'impactant.

On mesure également la contrainte et la déformation au cœur de l'ouvrage en différents points : interface partie cellulaire, remblai technique aval, au sein du remblai technique aval (cf.figure), par le biais de *cellules de pression totale (de type piézoélectrique, à acquisition rapide, technique à valider)*, de *capteurs de déplacement de type fil-invar à poulie* dans des gaines de protection, *inclinomètres verticaux et horizontaux à gaine souple*. Des géophones seront également disposés sur l'ouvrage, placés au sein de l'ouvrage à l'interface amont-aval, pour les campagnes d'essais à énergie les plus forte. Des accéléromètres seront également positionnés au sein de l'ouvrage (en zone non endommageable) pour évaluer les déplacements par intégration du signal.

Toutes ces mesures permettent à la fois de *quantifier la diffusion des contraintes* dans l'épaisseur de la structure, *d'identifier la contribution de chaque type de cellule (parement/noyau)*, de *juger du non endommagement* du remblai technique aval.

Des techniques d'imagerie géophysique entre les différentes étapes de sollicitation seront utilisées afin de contrôler indirectement l'intégrité du remblai de masse (utilisation du Radar, et de la technique du bruit de fond).



Vue de principe des points de mesure de contrainte et de déplacement dans l'ouvrage :

- *vue en coupe et*
- *vue de face (à affiner)*

Ces mesures en temps réel sont complétées par des mesures de déformation avant/après, sur les faces visibles de l'ouvrage (amont et aval), par des mesures topographiques de type laser (LIDAR).

Les zones dissipatives cellulaires seront démontées méthodiquement afin d'effectuer des mesures aux interfaces à posteriori pour calage. Le concept de réparabilité sera testé.

Dans le cadre du projet REMPARE, EGIS Géotechnique, en plus de son implication dans les réunions du comité de suivi et du comité de pilotage, intervient plus particulièrement sur les tâches suivantes : développement d'outils pour l'ingénierie, modélisation numérique multi-échelles et essais vrai grandeur à l'échelle de l'ouvrage (essai sur site).

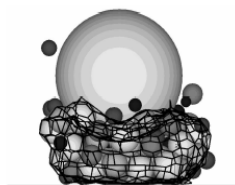
Les prestations d'Egis Géotechnique ont, jusqu'alors, consisté plus particulièrement en :

« Développement d'outils pour l'ingénierie » :

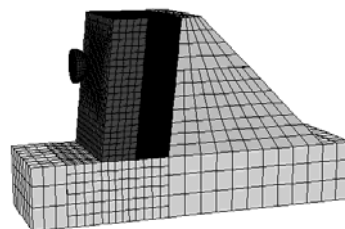
- Identification et définition des besoins des opérationnels (Bureaux d'études)
- Pilote sur les besoins de l'ingénierie, présentation au Comité de Pilotage
- Etat de l'art des méthodes de dimensionnement, et essais expérimentaux concernant les merlons pare-blocs.
- Mise au point d'un guide pratique de dimensionnement

« Modélisation numérique multi-échelles » :

- Mise en place d'une Thèse Cifre sur la problématique de « Couplage discret-continu pour la modélisation d'ouvrage pare-blocs » (démarrage décembre 2007).
- Etude bibliographique pour le choix d'une méthode de couplage numérique adaptée à la problématique.
-
- Implémentation de la méthode retenue dans deux codes de calcul numérique du commerce, puis validation de la méthode.



Modélisation discrète à l'échelle d'un gabion



Modélisation continue à l'échelle d'un ouvrage

« Essais vrai grandeur à l'échelle de l'ouvrage » :

Il s'agit de la construction d'un merlon en vrai grandeur dans une carrière et d'un dispositif d'impact :

- Participation à l'étude de conception de l'instrumentation avec les autres partenaires.
- Participation au choix et au dimensionnement des profils d'étude.
- Recherche, fourniture et test de capteurs innovants (accéléromètre embarqué, mesure inclinométrique automatique ...).
- Participation aux essais d'impact et à l'interprétation des mesures et des résultats.

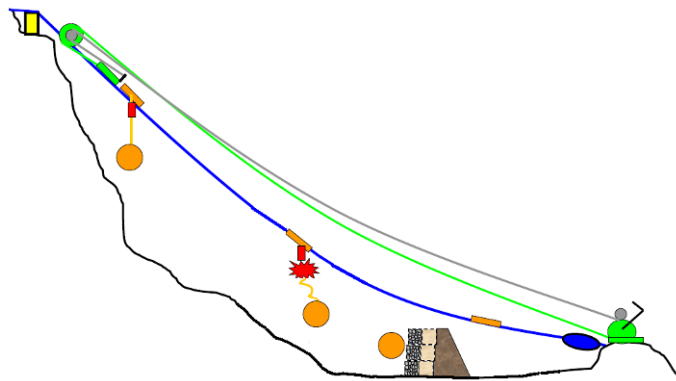


Schéma de principe de la station d'essai « ouvrage réel »

L'innovation liée à la réalisation du projet REMPARE porte sur plusieurs aspects :

- La technique développée dite d'assemblage cellulaire est novatrice, surtout par l'inclusion de dispositifs composites dissipatifs.
- Les méthodes numériques mises en œuvre nécessitent des développements de recherche de pointe en particulier sur le comportement des matériaux composites dissipatifs (thèses en cours)
- La mise en place d'une ingénierie performancielle (Reingénierie) par adaptation des matériaux (systèmes composites) et des assemblages de matériaux, par adaptation des systèmes de liaison entre éléments modulaires constitutifs et de leur positionnement dans l'ouvrage, est une innovation forte.
- L'obtention de réponses au sein d'un ouvrage instrumenté constituera une avancée majeure, unique sur le plan international. Jusqu'à présent les observations n'ont été faites que sur l'extérieur de l'ouvrage et portent surtout sur des constats a posteriori. Les modèles numériques utilisés ne peuvent être confrontés qu'avec l'état final (déplacements externes). L'innovation va porter sur l'instrumentation mise en place, en adaptant des systèmes ayant été utilisés pour des ouvrages sous sollicitation statique. Les compétences et complémentarités des laboratoires LCPC, Cemagref, Lirigm-3S, et bureaux d'études Egis géotechnique, Géolithe, SAGE seront d'un grand intérêt. Ceci permettra d'évaluer les actions s'exerçant sur la structure : au parement, en interne dans l'ouvrage, en particulier à l'interface du noyau dissipatif et du merlon technique de charge avale.

- L'innovation de la démarche se situe également dans le couplage : comportement mécanique et intégration environnementale des futurs ouvrages. L'impact sur les populations (flore, animale, et humaine) est souvent un argument retenu pour le développement des techniques novatrices.
- Le développement d'un logiciel d'aide au dimensionnement pour l'étude opérationnelle des ouvrages constitue un objectif important en termes d'innovation.