

# COMPORTEMENT DYNAMIQUE D'UNE STRUCTURE DE PROTECTION : ESSAIS D'IMPACT ET MODELISATION NUMERIQUE

## **DYNAMIC BEHAVIOUR OF A PROTECTIVE STRUCTURE: IMPACT TESTS AND NUMERICAL MODELLING**

Agathe FURET<sup>1,2,3</sup>, Stéphane LAMBERT<sup>2</sup>, Pascal VILLARD<sup>3</sup>, Jean-Philippe JARRIN<sup>1</sup>, Julien LORENTZ<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Géolithe, 181 rue des Bécasses, 38920 Crolles, France, [agathe.furet@geolithe.com](mailto:agathe.furet@geolithe.com)

<sup>2</sup> Univ. Grenoble Alpes, INRAE, ETNA, 38000 Grenoble, France

<sup>3</sup> Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, 3SR, 38000 Grenoble, France

<sup>4</sup> Géolithe Innov, 181, rue des Bécasses, 38920 Crolles, France

**RÉSUMÉ** – Cette communication présente l'approche globale retenue pour caractériser la réponse dynamique de la structure Bloc Armé® destinée à la protection contre les risques naturels dont les chutes de blocs rocheux. L'étude comprend des essais d'impact à différentes échelles et le développement d'un modèle numérique 3D et vise à proposer des recommandations de dimensionnement.

**ABSTRACT** – The Bloc Armé® structure is a protective structure against natural hazards, notably adapted for rockfall protection. This article presents the global approach considered in view of characterizing the dynamic response of this type of structures, based on impact experiments at different scales and developing a 3D model, in view of deriving design recommendations.

### 1. Introduction

Les structures de protection de type merlons en remblais de terre représentent une solution efficace pour la protection contre les chutes de blocs rocheux (Lambert et Bourrier, 2013). Cependant, ces structures présentent l'inconvénient d'une emprise au sol importante, paramètre qui se montre limitant dans un contexte d'aménagement de territoires souvent contraints par le relief. Les attentes sociétales en cas d'évènements naturels affectant les infrastructures, associent le besoin d'un rétablissement rapide du fonctionnement, au moins partiel, de celles-ci et la demande d'interventions dans des conditions de sécurité optimales. C'est dans ce contexte qu'est proposée la structure Bloc Armé® comme solution de protection contre les risques naturels.

La structure, visible en *Figure 1*, est configurable en 3D et se compose de blocs préfabriqués en béton liaisonnés entre eux par des armatures métalliques. Ces armatures assurent un liaisonnement vertical et horizontal entre les blocs, à l'aide respectivement, de barres et de plaques métalliques. Par la présence de jeux entre les armatures, la structure tolère de faibles déplacements entre les blocs. Cela confère à la structure une capacité à répartir les efforts, à se déformer et à dissiper de l'énergie.

Un ouvrage construit sur une route des Alpes a résisté à plusieurs glissements de terrain de plus de 1 000 m<sup>3</sup> démontrant l'efficacité de la structure. Cette structure innovante étant également destinée à la protection contre les chutes de blocs rocheux, un programme de recherche, en partie réalisé dans le cadre du projet national C2ROP, a été

entrepris. En complément d'essais d'impact par lâchers verticaux (Furet et al. 2018), des essais d'impact horizontaux sur des murs verticaux ont été réalisés à échelle réelle et à échelle réduite. Pour analyser plus finement le comportement de la structure sous impact un modèle numérique a été développé. Après une présentation des essais d'impact, le modèle numérique est présenté puis les résultats de simulations aux deux échelles sont comparés aux résultats expérimentaux.

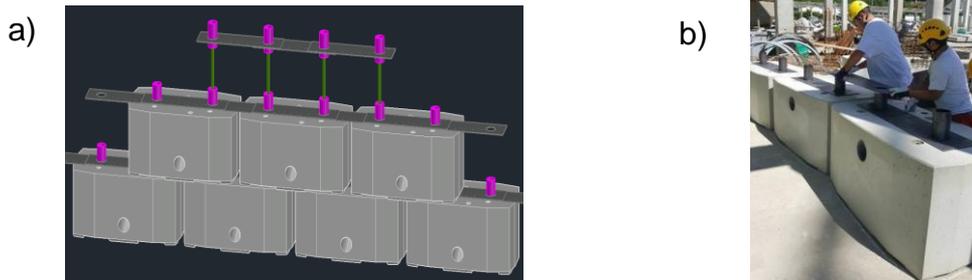


Figure 1: Structure Bloc Armé® : blocs liaisonnés par des barres verticales et des plaques horizontales a) schéma de conception b) montage d'une structure

## 2. Caractérisation expérimentale de la structure sous impact

### 2.1. Essais d'impact sur structure à échelle réelle

Afin d'observer la réponse de la structure sous impact des essais ont été réalisés sur une structure à échelle réelle. Un mur vertical en forme de pyramide de 9,6m à la base, visible en Figure 2a, a été impacté horizontalement par un impactant de 7 420 kg. Une série d'impacts a été réalisée, sur un même mur, à énergies croissantes comprises entre 16 kJ et 125 kJ (vitesses d'impact de 2,1 m/s à 5,8 m/s). Ces essais ont permis d'améliorer la connaissance sur le fonctionnement dynamique de la structure et ont fourni des données pour la validation du modèle numérique, notamment en termes de déplacement de la structure.

### 2.2. Essais d'impact sur structure à échelle réduite

Dans l'objectif d'étudier l'influence de différentes configurations sur la réponse des ouvrages impactés, une campagne d'essais a été réalisée à échelle réduite. La structure testée, à l'échelle 1/4, est légèrement simplifiée mais reprend le même fonctionnement que la structure réelle. Les impacts sont réalisés horizontalement, à l'aide d'un impactant de 35 kg de forme sphérique en tête, à une énergie maximale de 1 040 J (vitesse de 7,7 m/s). Les configurations testées comportent un mur rectiligne et trois murs incluant des murs de refend dont on a fait varier les dimensions et les espacements (Figure 2b). L'effet des conditions d'impact, telles que la vitesse d'impact et la position d'impact, a également été étudié.

### 2.3. Essais complémentaires

En complément des essais d'impact, des essais de caractérisation du béton et du frottement aux interfaces entre blocs et entre bloc et base ont été réalisés.

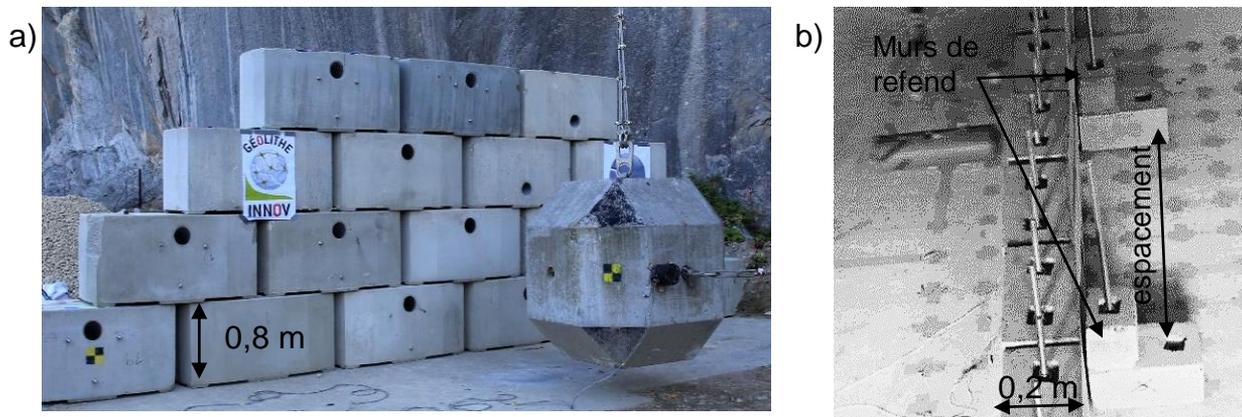


Figure 2 : Essais d'impact a) sur structure à échelle réelle b) sur murs à échelle réduite de différentes configurations : géométries des murs de refend et espacements variables

## 2.4. Résultats principaux

Les essais d'impact sur la structure à échelle réelle ont mis en évidence la capacité de la structure à transmettre les efforts latéralement et à se déformer globalement. Par la présence des armatures, toute la hauteur du mur est déplacée et la déformation du mur concerne de nombreux blocs autour du point d'impact.

L'instrumentation mise en œuvre pour les essais à échelle réduite, impliquant de la photogrammétrie et des caméras à haute fréquence d'acquisition, a permis d'observer que la réponse dynamique du mur en déplacement se décompose selon trois mécanismes principaux : (1) glissement sur la base, (2) déplacement différentiel des blocs les uns sur les autres et (3) soulèvement du mur. La longueur du mur mobilisée lors de l'impact et l'amplitude de chacun de ces mécanismes se sont montrées variables selon les conditions d'impact et les configurations testées.

## 3. Modélisation numérique

Un modèle numérique est réalisé avec FLAC3D (Flac3d, 2019) logiciel basé sur la méthode des différences finies développé par la société Itasca. La modélisation numérique vise à comprendre les phénomènes impliqués dans la réponse dynamique de l'ouvrage, notamment concernant la dissipation d'énergie, et à reproduire le comportement global de la structure en termes de déplacement.

### 3.1. Modèle géométrique

Le modèle, montré en Figure 3, est composé d'un ensemble de blocs liés entre eux par un réseau d'éléments structuraux représentant les barres et les plaques. Les blocs sont modélisés par des milieux continus de type brique pleine dont les dimensions sont identiques à celles des blocs réels. Afin de prendre en compte les chanfreins, présents dans la géométrie des blocs produits à échelle réelle, les arrêtes verticales des blocs sont légèrement arrondies pour les simulations à échelle réelle. Les blocs sont disposés en quinconce en considérant une disposition analogue à celle de la structure réelle.

Une condition absorbante est imposée aux bords latéraux et à la surface inférieure de la base. De telles conditions permettent d'autoriser des déplacements en considérant une continuité du milieu de part et d'autre de la limite, tout en amortissant les déplacements dynamiques et en laissant passer les ondes élastiques.

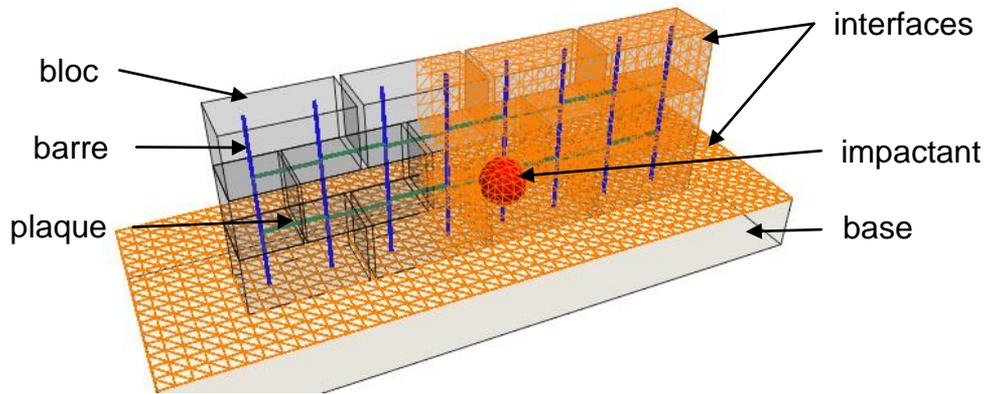


Figure 3: Modèle de la structure dans FLAC3D, blocs en milieux continus en contact par des interfaces et liaisonnés par des éléments structurels

### 3.2. Lois de comportement et paramétrages

Le comportement des blocs est modélisé par la loi de comportement, appelée Mohr-Coulomb dans FLAC3D, caractérisée par un comportement élastique de Hooke et une rupture plastique combinant le critère de Mohr-Coulomb et un critère de rupture en traction. Une telle loi est retenue car pour notre application, il a été choisi de ne pas décrire précisément le comportement du béton des blocs et son endommagement. Cependant, la dissipation d'énergie par déformation plastique est considérée afin de décrire correctement le comportement global de l'ouvrage en déplacement.

Les essais de caractérisation ont permis de définir les valeurs numériques de la résistance à la traction, du module d'élasticité et de la cohésion et de l'angle de frottement du béton des blocs. Le coefficient de poisson et l'angle de dilatance sont définis d'après la littérature.

Une loi de comportement élastique est choisie pour la base et l'impactant, éléments non déformés plastiquement lors des essais. La valeur du module d'élasticité de l'impactant est choisie de l'ordre de deux fois celui des blocs. Le module d'élasticité retenu pour la base est égal à celui des blocs.

Les contacts entre les différents éléments sont gérés par des interfaces rigides. Alors que les paramètres de rupture (frottement, cohésion et résistance en traction) sont choisis pour modéliser fidèlement le comportement à l'interface des éléments, les rigidités sont définies de telle sorte que la déformation de celle-ci reste peu influente. Itasca conseille de fixer les rigidités de l'interface à une valeur dix fois supérieure à la plus haute rigidité des matériaux environnant l'interface. La valeur est calculée par :

$$k = 10 \times \max \left[ \frac{K + \frac{4}{3}G}{\Delta z_{\min}} \right] \quad (1)$$

Avec K et G les rigidités normale et tangentielle des matériaux et  $\Delta z_{\min}$  la plus petite dimension dans la direction normale des zones adjacentes à l'interface.

Les valeurs des propriétés des milieux continus sont présentées dans le Tableau 1 et les valeurs non nulles des propriétés des interfaces sont données dans le Tableau 2.

Tableau 1 : Valeurs des paramètres des milieux continus

Échelle réelle			Échelle réduite		
Blocs	Impactant	Base	Blocs	Impactant	Base

Module de Young (Pa)	$1,1 \times 10^{10}$	$2,0 \times 10^{10}$	$1,0 \times 10^{10}$	$5,8 \times 10^9$	$1,0 \times 10^{10}$	$5,0 \times 10^9$
Coefficient de Poisson (-)	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Angle de frottement (°)	59	-	-	55	-	-
Cohésion (Pa)	$6,9 \times 10^6$	-	-	$5,9 \times 10^6$	-	-
Angle de dilatance (°)	0	-	-	0	-	-
Résistance à la traction (Pa)	$3,8 \times 10^6$	-	-	$3,7 \times 10^6$	-	-

Tableau 2 : Valeurs des paramètres des interfaces

	Échelle réelle			Échelle réduite		
	bloc/ base	bloc/ bloc	bloc/ impactant	bloc/ base	bloc/ bloc	bloc/ impactant
Angle de frottement (°)	30	30	32	28	23	30
Rigidité normale (Pa/m)	$6,0 \times 10^{11}$	$6,1 \times 10^{11}$	$6,1 \times 10^{11}$	$1,0 \times 10^{12}$	$1,0 \times 10^{12}$	$1,0 \times 10^{12}$
Rigidité tangentielle (Pa/m)	$6,0 \times 10^{11}$	$6,1 \times 10^{11}$	$6,1 \times 10^{11}$	$1,0 \times 10^{12}$	$1,0 \times 10^{12}$	$1,0 \times 10^{12}$

Les armatures métalliques sont modélisées à l'aide d'éléments structurels existants dans FLAC3D. Les jeux de déplacement autorisés dans la structure réelle sont reproduits à l'aide d'un lien de type ressort entre les nœuds des éléments structurels et le maillage des blocs. Le passage de la rigidité d'une valeur nulle à une valeur très élevée permet de libérer ou bloquer le déplacement des éléments au sein du bloc.

### 3.3. Simulation des essais d'impact et options de calcul

L'impact est modélisé par contact direct d'un impactant sur la structure. La géométrie, la masse et la vitesse de l'impactant sont choisies pour représenter fidèlement l'impact.

Les simulations sont réalisées avec les options dynamiques et grandes déformations actives et sans ajout d'amortissement numérique.

## 4. Confrontation du modèle numérique avec les résultats expérimentaux

### 4.2. Modèle à échelle réduite

#### 4.2.1. Comportement en déplacement

Le modèle numérique développé présente une bonne capacité à reproduire les différents modes de déplacement de la structure (Figure 4). Le déplacement final du mur obtenu pour les simulations numériques est comparable au déplacement réel du mur. Si on s'intéresse à l'exemple d'un mur rectiligne à échelle réduite impacté à 1 040 J, les résultats, montrés en Figure 4, font apparaître une déformée en V similaire entre

l'expérimental et le numérique. Le déplacement maximal de la simulation de 13 cm reste cependant inférieur d'environ 25% aux 17 cm observés expérimentalement.

Le pointage du déplacement d'un point haut du mur selon l'axe d'impact x (

Figure 5a) montre que le déplacement du mur augmente régulièrement jusqu'au déplacement maximal, en partie réversible, avant un retour jusqu'au déplacement résiduel. Le mur atteint son déplacement final après une durée avoisinant 450 ms après le début du déplacement, avec un déplacement maximal observé à 250 ms environ. Comme visible en

Figure 5b, les résultats numériques montrent la même cinématique et confirment une bonne description du comportement de la structure par le modèle numérique.

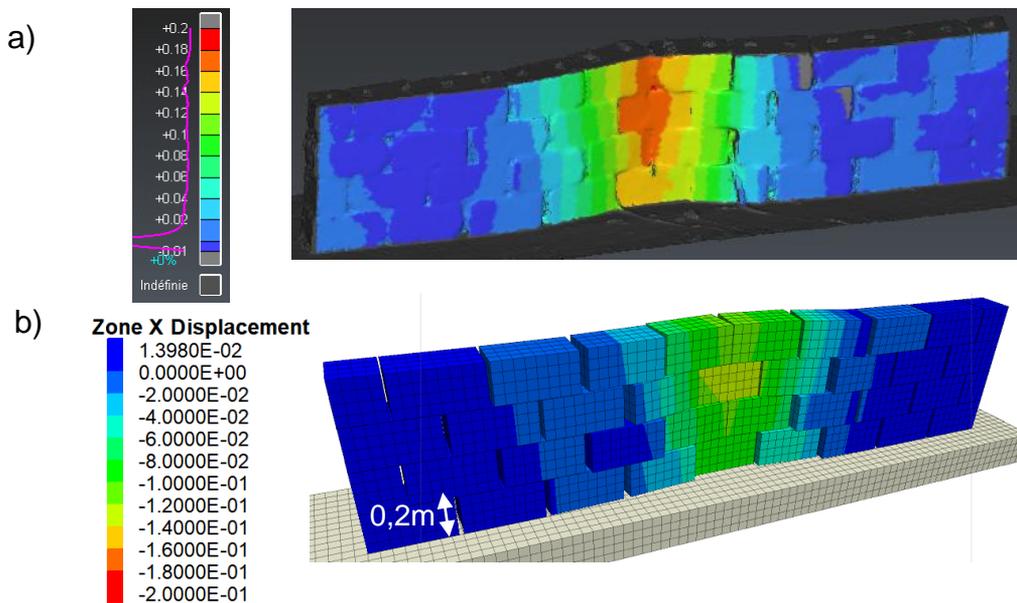


Figure 4 : Déformation d'un mur rectiligne à échelle réduite après un impact à 1 040J a) résultat expérimental b) résultat numérique

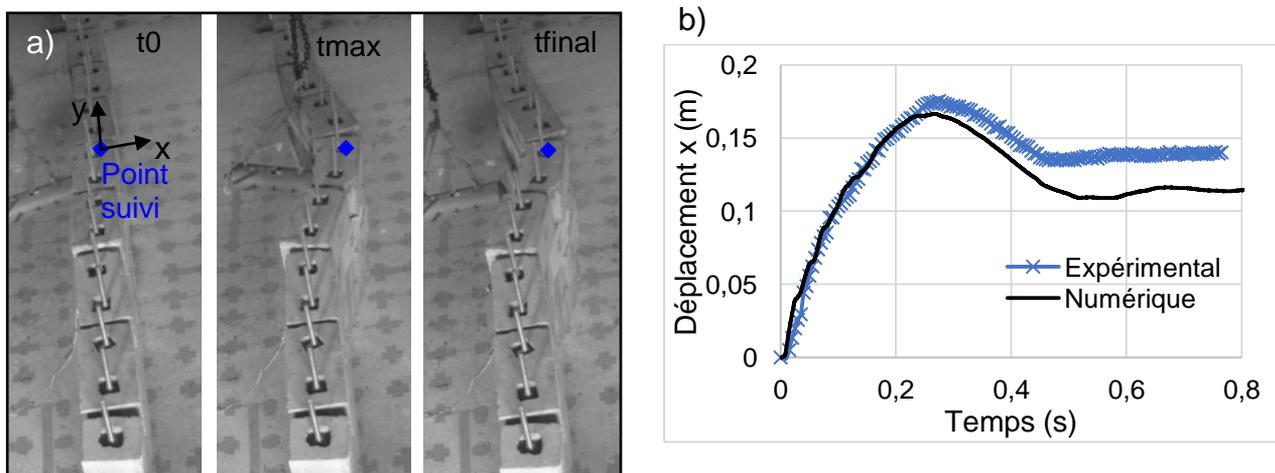


Figure 5 : Impact à 1 040 J sur mur rectiligne a) déformé de l'ouvrage pour trois temps caractéristiques b) comparaison du suivi d'un point au droit de l'impact au cours du temps pour les résultats expérimentaux et numériques

#### 4.2.2. Dissipation d'énergie

La modélisation numérique est également un outil intéressant pour l'étude des phénomènes impliqués dans la dissipation d'énergie. Le développement de fonctions spécifiques, à l'aide du langage fish intégré au logiciel FLAC3D, a permis de quantifier certaines dissipations d'énergie. Pour l'exemple de l'impact à 1 040 J sur un mur rectiligne à échelle réduite, les frottements dissipent une énergie de l'ordre de 750 J, pour 2/3 au niveau des contacts entre blocs et 1/3 au niveau du frottement du mur sur la base. La plastification des blocs, dissipe une énergie de l'ordre de 200 J. Ainsi on observe que l'endommagement et le déplacement des blocs en béton dissipent 90% de l'énergie d'impact. Les 10% d'énergie restante sont imputée à la déformation des éléments structurels.

L'approfondissement des calculs concernant la dissipation d'énergie devrait permettre d'identifier l'ensemble des mécanismes impliqués dans la dissipation d'énergie et d'étudier l'influence de certains paramètres sur les modes de dissipation d'énergie.

#### 4.3. Modèle à échelle réelle

De même que pour l'échelle réduite, le modèle permet de reproduire le comportement global de l'ouvrage à l'échelle réelle. La succession d'essais réalisée expérimentalement sur un mur à échelle réelle a été simulée numériquement. Les déplacements de l'ouvrage obtenus après chaque essai sont proches de ceux observés expérimentalement. Comme visible en Figure 6, après une succession de 4 impacts, les déformées expérimentale et numérique sont comparables. De même que pour les ouvrages à échelle réduite, le modèle numérique montre une tendance à sous-estimer les déplacements, ici d'environ 20%, avec un déplacement maximal de 69 cm pour un déplacement maximal estimé à 85 cm pour les résultats expérimentaux.

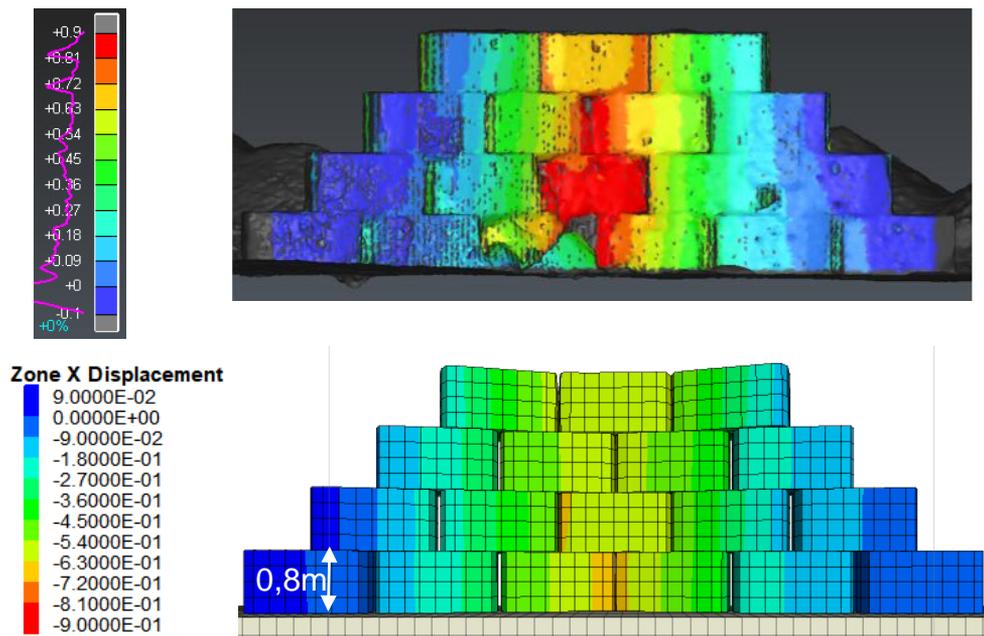


Figure 6 : Déformation d'un mur à échelle réelle après une série de 4 impacts de 16 kJ, 45 kJ, 92 kJ et 125 kJ à 1,1m de hauteur a) résultat expérimental b) résultat numérique

## **5. Conclusions et perspectives**

L'article présente les résultats d'essais expérimentaux et de simulations numériques réalisés dans le cadre du développement d'une nouvelle structure de protection contre les blocs rocheux. Les essais réalisés à échelle réelle ont permis d'observer le comportement de la structure sous impact. Cette campagne a été complétée par des essais d'impact horizontaux sur des murs à échelle réduite qui permettent l'étude du comportement d'ouvrages complets. La réduction de l'échelle a aidé à l'étude de l'influence de différents paramètres, incluant la mise en place de murs de refend dans de multiples configurations. Les données permettent de préciser la cinématique des différents éléments modulaires et ont servi à la validation d'un modèle numérique.

Le modèle numérique développé avec FLAC3D s'est montré efficace pour reproduire le comportement de la structure, aussi bien à échelle réduite qu'à échelle réelle. De plus, les simulations numériques contribuent à une meilleure compréhension des mécanismes mis en jeu lors de l'impact et rend possible une étude quantitative de la dissipation d'énergie.

En perspective, le modèle sera enrichi dans l'objectif d'améliorer les résultats concernant l'amplitude des déplacements, sous-estimé par le modèle actuel. Des études paramétriques seront notamment réalisées sur l'influence des angles de frottement aux interfaces. En effet, ils sont actuellement mesurés par des essais statiques et les valeurs peuvent se révéler différentes lors d'une sollicitation dynamique. Une extension du modèle numérique permettant d'ajouter des murs de refend est également prévue. De plus, des essais d'impact à haute énergie sur des ouvrages à échelle réelle sont envisagés. Ces futurs travaux visent à proposer un outil numérique, dont la validité et la robustesse auront pu être démontrés en comparaison de nombreux résultats expérimentaux, permettant de modéliser des impacts sur différents types d'ouvrages.

L'analyse approfondie des données expérimentales et de résultats issus de simulation numériques futures permettra au final d'améliorer les structures de protection et de proposer des préconisations pour le dimensionnement d'ouvrage soumis à impacts par des blocs rocheux.

## **6. Remerciements**

Ces travaux ont été réalisés dans le cadre et avec le soutien financier du projet national C2ROP. Les auteurs tiennent à remercier le personnel de l'Ifsttar et du Cerema pour leur contribution à la réalisation des essais expérimentaux à échelle réelle, sur le site de Montagnole (73), ainsi que les personnels et les étudiants de l'IUT Génie Civil et Construction Durable de Grenoble qui ont contribué à la réalisation des essais à échelle réduite.

## **7. Références bibliographiques**

- Furet, A., Lambert, S., Villard, P., Jarrin, J-P., Lorentz, J., Meignan, L. (2018).  
Expérimentations d'impact grandeur réelle sur parement de merlon Bloc Armé®.  
Journées Nationales de Géotechniques et de Géologie de l'Ingénieur 13-15 juin,  
Champs-Sur-Marne.
- Itasca Consulting Group Inc. (2019) FLAC3D Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3  
Dimensions. User's Guide, version 6.
- Lambert, S, and Bourrier, F (2013). Design of rockfall protection embankments: a review.  
Engineering geology 154 (28), 77-88.