HAL open science

Réponse sous impact de murs pare-blocs

Agathe Furet, Stéphane Lambert, Pascal Villard, Jean-Philippe Jarrin, Julien Lorentz

To cite this version:

Agathe Furet, Stéphane Lambert, Pascal Villard, Jean-Philippe Jarrin, Julien Lorentz. Réponse sous impact de murs pare-blocs. Revue française de Géotechnique, 2020, 163, pp.9. 10.1051/geotech/2020017 . hal-03129197

HAL Id: hal-03129197

https://hal.science/hal-03129197v1

Submitted on 13 Jul 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial 4.0 International License

Réponse sous impact de murs pare-blocs

Agathe Furet[1,2,3,★], Stephane Lambert[2], Pascal Villard[3], Jean-Philippe Jarrin[1] et Julien Lorentz[4]

[1] Géolithe, 181, rue des Bécasses, 38920 Crolles, France
[2] Univ. Grenoble Alpes, INRAE, ETNA, 38000 Grenoble, France
[3] Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, 3SR, 38000 Grenoble, France
[4] Géolithe Innov, 181, rue des Bécasses, 38920 Crolles, France

Résumé – Cet article présente l'étude du comportement dynamique de murs innovants de protection contre les chutes de blocs constitués de blocs en béton liés entre eux par un assemblage d'armatures. Les différents modes de déformation des murs et l'influence de la géométrie des murs sur leur réponse en déplacement sont étudiés par la réalisation d'impacts sur des murs à échelle 1/4, dans des configurations variées. Un modèle numérique basé sur une approche tridimensionnelle et continue, représentant de manière réaliste les différents constituants de la structure et leurs interactions, est ensuite proposé. Les résultats numériques concernant le déplacement de l'ouvrage sont confrontés aux résultats expérimentaux. Enfin, la dissipation d'énergie au sein de l'ouvrage est abordée, en considérant les différents mécanismes dissipatifs et leur contribution.

Mots clés : Ouvrage de protection / chute de blocs / expérimentation / modélisation numérique / impact

Abstract – Response of rockfall protection walls subjected to impact. This article presents the study of the dynamic behavior of rockfall protection walls made of concrete blocks interconnected by metallic elements. The different deformation modes and the influence of the geometry of the wall on its response are studied conducting impacts experiments on 1/4 scale walls of various designs. A numerical model based on a tridimensional and continuous approach, depicting the different elements of the structure and their interaction in a realistic way, is proposed. The numerical results concerning the displacement are compared to the experimental results. Finally, the energy dissipation within the structure is discussed, regarding the different dissipative mechanisms and their contribution.

Keywords: Protective structure / rockfall / experiment / numerical modeling / impact

1 Introduction

La chute de blocs rocheux, source de dommages importants sur les infrastructures et d'atteintes, parfois mortelles, sur des personnes, est un aléa naturel majeur dans notre société. Les changements climatiques récents rendent les événements de plus en plus fréquents et l'expansion urbaine ainsi que le développement de lieux de loisirs en montagne accroissent l'exposition des personnes et des équipements. Pour se protéger contre de tels événements, des parades actives et passives sont utilisées respectivement pour empêcher le départ et intercepter les blocs avant qu'ils n'atteignent les enjeux. Concernant les parades passives, qui nous intéressent ici, des structures variées sont mises en œuvre en fonction de l'énergie cinétique et de la hauteur de passage des blocs attendus, du type d'enjeux à protéger et aussi des contraintes géomorphologiques et sociétales.

Les merlons, ouvrages massifs en terre souvent associés à une fosse de réception sont capables de résister à des impacts de forte énergie du fait de leur masse importante et représentent une solution couramment employée. Des essais d'impact sur des structures de protection ont été réalisés par le passé. Ces essais ont par exemple montré la capacité d'un ouvrage réduit à l'échelle 1/3 en remblai renforcé par géogrille à résister à un impact de plus de 170 kJ (Korini *et al.*, 2019). La capacité d'un ouvrage sandwich à résister à un impact de 2000 kJ a également été démontrée par des essais à échelle réelle (Lambert *et al.*, 2020). Malgré les avancées techniques permettant à la fois d'assurer une meilleure stabilité statique et de raidir les parements (par utilisation de renforcement par géosynthétiques dans le corps du merlon ou de pneus ou de géocellules au parement), ces ouvrages présentent une forte emprise au sol et leur construction peut s'avérer longue et complexe.

L'étude présentée concerne une structure composée de blocs préfabriqués en béton liaisonnés entre eux par des armatures métalliques (Fig. 1). Cette structure, développée et brevetée par Géolithe Innov, représente une solution de protection contre les mouvements de terrain, facile à mettre en œuvre, d'emprise au sol modérée et notamment adaptée pour la construction d'ouvrages pare-blocs (Lorentz *et al.*, 2018).

★ Auteur de correspondance : agathe.furet@geolithe.com

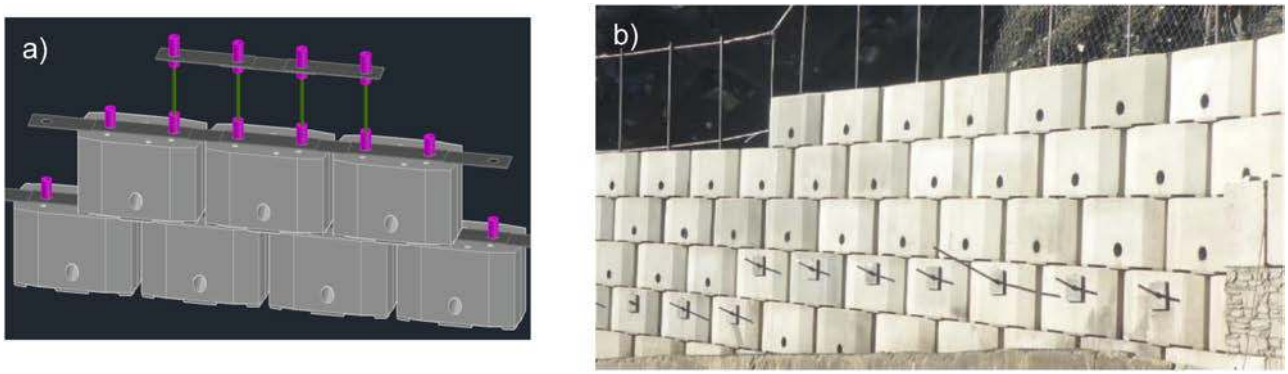

Fig. 1. Structure Bloc Armé® (a) schéma de conception ; (b) ouvrage existant.
Fig. 1. *Bloc Armé® structure (a) design drawing; (b) existing wall.*

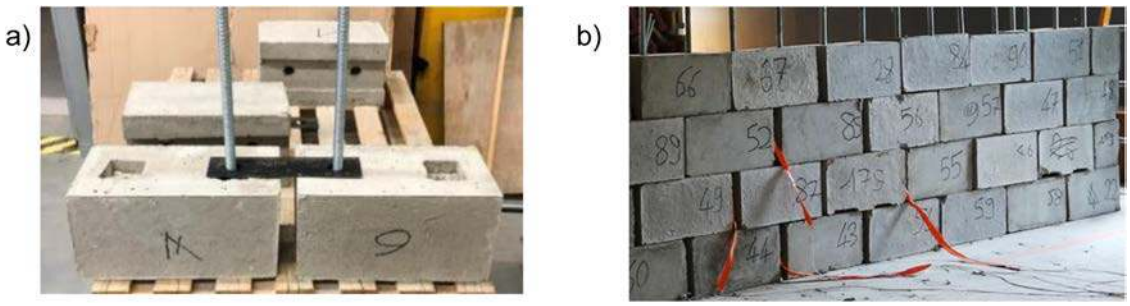

Fig. 2. Structure étudiée : blocs en béton liaisonnés par des barres verticales et des plaques horizontales (a) méthode d'assemblage entre deux blocs ; (b) mur avant impact.
Fig. 2. *Studied structure: concrete blocks interconnected via vertical bars and horizontal plates (a) assembly between two blocks; (b) wall before impact.*

L'utilisation de blocs en fait une structure dont la géométrie modulable en trois dimensions et les caractéristiques mécaniques peuvent être adaptées aux cas d'utilisation. Cet article s'intéresse au comportement de la structure sous impact.

Dans un contexte où le dimensionnement des merlons suit des méthodes empiriques ou analytiques, souvent basées sur l'équivalence d'un chargement pseudo-statique (Lambert et Bourrier, 2013), l'étude menée vise à améliorer la connaissance de la réponse dynamique d'ouvrages pare-blocs. Des études concernant le comportement de murs rigides en béton soumis à des impacts ont déjà été réalisées en laboratoire par des auteurs qui proposent, par exemple, une méthode pour la vérification du non renversement des ouvrages (Lam *et al.*, 2018) et une solution analytique pour l'estimation du glissement (Yong *et al.*, 2019). Dans cet article, on s'intéresse au comportement global de la structure impliquant du glissement, du soulèvement et un endommagement des matériaux. Une analyse de la dissipation d'énergie est également proposée.

Un programme de recherche impliquant des essais d'impact et le développement d'un modèle numérique tridimensionnel a été entrepris. L'article s'intéresse en particulier aux résultats d'une campagne d'essais réalisée sur des ouvrages à échelle réduite dans l'objectif de tester différentes configurations de murs et d'étudier les mécanismes de dissipation d'énergie rentrant en jeu lors de l'impact. Les essais réalisés sur des murs droits et renforcés par des murs de refend ont pour but de montrer les différents modes de déplacement et l'influence de la géométrie des murs sur leur comportement dynamique. Le modèle numérique, développé avec l'outil de modélisation FLAC3D (Itasca, 2017), est utilisé pour reproduire le comportement global de l'ouvrage en déplacement et permet une analyse plus approfondie des mécanismes.

2 Structure étudiée

La structure étudiée (Fig. 2) se compose de blocs préfabriqués en béton liaisonnés entre eux par des armatures métalliques.

Les blocs produits à l'échelle 1/4 par rapport aux blocs des structures à échelle réelle, présentent une longueur de 38 cm, une largeur de 20 cm et une hauteur de 20 cm et deux réservations sur toute la hauteur. Les barres verticales placées dans les réservations des blocs assurent un liaisonnement vertical alors que les plaques disposées horizontalement renforcent le liaisonnement horizontal existant du fait de la disposition des blocs en quinconce.

L'espacement moyen de 2 cm entre blocs, pour un entraxe entre les barres de 20 cm, et la présence de jeux entre les armatures autorisent des déplacements relatifs entre les blocs.

La conception de l'assemblage confère à la structure une capacité à répartir les efforts, à se déformer et, conséquemment, à dissiper de l'énergie par frottement.

Fig. 3. Dispositif d'essais : impact sur (a) mur droit ; (b) mur avec murs de refend.
Fig. 3. *Test facility: impact on (a) straight wall; (b) wall with perpendicular partition walls.*

3 Essais d'impact à échelle réduite

3.1 Principe des essais

Le principe de similitude n'a pas été appliqué. Les essais visent à observer les modes de fonctionnement et l'influence des différents paramètres (impact, structure) sans chercher à extrapoler quantitativement les résultats obtenus à échelle réduite vers l'échelle 1. Les impacts sont réalisés à l'aide d'un pendule avec lequel un impactant suspendu par une chaîne frappe le mur selon une trajectoire quasi-horizontale. Le système permet de réaliser des impacts à une vitesse maximale de 7,7 m/s. L'impactant d'une masse de 35 kg (densité d'environ 4000 kg/m^3) est formé d'une coque d'acier remplie de béton armé présentant une tête arrondie (Fig. 3).

Dans le but d'analyser le comportement dynamique des murs lors de l'impact, deux caméras à haute fréquence d'acquisition (160 i/s) sont placées de façon à obtenir une vue de côté et une vue de dessus. Deux caméscopes sont ajoutés à l'avant et à l'arrière du mur. Les images acquises à cette fréquence se sont avérées suffisantes pour caractériser la vitesse de l'impactant avant et après impact ainsi que les déplacements du mur. Des modèles photogrammétriques des murs avant et après impact sont produits pour chaque essai afin de déterminer la déformée de l'ouvrage et son déplacement résiduel.

La résolution des vidéos et le flou induit par le déplacement rapide du mur conduisent à une précision de l'ordre du centimètre pour les mesures issues du pointage vidéo. Le déplacement résiduel est estimé sur les modèles photogrammétriques par comparaison de la face avant du mur à l'état final avec un plan calé sur la face avant du mur avant impact. Le cumul de l'imprécision des modèles et de l'utilisation d'un plan conduit à une précision centimétrique des mesures. L'estimation des longueurs déplacées et soulevées se fait respectivement par observation d'après les résultats photogrammétriques et vidéos. La précision est estimée à 10 cm.

Les murs testés, simplement posés sur une dalle en béton, sont construits selon quatre configurations (Fig. 4). La première configuration testée consiste en un mur droit simple. Pour trois autres configurations, sont ajoutés, perpendiculairement à un mur droit, des murs de refend de dimensions et d'espacements variables. Ces renforts sont composés de 1,5 ou 3 blocs, respectivement désignés par mur de refend bas et mur de refend haut, et sont distants de 1,00 à 1,58 m. Pour chaque configuration, deux ouvrages ont été impactés à une énergie cinétique de 1040 J, à mi-longueur et à des hauteurs d'impact différentes : Hi = 0,3 m et Hi = 0,5 m.

3.2 Résultats expérimentaux

3.2.1 Modes de déformation du mur

Les essais ont fait apparaître une déformée de l'ouvrage en V, se développant du point d'impact vers les extrémités du mur et témoignant d'une large mobilisation de la structure par une transmission latérale des efforts (Fig. 5a). La déformée est comparable à celle observée lors d'essais d'impact réalisés sur une structure similaire (Green *et al.*, 2018). Le déplacement maximal dans la direction de l'impact et la longueur de mur déplacé lors de l'impact sont variables selon la configuration de mur testée et la hauteur d'impact. Selon les conditions d'impact, on constate une augmentation plus ou moins importante des espacements entre blocs voire la rupture de blocs au droit de l'impact (Fig. 5b). Dans certains cas, l'impact provoque également la projection de fragments de béton, phénomène qui, dans le cas des structures à échelle réelle peut être évité par l'ajout de fibres dans le béton.

La réponse dynamique du mur en déplacement résulte de trois mécanismes principaux : (1) le glissement sur la base, (2) le déplacement relatif des blocs les uns par rapport aux autres et (3) le soulèvement par pivotement du mur (Fig. 6a). Le glissement du mur sur la base s'accompagne le plus souvent d'un pivotement du mur par rapport à son arête arrière, sur une certaine longueur en partie centrale. Ce pivotement, et dans une moindre mesure les déplacements relatifs des blocs, entraîne des déplacements réversibles en tête.

Les modèles photogrammétriques permettent de mesurer, selon l'axe d'impact x, les déplacements rémanents en pied et en tête de mur. Les mesures issues du pointage vidéo renseignent sur le déplacement du haut du mur durant l'impact, donnant accès au déplacement maximal et résiduel du mur en tête. Les déplacements, mesurés à la verticale du point d'impact, permettent de définir plusieurs grandeurs caractéristiques de la réponse dynamique des murs que sont le glissement à la base (d_{bas}), le déplacement réversible en tête (d_r), le déplacement maximal en tête (d_{max}) et le déplacement horizontal résiduel lié au glissement des blocs les uns par rapport aux autres (d_b) (Fig. 6a). La mobilisation du mur est également décrite par les longueurs d'ouvrage déplacées (Ld) et soulevées par pivotement (Ls), estimées d'après les mesures photogrammétriques et vidéo (Fig. 6b).

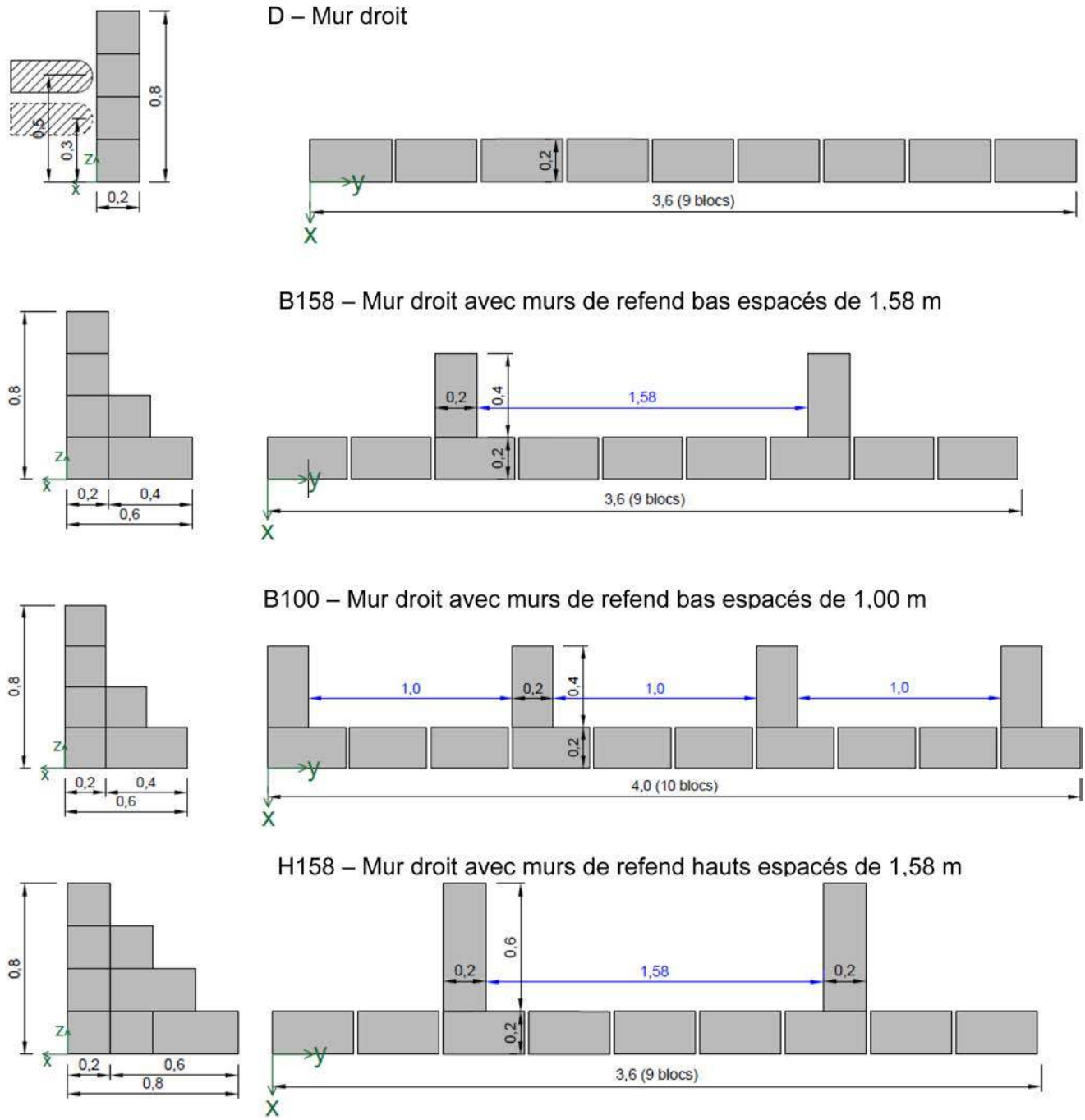

Fig. 4. Configurations des mur testés (a) D : mur droit sans mur de refend ; (b) B158 : mur avec murs de refend bas et un espacement de 1,58 m ; (c) B100 : mur avec murs de refend bas et un espacement de 1,00 m ; (d) H158 : mur avec murs de refend haut et un espacement de 1,58 m.
Fig. 4. *Design of tested walls (a) D: straight wall without partition wall; (b) B158: wall with low partition walls and a space of 1.58 m; (c) B100: wall with low partition walls and a space of 1.00 m; (d) H158: wall with high partition walls and a space of 1.58 m.*

Le pointage vidéo du déplacement d'un point situé en haut du mur dans l'axe d'impact x (Fig. 7a) permet d'obtenir l'évolution temporelle du déplacement (Fig. 7b). En partie haute, pour un impact à 1040 J à une hauteur Hi = 0,5 m sur mur droit, le déplacement du mur augmente régulièrement jusqu'au déplacement maximal, observé à 250 ms environ, avant un retour jusqu'au déplacement résiduel atteint après une durée avoisinant 450 ms.

3.2.2 Influence des murs de refend

Les grandeurs mesurées dans les différentes configurations sont présentées (Tab. 1). L'influence des murs de refend sur la réponse du mur est mise en évidence en prenant comme cas de référence le mur droit. Compte tenu des incertitudes sur les mesures expérimentales, l'analyse est basée sur une comparaison qualitative des résultats.

Fig. 5. Mur droit après impact à 1040 J pour Hi = 0,5 m (a) déformation générale du mur ; (b) état du mur à l'arrière.
Fig. 5. *Straight wall after a 1040 J impact at Hi = 0.5 m (a) wall deformation; (b) back face of the wall.*

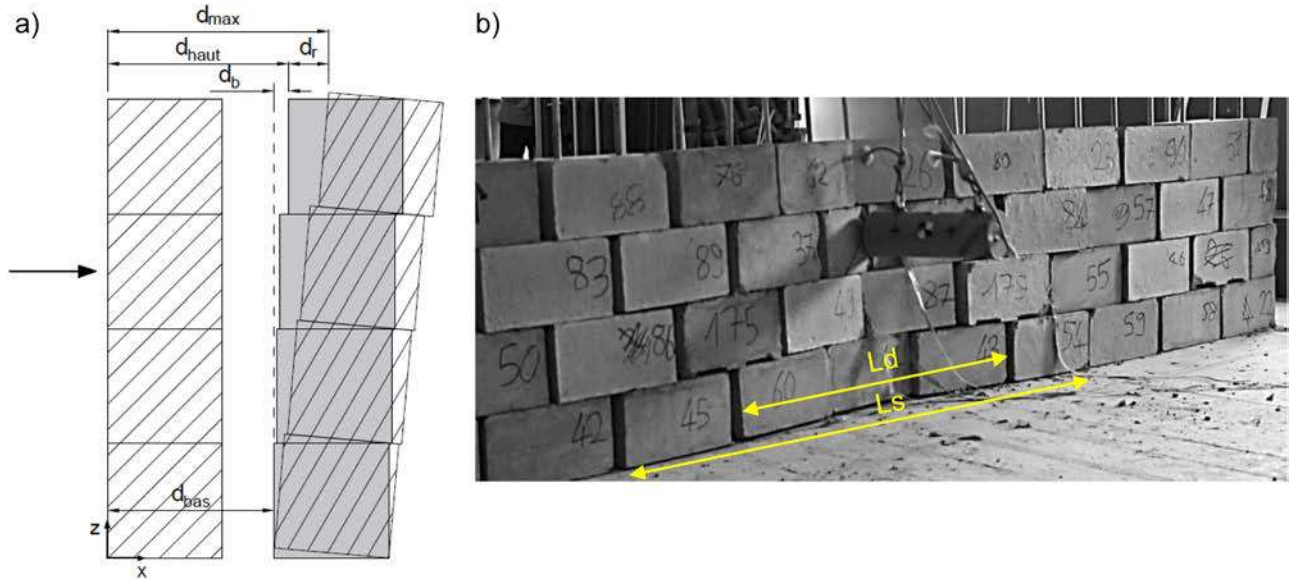

Fig. 6. Grandeurs caractéristiques (a) déplacements dans l'axe d'impact ; (b) longueurs de mur mobilisées en glissement et en soulèvement.
Fig. 6. *Characteristic quantities (a) impact axis displacements; (b) length wall mobilized by sliding and tilting.*

Pour toutes les configurations le déplacement résiduel maximal à la base du mur est réduit en présence de murs de refends. Cette tendance est plus marquée dans le cas d'un impact haut (Hi = 0,5 m). Les mêmes tendances générales se dégagent concernant le déplacement haut résiduel (d_{haut}) et le déplacement haut maximal (d_{max}) (sauf pour B100, Hi = 0,5 m). Le déplacement réversible (d_r) est quant à lui accru en présence de refends, pour les deux hauteurs d'impact. La longueur de mur soulevée (Ls) semble globalement assez peu variable. Le déplacement lié au glissement des blocs est assez faible et est augmenté en amplitude par la présence de murs de refend. On observe qu'un impact en partie basse du mur (Hi = 0,3 m) entraîne un déplacement lié au glissement des blocs (d_b) négatif, ce qui s'explique par un déplacement résiduel bas supérieur au déplacement résiduel haut.

Ces tendances générales peuvent être complétées par l'examen plus détaillé de certains cas, pour évaluer l'influence des refends sur la réponse du mur. Lors de l'impact à Hi = 0,5 m, la longueur de mur déplacée est réduite en présence de refends rapprochés, mais plus grande en présence de refends distants, hauts ou bas. Pour les essais à 1040 J pour Hi = 0,5 m, les murs de refend bas et distants (configuration B158)

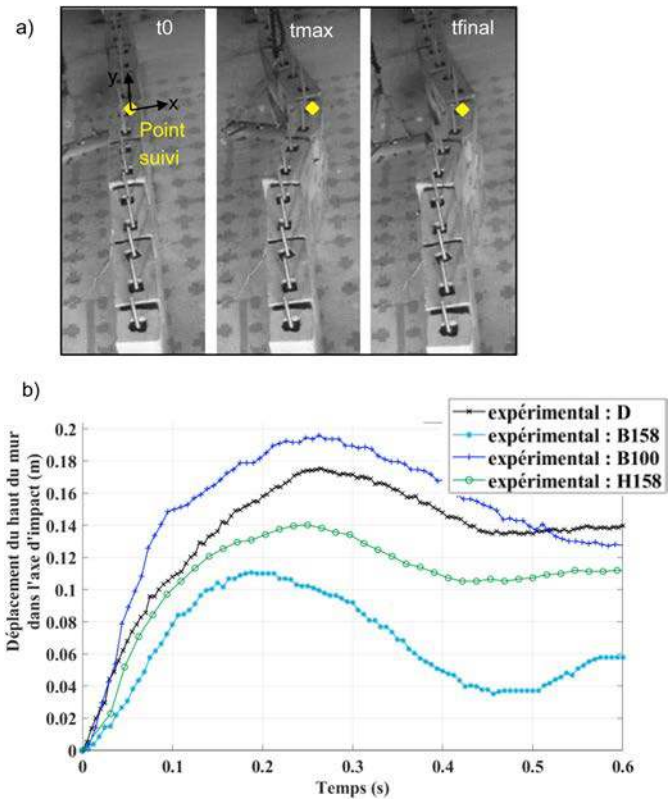

Fig. 7. Suivi du déplacement du haut du mur pour les impacts à Hi = 0,5 m (a) déformée du mur droit (D) pour trois temps caractéristiques ; (b) évolution du déplacement dans l'axe d'impact d'un point haut du mur.
Fig. 7. *Top wall displacements (a) straight wall (D) deformation for three characteristic times method; (b) time evolution of the impact axis displacement at top of the wall.*

permettent de mobiliser une longueur de mur plus grande, réduisant le déplacement maximal par glissement et augmentant le déplacement réversible en tête ; le glissement diminue de 0,14 à 0,07 m et le déplacement réversible augmente de 0,04 à 0,07 m. Ces effets sont amoindris, lorsque la distance entre les murs de refend est réduite (configuration B100) ou que la hauteur des murs de refend est augmentée (configuration H158).

Par comparaison avec les impacts à Hi = 0,5 m, la réponse des murs impactés à Hi = 0,3 m montre une moindre dépendance à la configuration. Cependant les résultats, à Hi = 0,3 m confirment que la présence de murs de refend tend à réduire le glissement et des murs de refend bas et fortement espacés entraînent un déplacement réversible en tête élevé.

La comparaison des configurations avec murs de refend, montre que, dans les conditions d'impact étudiées, des murs de refend bas et espacés permettent de mobiliser une plus grande longueur de mur et ainsi de limiter le glissement maximal en pied. Cependant on observe que cette configuration occasionne un déplacement réversible en tête, associé à un soulèvement de l'ouvrage important. Réduire les espacements entre les murs de refend ou augmenter leur dimension, entraîne une moindre diminution du glissement. Le déplacement réversible est réduit uniquement dans le cas où la dimension des murs est augmentée.

3.2.3 Bilan énergétique partiel

L'énergie transmise au mur lors de l'impact est soit dissipée lors du contact entre l'impactant et le mur (fracturation, endommagement et échauffement des blocs), soit dissipée par déformation ou plastification des armatures, soit transformée en ondes élastiques (qui se dissipent plus ou moins rapidement dans le système), soit transmise sous forme de quantité de mouvement au mur (qui se déplace et se soulève) ou aux fragments de blocs qui se détachent du mur, soit conservée par le système après le choc (énergie cinétique de l'impactant par exemple). Les mesures réalisées lors des essais expérimentaux sont limitées et ne permettent pas de faire un bilan énergétique complet qui permettrait de définir comment l'énergie d'impact est transmise au système. Elles ont néanmoins permis d'estimer l'énergie dissipée par frottement lors du glissement du mur sur la base, l'énergie nécessaire au soulèvement du mur et l'énergie cinétique transmise aux fragments de blocs de béton projetés. L'énergie cinétique de l'impactant après l'impact, supposée faible, n'a pas pu être quantifiée précisément.

Si on définit P_{depl}, le poids de mur déplacé, $\phi_{bloc/base}$ l'angle de frottement à l'interface entre les blocs et la base et d_{moy} le déplacement moyen du mur (déplacement maximal divisé par 2 pour une déformée en V), on peut exprimer l'énergie dissipée par frottement à la base par :

$$E_{frot,base} = P_{depl} \times \tan\phi_{bloc/base} \times d_{moy}. \quad (1)$$

L'angle de frottement dynamique de 20° (Sect. 4.1) est retenu pour le calcul de la force de frottement agissant à la base.

Tableau 1. Impacts à 1040 J : comparaison des résultats entre le mur droit et les murs avec murs de refend, Hi = 0,5 m et Hi = 0,3 m.
Table 1. *1040 J impact: results comparison between straight wall and walls with partition walls, Hi = 0.5 m and Hi = 0.3 m.*

1040 J– Hi = 0,5 m	**Configurations**			
Déplacement selon l'axe *x* (m)	D	B158	B100	H158
Déplacement bas résiduel (d_{bas})	0,14 ± 0,01	0,07 (−)	0,09 (−)	0,1 (−)
Déplacement haut maximal (d_{max})	0,18 ± 0,01	0,14 (−)	0,2 (+)	0,16 (−)
Déplacement haut résiduel (d_{haut})	0,14 ± 0,01	0,07 (−)	0,12 (−)	0,12 (−)
Déplacement réversible en tête ($d_r = d_{max} - d_{haut}$)	0,04 ± 0,01	0,07 (+)	0,08 (+)	0,04 (=)
Déplacement lié aux glissement des blocs ($d_b = d_{haut} - d_{bas}$)	0 ± 0,01	0 (=)	0,03 (+)	0,02 (+)
Longueur de mur déplacée (Ld)	1,2 ± 0,1	1,6 (+)	1 (−)	1,4 (+)
Longueur de mur soulevée (Ls)	1,6 ± 0,1	1,4 (−)	1,6 (=)	1,6 (=)
1040 J– Hi = 0,3 m	**Configurations**			
Déplacement selon l'axe *x* (m)	D	B158	B100	H158
Déplacement bas résiduel (d_{bas})	0,13 ± 0,01	0,11 (−)	0,13 (=)	0,11 (−)
Déplacement haut maximal (d_{max})	0,15 ± 0,01	0,14 (−)	0,14 (−)	0,11 (−)
Déplacement haut résiduel (d_{haut})	0,12 ± 0,01	0,08 (−)	0,11 (−)	0,08 (−)
Déplacement réversible en tête ($d_r = d_{max} - d_{haut}$)	0,03 ± 0,01	0,06 (+)	0,03 (=)	0,03 (=)
Déplacement lié aux glissement des blocs ($d_b = d_{haut} - d_{bas}$)	−0,01 ± 0,01	−0,03 (+)	−0,02 (+)	−0,03 (+)
Longueur de mur déplacée (Ld)	0,8 ± 0,1	1 (+)	1 (+)	1,2 (+)
Longueur de mur soulevée (Ls)	1,6 ± 0,1	1,4 (−)	1,6 (=)	1,6 (=)

Note: (−) diminution (+) augmentation (=) maintient– de la valeur par rapport à la référence du mur droit.

L'énergie nécessaire au soulèvement du mur est calculée en considérant le poids du mur déplacé multiplié par la hauteur moyenne d'élévation (soulèvement maximal divisé par 4 puisque le soulèvement est nul au niveau de l'arête arrière du mur). L'énergie cinétique des fragments de blocs éjectés est déterminée à partir de la masse éjectée et de la vitesse de projection, mesurée par pointage vidéo.

Les bilans concernant les impacts pour Hi = 0,5 m sur les différentes configurations (Fig. 8) révèlent que l'exploitation des images permet d'attribuer à ces mécanismes dissipatifs moins de 15 % de l'énergie d'impact. Toutefois, ces résultats révèlent que les mécanismes dissipatifs et leur amplitude sont variables d'une configuration à l'autre. Le glissement à la base est un mécanisme dissipatif prédominant pour le mur droit. Ce mécanisme dissipe moins pour la configuration B100, du fait d'un moindre glissement basal. Également, l'apparition de projections de béton et l'augmentation du soulèvement du mur s'accompagnent d'une réduction de l'énergie dissipée par glissement du mur

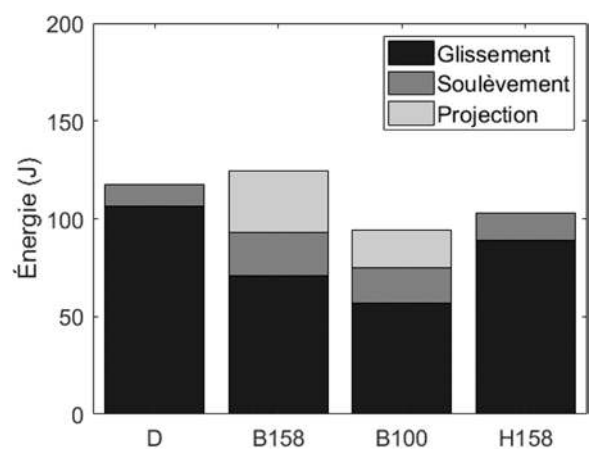

Fig. 8. Bilan d'énergie partiel lors d'un impact à 1040 J sur mur droit pour Hi = 0,5 m.
Fig. 8. *Partial assessment of the dissipated energies for a 1040 J impact on straight wall at Hi = 0.5 m.*

4 Modélisation numérique

4.1 Présentation du modèle

Le modèle numérique (Fig. 9) est composé d'un ensemble de blocs liés entre eux par un réseau d'éléments structurels représentant les barres et les plaques. Les blocs sont modélisés par des éléments volumiques dont les dimensions sont identiques à celles des blocs réels. Les blocs sont disposés en quinconce en considérant une disposition analogue à celle de la structure réelle. Le mur repose sur un support peu déformable (base).

Une condition absorbante est imposée aux bords latéraux et à la surface inférieure de la base. De telles conditions permettent de considérer une continuité du milieu de part et d'autre de la limite sans qu'il n'y ait de réflexion d'ondes élastiques. Dans la procédure de calcul proposée par FLAC3D, des forces extérieures, opposées aux charges statiques, sont

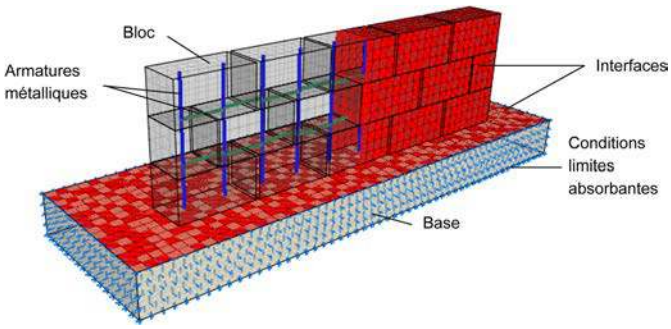

Fig. 9. Modèle de la structure dans FLAC3D, blocs en milieux continus en contact par des interfaces et liaisonnés par des éléments structurels.
Fig. 9. *FLAC3D model of the structure, blocks using continuum contacting to each other's thanks to interfaces and interconnected using structural elements.*

utilisés en remplacement de conditions de fixité aux nœuds. Par la suite, les déplacements à la périphérie du modèle, générés par les ondes élastiques, sont amortis par des forces visqueuses.

Le comportement des blocs est régi par la loi de comportement élasto-plastique, appelée Mohr-Coulomb dans FLAC3D, caractérisée par un comportement élastique et une rupture plastique combinant le critère de Mohr-Coulomb et un critère de rupture en traction. Cette loi de comportement a été choisie car, sans décrire très finement la dégradation mécanique du béton, elle permet de prendre en compte la dissipation d'énergie liée à sa plastification. Une telle représentation du béton est suffisante pour l'utilisation du modèle dans un objectif de description du comportement global de l'ouvrage. Des essais expérimentaux de compression et de fendage sur des éprouvettes, ont permis de définir les valeurs de la résistance à la traction, du module d'élasticité, de la cohésion et de l'angle de frottement interne du béton des blocs. Le coefficient de Poisson est choisi d'après la littérature (Chen, 1982) et l'angle de dilatance est fixé à une valeur nulle

Une loi de comportement élastique est choisie pour la base et l'impactant qui ne sont pas déformés plastiquement lors des essais. La valeur du module d'élasticité de l'impactant est fixée à deux fois celui des blocs et le module d'élasticité de la base est égal à celui des blocs. Les paramètres retenus pour les milieux continus sont présentés dans le tableau 2.

Les contacts entre les différents éléments sont gérés par des interfaces pour lesquelles les paramètres de rupture sont choisis pour modéliser au mieux le comportement réel des interactions. Les interfaces, purement frottantes dans notre cas, présentent des valeurs de cohésion et de résistance à la traction nulles. Les valeurs des angles de frottement aux interfaces bloc/bloc et bloc/base, déterminées expérimentalement par des essais statiques, sont réduites de 25 % pour prendre en compte le caractère dynamique de la sollicitation. Cette valeur est en accord avec les observations faites dans la littérature pour d'autre types d'interfaces (Stoltz *et al.*, 2012) et a été validée numériquement par une étude paramétrique. Les rigidités sont définies de façon à garantir la non pénétration des éléments et une mobilisation rapide du frottement maximal. Itasca, éditeur du logiciel, conseille de fixer les rigidités de l'interface à une

Tableau 2. Valeurs des paramètres des milieux continus.
Table 2. *Parameters for the continuum materials.*

Paramètre	Blocs	Base	Impactant
Module de Young (Pa)	$5{,}8 \times 10^9$	$5{,}8 \times 10^9$	$1{,}1 \times 10^{10}$
Coefficient de Poisson (−)	0,2	0,2	0,2
Angle de frottement (°)	55	–	–
Cohésion (Pa)	$5{,}9 \times 10^6$	–	–
Angle de dilatance (°)	0	–	–
Résistance à la traction (Pa)	$2{,}9 \times 10^6$	–	–

valeur dix fois supérieure à la plus haute rigidité équivalente des matériaux environnant l'interface. La valeur est calculée par :

$$k = 10 \times \max\left[\frac{K + \frac{4}{3}G}{\Delta zmin}\right]. \quad (2)$$

Avec K et G les rigidités normale et tangentielle des matériaux et Δzmin la plus petite dimension dans la direction normale des zones adjacentes à l'interface.

La définition des rigidités suivant ce critère au niveau des interfaces entre le mur et la base s'est avéré dans certains cas problématique. En effet, sur plusieurs dizaines de millisecondes après l'impact, un léger soulèvement du mur peut se produire, se traduisant dans certains cas, par un décollement de quelques dixièmes de millimètres du mur sur une grande surface, compte tenu, qu'avec une rigidité d'interface forte, l'interpénétration initiale du bloc et de la base sous poids propre est extrêmement faible. Pour limiter ce phénomène et après avoir vérifié que l'effet sur les résultats reste limité, les rigidités aux interfaces blocs/base sont divisées d'un facteur 10 par rapport au critère proposé par Itasca. Les valeurs non nulles des propriétés des interfaces sont données dans le tableau 3.

Les armatures métalliques sont modélisées à l'aide d'éléments structurels linéiques existants dans FLAC3D. Les éléments appelés « câbles », présentant un comportement axial élasto-plastique parfait, sont utilisés pour modéliser les plaques métalliques disposées entre les barres.

Les éléments appelés « pieux », possèdent, en plus du comportement axial élasto-plastique, une résistance à la flexion et au cisaillement et une déformation limite de rupture. Ces éléments sont utilisés pour modéliser les barres de liaison verticale. Dans le cadre des essais à échelle réduite, aucune rupture des barres n'a été constatée.

Les jeux en déplacement existants entre les blocs, les barres et les plaques sont pris en compte dans le modèle numérique. Un type de lien déformable, agissant comme un ressort, est appliqué entre les nœuds des éléments structurels représentant les armatures et les zones des blocs. La bascule de la rigidité du ressort d'une valeur nulle à une valeur très élevée permet d'autoriser le déplacement à hauteur des jeux réels et de créer une butée entre les armatures et les blocs quand le déplacement tend à dépasser le jeu autorisé. Selon le même principe, un lien de type déformable est ajouté dans l'axe des barres pour prendre en compte le fait que les boulons n'étaient pas parfaitement serrés aux extrémités des barres et permettre

Tableau 3. Valeurs des paramètres des interfaces.
Table 3. *Parameters for the interfaces.*

Paramètre	bloc/base	bloc/boc	bloc/impactant
Angle de frottement (°)	20	17	30
Rigidité normale (Pa/m)	$1{,}3 \times 10^{11}$	$1{,}3 \times 10^{12}$	$4{,}0 \times 10^{12}$
Rigidité tangentielle (Pa/m)	$1{,}3 \times 10^{11}$	$1{,}3 \times 10^{12}$	$4{,}0 \times 10^{12}$

une liberté de déplacement d'une l'amplitude maximale de 6 mm.

L'impact est modélisé par contact direct d'un impactant sur la structure. La masse et la vitesse de l'impactant sont conformes aux conditions expérimentales. La géométrie de l'impactant ainsi que sa masse volumique (Fig. 10b) ont été légèrement modifiés par soucis de simplification et pour que la masse de l'impactant soit conservée. Les simulations sont réalisées après avoir activé les options dynamiques et grandes déformations et sans ajout d'amortissement numérique artificiel. Le pas de temps de la simulation est de l'ordre de 5×10^{-7} s. Le temps de simulation est d'environ 10 h pour une simulation de 0,6 s (matériel Intel®Core™ i7-6700K CPU @4.00 GHz, 32 Go de RAM).

4.2 Résultats numériques sur mur droit

4.2.1 Déformations du mur

Les résultats numériques avec le mur droit impacté à 1040 J font apparaître une déformée en V similaire entre l'expérimental et le numérique (Figs. 10a et 10b). Les amplitudes de déplacement pour l'ensemble du mur sont reproduites par le modèle numérique avec une sous-estimation de l'ordre de 15 %.

La comparaison de l'évolution du déplacement du point haut du mur avec les résultats expérimentaux issus du pointage vidéo montre une cinématique proche. Cependant, on note un déplacement réversible numérique plus faible en tête. Cet écart est attribué à l'absence de fracturation des blocs numériques qui limite les déplacements lorsque deux blocs entrent en contact, comme c'est le cas en haut du mur dans l'axe de l'impact. Dans l'ensemble, les résultats confirment une bonne description du comportement dynamique de la structure par le modèle numérique et une capacité du modèle à estimer le glissement à la base, les déplacements entre blocs et le soulèvement (Fig. 10c).

Numériquement, la fracturation ne peut être reproduite explicitement du fait de l'utilisation d'un milieu continu. Cependant la loi de Mohr-Coulomb intègre les déformations plastiques en cisaillement et en traction du matériau (Fig. 11a). Malgré sa simplicité, la loi de comportement utilisée induit de la plastification des blocs au droit de l'impact et au niveau des blocs déplacés. Le modèle numérique permet de reproduire de manière réaliste la cinématique de l'ouvrage et de rendre compte globalement de la quantité d'énergie dissipée lors de la dégradation des blocs de béton (fissuration ou épaufrures, Fig. 11b).

Cependant les déformations plastiques de ces zones ne semblent pas suffisantes pour autoriser de plus amples déplacements lors de contacts entre blocs. Cela explique en partie les déplacements de plus faible amplitude observés numériquement

Les déformations plastiques du béton représentent une source de dissipation d'énergie importante et sa prise en compte est nécessaire pour une bonne représentation du comportement global de l'ouvrage.

4.2.2 Dissipation d'énergie

Les estimations réalisées d'après les résultats expérimentaux sont basées sur des hypothèses fortes et de nombreuses simplifications. Elles ne prennent pas en compte de nombreuses sources de dissipation d'énergie telles que l'endommagement plastique des blocs en béton ou le frottement lié au déplacement des blocs les uns par rapport aux autres qui sont difficilement quantifiables sur la base d'observations visuelles.

Les simulations numériques et le développement de fonctions spécifiques, à l'aide du langage Fish intégré au logiciel FLAC3D, rendent possible le calcul de différentes sources de dissipation d'énergie.

Pour l'essai d'impact à 1040 J pour Hi = 0,5 m de haut sur le mur droit, l'énergie dissipée par frottement est de 132 J, entre le mur et la base et une énergie de 266 J au niveau des contacts entre blocs. Ces quantités d'énergie est obtenue par cumul des énergies dissipées par frottement à chaque pas de temps calculées en considérant les efforts tangentiels à l'interface et les accroissements de déplacement relatifs aux interfaces. La plastification des blocs, dissipe une énergie de l'ordre de 360 J (Fig. 12a). Elle est calculée directement par FLAC3D en fonction des déformations déviatoire et volumique des zones.

L'endommagement et le déplacement des blocs en béton dissipent au total 70 % de l'énergie d'impact. Le reste de la dissipation (30 %) est attribué à la déformation des éléments structurels et aux ondes élastiques qui se propagent dans le modèle.

On observe que, la proportion d'énergie dissipée par déformation plastique, de l'ordre de 35 %, est plus faible que pour les ouvrages en terre ou la dissipation par compaction du matériau atteint de 75 à 80 % de l'énergie d'impact (Ronco *et al.*, 2009 ; Kister et Fontana, 2011). Dans de tels murs, une part importante de l'énergie est consommée dans les frottements qui dissipent presque 40 % de l'énergie d'impact.

La dissipation par frottement basal issue des résultats numériques est supérieure à l'estimation faite d'après les mesures expérimentales (149 J pour 106 J). Cette différence est attribuée au fait que les éventuelles augmentations de contraintes du mur sur la base dues à la sollicitation d'impact sont négligées dans la méthode expérimentale qui considère une force constante, égale au poids du mur.

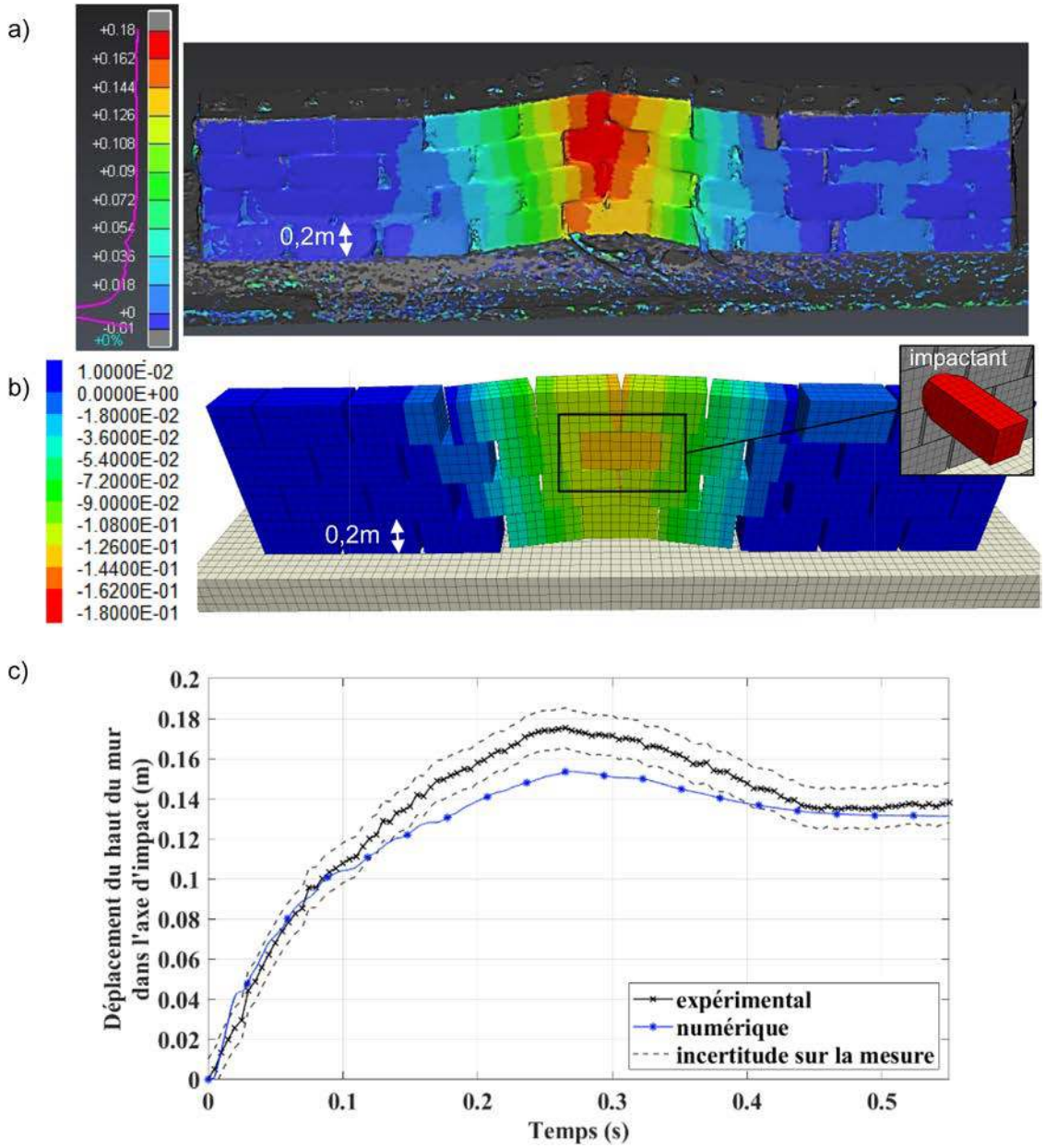

Fig. 10. Déformation d'un mur droit après un impact à 1040 J à Hi = 0,5 m (a) résultat expérimental ; (b) résultat numérique ; (c) comparaison de l'évolution du déplacement du point haut du mur au droit de l'impact.

Fig. 10. *Straight wall deformation after a 1040 J impact at Hi = 0.5 m (a) experimental results; (b) numerical results; (c) time evolution of the impact axis displacement at top of the wall.*

L'évolution temporelle de la dissipation d'énergie totale calculée dans la simulation fait apparaître une évolution très rapide en début d'impact, jusqu'à 30 ms, qui diminue ensuite progressivement jusqu'à se stabiliser au bout de 300 ms (Fig. 12b).

Les différents mécanismes dissipatifs sont mobilisés à différents instants. La plastification dans les premiers instants est liée à l'endommagement du béton au voisinage du point d'impact et constitue une part importante de l'énergie dissipée par plastification au sein du mur, sur la durée de la simulation. Par la présence du jeu dans l'assemblage d'armatures, le bloc impacté se déplace seul avant la mise en œuvre du déplacement global de la structure sur la base, par mobilisation des armatures. Les augmentations des dissipations d'énergie, respectivement rapide pour le frottement entre blocs et tardive pour le frottement des blocs sur la base, confirment cette cinématique. Les calculs montrent que les déplacements relatifs entre blocs, même s'ils sont limités par les faibles jeux transversaux tolérés dans l'assemblage d'armatures, sont fortement dissipatifs.

5 Conclusions

Les essais d'impact réalisés sur des murs à échelle réduite ont permis d'observer le comportement dynamique de différents types de murs pare-blocs élancés.

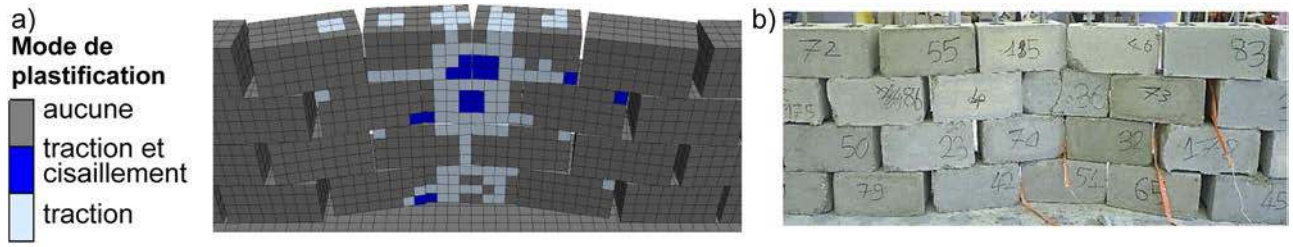

Fig. 11. État de plastification du mur après impact (a) zones plastifiées et mode de plastification dans le modèle numérique ; (b) endommagement du mur réel, fracturé au droit de l'impact.
Fig. 11. *Wall damage after impact (a) plastic zones and plasticization types in the numerical model; (b) damage of the real wall, cracked at the impact location.*

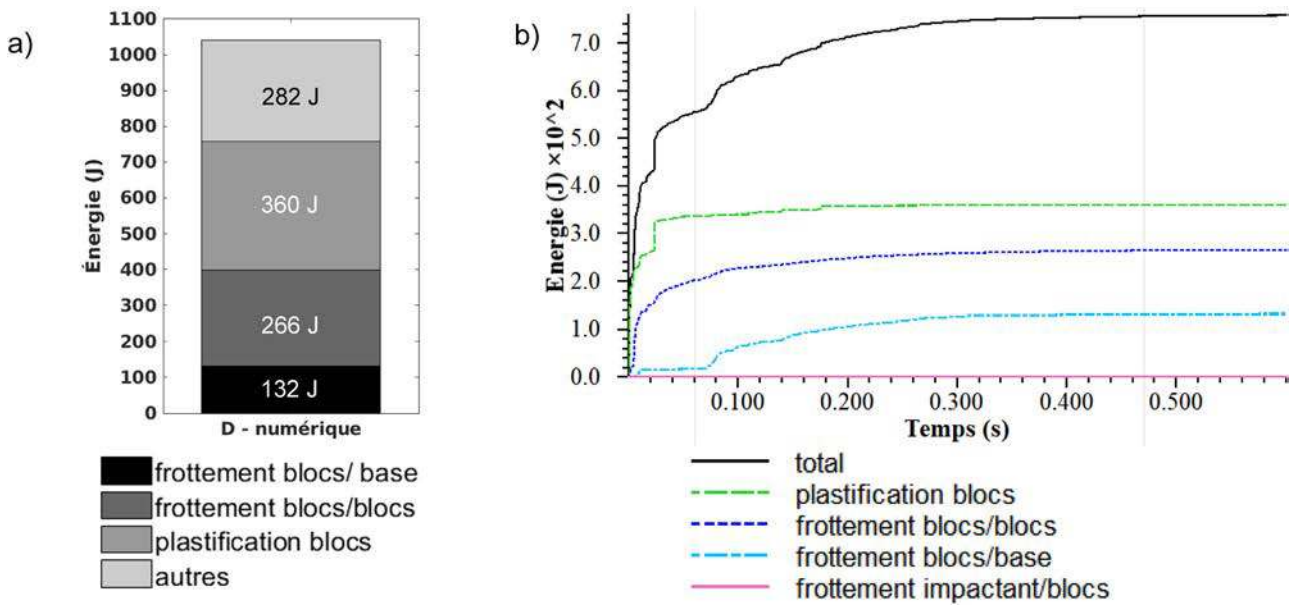

Fig. 12. Dissipation d'énergie pour un impact à 1040 J à Hi = 0,5 m sur mur droit (a) bilan des énergies dissipées par différents mécanismes ; (b) dissipation d'énergie au cours du temps.
Fig. 12. *Energy dissipation for a 1040 J impact at Hi = 0.5 m on straight wall (a) dissipated energies by different mechanisms; (b) time evolution of the energy dissipation.*

La transmission latérale des efforts a été mise en avant par la mobilisation du mur sur toute sa hauteur et sur une longueur allant de 2 à 4 blocs. L'impact entraîne un glissement du mur sur la base et un soulèvement de celui-ci. La mise en place de murs de refend réduit le glissement et augmente le soulèvement, en particulier lorsque les murs de refend sont de faibles dimensions et espacés. Ces résultats permettent de faire des préconisations quant à la conception d'ouvrages en blocs modulaires liaisonnés.

Comme démontré ici sur la configuration « mur droit », le modèle numérique développé permet d'accéder à une bonne estimation du comportement de la structure en déplacement. La capacité du modèle numérique à rendre compte du comportement des murs avec murs de refends a par ailleurs pu être démontrée de manière satisfaisante.

D'autre part, la modélisation détaillée de chacun des éléments de l'assemblage rend possible l'étude des phénomènes physiques impliqués lors de l'impact. La dissipation d'énergie par de nombreux mécanismes, parfois difficilement mesurables expérimentalement, peut être quantifiée. En effet, les calculs numériques permettent d'appréhender le frottement entre blocs ou la dissipation par déformation plastique des blocs qui sont des mécanismes fortement dissipatifs et complexes à observer expérimentalement.

En parallèle de l'étude à échelle réduite, des essais d'impact à échelle réelle ont été réalisés. Le développement d'un modèle numérique à cette échelle et l'analyse des résultats sont toujours en cours mais les premières confrontations montrent que, là encore, le modèle numérique donne des résultats très satisfaisants. On peut ainsi espérer que ces travaux déboucheront sur un outil de conception et de dimensionnement utilisable en ingénierie et dont la robustesse aura été vérifiée.

Remerciements. Ces travaux ont été réalisés dans le cadre et avec le soutien financier du projet national C2ROP. Les auteurs tiennent à remercier les personnels et les étudiants de l'IUT Génie Civil et Construction Durable de Grenoble qui ont contribué à la réalisation des essais. Les auteurs remercient la société Itasca pour l'aide obtenue dans le cadre d'un partenariat (IEP).

Références

Chen WF. 1982. Plasticity in reinforced concrete. Mc Graw Hill.

Green R, Lambert C, Watts C, Kennett D, Ryder E. 2018. Development and testing of a modular rockfall protection wall to mitigate earthquake-induced slope hazards. In: *69th Highway Geology Symposium, Sept. 2018*.

Itasca Consulting Group Inc. 2017. FLAC3D Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions. User's Guide, version 6.

Kister B, Fontana O. 2011. On the evaluation of rockfall parameters and the design of protection embankments – a case study. In: *Proceeding of Interdisciplinary Workshop on Rockfall Protection – Rocexs*, 2011, Innsbruck, Austria, pp. 31–32.

Korini O, Bost M, Rajot JP, Braouli BY, Freitag N. 2019. Experimental study of reinforced soil bunds subjected to horizontal impact. In: *14th International Congress on Rock Mechanics and Rock Engineering (ISRM), Sept 2019*, Foz do Iguassu, Brazil.

Lam NTK, Yong ACY, Lam C, *et al.* 2018. Displacement-based approach for the assessment of overturning stability of rectangular rigid barriers subjected to point impact. *J Eng Mech* 144(2).

Lambert S, Bourrier F. 2013. Design of rockfall protection embankments: a review. *Eng Geol* 154(28): 77–88.

Lambert S, Bourrier F, Gotteland P, Nicot F. 2020. An experimental investigation of the response of slender protective structures to rockfall impacts. *Can Geotech J*. https://doi.org/10.1139/cgj-2019-0147.

Lorentz J, Jarrin J-P, Meignan L, Leroux Mallouf R. 2018. Bloc Armé© – Landslides passive protective structure. In: *4th International Symposium Rock Slope Stability, Nov. 2018*, Chambéry, France, pp. 105–106.

Ronco C, Oggeri C, Peila D. 2009. Design of reinforced ground embankments used for rockfall protection. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 9: 1189–1199.

Stoltz G, Gallo R, Poulain D, Touze-Foltz N. 2012. Testing procedure with an inclined plane device to assess the residual friction characteristics at geosynthetics interfaces. In: *EUROGEO 5, Sep 2012*, Valence, Spain, 5 p. hal-00763353.

Yong ACY, Lam C, Lam NTK, Perera JS, Kwan JSH. 2019. Analytical solution for estimating sliding displacement of rigid barriers subjected to boulder impact. *J Eng Mech* 145(3).