

# MODÈLE NUMÉRIQUE D'UN MUR PARE-BLOCS INNOVANT : DÉVELOPPEMENT ET UTILISATION AVANCÉE

## NUMERICAL MODEL OF INNOVATIVE ROCKFALL PROTECTION WALL: DEVELOPMENT AND ADVANCED USE

Agathe FURET<sup>1</sup>, Stéphane LAMBERT<sup>2</sup>, Ritesh GUPTA<sup>2</sup>, Franck BOURRIER<sup>2,3</sup>, and Julien LORENTZ<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Géolithe, Groupe Géolithe 181 rue des Bécasses 38920 Crolles, France

<sup>2</sup> Univ. Grenoble Alpes, INRAE, CNRS, IRD, Grenoble INP, IGE, 38000 Grenoble, France

<sup>3</sup> Univ. Grenoble Alpes, Inria, CNRS, Grenoble INP, Institute of Engineering, LJK, 38000 Grenoble, France

**RÉSUMÉ** – L'article présente d'abord un modèle numérique simulant la réponse d'ouvrages pare-blocs modulaires soumis à impacts de blocs rocheux. Ces simulations peuvent être utilisées pour étudier le comportement de l'ouvrage sous conditions d'impact variées ou, lors d'un événement sur ouvrage réel, être couplées à des mesures pour estimer à distance l'état de l'ouvrage ou les caractéristiques de l'impact.

**ABSTRACT** – The article first presents a numerical model simulating the response of modular rockfall protection structures subjected to rockfall impacts. These simulations can be used to study the response of the structure to various impact conditions. Also, during an event on a real structure, the model can be coupled with measurements on the structure to remotely estimate the damage of the structure or the impact conditions.

### 1. Introduction

L'augmentation des risques naturels accentue le besoin de développer des nouvelles solutions pour l'aménagement de territoires souvent contraints par le relief. Une technologie innovante, constituée de blocs préfabriqués en béton et liaisonnés entre eux par des armatures métalliques, permet de construire des ouvrages de faible emprise au sol, particulièrement bien adaptés à la protection contre les aléas gravitaires, et notamment la chute de blocs rocheux. Plusieurs ouvrages de ce type ont été construits en réponse à des exigences variées. Après une coulée de boue, un ouvrage linéaire ancré a été construit pour rétablir la circulation en urgence tout en protégeant l'axe routier. Cette technologie a également permis de protéger un supermarché d'un aléa de chute de blocs rocheux, en optimisant la facilité de mise en œuvre et les interruptions de service en cas d'évènement (Furet et al., 2022a).

Des essais d'impact à haute énergie (plusieurs milliers de kJ) sur des ouvrages à échelle réelle ont permis de démontrer la résistance de la technologie et d'étudier le comportement des ouvrages (Furet et al., 2022b). Les résultats de ces essais ont validé la robustesse de plusieurs modèles numériques innovants permettant de simuler des impacts sur des ouvrages utilisant cette technologie. Ces campagnes expérimentales ont également contribué au développement de capteurs autonomes embarqués dans les ouvrages. L'ensemble de ces travaux ont été réalisés dans le cadre du projet Smart-Protect, financé par la région Auvergne Rhône-Alpes.

Cette communication s'intéresse à un modèle numérique développé par une approche de dynamique non régulière des contacts (NSCD, pour *Non Smooth Contact Dynamics*) avec la plateforme Siconos (Acary et Perignon, 2007). La première partie est consacrée à la description du modèle et de sa calibration à partir des essais menés à échelle réelle. Puis sont présentés des résultats issus d'une utilisation avancée du modèle sur le cas particulier des murs en zig-zag testés expérimentalement. Enfin, des travaux sont

présentés pour démontrer comment des analyses inverses pourraient être conduites sur la base de mesures faites sur le mur durant un évènement, dans l'objectif d'estimer à distance et de manière rapide (< 1h) l'état de l'ouvrage ou les caractéristiques de l'évènement.

## 2. Technologie et ouvrages

### 2.1. Description de la technologie pare-blocs

Les ouvrages étudiés sont constitués de blocs de béton préfabriqués, assemblés en quinconce. Les blocs sont reliés entre eux par des tubes métalliques insérés dans des réservations traversant les blocs verticalement. Un « jeu » permet aux tubes de se déplacer dans les réservations. Des élingues verticales installées sur toute la hauteur du mur peuvent être ajoutées, notamment dans le cas d'impact à énergie élevée, afin de limiter les mouvements verticaux des blocs (Figure 1).

L'innovation réside dans la présence des armatures métalliques et dans les déplacements permis au sein des ouvrages, résultant de l'espace laissé entre les tubes et les blocs de béton et entre les blocs de béton contigus. Les éléments métalliques, en assurant une continuité mécanique entre les blocs, favorisent le transfert d'effort au sein de la structure tout en limitant le développement de forces d'impact élevées. La technologie permet de mettre en œuvre facilement des ouvrages de faible emprise au sol dans des configurations variées (rectilignes, courbes, en zig-zag, avec ou sans renforcements extérieurs, ...), en fonction des caractéristiques morphologiques du site, des phénomènes attendus (dont l'énergie d'impact), ainsi que des besoins opérationnels.

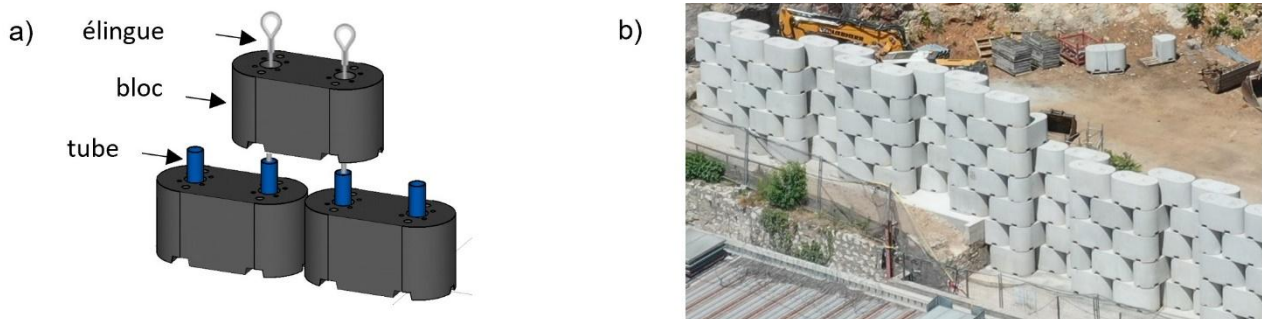


Figure 1. a) Schéma de l'assemblage des composants principaux, b) Ouvrage réel en fin de montage.

### 2.2. Essais d'impact

Des essais d'impact ont été réalisés sur des murs en zig-zag de 3,2 m de haut. Les essais ont été réalisés à l'aide du système pendulaire du site d'essais de l'Université Gustave Eiffel (Montagnole, France). Deux murs identiques ont été construits à l'échelle réelle et soumis à un impact subhorizontal d'énergie différente par un projectile en béton armé de 2600 kg et de largeur 1,1 m (forme conforme au guide d'agrément européen des écrans de filet, etag-27). Les vitesses à l'impact sont de 20 m/s et 28 m/s, correspondant respectivement à des énergies cinétiques de 520 kJ et 1020 kJ. Le projectile a percuté la structure à mi-longueur et à environ 1,7 m du sol, avec un angle d'incidence et une vitesse de rotation nuls (Figure 2a). La réponse à l'impact de la structure est décrite à partir de mesures de déplacement faites le long de deux axes verticaux : l'« axe d'impact » aligné au point d'impact, et l'« axe distant » décalé de 3,5 m sur sa gauche (Figure 2b). Le déplacement du mur est mesuré au cours du temps sur ces axes : au sommet et à la base pour l'axe d'impact (mesure par caméras rapides) ; aux points C et D pour l'axe distant (mesure par extensomètres à câble).

Ces essais ont permis de quantifier les déplacements maximaux résiduels (0,9 m et 1,4 m respectivement pour des impacts de 520 kJ et 1020 kJ) et de mesurer la déformée des murs par photogrammétrie. Le comportement des ouvrages soumis à impact a également été identifié : déplacements relatifs des blocs, glissement du mur à la base, léger soulèvement puis léger basculement du mur au droit de l'impact, fracturation des blocs impactés. La réponse dynamique de la structure se caractérise aussi par le décalage en temps entre l'initiation des déplacements entre les axes d'impact et distant. Pour l'impact à 1020 kJ, une différence d'amplitude significative du déplacement entre le bloc bas et le bloc haut est observée pour les deux axes mesurés. Cette différence provient d'une inclinaison rémanente et de déplacements relatifs entre les blocs le long d'un même axe vertical.

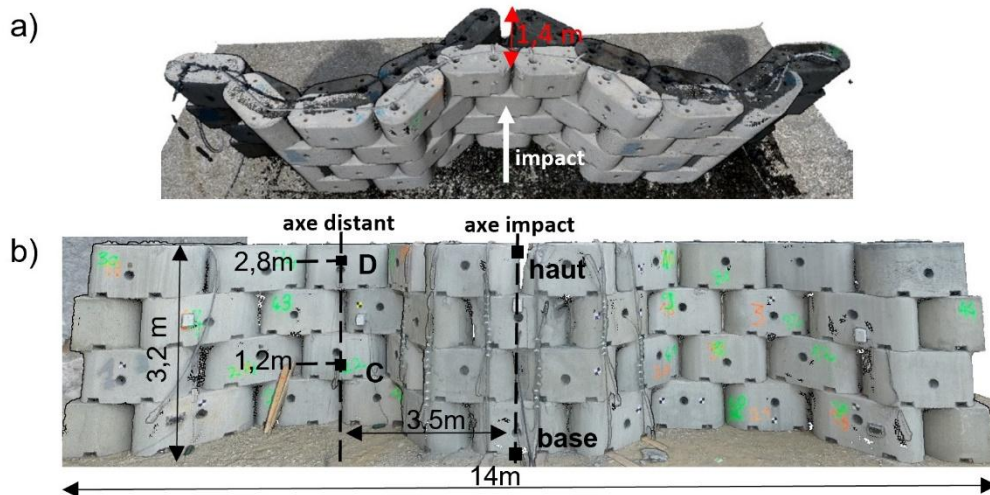


Figure 2. Essais d'impact sur ouvrage en zig-zag : a) Déformée du mur après impact à 1020 kJ superposée au mur avant impact, b) Points instrumentés sur le mur.

### 3. Modélisation et calibration

L'ouvrage de protection contre les chutes de bloc rocheux est modélisé numériquement à l'aide du logiciel SICONOS, qui implémente en langage Python la méthode NSCD avec des formes complexes (Acary and Perignon, F., 2007). Cette méthode a été développée pour résoudre des problèmes multi-corps, rigides ou déformables, avec multi-contacts régis par des lois de contact rigides.

Le système est ici modélisé par un ensemble de blocs rigides en interactions décrites par des contraintes unilatérales de frottement de Coulomb. Les sauts de vitesse, caractéristiques d'un impact et de la dynamique de corps rigides en interaction, sont pris en compte par l'introduction d'une loi d'impact. Les calculs aux contacts sont fonction des coefficients de frottement ( $\mu$ ) et de restitution ( $e$ ) fixés par l'utilisateur. Dans ce modèle,  $e$  est inférieur à 1, et représente globalement la dissipation d'énergie due à la plasticité et à la fracturation des éléments. Les termes non impulsionsnels de la dynamique sont approximés avec une méthode  $\theta$ . Avec  $\theta = 1$ , plus adapté pour des calculs quasi-statiques, le schéma est implicite et maximise la dissipation numérique. Ici, avec  $\theta = 1/2$ , l'énergie mécanique totale est conservée, et le calcul suit un schéma robuste et stable avec des pas de temps relativement grands. Cette méthode est donc particulièrement intéressante pour la simulation d'impacts sur ouvrages de protection, en permettant l'analyse des processus de dissipation d'énergie avec des temps de calculs faibles (20 min de temps de calcul pour 1s de simulation). Les spécificités de la structure peuvent être implémentées : forme des blocs de béton, présence d'éléments structurels traversant les blocs, interaction complexe entre les différents composants, et notamment les jeux en déplacement. Chaque élément du mur est modélisé comme un assemblage de formes

*primitives* utilisées pour la détection des contacts (Figure 3). L'interaction entre les différents éléments est contrôlée au travers de *connecteurs* (pour plus de détails, voir Gupta et al, 2023).

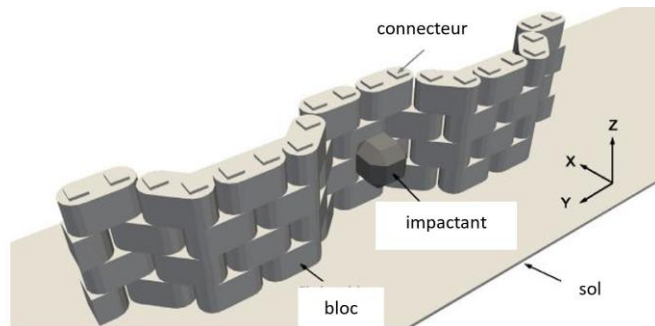


Figure 3. Modélisation NSCD du mur en zig-zag (issu de Gupta et al, 2023).

Les propriétés mécaniques et géométriques du modèle sont directement tirées de la structure réelle (Furet, 2022b). Néanmoins, cinq paramètres sont difficiles à mesurer ou estimer précisément malgré la connaissance des éléments de la structure. Trois d'entre eux concernent la mécanique des contacts, à savoir le coefficient de restitution ( $e$ ) et deux coefficients de frottement pour les interfaces béton-béton et béton-fondation ( $\mu_{CC}$  et  $\mu_{CS}$  respectivement). Les deux autres paramètres ( $v_p$  et  $d_z$ ) permettent de prendre en compte les déplacements relatifs entre éléments au sein de la structure :  $v_p$  caractérise le relâchement des élingues verticales reliant les blocs, et  $d_z$  définit la position verticale d'un disque virtuel qui permet le contact entre les blocs et les tubes.

Une approche innovante a été utilisée pour calibrer ces cinq paramètres dans le but de reproduire au mieux la réponse du mur à l'impact, dans le temps et l'espace sous les deux énergies d'impact différentes. La calibration de ces paramètres, chacun échantillonnés sur une plage de valeurs réaliste définie *a priori*, s'est appuyée sur 24 mesures effectuées lors des deux essais d'impact à échelle réelle. La calibration est basée sur le déplacement mesuré en 4 points de la structure à 3 instants différents : le déplacement rémanent après stabilisation du mur, le déplacement maximal au cours de l'impact et le déplacement à mi-course entre l'initiation du mouvement et le déplacement maximal. La calibration a été réalisée en combinant une méthode d'apprentissage statistique de l'interface Bayésienne et un travail de méta-modélisation. Les métamodèles ont rendu possible la réalisation d'un grand nombre de simulations, nécessaires à l'utilisation de l'interface bayésienne (Gupta et al., 2023). Le modèle numérique ainsi calibré possède une bonne capacité à reproduire le comportement dynamique expérimental (Figure 4).

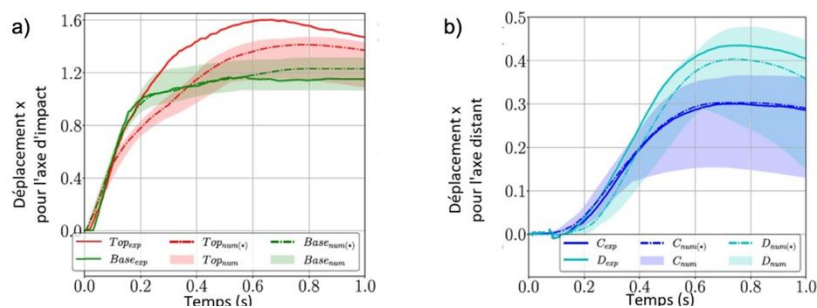


Figure 4. Comparaison des résultats numériques et expérimentaux, après calibration du modèle, sur a) l'axe d'impact, b) l'axe distant.

Cette approche a permis de définir le meilleur jeu de valeurs pour les cinq paramètres en optimisant l'écart entre les mesures expérimentales et les résultats numériques,

quantifié par erreur quadratique moyenne (RMSE). Avec le jeu de paramètres retenu, le RMSE évalué à trois instants représentatifs est de 9,9 cm et 2,3 cm (8,6 % et 5,6% des déplacements mesurés), respectivement pour l'axe d'impact et l'axe distant.

#### 4. Utilisation avancée du modèle

Le modèle NSCD développé permet de réaliser très rapidement des simulations d'impact (de l'ordre de 20 min pour une simulation). Ainsi, en plus de la prédiction des déplacements sur des cas particuliers, l'outil peut être utilisé pour différentes applications.

##### 4.1. Réponse du modèle sous conditions d'impact variées

Le modèle a été utilisé pour étudier le comportement d'un ouvrage en zig-zag soumis à des impacts d'énergie variable, avec différentes conditions d'impact. Plusieurs centaines de cas ont été simulés en faisant varier, sur une plage de valeurs réaliste, les caractéristiques du point d'impact sur le mur, de la vitesse de l'impactant et de sa trajectoire avant impact (Tableau 1).

Tableau 1. Paramètres choisis pour la modélisation d'impacts réalistes

Paramètre	Plage de valeurs	Distribution	Moyenne	Unité
vitesse en translation ( $v$ )	10 - 25	Gauss	17,5	m/s
vitesse en rotation ( $\Omega$ )	0,0 - 5,6	Uniforme	2,8	rot/sec
position d'impact - le long du mur	0,0 - 3,53	Uniforme	2,71	m
position d'impact - sur la hauteur	0,55 - 2,1	Uniforme	1,35	m
inclinaison ( $\alpha$ )	-60 - +60	Uniforme	0	°
déviatation ( $\beta$ )	-45 - +45	Gauss	0	°

Les résultats ont montré que la seule variation du point d'impact le long de l'ouvrage modifie l'amplitude des déplacements (Figure 5a) mais aussi l'inclinaison des blocs béton selon la verticale. L'influence de chacun des 6 paramètres caractéristiques de l'impact sur le déplacement maximal ( $u_x^{max}$ ), la vitesse maximale ( $v_{max}$ ) et l'inclinaison maximale ( $\theta_{max}$ ) est quantifiée par un indice Sobol (Figure 5b). Cette étude montre que la vitesse en translation, la position le long du mur et l'inclinaison de la trajectoire d'impact influencent fortement le comportement de l'ouvrage. La hauteur d'impact ou la déviatation de la trajectoire influent moyennement alors que la vitesse en rotation à une très faible influence.

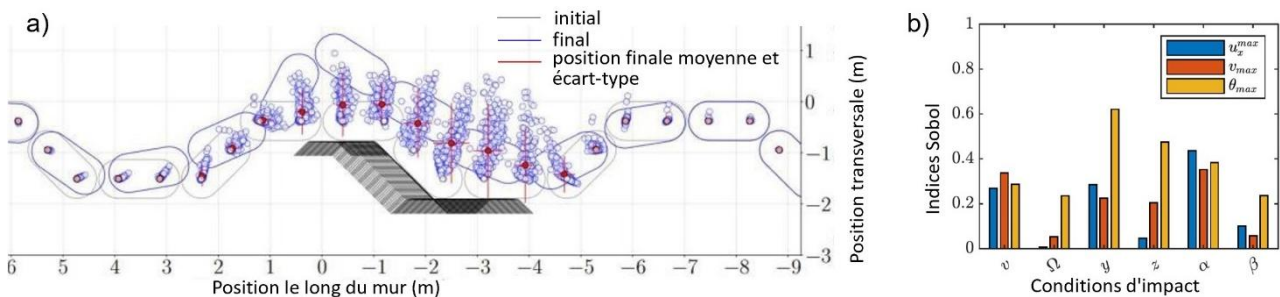


Figure 5. a) Déplacement rémanent en haut du mur obtenu pour 300 simulations avec des conditions d'impact variées b) Indices Sobol pour l'étude de sensibilité aux conditions d'impact.

La dépendance de la réponse du mur aux conditions d'impact s'est révélée forte et non linéaire. En particulier, la grande sensibilité des résultats à la position d'impact le long du mur s'explique par les discontinuités existantes au sein de la structure et dans la géométrie de l'ouvrage. Les différences de réponse sont caractérisées par la cinématique

des blocs, en termes de déplacement et de vitesse. Dans l'exemple du mur zig-zag dans des conditions d'impact différentes, la longueur de mur déplacé est variable, ainsi que les vitesses maximales des blocs et leur variation le long du mur. Opérationnellement, une telle étude paramétrique permet d'identifier la déformée la plus défavorable et ainsi d'ajuster l'implantation ou la géométrie de l'ouvrage si nécessaire. Les résultats peuvent également permettre d'anticiper les endommagements selon les sollicitations attendues.

#### 4.2. Estimation des capacités dissipatives de l'ouvrage

Pour approfondir l'analyse du comportement de l'ouvrage, une méthode calcul de la dissipation d'énergie dans l'ouvrage a été implémentée dans le logiciel Siconos. Le schéma de calcul garantissant la conservation de l'énergie. Ainsi, les composantes normales et tangentielles des efforts aux contacts sont utilisées pour calculer la quantité d'énergie dissipée par frottement entre les éléments  $D_f$ , ainsi que la quantité d'énergie dissipée du fait de la déformation inélastique, laquelle est principalement représentative de la plastification des blocs béton. Le bilan énergétique montre que la plastification est le mécanisme de dissipation prédominant (Figure 6a). En considérant les résultats des 300 simulations avec différentes conditions d'impact, le rapport entre la dissipation d'énergie par frottement et la dissipation d'énergie par plastification ( $R_{f/p}$ ) est d'environ 0,7 en moyenne. L'étude de ce rapport en fonction de chacun des paramètres d'impact (Figure 6b) montre qu'une augmentation de l'inclinaison de la trajectoire d'impact  $\alpha$ , supérieure à  $0^\circ$ , entraîne une augmentation de la borne inférieure de  $R_{f/p}$ , démontrant une plus forte contribution du frottement dans la dissipation d'énergie. De manière moins significative, la position de l'impact le long du mur  $y$  semble également avoir une influence : la borne inférieure de  $R_{f/p}$  est plus élevée lorsque  $y$  varie entre 1,2m et 2,2 m, traduisant une plastification moindre en cas d'impact sur le segment incliné du mur en zig-zag. Plus généralement, la forte variabilité de ce rapport, variant sur une plage de 0,2 à 2, révèle que certaines conditions d'impact conduisent à des dommages importants des blocs de béton ( $R_{f/p}$  faible), tandis que d'autres entraînent des déplacements importants, et donc une plus grande dissipation par frottement ( $R_{f/p}$  élevé). Selon le contexte du site, la valeur de ce rapport pour des impacts réalistes apparaît comme un critère pertinent pour optimiser la structure ; selon que l'on vise à minimiser les déplacements ou, au contraire, à favoriser les déplacements afin de limiter l'endommagement plastique des blocs de béton.

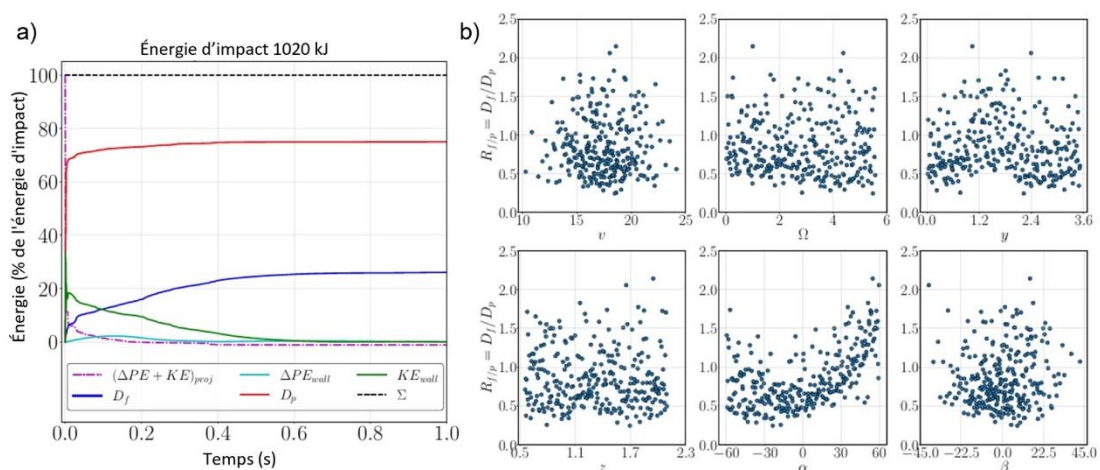


Figure 6. a) Variation d'énergie lors d'un impact à 1020 kJ, b) Ratio  $R_{f/p}$  en fonction de chacun des 6 paramètres décrivant les conditions d'impact (300 simulations).

### 4.3. Analyse inverse

Les ouvrages de protection contre les aléas naturels sont parfois instrumentés pour, en temps réel, détecter un évènement et déclencher une alerte. Connaître les conséquences de l'impact sur les déplacements de l'ouvrage et son endommagement peut aider à décider de l'arrêt du trafic et du besoin d'inspection. L'étude présentée au paragraphe 4.1 montre que la complexité de la réponse selon les conditions d'impact nécessite le développement d'une méthode spécifique pour réaliser les analyses inverses. L'étude a par ailleurs mis en évidence que l'inclinaison des blocs béton dans le mur n'est pas une donnée suffisamment riche, mais que la vitesse maximale des blocs, apparaissant étroitement liée aux conditions d'impact, peut quant à elle être retenue comme donnée d'entrée de l'analyse inverse.

L'analyse inverse s'appuie donc sur un profil de vitesse, soit les valeurs maximales durant l'impact de la vitesse de trois blocs béton par longueur caractéristique d'ouvrage. Cette donnée, qui peut être mesurée sur ouvrage réel, est issue des résultats numériques dans cette étude.

Le principe de l'approche proposée est de comparer le profil de vitesse mesuré sur ouvrage à un grand nombre de profils issus de simulations. Cette comparaison est menée en associant la méthode d'apprentissage statistique de l'interface Bayésienne et des métamodèles. Dans cette démarche, les données nécessaires à l'approche bayésienne sont générées par des métamodèles créés à partir de 300 simulations NSCD.

L'interface bayésienne permet de déterminer les conditions d'impact reproduisant le mieux le profil de vitesse observé. Par la suite, ces conditions d'impact sont utilisées pour prédire les résultats souhaités, comme par exemple l'énergie dissipée par plastification ou le déplacement maximal de l'ouvrage. Ces résultats caractéristiques peuvent être obtenu par des simulations NSCD. Toutefois, dans le cas où l'objectif est de donner une information dans des délais de l'ordre quelques minutes, il est préférable d'avoir recours au métamodèle développé spécifiquement à partir des résultats de simulations.

La figure 7 montre que le niveau de fiabilité de cette analyse inverse est satisfaisant autant pour obtenir le déplacement de l'ouvrage, ou plus exactement la distance à une ligne de sécurité, que l'énergie dissipée par endommagement des blocs, et ce à partir des profils de valeur maximale de vitesse le long du mur.

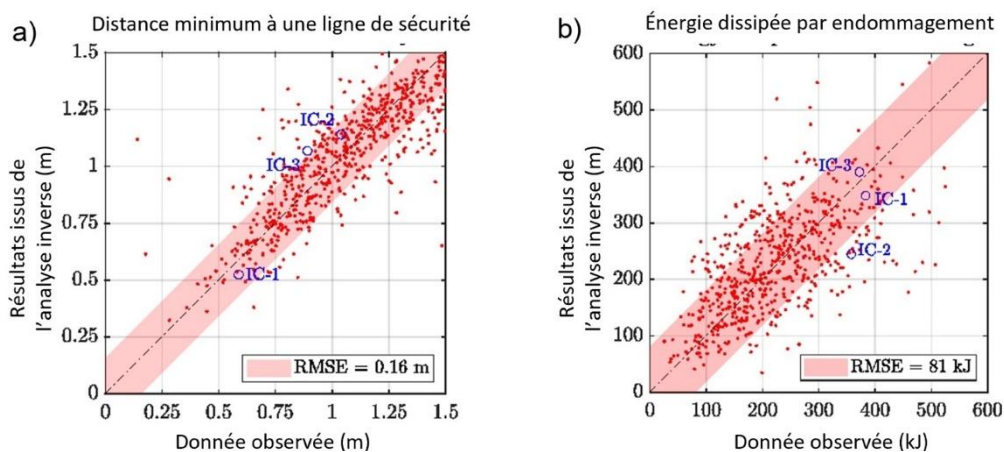


Figure 7. Comparaison des prédictions par analyse inverse avec la valeur obtenue à partir des simulations pour a) la distance restante minimale, b) l'énergie dissipée associée à un endommagement des blocs. Les points IC 1 à 3 correspondent à trois impacts centrés sur le mur.

## 5. Conclusions

L'ouvrage étudié ici est composé de blocs en béton liaisonnés par des éléments métalliques, technologie innovante et particulièrement adaptée pour la protection contre la chute de blocs rocheux. Des essais d'impact (520 kJ et 1020 kJ) sur des ouvrages à échelle réelle ont validé la résistance de l'ouvrage et amélioré la compréhension de son comportement. Le modèle numérique NSCD présenté a été calibré sur la base des résultats expérimentaux à l'aide d'une méthode complexe. Grâce à l'utilisation de métamodèles et de méthode statistiques, les simulations sont robustes et rapides, permettant un usage avancé du modèle.

Ce modèle peut notamment opérer un grand nombre de cas simulant la réponse de l'ouvrage à des conditions d'impact variées. Le calcul du ratio de l'énergie dissipée par frottement relativement à l'énergie dissipée par plastification des blocs béton constitue un critère d'optimisation pertinent pour la conception des ouvrages.

Par ailleurs, les résultats de simulation NSCD ont permis de développer une méthode d'analyse inverse. Cette méthode permet, de déterminer les conditions d'impact qui correspondent le mieux aux vitesses observées sur ouvrage. Dans un second temps, la connaissance de ces conditions d'impact permet d'accéder aux informations nécessaires à la prise de décision (par exemple distance depuis la route ou énergie dissipée par plastification des blocs), par le biais du modèle numérique de l'ouvrage. Cette approche se montre suffisamment précise pour constituer un outil d'aide à la décision en cas d'évènement sur ouvrage.

En perspective, la méthode d'analyse inverse pourrait être utilisée sur la base de mesure des vitesses sur un ouvrage en temps réel et aussi être utilisée pour caractériser spécifiquement l'impact à partir de mesure de la déformée de l'ouvrage après un impact.

Le modèle NSCD et les méthodes associées, utilisant des métamodèles, représente un outil intéressant pour l'optimisation de la conception et la surveillance d'ouvrages dans un contexte opérationnel.

## 6. Références bibliographiques

Acary, V. and Perignon, F. (2007). Siconos: A Software Platform for Modeling, Simulation, Analysis and Control of Non smooth Dynamical Systems, SIMULATION NEWS EUROPE, ArgeSIM/ASIM 17 (2007) 19–26.

Furet A., Lambert S., Villard P., Jarrin J-P., Lorentz J. et Meignan L. (2022a). Bloc Armé : une technologie innovante pour une protection optimisée contre les risques naturels, in Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur (JNGG), Lyon, France.

Furet, A., Lambert, S., Villard, P., Jarrin, J.P (2022b). Experimental and numerical impact responses of an innovative rockfall protection structure made of articulated concrete blocks. DOI 10.1007/s00603-022-02957-x. Rock Mechanics and Rock Engineering .

Gupta, R., Bourrier, F., Acary, V. and Lambert, S. (2023). Bayesian interface based calibration of a novel rockfall protection structure modelled in the non-smooth contact dynamics framework. Engineering structures.