



HAL
open science

Dimensionnement de couches de sols en protection des bâtiments contre les impacts rocheux – Campagne d’essais pour déterminer les paramètres du modèle pour une grave 0-31.5 issue de béton concassé - Choix du matériau et essai de faisabilité

Anne-Sophie Colas, Jean-Pierre Rajot, Patrick Joffrin, Nicolas Vermorel,
Christophe Pruvost

► **To cite this version:**

Anne-Sophie Colas, Jean-Pierre Rajot, Patrick Joffrin, Nicolas Vermorel, Christophe Pruvost. Dimensionnement de couches de sols en protection des bâtiments contre les impacts rocheux – Campagne d’essais pour déterminer les paramètres du modèle pour une grave 0-31.5 issue de béton concassé - Choix du matériau et essai de faisabilité. Université Gustave Eiffel. 2023, pp.26. hal-04434713

HAL Id: hal-04434713

<https://hal.science/hal-04434713>

Submitted on 2 Feb 2024

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.

Convention DGPR-Université Gustave Eiffel 2022 n°2201357657 du 26 juillet 2022

Action 16 : Anne-Sophie COLAS

Dimensionnement de couches de sols en protection des bâtiments contre les impacts rocheux

Campagne d'essais pour déterminer les paramètres du modèle pour une grave 0-31.5 issue de béton concassé

Partie 1 : Sélection, approvisionnement du matériau et essai préliminaire

Date : 16 mai 2023

Auteurs : J.P. Rajot, Anne-Sophie Colas, P. Joffrin, N. Vermorel, C. Pruvost

Nomenclature d'activité : RP3-J22071
Référence sur Numéro de contrat* :
Confidentialité : Diffusion libre

Université Gustave Eiffel,

Campus de Lyon

Département Géotechnique Environnement, Risques naturels et Sciences de la terre (GERS),

Laboratoire Risques Rocheux et Ouvrages Géotechniques (RRO)

25 Avenue François Mitterrand, Case 24

F-69675 Bron Cedex

Téléphone : +33 4 72 14 25 77

Adresse électronique : anne-sophie.colas@univ-eiffel.fr

Version

Version	Date	Modification	Préparé par	Contrôlé par
1	16/05/2023	Version initiale	J.P. Rajot	A.S. Colas

Destinataires

MTE/DGPR/SRNH : M. Bruno JANET

Université Gustave Eiffel : Mme Céline BOURDEAU-LOMBARDI

Table des matières

1	Introduction	1
2	Matériau sélectionné	4
3	Essai préliminaire	6
3.1	Préparation de l'essai et instrumentation	6
3.2	Mise en œuvre de la couche protectrice	9
3.3	Exécution de l'essai d'impact	11
3.4	Résultats et mesures	12
4	Dépouillement des mesures et interprétation	14
5	Conclusion	17
	Annexe A : Références bibliographiques	18
	Annexe B : Courbe granulométrique du concassé 0-31.5 issu de béton recyclé utilisé en couche protectrice contre impacts	19

RESUME

Les bâtiments existants construits en zone d'aléa chute de blocs rocheux peuvent bénéficier d'une protection par couche de sol, permettant d'éviter les impacts directs contre leur structure. Une première étude [4] a permis de définir la forme d'un modèle empirique décrivant le pulse de pression espace-temps transmis à une structure au travers d'une couche de sable peu compacte d'épaisseur D , lors d'un impact à la vitesse V par un bloc rocheux de diamètre B en surface de la couche de sol protectrice. Les valeurs des paramètres du modèle ont été déterminées pour ce sable peu compact à partir d'une campagne d'essais instrumentés en vraie grandeur.

Ainsi, pour ce sable peu compact, le pulse de pression perçu par la structure peut être caractérisé pour toute valeur de D , B ou V . Pour le dimensionnement de la couche protectrice, l'étude d'aléa précisant la taille et la vitesse des blocs susceptibles d'atteindre le bâtiment, l'épaisseur de la couche protectrice est choisie pour vérifier par calcul en dynamique la résistance de la structure.

Le sable étant peu disponible dans les territoires de montagne, l'objectif de cette nouvelle étude est de déterminer les valeurs des paramètres du modèle pour un autre matériau, une grave propre 0-31.5, pouvant être produite par concassage local. La granulométrie ne doit pas être trop élevée pour favoriser la dissipation d'énergie par frottement entre particules de sol. Le matériau doit être propre pour éviter l'apparition à terme dans le matériau d'une cohésion qui réduirait la dissipation d'énergie et la durée du pulse de pression lors de l'impact, comme lors d'un impact entre solides rigides.

Contrairement au sable, pouvant être mis en place et compacté par des moyens légers disponibles au Laboratoire RRO, les essais sur couche de grave concassée 0-31.5 propre, nécessitent l'utilisation d'engins spécifiques de terrassement. C'est pourquoi l'action proposée a été décomposée en deux parties. La première, objet de ce rapport, consiste à sélectionner, approvisionner le matériau sur le site d'essais, réaliser un essai de faisabilité pour préciser sa mise en œuvre en couche protectrice et tester l'installation de l'instrumentation. La seconde, consacrée à la réalisation de l'ensemble du programme d'essai, au dépouillement des mesures et à la détermination des paramètres du modèle, sera réalisée dans le cadre de la convention DGPR-Université Eiffel suivante.

Ce rapport présente le matériau sélectionné (identification) et les résultats obtenus lors d'un premier essai de faisabilité. La procédure de mise en œuvre de la couche protectrice et la densité sèche obtenue après compactage sont précisées. De nouveaux capteurs de pression ont été testés lors de cet essai. Ces premières mesures montrent que le pulse de pression semble plus important au travers de cette grave 0-31.5 qu'au travers du sable lâche utilisé dans l'étude de Tarik Oussalah (2018).

MOTS-CLES

Risque rocheux ; Chute de blocs ; Protection contre les impacts ; Couche de protection ; Grave ; Béton recyclé ; Dimensionnement ; Essais échelle 1.

1 Introduction

Les couches de sol sont depuis longtemps employées pour protéger des structures contre les chutes de blocs rocheux, que ce soit pour couvrir des structures à risque (tunnels, galeries...) ou réaliser des ouvrages de protection (merlons). Des bâtiments existants construits en zones d'aléa chute de blocs rocheux peuvent également bénéficier d'une protection par couche de sol, en utilisant des nappes géosynthétiques pour renforcer le sol et le placer verticalement contre les murs exposés. Cette couche de sol dissipe de différentes façons une partie de l'énergie d'impact, par plastification et écoulement du sol (déplacements importants), et diffuse dans l'espace et dans le temps les efforts transmis à la surface de la structure, le choc étant beaucoup moins rigide. En conséquence, l'intensité de la charge est moins élevée et les vitesses de chargement et de déchargement plus faibles.

La Figure 1.1 est une représentation schématique du problème considéré, un bloc rocheux de diamètre B impactant à vitesse V une couche de sol d'épaisseur D protégeant une structure. Une analyse bibliographique [2] indique que la plupart des études se sont intéressées à la force d'impact (F_{IMPACT}), simple à observer en équipant d'un accéléromètre le bloc impacteur, très peu à la charge transmise à la structure au travers de la couche de sol (F_{BASE}). De plus, les niveaux d'énergie d'impact considérés dans ces études étaient en général très faibles par rapport aux niveaux rencontrés en pratique pour l'aléa chute de blocs rocheux.

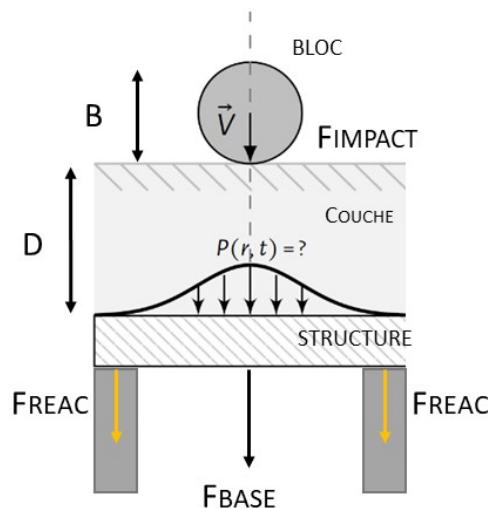
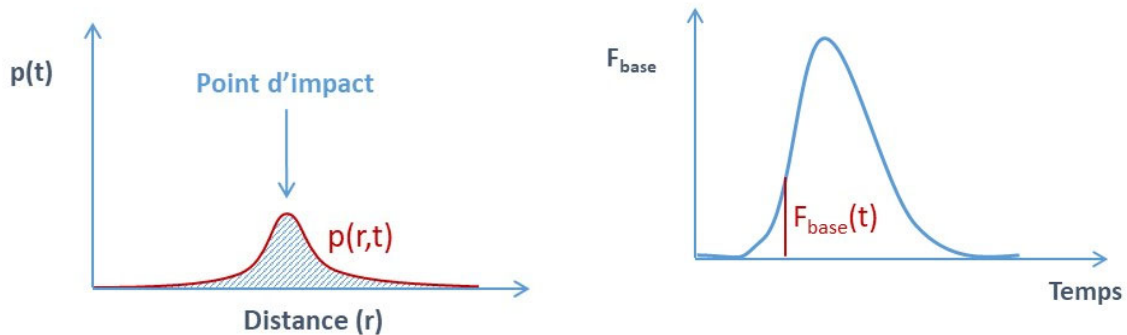


Figure 1.1 Représentation schématique de l'impact d'un bloc sur une couche protégeant une structure

Deux guides, un Japonais [3] (2000) et un Suisse [1] (2008), comportent des recommandations sur le dimensionnement des couches de sols en protection des galeries pare-blocs. Le guide Japonais suppose que l'effort transmis à la structure (F_{BASE}) est égal à la force d'impact (F_{IMPACT}). Le guide Suisse propose une expression donnant la force transmise F_{BASE} équivalente, considérée quasi-statique et ponctuelle. La modélisation numérique prédictive de l'interaction dynamique entre bloc, couche protectrice et structure, impliquant en outre plasticité du sol en grands déplacements, n'est pas possible en l'état actuel des connaissances (2023). Dans la plupart des études, des relations empiriques sont donc proposées pour relier les efforts F_{IMPACT} ou F_{BASE} aux différentes conditions d'impact et facteurs d'influence potentiels identifiés : géométrie du bloc, angle d'incidence, granulométrie et densité du sol...

En réalité, comme le montre la Figure 1.2, la valeur de l'effort sur la structure induit au travers de la couche protectrice par l'impact (F_{BASE}) varie dans le temps et correspond à l'intégrale de la distribution de pression à la base de la couche de sol, $p(r, t)$, où r représente la distance à la trajectoire d'impact, considérée ici perpendiculaire à la structure, et t le temps. La

connaissance de ce pulse spatio-temporel de pression à l'interface entre couche protectrice et structure est impérative pour dimensionner la structure protégée en dynamique. En effet, la sollicitation des matériaux composant la structure dépend des forces d'inertie, lesquelles sont liées à la forme du pulse de pression appliqué, notamment les vitesses d'accroissement de pression et de déchargement.



(a) Distribution spatiale de pression à l'instant t en surface de la structure protégée

(b) Variation de la résultante de pression à l'interface sol-structure pendant l'impact

Figure 1.2 Pression transmise en surface de la structure protégée à un instant t et variation de sa résultante pendant l'impact

L'étude de Tarik Oussalah [4] a donc visé directement l'observation du pulse de pression $p(r, t)$ à l'interface entre couche de sol protectrice et structure lors d'un programme expérimental combinant de manière systématique :

- Trois épaisseurs de couche protectrice : 1, 1.5 ou 2 m,
- Cinq blocs impacteur, de masses comprises entre 117 et 7599 kg (diamètre équivalent de 0.42 à 1.79 m, pour une densité de 2.5) et
- Cinq vitesses d'impact, de 4.43 m/s (16 km/h) à 25.45 m/s (92 km/h)

Pour limiter toutefois le programme d'essais de cette étude, une seule nature de couche de sol protectrice (sable fin propre, roulé (alluvial)) et une seule procédure de mise en œuvre pour obtenir une densité sèche identique pour tous les essais ont été retenues.

Le dépouillement des mesures a tout d'abord permis d'observer des phénomènes physiques, conduisant ensuite à caractériser chaque impact par un nombre limité de grandeurs (valeur du pic de pression au droit de la trajectoire... [2]). L'analyse de ces grandeurs caractéristiques déduites du dépouillement des différents essais a enfin permis d'établir une expression empirique donnant $p(r, t)$ en fonction des facteurs de sollicitation D , B et V avec une précision de l'ordre de 15% sur l'ensemble des essais réalisés.

Ainsi, pour le sable peu compact considéré dans cette première étude, le pulse de pression perçu par la structure peut être caractérisé pour toute valeur de D , B ou V . En pratique, pour dimensionner la couche protectrice, l'étude d'aléa précisant la taille (B) et la vitesse des blocs (V) susceptibles d'atteindre le bâtiment, l'épaisseur de la couche protectrice (D) doit être choisie pour vérifier par calcul en dynamique la résistance de la structure.

Toutefois il est important de noter que, pour limiter le programme d'essais de cette première étude, l'influence sur le pulse de pression de cinq facteurs notables a été éludée :

- (1) La nature du sol de protection : La distribution granulométrique du sol protecteur est connue pour avoir une influence sur l'énergie dissipée dans le sol par cisaillement.

- (2) La densité sèche de la couche de sol protectrice : La densité obtenue par compactage à la mise en œuvre aura une influence sur la dissipation d'énergie et sur la déformabilité du sol. Le pulse de pression au travers d'un sol plus dense aura une amplitude plus grande et une durée plus faible.
- (3) La rigidité et la fréquence propre de la structure à protéger : En réalité, la couche de sol protectrice et la structure interagissent. La pression à l'interface dépend donc aussi de la rigidité et du comportement dynamique de la structure.
- (4) L'angle d'impact : La direction de la trajectoire d'impact par rapport à la surface de la couche de sol protectrice a une influence sur la profondeur et la géométrie du sol plastifié lors de l'impact, donc sur la géométrie et l'intensité du pulse de pression.
- (5) La forme du bloc : Pour les blocs de forme élancée ou présentant des angles vifs, un impact sur le plus petit côté ou sur un angle vif conduira à une pénétration plus importante, un pic de pression plus élevé et une distribution de pression plus étroite.

La présente étude vise à traiter les points (1) et (2) en étendant le modèle à une autre nature de sol, compacté à une autre densité. Concernant les points (3) et (4), une structure à protéger très rigide a été choisie pour les essais (dalle de béton épaisse de 50 cm coulée au rocher) et la direction d'impact a été fixée perpendiculaire à la structure. Or une structure à protéger plus souple et un impact incliné réduisent l'amplitude des pressions transmises. Par conséquent le modèle empirique développé pour décrire la pression induite par l'impact au travers de la couche de sol peut être considéré sécuritaire pour une structure plus souple et un angle d'impact plus faible. La principale limitation à l'utilisation pratique du modèle développé dans cette étude reste donc l'influence de la forme du bloc (5), dont l'élancement doit être faible.

La suite de ce rapport est organisée en quatre Sections principales. La Section 2 tout d'abord présente le nouveau matériau de protection sélectionné, une grave propre issue de béton recyclé, matériau davantage disponible en région montagneuse que le sable alluvionnaire. La Section 3 ensuite décrit l'essai de faisabilité réalisé, en précisant les conditions de mise en œuvre, l'instrumentation mise en place et les mesures observées. La Section 4 présente alors le dépouillement des mesures et une interprétation des premiers résultats concernant l'influence de la nature et de la densité du sol de protection. La Section 5 enfin contient les conclusions de cette première partie de l'étude, qui sera complétée l'an prochain avec la réalisation d'essais complémentaires permettant de définir les valeurs de l'ensemble des paramètres du modèle pour ce nouveau matériau.

2 Matériau sélectionné

L'objectif est de déterminer, pour un matériau autre qu'un sable alluvionnaire, les valeurs des paramètres du modèle décrivant le pulse de pression transmis au travers d'une couche de sol lors d'un impact par bloc rocheux. Le premier critère pour choisir un sol présentant un potentiel de protection important est la teneur en fines, définie par le pourcentage en masse du passant inférieur à $63\ \mu$ de la courbe granulométrique ($\% < 63\mu$).

En effet, un certain temps après la mise en œuvre, les fines contenues dans le matériau sont susceptibles au séchage de cimenter entre elles les particules plus grandes, donnant au matériau une cohésion et une rigidité pouvant être très importante¹. Lors d'un impact par un bloc rocheux, la dissipation d'énergie dans un tel matériau serait alors bien moindre et les efforts plus brutalement transmis à la structure protégée, comme pour un impact entre solides faiblement déformables.

Un sol en protection de structures contre les impacts rocheux doit être classé « propre » au sens du Guide des Terrassements Routiers (GTR, 2023) [5], i.e. vérifiant le critère suivant :

$$\text{Passant à } 63\mu < 5\ \% \quad (1)$$

Le sol utilisé en protection doit donc être un sol grenu propre. Pour maximiser la dissipation d'énergie par frottement interne entre particules, leur taille maximale ne doit pas être trop grande et la distribution granulométrique étalée et régulière, ce qui accroît le nombre de surfaces de contact locales. Ces conditions peuvent s'exprimer par les équations suivantes :

$$D < 63\ \text{mm} \quad (2)$$

$$C_U > 6 \quad (3)$$

et

$$1 < C_C < 3 \quad (4)$$

Où D est le diamètre équivalent maximal des particules, C_U le coefficient d'uniformité et C_C le coefficient de courbure.

Selon le GTR, le matériau recommandé serait donc classé « Sable propre bien gradué » (SW) ou « Grave propre bien graduée » (GW).

En outre, pour la durabilité du matériau exposé aux intempéries et aux impacts, des conditions supplémentaires doivent être vérifiées concernant les granulats, qui doivent **résister aux cycles de gel-dégel (NF EN 1367-7 : 2014) et à la fragmentation qualifiée par essai Los Angeles (NF EN 1097-2 : 2020)**. À ce stade de l'étude, aucune spécification n'est proposée sur ces deux points, qui devront cependant être précisés dans un document de référence sur la protection des structures contre les impacts rocheux par couches de sols.

La recherche de matériau s'est donc orientée vers les granulats de la classe granulaire 0 - 31.5 mm ou proche, produits couramment en carrière. Cependant la plupart des matériaux examinés dans un périmètre raisonnable autour du site d'essais (la station de Montagnole près de Chambéry, France), naturels avec criblage pour éliminer les éléments grossiers ou

¹ Cette cohésion et rigidité peuvent partiellement disparaître si le sol est de nouveau hydraté, mais cela dépend fortement de la perméabilité du matériau donc de sa granulométrie.

concassés à partir d'une roche plus ou moins massive, ne vérifiaient clairement pas la condition requise concernant la propreté du matériau.

Toutefois, généralement attenantes aux carrières, les plates-formes de recyclage des déchets du BTP proposent également des produits issus de fraisats d'enrobés routiers ou de démolition de bâtiments ou d'ouvrages en béton. Les premiers présentent une cohésion évidente et pour raison environnementale ne peuvent pas être utilisés dans toutes les applications du Génie Civil. Par contre, les concassés 0 - 31.5 mm issus de béton recyclé vérifient assez bien les critères requis pour utilisation en couche de protection contre les impacts :

- Par composition des bétons, ils sont presque exempts de particules fines,
- Présentent une granulométrie très étalée et continue, avec beaucoup de particules sableuses (de 63 μ à 2 mm), ajoutées pour composer le béton, et
- Les particules sableuses sont souvent siliceuses (très résistantes) et les particules de plus grande dimension présentent une résistance à la fragmentation, éventuellement moyenne mais correspondant tout de même à celle d'un béton.

Le matériau retenu pour cette étude est un **concassé 0 - 31.5 mm issu de béton recyclé**, provenant de la filiale de recyclage de la Société des Carrières et Matériaux de Savoie (SCMS), située à La Motte-Servolex F-73290. Il apparaît que ce matériau est plus économique qu'un produit issu de carrière rocheuse (autour de l'agglomération de Chambéry) et son emploi contribue à améliorer la gestion des ressources naturelles minérales.

La courbe granulométrique du matériau, fournie par la SCMS, est donnée en Annexe B. Il s'agit bien d'une grave de granulométrie 0-31.5 mm, propre (passant à 63 μ égal à 4.1 %), bien graduée ($C_U = 28$ et $C_C = 3.5$). Comme présenté en Section suivante, un tel matériau présente une bonne aptitude au compactage et une résistance au cisaillement importante, ce qui éventuellement ne sera pas très favorable à la dissipation d'énergie lors d'un impact.

Pour construire les couches protectrices d'épaisseurs allant jusqu'à 2 m et, pour éviter les effets de bord lors des impacts, de dimensions minimales au sommet de 5 m par 5 m, au total 230 tonnes de ce matériau ont été livrées à la station d'essai de Montagnole. La photo en Figure 2.1 donne une idée du matériau livré sur le site d'essai. Les particules les plus grandes apparaissent en surface du tas du fait de la ségrégation lors du déversement du matériau. Ces particules sont toutefois propres. En Section suivante, une photo illustrant l'essai de faisabilité montre davantage la granulométrie étalée.



Figure 2.1 Matériau livré sur le site d'essai : taille maximale des particules et propreté

3 Essai préliminaire

Un premier essai d'impact sur couche de sol protectrice composée de 0-31.5 mm issu de béton recyclé a été réalisé à la station d'essai de Montagnole le 19/10/2022. L'objectif était de mettre au point la technique de mise en œuvre de la couche protectrice et de tester l'instrumentation, notamment de comparer les mesures données par des capteurs de pression différents, provenant de deux constructeurs. En effet, les capteurs de pression totale en Génie Civil sont généralement employés pour des sollicitations quasi-statiques. Les constructeurs ne précisent pas la bande passante de ces capteurs qui pourtant influe sur les mesures lors de sollicitations dynamiques. Il est donc apparu pertinent comparer les mesures entre capteurs.

Les conditions d'essai choisies correspondent à l'essai dénommé « D1B2H4 » dans la thèse de Tarik Oussalah [4] sur la performance des couches protectrices en sable peu compact. Une couche de sol protectrice d'épaisseur (D) égale à 1 m est mise en place sur une structure support très rigide à protéger, une dalle en béton armée épaisse de 50 cm coulée en place au rocher. Un bloc EOTA de hauteur 66 cm, de masse 540 kg (diamètre de sphère équivalente (B) égal à 73 cm), est ensuite largué d'une hauteur de 20 m au-dessus du point d'impact visé sur la dalle protégée, conduisant à une vitesse d'impact (V) de 71 km/h.

3.1 Préparation de l'essai et instrumentation

Pour limiter la quantité de matériau à mettre en œuvre pour cet essai, avec des moyens de terrassement réduits, la couche de sol a été limitée par des murets perpendiculaires en briques creuses placés sur trois côtés. Le côté sans muret permet la mise en place du matériau avec simple un tracteur. La Figure 3.1, en haut à droite, montre cette construction des trois murets limitant l'emprise de la couche protectrice à placer sur la dalle en béton armée. Les deux murets latéraux sont distants de 306 cm et leur longueur intérieure est de 170 cm.

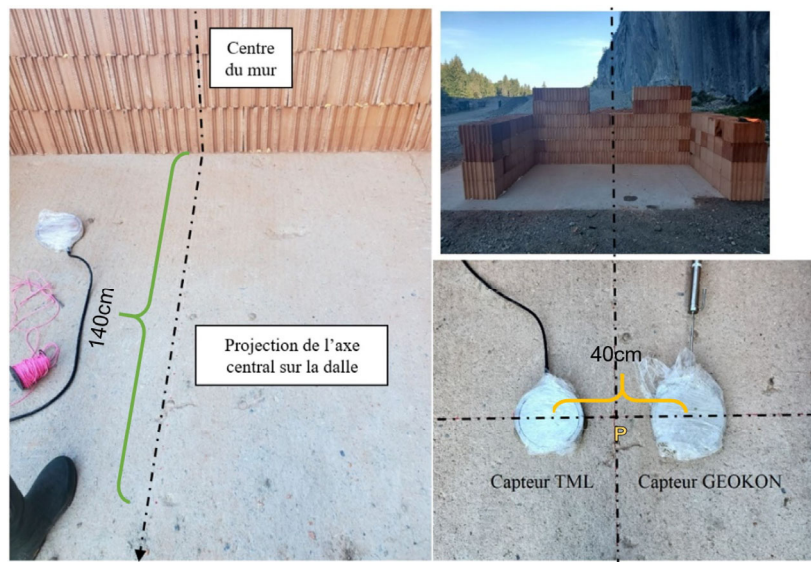


Figure 3.1 Limitation de l'emprise de la couche protectrice et position des capteurs

Pour améliorer la résolution spatiale des mesures de pression en surface de la dalle, la future campagne d'essais prévoit de compléter les sept capteurs de marque Geokon (modèle 3515-1) utilisés en 2018 pour la thèse de Tarik Oussalah [4] avec de nouveaux capteurs de pression, de marque TML (Tokyo Measuring Instruments Laboratory, Co.). La Figure 3.1 montre également la localisation de deux capteurs de pression totale installés pour comparer leurs

mesures pendant l'essai, l'un de marque TML, l'autre Geokon. Ces deux capteurs sont situés à une distance de 1.40 m du muret de fond de l'enceinte et à 20 cm de part et d'autre de la médiane entre les deux murets latéraux. Le point d'impact visé correspond dans la figure au point P, à l'intersection entre la droite à 1.40 m de distance du muret de fond et la médiane aux murets latéraux.

Le capteur Geokon 3515-1 (Figure 3.2), souvent placé sous ballast ferroviaire, est un capteur adapté à la mesure des changements de pression sous sollicitations dynamiques. La cellule de mesure est une poche métallique remplie d'huile en forme de disque, protégée contre le poinçonnement par deux plaques d'acier épaisses de 10 mm. La pression d'huile est mesurée par un capteur situé à l'extrémité d'une tige reliée à la cellule de mesure. Plusieurs modèles existent, pour des plages de mesure de 0 à 1.0, 2.5 ou 6.0 MPa. Le capteur utilisé pour cet essai préliminaire est le modèle avec plage de mesure de 0 à 1.0 MPa.

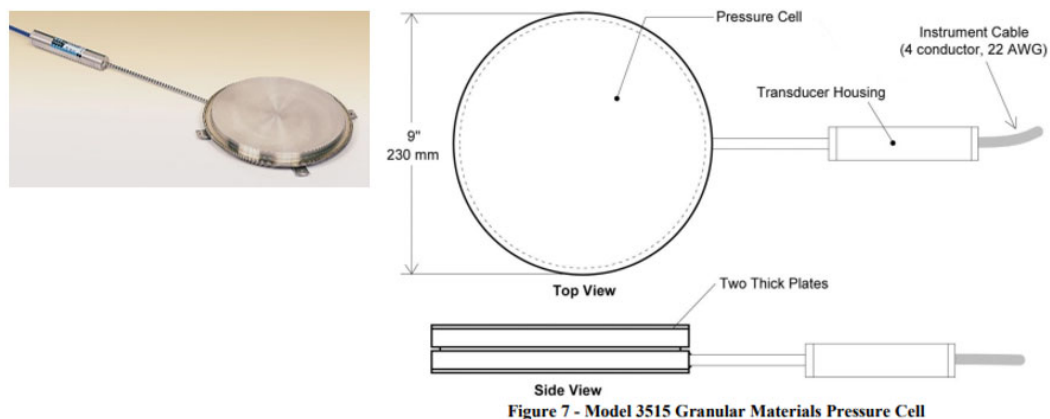


Figure 3.2 Photo et schéma du capteur Geokon 3515 (Extrait de « Instruction Manual, Model 35000 Series, Geokon »).

Les capteurs TML de la gamme KDA-PA (Figure 3.3) sont des capteurs à pont de jauges qui mesurent la pression exercée par le sol à travers une surface de diamètre extérieur égal à 200 mm. Selon le fabricant, ce capteur est composé d'une structure à double diaphragme qui minimise le déplacement perpendiculaire de la zone de détection (« Sensing area » en Figure 3.3). Ces capteurs sont utilisés dans les Travaux Publics pour mesurer la pression exercée par les sols et suivre le comportement des remblais.

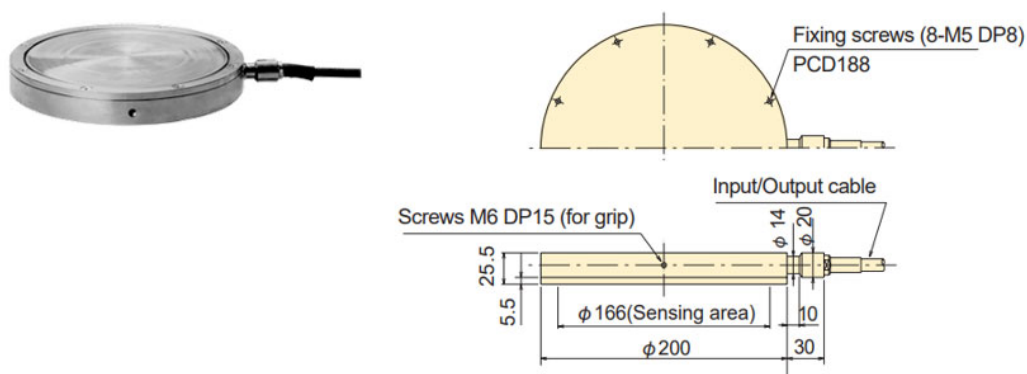


Figure 3.3 Photo et schéma du capteur TML KDA-PA (Extrait de « KDA-PA/KDB-PA Soil Pressure Gauge Technical Guide », Tokyo Measuring Instruments Laboratory Co., Ltd.)

Avant mise en œuvre de la couche protectrice, les capteurs sont scellés à la dalle au mortier prompt pour assurer un contact homogène et éviter un déplacement latéral du capteur causé par un éventuel déplacement du sol pendant l'impact. La photographie en Figure 3.4 montre les capteurs scellés au mortier sur la dalle. Leurs centres sont positionnés précisément sur une droite située à 1.40 m du muret de fond et à 20 cm de part et d'autre de la médiane aux murets latéraux, tracées en couleur rouge sur la dalle. Les capteurs sont protégés d'un film plastique pour éviter la forte adhérence entre mortier et acier, dans l'objectif de les récupérer sans dommage après essai. Le film plastique protège aussi le capteur de l'humidité lorsqu'il reste en place plusieurs jours ou semaines.



Figure 3.4 Photographie des capteurs installés en surface de la dalle à protéger

Enfin, la Figure 3.5 est une vue en plan schématique du dispositif d'essai montrant, en (a), la localisation des capteurs de pression et, en (b), l'extension de la couche de sol protectrice, qui forme des cônes aux extrémités des murets latéraux à l'opposé du muret de fond. La mise en œuvre de la couche protectrice est présentée en Section suivante.

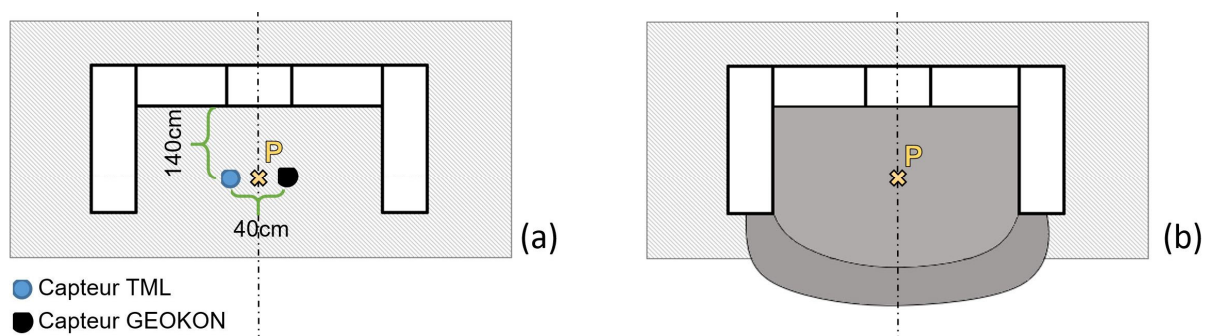


Figure 3.5 Vue en plan schématique du dispositif d'essai avant et après construction de la couche protectrice

3.2 Mise en œuvre de la couche protectrice

Le matériau testé étant désormais un matériau grenu grossier, une mince couche de sable a tout d'abord été placée à la base de la couche, en surface de la dalle, pour protéger les capteurs de pression et le câblage d'un possible poinçonnement pendant l'impact, ou d'une déformation localisée des plaques des capteurs qui pourrait induire une erreur de mesure. Cette mesure de prévention est conseillée par le fabricant TML dans la notice technique de son capteur. La photographie en Figure 3.6 montre la mise en œuvre manuelle de cette couche de sable en utilisant le chargeur à l'avant du tracteur disponible à la station de Montagnole.

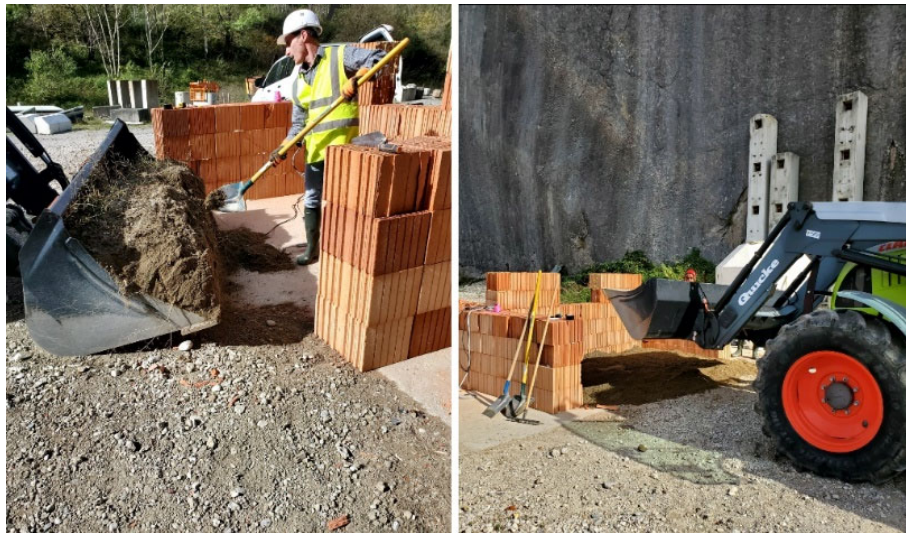


Figure 3.6 Mise en œuvre manuelle d'une mince couche de sable pour protéger l'instrumentation

Le protocole de construction de la couche protectrice de grave propre 0-31.5 issue de béton recyclé a suivi les mêmes étapes que pour la campagne d'essais avec le sable [4] : placement du matériau en léger excès pour former des sous-couches de 25 cm après compactage, réglage manuel au râteau du matériau sur toute la surface à couvrir pour viser la dimension souhaitée au sommet de la couche et enfin compactage de chaque sous-couche par trois passes de plaque vibrante (Mikasa, modèle MVCF60) à une vitesse de déplacement maximale de l'ordre de 25 m/min, en alternant parcours en spirale divergente et convergente.

La Figure 3.7 montre la mise en œuvre de la seconde sous-couche : à gauche, placement de la grave 0-31.5, au centre, réglage uniforme du matériau sur une épaisseur d'environ 28 cm et, à droite, compactage du matériau conduisant au niveau souhaité (en l'occurrence, 50 cm au-dessus de la dalle). Enfin, la Figure 3.8 montre la couche protectrice de hauteur totale 1 m terminée. Sur cette photo, il est intéressant de noter l'aspect visuel du matériau, typique d'une distribution granulométrique étalée et d'une bonne propreté. Un peu de ségrégation apparaît en surface de talus.



Figure 3.7 Mise en œuvre d'une sous-couche de grave 0-31.5



Figure 3.8 Couche de protection terminée

La procédure de mise en œuvre du matériau permet de maîtriser l'homogénéité de la densité sèche du sol, paramètre important pour la déformabilité et la résistance du sol, donc pour la transmission des efforts à la dalle lors de l'impact. Le poids volumique du sol mis en œuvre a été déterminé in situ par un essai dit « à la bêche ». Cet essai est illustré en Figure 3.9. Une quantité de sol adaptée à sa granulométrie est prélevée en veillant à extraire tout le sol remanié par le creusement. Cette quantité est pesée. Une bâche souple étanche est placée dans l'excavation réalisée. Le volume d'eau nécessaire pour remplir l'excavation jusqu'au niveau initial du sol est déterminé par pesage différentiel. Le poids volume est le rapport du poids de sol extrait sur le volume de l'excavation.



Figure 3.9 Détermination du poids volumique par essai à la bêche. De gauche à droite : (1) Extraction d'une quantité de sol au le sommet du remblai, (2) Pesage du matériau, (3) Pesage initial de l'eau à verser dans l'excavation pour remplacer le sol retiré et (4) Remplissage du trou d'excavation.

La masse de grave prélevée était au total de 18.97 kg et le volume d'eau nécessaire pour combler l'excavation 8.724 litre (masse 8.724 kg). Le poids volumique (γ) de la grave propre 0-31.5 bien graduée vaut donc d'environ 21.3 kN/m^3 . La teneur en eau (w), déterminée au laboratoire par le Cerema de Lyon sur le sol prélevé, était de 8.5 %. Enfin, le poids volumique sec (γ_d) de la grave, calculé avec l'Équation (5), est trouvé égal à 19.63 kN/m^3 .

$$\gamma_d = \frac{\gamma}{1 + w} \quad (5)$$

3.3 Exécution de l'essai d'impact

L'exécution de l'essai comporte trois étapes. L'impacteur doit tout d'abord être positionné à l'aplomb du point d'impact visé. Il est ensuite levé à la hauteur nécessaire pour obtenir la vitesse d'impact souhaitée. Il est enfin largué et, à partir de cet instant, la chute est observée par caméras rapides, l'impact est suivi par accéléromètres fixés au bloc impacteur et les pressions données par les capteurs en surface de la dalle sont enregistrées.

En Figure 3.8 ci-dessus, les piquets jaune et bleu dans les murets latéraux servent à repérer le plan vertical situé à 1.40 m du muret de fond du dispositif, plan dans lequel se trouve le point d'impact visé, avec les centres des deux capteurs à 20 cm de part et d'autre de la médiane entre les deux murets latéraux. Sur un cordeau tiré entre ces piquets, le point d'impact visé se trouve sur la verticale à une distance de 1.50 m du muret gauche. Le point correspondant est alors matérialisé au sommet de la couche protectrice.

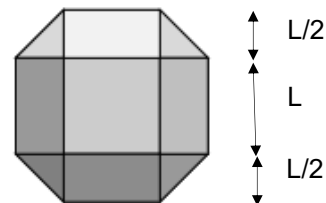
La Figure 3.10 montre le bloc impacteur utilisé pour cet essai. Il doit tout d'abord être approché pour pouvoir être accroché au crochet du dispositif de largage de la grue de Montagnole. Sa dimension caractéristique L vaut 33 cm, soit une hauteur totale de 66 cm entre faces planes opposées. Composé de béton fibré pour résister aux chocs, sa masse est de 540 kg.

Pour positionner les impacteurs à l'aplomb d'un point dans un plan horizontal, la flèche de la grue de Montagnole peut pivoter autour d'un axe vertical et le treuil de levage du bloc être translaté le long de la flèche. La photographie en Figure 3.11 illustre le positionnement du bloc impacteur au-dessus du point visé, repéré au sommet de la couche protectrice. Cette étape peut être fastidieuse en raison de l'inertie du bloc, suspendu en extrémité du câble de levage. Lorsque la position du bloc est satisfaisante, le bloc est levé à la hauteur souhaitée (dans cet essai, à 20 m au-dessus du sommet de la couche), la longueur de câble étant suivie par une roue codeuse. Enfin, la hauteur est contrôlée par distance-mètre laser.



(a) Photographie du bloc impacteur

Bloc EOTA



(b) Élévation selon une face du bloc

Figure 3.10 Bloc EOTA standard utilisé pour les essais d'impact



Figure 3.11 A gauche, repérage du point d'impact visé et, à droite, alignement de l'impacteur

3.4 Résultats et mesures

En début d'essai, le crochet de largage est déclenché et le bloc tombe en chute libre. Pour contrôler la position de la trajectoire, et éventuellement observer la décélération du bloc à l'impact (en redondance avec les accéléromètres au centre de gravité du bloc), l'impact est filmé par caméras rapides à une vitesse de 1000 images par seconde. Les photographies en Figure 3.12 sont extraites des vidéos enregistrées par les caméras rapides placées face au muret de fond (filmant dans une direction parallèle à la falaise de Montagnole) et par la caméra rapide dans la direction perpendiculaire, vers la falaise. La pénétration dans la couche de grave a été beaucoup plus faible que celle dans la couche de sable lors de l'essai Oussalah [4] pour les conditions d'impact D, B et V identiques.



Figure 3.12 Vues simultanées de l'impact dans la direction de la falaise et perpendiculairement

Malgré toutes les précautions prises, le point d'impact effectif peut être légèrement décalé par rapport au point visé. Une des sources de cette incertitude provient du crochet de largage qui peut transmettre à l'impacteur de faibles déplacements et vitesses horizontaux lors de son ouverture. Le vent sur le crochet de largage et le câble de suspension peuvent également produire des oscillations du bloc difficile à maîtriser. Le diamètre des capteurs étant de 20 cm, il est important de bien localiser le point d'impact réel.

Pour cela, la position finale du bloc après impact est déterminée précisément. Une légère déviation du bloc, observée grâce aux caméras rapides, s'est en fait produite aussi pendant la pénétration du bloc dans le sol. Pour l'analyse ultérieure des résultats des essais d'impacts sur couches de sol, la position du bloc déterminée précisément après l'impact est par convention réputée définir la position du point d'impact en surface de la couche protectrice.

La Figure 3.13 montre la détermination de la position du centre du bloc après impact, à gauche, dans une direction parallèle à la falaise (en X) et, à droite, transversalement (en Y). Ces deux directions correspondent aux côtés de la dalle et, dans l'essai, aux directions des murets de fond et latéraux. En photo de gauche, le décalage en X est mesuré par rapport au cordeau tendu entre les piquets jaune et bleu de la photo en Figure 3.8, qui matérialisent le plan vertical passant par le point d'impact visé et les centres des deux capteurs de pression. En photo de droite, le décalage est déterminé en mesurant la distance aux murets latéraux.

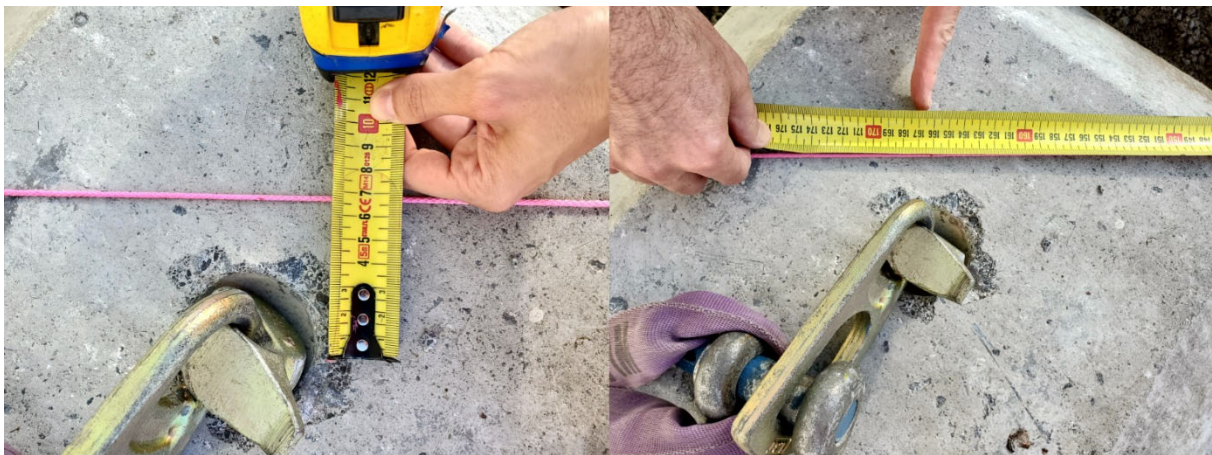


Figure 3.13 Repérage du centre du bloc après impact dans un plan horizontal

Dans cet essai, le point d'impact effectif est décalé de +7 cm dans la direction X et de +5 cm dans la direction Y, perpendiculaire à la falaise. La localisation de la trajectoire dans une vue en plan a été représentée schématiquement en Figure 3.14. Cette localisation précise de la trajectoire d'impact intervient en Section suivante, dans l'interprétation des résultats.

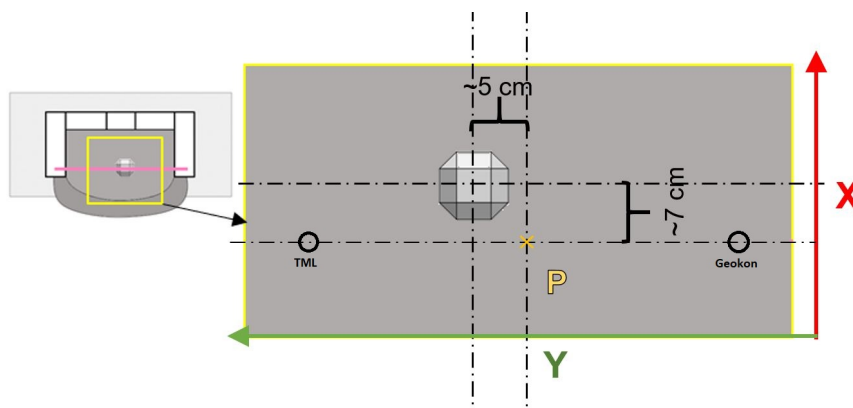


Figure 3.14 Repérage du bloc après impact dans une vue en plan

Enfin les pressions induites (variation de pression par rapport à la pression initiale due au poids propre du remblai, de l'ordre de 21 kPa) observées pendant l'impact par les deux capteurs, TLM et Geokon, ont été représentées graphiquement en Figure 3.15.

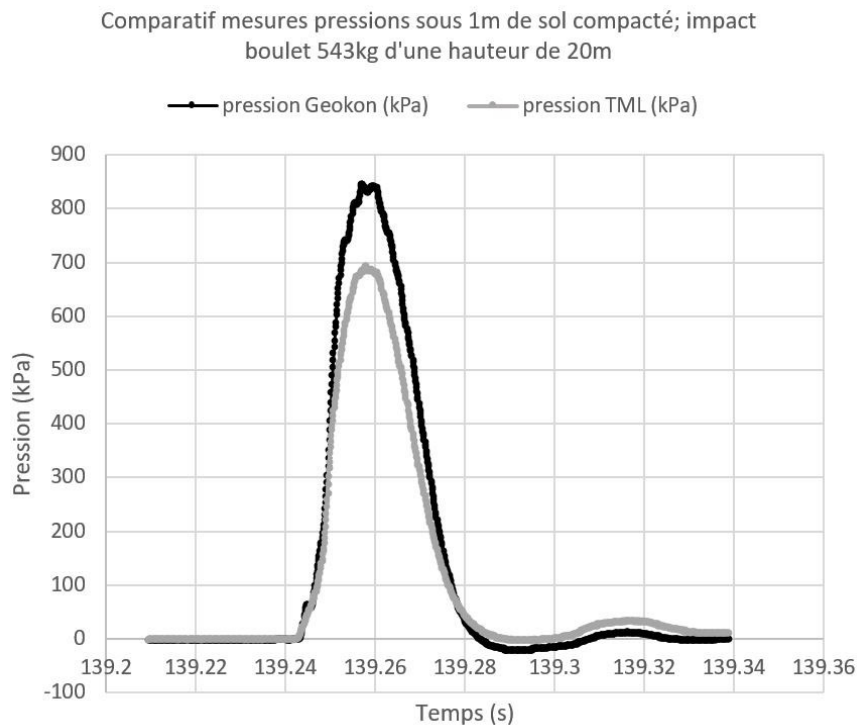


Figure 3.15 Pressions induites pendant l'impact au droit des deux capteurs, Geokon et TLM.

4 Dépouillement des mesures et interprétation

Les mesures de pression induites représentées en Figure 3.15 comportent des oscillations localisées de très faible intensité, comme celles pouvant être notées pour le capteur Geokon au voisinage du pic. Par ailleurs une oscillation de faible intensité et de fréquence plus basse apparaît après le pulse de pression. Cette oscillation est liée à la réaction dynamique de la dalle en béton et de sa fondation. Cette vibration de la dalle et de sa fondation est rapidement amortie. L'impact ne cause donc pas de vibration prolongée dans la couche de sol, en interaction avec la dalle et sa fondation.

La pression induite commence à augmenter presque simultanément dans les deux capteurs. Concernant le taux d'accroissement et la largeur du pulse de pression induite, les deux capteurs donnent des valeurs comparables, ce qui peut notamment être mis en évidence en normalisant les courbes par rapport à leurs valeurs maximales respectives. Ceci est en cohérence avec les phénomènes observés par Oussalah [4] lors des essais d'impact sur couches protectrices de sable.

Le capteur Geokon est légèrement plus éloigné de la trajectoire d'impact que le capteur TLM, comme le montre le schéma en Figure 3.14. Dans cette Figure, les capteurs et le décalage du point d'impact par rapport au point visé ont été représentés à la même échelle, mais la position de l'impact a été repérée par un schéma à échelle plus faible du bloc de largeur 66 cm. Les distances à la trajectoire d'impact des capteurs TLM et Geokon sont les suivantes :

$$r_{TLM} = 16.5 \text{ cm} \quad (6)$$

$$r_{\text{Geokon}} = 25.9 \text{ cm} \quad (7)$$

Bien que le capteur Geokon soit plus éloigné de la trajectoire d'impact que le capteur TLM, la valeur de pic de 847 kPa donnée par le capteur Geokon est supérieure à la valeur de pic de 693 kPa observée par le capteur TLM. En fait dans ce type d'essai, la pression induite décroît avec la distance à la trajectoire d'impact. Par conséquent, même si les grandeurs observées sont du même ordre, les deux capteurs testés (Géokon et TLM) ne semblent pas exactement équivalents pour les mesures de pression en dynamique.

Pour une couche protectrice de sable lâche, les valeurs paramètres du modèle décrivant le pulse spatio-temporel de pression au sommet de la dalle ont été déterminées par Oussalah [4]. Ainsi, la Figure 4.1 représente le pulse de pression calculé pour une couche de sable lâche dans les mêmes conditions d'impact que l'essai préliminaire : épaisseur de sable lâche (D) 1 m, impacteur de diamètre équivalent (B) égal à 73 cm et vitesse d'impact (V) de 71 km/h.

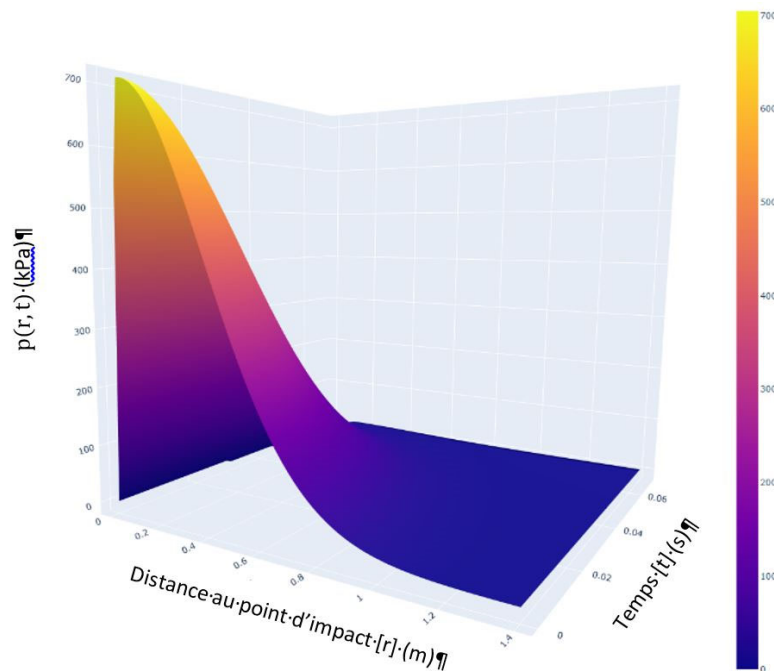


Figure 4.1 Prédiction du pulse de pression induite en surface d'une dalle protégée par une couche de sable lâche épaisse de 1 m, impactée à 71 km/h par un bloc rocheux de diamètre 73 cm

Le modèle permet donc de déterminer les valeurs des pics de pression induites qui auraient été observées pour les mêmes conditions d'impact D, B et V, sur une couche protectrice de sable lâche, au droit du capteur TLM (à 16.5 cm de distance de la trajectoire d'impact) et au droit du capteur Géokon (à 25.9 cm). Dans le graphe en Figure 4.2, la courbe de couleur rouge représente la distribution spatiale du pic de pression induite donnée par le modèle en fonction de la distance à la trajectoire d'impact (r) pour une couche de sable lâche et ces mêmes conditions d'impact. Cette Figure comporte également les valeurs de pression induite maximale observées dans les sept capteurs P11 à P17 lors de cet essai (Oussalah [4]).

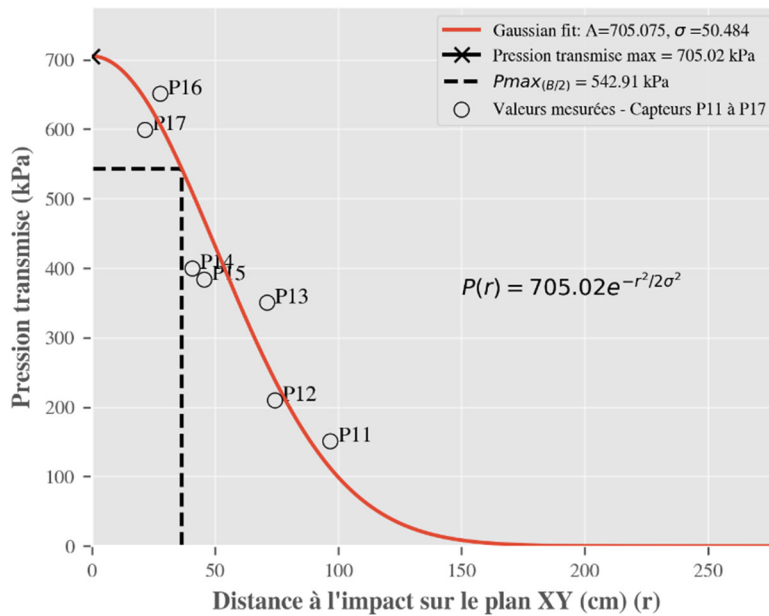


Figure 4.2 Pression induite maximale à la surface d'une dalle au travers d'une couche de sable lâche épaisse de 1 m, lors d'un impact à 71 km/h par un bloc rocheux de diamètre 73 cm (modèle)

En synthèse, le Tableau 4.1 permet de comparer, au droit de chacun des deux capteurs, les valeurs de pic de pression induite pour les mêmes conditions d'impact (D, B et V), d'une part, sur une couche protectrice de sable lâche (selon le modèle d'Oussalah [4]) et, d'autre part, de grave propre 0-31.5 (observé lors de l'essai préliminaire).

Tableau 4.1 Comparaison au droit des capteurs des valeurs de pic de pression induite pour une couche de sable lâche (modèle) et une couche de grave propre 0-31.5 (essai)

Nature de couche protectrice \ Distance à la trajectoire (r)	Pic de pression induite au travers de la couche protectrice (kPa)	
	Sable lâche (modèle)	Grave propre 0-31.5 (essai)
$r_{TLM} = 16.5$ cm	668	693
$r_{Geokon} = 25.9$ cm	618	847

La prédiction selon le modèle, pour les valeurs des paramètres déterminés pour le sable lâche, montre que la décroissance de la pression induite maximale avec la distance à la trajectoire d'impact reste modeste entre les deux capteurs (de l'ordre de 50 kPa). En effet, le diamètre équivalent de l'impacteur étant de 73 cm, les deux capteurs sont situés sous l'impacteur, où le pic de pression est proche de l'extrémum. La faible différence de distance à la trajectoire d'impact par rapport au rayon du bloc ne permet pas de caractériser une tendance, comme le montre les observations des capteurs P16 et P17 en Figure 4.2.

Néanmoins les valeurs de pic de pression observées à deux distances de la trajectoire d'impact lors de l'essai préliminaire sur la grave 0-31.5 sont supérieures à celles prédites par le modèle aux mêmes distances de la trajectoire d'impact pour une couche de sable. L'impact par un bloc rocheux semble donc produire un pulse de pression plus important au travers d'une couche protectrice de grave 0-31.5 de densité sèche 19.6 kN/m^3 qu'au travers d'une couche de sable lâche de densité sèche 15.3 kN/m^3 . Cette tendance devra être confirmée par la campagne d'essai complète à venir.

5 Conclusion

Le modèle empirique d'Oussalah [4], dont les paramètres ont été déterminés pour un sable alluvionnaire, permet de définir le pulse de pression transmis à une structure au travers d'une couche protectrice de sol lors d'un impact par un bloc rocheux. Une réflexion a été menée pour choisir un matériau davantage disponible en zone montagneuse que le sable, dans la perspective de réaliser une campagne d'essais pour disposer des valeurs des paramètres du modèle pour ce nouveau matériau.

Les critères de sélection des sols utilisables en protection contre les impacts ont été spécifiés. Le nouveau matériau considéré est une grave propre bien graduée, de granulométrie 0-31.5mm, issue de concassé de béton recyclé. Outre sa disponibilité importante, l'utilisation de ce matériau contribue à gérer plus durablement les ressources naturelles minérales. En raison de la composition des bétons, les concassés de béton recyclé contiennent peu de particules fines ($< 63\mu$), à terme sources de cohésion interne au matériau, favorable à la transmission des efforts d'impact. Leur granulométrie est étalée et très régulière. Au total, 230 tonnes de ce matériau ont été livrées sur le site de la station d'essais de Montagnole en vue de réaliser la future campagne d'essais.

Un essai d'impact préliminaire a été effectué pour définir la procédure de construction de la couche protectrice et tester l'instrumentation qui sera utilisée pour observer les efforts transmis en surface de la structure protégée. Une couche protectrice épaisse d'un mètre ($D = 1$ m) a été construite en quatre sous-couches d'égale épaisseur, chacune étant compactée par trois passes de plaque vibrante de type PV1. Le poids volumique mesuré en place était relativement élevé, égal à 21.3 kN/m^3 , et le poids volumique sec 19.6 kN/m^3 .

Pour cet essai d'impact sur une couche de grave propre 0-31.5 bien graduée protégeant une dalle rigide, un bloc EOTA de hauteur 66 cm, de masse 540 kg (sphère de diamètre équivalent (B) égal à 73 cm), a été largué d'une hauteur de 20 m au-dessus du point d'impact visé sur la dalle protégée, conduisant à une vitesse d'impact (V) de 71 km/h.

La pénétration dans la couche protectrice de grave a été moitié plus faible que celle observée lors de l'essai d'impact réalisé par Oussalah [4], pour des conditions d'impact identiques, sur une couche de sable peu compact.

Les performances aux sollicitations dynamiques de deux capteurs de pression totale ont été comparées. Le capteur Géokon a donné une valeur du pic de pression de 847 kPa, plus élevée que celle observée au capteur TML, 693 kPa, alors que ce dernier était légèrement plus proche de la trajectoire d'impact. Cette différence est donc probablement due à un comportement du capteur Geokon plus adapté aux mesures en dynamique, même si les valeurs de pression maximales observées dans les essais d'Oussalah [4] présentaient parfois aussi une variabilité.

Néanmoins, l'impact par un bloc rocheux semble produire un pulse de pression plus important au travers d'une couche protectrice de grave 0-31.5 de densité sèche 19.6 kN/m^3 qu'au travers d'une couche de sable lâche de densité sèche 15.3 kN/m^3 . Cette influence de la granulométrie et la densité sèche de la couche de sol sur sa capacité à protéger des impacts reste néanmoins à confirmer par la campagne d'essais complète à venir.

Annexe A : Références bibliographiques

- [1] ASTRA – Swiss Federal Transportation Office (2008). Actions de chutes de pierres sur les galeries de protection.
- [2] Da Silva Garcia, B., Oussalah, T., Rajot, J.P., Colas, A.S. (déposée en 2023), Space-Time Pressure Distribution Applied to a Stiff Concrete Structure through a Protective Sand Layer from Full-Scale Experimental Rock Fall Tests, ASCE, Journal of Geotechnical and geoenvironmental engineering, 33p.
- [3] Japan Road Association (2000). Rockfall Countermeasure Handbook (in Japanese).
- [4] Oussalah, T. (2018), Comportement des sables sous sollicitation d'impact à faible vitesse: application au dimensionnement de couches de sol protégeant les structures des impacts rocheux. Thèse de doctorat de l'Université de Lyon
<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01923593>

Annexe B : Courbe granulométrique du concassé 0-31.5 issu de béton recyclé utilisé en couche protectrice contre impacts

BUDILLON-RABATEL CONCASSAGE MOBILE BP 70056 100 Rue René Rambaud 38516 VOIRON Cedex Tel:04 76 05 02 14 Fax:04 76 65 62 73	Fiche d'essais Page 1/2, imprimé le jeudi 17 décembre 2020
---	--

0/31.5 RECYCLE MIXTE

Pétrographie : Valorisation / Recyclage
Elaboration : Concassé

Utilisateur : BUDILLON-RABATEL CONCASSAGE MOBILE
 BP 70056 100 Rue René Rambaud
 38516 VOIRON Cedex
 Tel:04 76 05 02 14 Fax:04 76 65 62 73

Contrôleur	LABORATOIRE CARRIERES ERCE - VOIRON BP 70056 100 Rue René Rambaud 38516 VOIRON Cedex
Prélèvement n° CC0344002	prélevés le 25/11/2020
Contrôle	Production
Chantier	ECOCIS Voreppe
Installation de traitement	Budillon-Rabatel Concassage Mobile
Observations internes	

ESSAIS	Minimum	Valeur	Maximum	Norme
Essai de classification des gravillons recyclés (EN_GR)		.		EN 933-11
Granulats recyclés - Teneur en élément flottant (FL)		1 cm ³ /kg	5	EN 933-11
Granulats recyclés - Teneur en matériaux bitumineux (Ra)		0 %	5	EN 933-11
Granulats recyclés - Teneur en béton, gra. non liée et verre	90.0	99.9 %		EN 933-11
Granulats recyclés - Autres (Rx)		0.1 %	1.0	EN 933-11
Los Angeles (LA)		24 %	40	EN 1097-2
LA+MDE (LA+MDE)		43	65	
Evaluation des fines - Essai au bleu de méthylène (0/2) (MB)		0.50 g/kg	2.50	EN 933-9
Micro-Deval (MDE)		19 %	35	EN 1097-1
Sulfates solubles dans l'eau (SS)		0.2 %	0.4	NF EN 1744-1
Teneur en eau par séchage en étuve venti (W)		3.9 %		EN 1097-5
Valeur au bleu d'un sol (VBS)		0.03 g/100g		P94-068

Analyse granulométrique			
Tamis (mm)	Minimum	%tamisat	Maximum
63.000	100	100	
40.000		100	
31.500	85	96	99
28.000		94	
25.000		90	
22.400		85	
20.000		80	
16.000	55	65	85
14.000		59	
12.500		54	
10.000		46	
8.000	35	40	68
6.300		34	
5.000		30	
4.000	22	26	60
2.000	16	18	47
1.000	9	13	40
0.500	5	10	35
0.250		7	
0.125		5	
0.080		4	
0.063	2.0	4.1	12.0

BUDILLON-RABATEL CONCASSAGE MOBILE

BP 70056 100 Rue René Rambaud
38516 VOIRON Cedex
Tel:04 76 05 02 14 Fax:04 76 65 62 73

Fiche d'essais

Page 2/2, imprimé le jeudi 17 décembre 2020

0/31.5 RECYCLE MIXTE

Pétrographie : Valorisation / Recyclage

Elaboration : Concassé

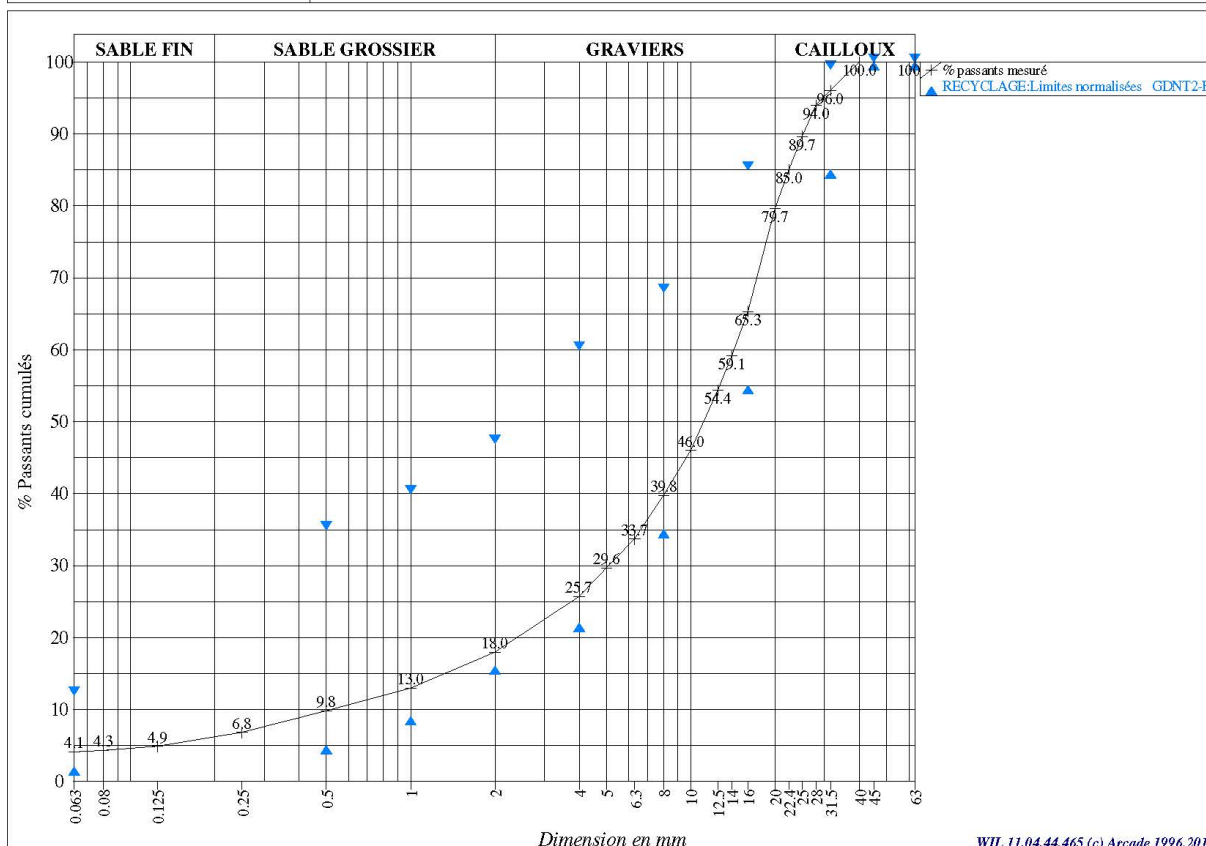
Utilisateur : BUDILLON-RABATEL CONCASSAGE MOBILE

BP 70056 100 Rue René Rambaud

38516 VOIRON Cedex

Tel:04 76 05 02 14 Fax:04 76 65 62 73

Contrôleur	LABORATOIRE CARRIERES ERCE - VOIRON BP 70056 100 Rue René Rambaud 38516 VOIRON Cedex
Prélèvement n° CC0344002	prélevés le 25/11/2020
Contrôle	Production
Chantier	ECOCIS Voreppe
Installation de traitement	Budillon-Rabatel Concassage Mobile
Observations internes	



WIL 11.04.44.465 (c) Arcade 1996,2019

C. CHATROUX
Chatroux

La reproduction de ce rapport d'essai n'est autorisée que sous sa forme intégrale. Il comporte 2 page(s).
Les résultats présentés ne concernent que les échantillons soumis aux essais.