

*Pôle Grenoblois d'Etude et de Recherche
pour la Prévention des Risques Naturels*

15 Janvier 2005

Programme de recherche 2004 financé par le
Conseil Général de l'Isère

Titre du projet

**Modélisation par éléments discrets de
l'impact de chute de blocs sur un
ouvrage de protection en béton armé**

Coordonnateur : Frédéric Victor Donzé

Laurent Daudeville, Sébastien hentz et Julien Lorentz,

Laboratoire 3S, UJF/INPG/CNRS, Grenoble

1. Table des matières

1.	Table des matières	2
2.	Résumé	3
3.	Contexte de l'étude.....	4
3.1.	Ouvrages rigides de protection contre les chutes de blocs	4
3.2.	Simulation d'impacts sur une dalle de protection fortement armée	5
3.3.	Développement de structures dissipatives multicouches.....	5
4.	Simulations d'impacts sur une dalle de protection fortement armée.....	6
4.1.	Expérimentation	6
4.2.	modélisation par la MED.....	7
4.3.	Résultats	9
4.4.	Conclusion sur la modélisation discrète	13
5.	Développement de structures dissipatives multicouches.....	14
5.1.	Présentation des tests expérimentaux	15
5.1.1.	Instrumentation.....	15
5.2.	Premiers résultats.....	16
5.3.	Conclusions et perspectives sur la campagne d'essais d'impact sur structures multicouches.....	17
6.	Bibliographie	18

2. Résumé

Cette étude réalisée dans le cadre du Pôle Grenoblois d'étude et de recherche pour la prévention des risques naturels, a pour dessein d'améliorer l'efficacité des ouvrages de protection en béton contre les chutes de pierres. Ce travail a été développé sur deux axes, dont l'un comprend la validation d'outils numériques 3D développés au sein du laboratoire 3S pour modéliser les ouvrages de protection et l'autre sur la mise en œuvre d'une campagne d'essai pour étudier la dissipation à l'impact de nouvelles structures de protection.

En ce qui concerne l'axe de modélisation, l'aspect novateur a été l'utilisation de la méthode des éléments discrets (MED) à l'échelle de la structure. La réponse d'une dalle en béton armée impactée lors d'une campagne d'essai menée par le LOCIE de Chambéry a été simulée numériquement. Cela nous a permis de mettre à contribution le code SDEC, qui est développé actuellement au laboratoire 3S, pour obtenir une description très détaillée de la zone impactée ainsi que la réponse globale de la structure. Cette étude s'inscrit dans la suite d'un projet financé par le Conseil Général de l'Isère en 2002, qui avait montré la difficulté d'interprétation d'une approche aux éléments finis pour étudier l'effet de cumul de l'endommagement sous impacts.

Le deuxième objectif de ce projet est (car les travaux se poursuivent) d'optimiser les dispositifs de dissipation à l'impact des ouvrages de protection en béton qualifiés de « légers », c'est dire conçus pour des impacts de moyenne énergie (de l'ordre de 1000 kJ). Pour cela, une campagne d'essais est actuellement menée en collaboration avec le laboratoire LOCIE à Chambéry, sur des structures constituées d'une dalle en béton armé, dont on accepte le fort endommagement voire la destruction, et qui repose sur une couche de matériaux granulaires amortissants. Les résultats expérimentaux déjà obtenus ont permis de proposer une technologie innovante avec un faible coût de réalisation. Les mesures réalisées lors de tests d'impact vont permettre de calibrer et de valider les modèles numériques dans l'optique d'un dimensionnement de ce type d'ouvrage pour des énergies d'impact plus élevées.

Deux publications sont directement issues de ces travaux, dont l'une est sous presse dans la revue "Rivista Italiana Geotecnica" et l'autre est soumise à "la Revue Européenne de Génie Civil".

3. Contexte de l'étude

Les chutes de blocs sont très largement associées aux zones montagneuses de part la présence de nombreuses falaises, mais elles sont aussi très fréquentes le long des routes où des zones d'escarpement naturel ou d'excavation existent.

Les chutes de blocs et éboulements de petits volumes figurent parmi les mouvements de terrains les plus fréquents. Quand ces blocs atteignent des zones urbanisées ou des voies d'accès routières, ils représentent une menace directe pour les personnes. L'implantation d'un réseau étendu d'infrastructures et d'équipements dans les territoires de montagne, marqués par des contraintes naturelles fortes dans un espace réduit, s'est intensifiée. Ces différents aménagements sont bien souvent exposés à l'impact des chutes de blocs, dont la capacité destructrice justifie que l'on puisse associer à l'espace construit la notion de vulnérabilité.

Des centaines de millions d'euros sont dépensés chaque année en Europe pour la maintenance des pentes à risques ainsi que pour les infrastructures de protection.

3.1. *Ouvrages rigides de protection contre les chutes de blocs*

Dans le cas où la zone qui génère la chute des blocs rocheux n'est plus accessible ou de taille trop importante, il faut alors concevoir des structures localisées capables de dévier ou de stopper les chutes de blocs rocheux ; la stratégie alors utilisée est dite « passive ».

Ceux-ci sont principalement représentés par des sols (remblais, tout-venant) et du béton. Ce type de structures sont utilisées pour protéger les voies de communication contre les impacts verticaux : il s'agit des « galeries de protection ». Cependant, le dimensionnement de tels ouvrages utilisant les géomatériaux reste empirique, et leur coût demeure important.

Afin de diminuer ce coût, de nouvelles conceptions d'ouvrages de protection ont vu récemment le jour. Par exemple, le groupe de consultant TONELLO IC, a proposé de remplacer les ouvrages classiques très massifs par des structures plus légères. La structure en béton devant supporter une couche épaisse de remblais à vocation dissipant est remplacée par une simple dalle en béton armé reposant sur des appuis « fusibles » en acier (galerie PSD). L'énergie cinétique du bloc rocheux est alors dissipée au sein de la dalle (fissuration du béton, plasticité des armatures) et au sein d'appuis « fusibles » en acier (Perrotin et al. 2002).

Afin de valider le dispositif PSD, des essais ont été réalisés en 2002 avec des blocs cubiques en béton armé (le comportement du béton est considéré représentatif de celui d'une roche) de 450 kg dont les arêtes ont été « coupées ». 3 lâchers de blocs ont été réalisés à différentes hauteurs et à différents endroits de la structure (Perrotin et al. 2002).

3.2. *Simulation d'impacts sur une dalle de protection fortement armée*

Le premier objectif de la présente étude est, l'application de la MED associée aux développements précédents pour la simulation des trois essais d'impacts sur dalle en béton armé pour lesquels nous disposons de nombreuses informations d'ordre expérimental. Ces simulations permettent de ***valider cette approche sur structure en vraie grandeur***. Nous montrons également que la MED permet une analyse fine des phénomènes d'endommagement dans la zone d'impact par effet de poinçonnement. En effet, l'approche aux éléments finis permet difficilement une telle analyse en raison du caractère continu du modèle et du manque de signification physique de la variable d'endommagement scalaire.

La modélisation de ces essais par la Méthode des Eléments Discrets (MED) initialement développée par Cundall (1979) et reprise par Frédéric Donzé dans le code SDEC (Spherical Discrete Element Code, Donzé & Magnier, 1997), permet en effet d'apporter une meilleure description des phénomènes de fragmentation et multi-fissuration sous chargement dynamique sévère. Lors de son travail de thèse, Sébastien Hentz a appliqué la méthode aux structures en béton par des simulations d'essais quasi-statiques d'éprouvettes ou de petites structures en flexion (Hentz et al. 2003). L'originalité de ce travail réside dans l'application de la MED à des matériaux cohérents et dans la proposition d'une démarche d'identification des paramètres du modèle pour la description du comportement du béton à l'échelle des éléments discrets.

3.3. *Développement de structures dissipatives multicouches*

Le deuxième objectif de ce projet est de développer des structures multicouches permettant de diminuer l'intensité de la force d'impact transmise sur la dalle principale, grâce au couplage d'une dalle de béton faiblement armé et d'un matériau granulaire. Ces structures dissipatives de type «sandwich» devraient permettre de conserver un ouvrage de protection relativement léger, tout en diminuant sa vulnérabilité à l'impact. Le site expérimental situé dans la région d'Aix les Bains en Savoie et plus précisément à Grésy sur Aix à quelques kilomètres d'Aix les Bains est actuellement utilisé pour tester différentes configurations de structures dissipatives. Grâce aux financements de RNVO, risques naturels et vulnérabilité des ouvrages, un câble permettant de larguer des impacteurs a été mis en place entre deux falaises. Il est donc possible d'effectuer des lancers sans recourir à la location d'une grue qui s'avérait onéreuse lors d'essais antérieurs sur ce même site (Delhomme et al., 2003).

4. Simulations d'impacts sur une dalle de protection fortement armée

L'idée fondamentale du concept TONELLO, était d'éliminer la couche de remblai et d'employer une approche de semi-probabiliste avec la notion "d'endommagement acceptable". Dans ce contexte, ce nouveau système utilise une dalle de béton fortement armée reposant sur des cylindres métalliques. La dalle est soumise à l'impact direct des chutes de blocs et les réactions de la dalle sont transmises dans tous les appuis en acier qui agissent en tant qu'absorbeurs d'énergie. La dalle est alors conçue pour résister directement à un impact en chute de roche qui l'endommage sur une zone locale limitée à la zone de choc. Le premier exemple de ce système de protection a été établi en 1999 aux "Essariaux" entre Albertville et Chamonix. La conception d'une telle structure et de son renfort est exécutée en utilisant une méthode simplifiée basée sur le principe des conservations de moment et d'énergie (Perrotin et al, 2002). Des expériences étaient nécessaires pour valider les objectifs d'utilisation de cette méthode simplifiée, et évaluer la réponse et les performances de ce nouveau système.

4.1. *Expérimentation*

Dans les tests expérimentaux, un bloc de béton tombait la hauteur d'une grue placée au-dessus de la dalle expérimentale. La dalle expérimentale a été conçue par la compagnie TONELLO, et construite par la compagnie de Leon GROSSE. Des expériences ont été effectuées pendant l'été 2001 par le LOCIE (université de Chambéry). Pour une description complète, voir les (Mougin et al., 2003, Delhomme et al. 2003).

La dalle : c'est un modèle réduit d'un tiers du véritable ouvrage: 12 m de long (trois zones d'essai de 4 m ont été alors définies), 4.4 m de large, de 0.28 m d'épaisseur. Elle pèse approximativement 40 t. Les propriétés du béton sont : Module d'Young $E = 29$ GPa, résistance à la pression = 31 MPa. Il est fortement renforcé, avec des barres longitudinales (2*19 HA14 et 2*16 HA20) et de renfort transversal (2*118 HA16), aussi bien que les armatures verticales (19*7 HA8).

Le bloc : c'est un bloc de béton cubique renforcé, dimensions latérales de 0.56 m, et pesant 450 kilogrammes. Les propriétés du béton sont identiques que celles du béton composant la dalle.

Les fusibles : la dalle repose sur deux lignes de 11 fusibles, régulièrement espacés 1.14 m. Ce sont des cylindres creux en acier, qui peuvent absorber de l'énergie de choc en cloquant. Leurs propriétés connues sont, leur rigidité (1.109 N), et leur charge critique en compression (250000 N).

Les essais : trois impacts ont été effectués : le premier et le second de 15 et 30 m de haut respectivement et un troisième de 30m sur le bord de la dalle (au-dessus de la ligne des fusibles).

Les mesures : des jauges de contrainte ont été placées dans la dalle, et les cellules de déplacement ont enregistré le débattement maximum de la face inférieure de la dalle à différentes positions.

4.2. *modélisation par la MED*

La dalle : il doit être noté que seulement un tiers de la dalle a été modélisé, d'une part pour des raisons de symétrie, et d'autre part pour diminuer le coût de calcul. L'influence de ce choix sera discutée plus tard. Le renfort est identique à l'expérimentation (voir la fig. 7, 77 329 éléments), ensuite l'assemblage polydisperse compact et isotrope des éléments "béton" (110 160) est obtenu par une technique de désordre autour du renfort. Des paramètres locaux sont identifiés avec une approche quasi-statique : des essais uniaxiaux fondamentaux sont simulés sur un échantillon numérique extrait à partir de la dalle (voir la fig. 1) ainsi les propriétés prévues du béton sont obtenues. Cette étape est particulièrement importante, car elle assure l'aspect prédictif du calcul : aucun paramètre n'a été identifié directement sur l'essai d'impact. Quant aux paramètres de renfort, ils ont été identifiés avec un essai de traction sur seule une barre de renfort.

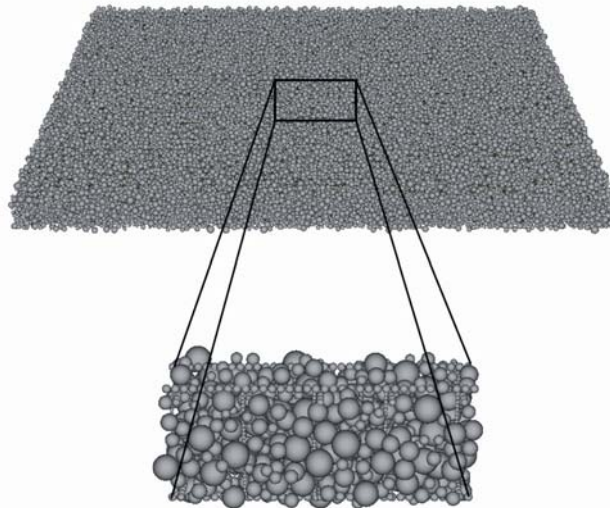


Fig. 1 – Echantillon prélevé pour l'identification des paramètres mécaniques

Le bloc : sa géométrie est comme celle du bloc expérimental, les paramètres locaux sont identiques à ceux de la dalle. 10976 éléments ont été employés.

Les fusibles : ils sont mis aux positions expérimentales, et doivent être modélisés avec beaucoup de précision (voir la fig. 2). Ce sont les cylindres creux, faits de 2430 éléments chacun. Vu la faible information expérimentale disponible concernant les fusibles, un essai de compressibilité a été simulé pour obtenir la rigidité prévue ainsi que l'effort critique. Comme dans la réalité, des plats ont été placés entre les fusibles et la dalle, ce qui évite aussi des problèmes dus à la différence dans granulométrie.

En conclusion, 221000 éléments ont été employés pour ce calcul (la simulation 0.01s de demandes en temps réel rudement 10h sur un P IV 2.8GHz). Le tableau 1 montre les paramètres locaux.

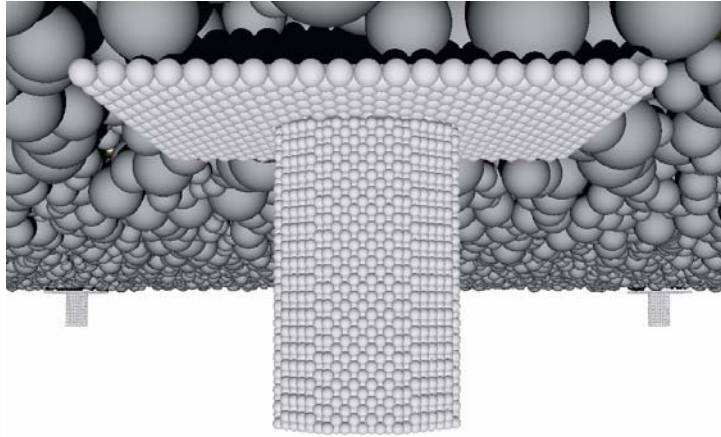


Fig. 2 – Modélisation des fusibles

Paramètres	Béton	Acier	bloc	fusible
ρ ($kg.m^3$)	2500	7800	2500	7800
γ	1,4	1,05	1,4	1,05
E (GPa)	30	210	30	72
ν	0,2	0,25	0,2	0,25
ϕ_i (degré)	30	0	30	0
c (MPa)	3	250	6	27
T (MPa)	1,5	500	3	55
β	100	$\rightarrow\infty$	100	$\rightarrow\infty$
ϕ_c (degré)	30	30	30	30

Table 1. – Paramètres locaux utilisés

Conditions de simulation : la gravité est d'abord appliquée à la dalle jusqu'à ce que l'équilibre soit atteint. Le bloc est ensuite placé juste au-dessus de la surface de la dalle, avec la vitesse initiale correspondant à sa chute libre. La configuration d'impact (position et orientation) a été aussi proche que possible de la configuration expérimentale observée. Le bloc est aussi soumis à la gravité. Des déplacements ont été mesurés aux mêmes positions que les cellules, sur la face inférieure de la dalle. La configuration numérique prête pour le calcul est montrée sur fig. 3.

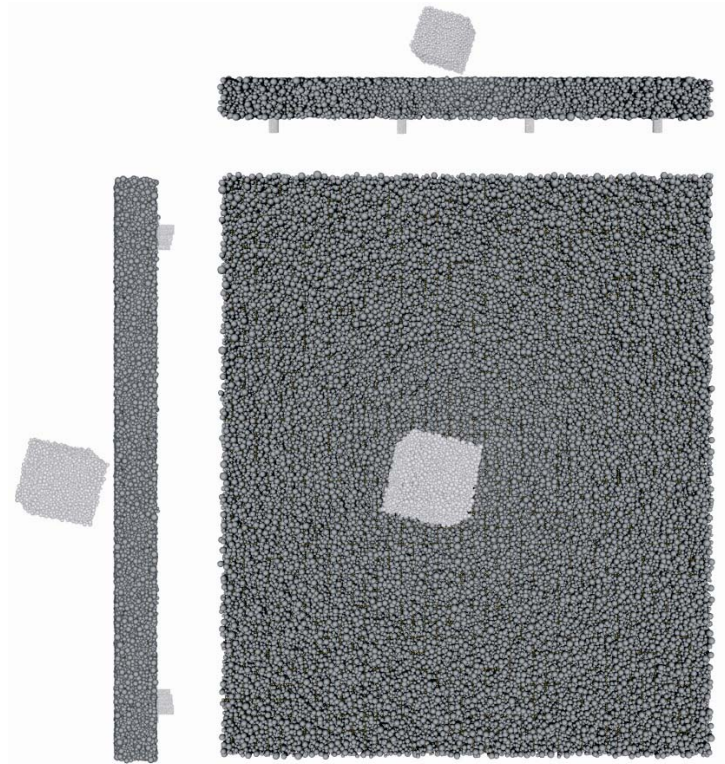


Fig. 3 – Configuration du modèle numérique

4.3. Résultats

Les résultats obtenus par la simulation des trois essais sont récapitulés au tableau 2, et comparés au déplacement maximum obtenu, ainsi que la tenue du renforcement et des fusibles. Ces résultats sont très satisfaisants, et en particulier, les erreurs relatives au déplacement maximum sont de l'ordre de 5 à 8 %.

Type de Test	Expérience	Simulation
30 m de hauteur de chute centrée	Déplacement maximum: 22,5 mm Pas de fusible cloqué Pas de plastification d de l'armature horizontale plastification de l'armature verticale	Déplacement maximum: 21.4 mm Pas de fusible cloqué plastification de l'armature
15 m de hauteur	Déplacement	Déplacement

de chute centrée	maximum: <i>14,5 mm</i> Pas de fusible cloqué Pas de plastification d de l'armature horizontale Pas d'information pour la verticale	maximum: <i>13,9 mm</i> Pas de fusible cloqué Pas de plastification de l'armature
30 m de hauteur de chute sur le bord	Maximum displacement: <i>21,5 mm</i> 3 fusibles cloqués Pas de plastification du renfort horizontal. Pas d'information pour la verticale	Maximum displacement: <i>19,9 mm</i> 4 fusibles cloqués plastification de l'armature

Table 2. – Comparaison entre les résultats numériques et expérimentaux

En ce qui concerne l'essai centré de 30 m de haut, la fig. 4 montre la force d'impact et la déflexion en fonction du temps pour les premières 50 ms, et fig. 5 montre la force de la dalle agissant sur un fusible particulier. On peut observer que le déplacement maximum est atteint en deux phases : le premier pic se produit bien au moment de l'impact, jusqu'à qu'approximativement 4 ms, puis une certaine fluctuation se produit, et autour de $t = 13$ ms, un deuxième pic apparaît. En analysant la force sur le fusible, il est à remarquer que pendant cette première phase, le fusible subit un effort très petit, tandis que la majeure partie de la force se produit pendant la deuxième phase. Ceci signifie que la première phase du déplacement correspond à une flexion locale de la dalle, qui n'est pas couplée au reste de la galette, tandis que la deuxième phase est due au mouvement global de la dalle, et qui dépend naturellement beaucoup des conditions aux limites.

La deuxième partie du déplacement peut alors être influencée par le fait que seulement un tiers de la dalle a été modélisée. D'autre part, il est très probable que cet impact active principalement un mode simple de flexion, c.-à-d. entre les deux lignes des fusibles, ce qui est indépendant de la longueur de la galette. D'ailleurs, la fréquence de vibration de la dalle déterminée après l'impact est approximativement 7.6 hertz, ce qui est proche de la mesure expérimentale, de 10 hertz. Il semble alors que ce qui modèle est bien représentant de la vraie structure, et que la comparaison du déplacement maximum est légitime.

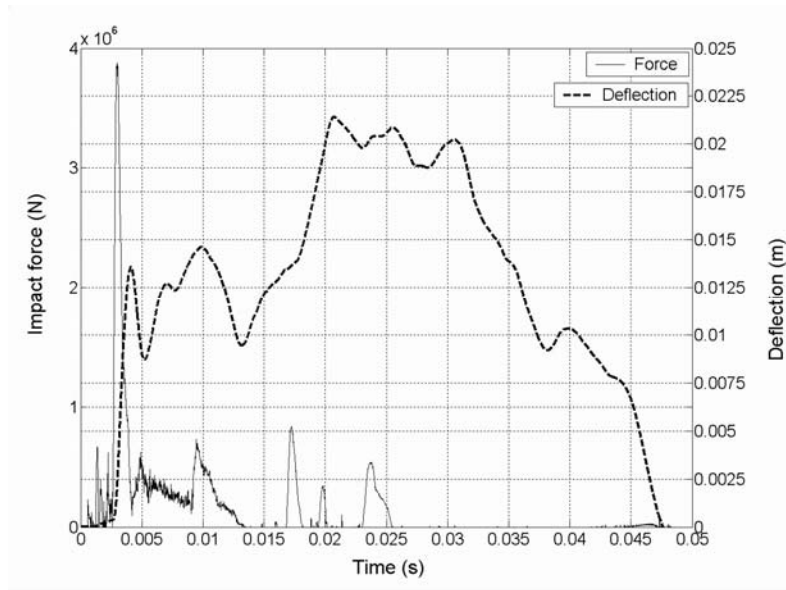


Fig. 4 – Force d’impact et déflexion en fonction du temps

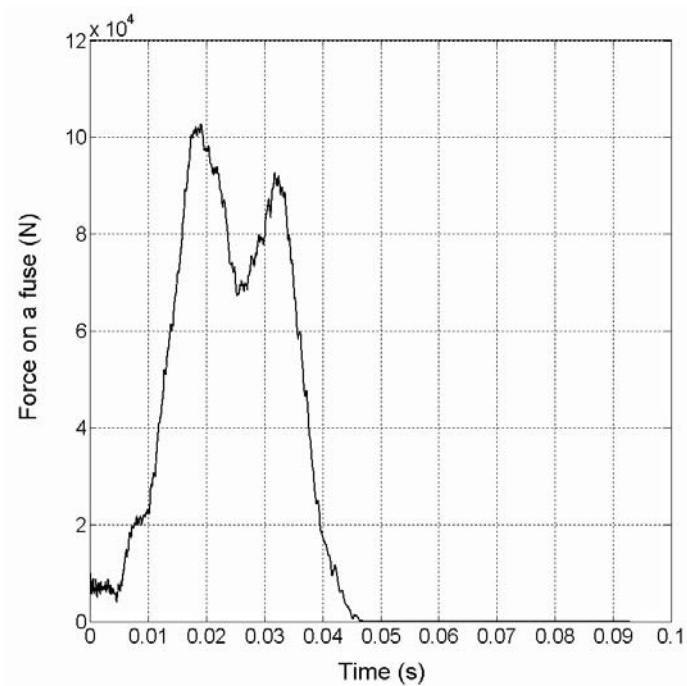


Fig. 5 – Evolution de la Force issue de la dalle et agissant sur un fusible

Le faciès d’endommagement de la dalle après impact est montré à la fig. 6 et à la fig. 7. Ces figures indiquent que l’endommagement dans une section transversale verticale de la dalle est important (l’endommagement est calculé par élément, et est exprimé par le nombre de rapport de liens cassés par rapport au nombre de liens initiaux ; plus l’élément est foncé, plus il y a d’endommagement). Il doit être noté que l’endommagement se produit très rapidement, pendant la localisée de l’impact. Au début de l’impact, la

sollicitation est principalement due au coin du bloc et l'endommagement prend la forme classique d'un cône. La face impactée est très endommagée, et localement écrasée. Un peu d'écaillage se présente en sub-surface, laissant apparaître une partie du renfort. Une partie de renforcement à plastifié.

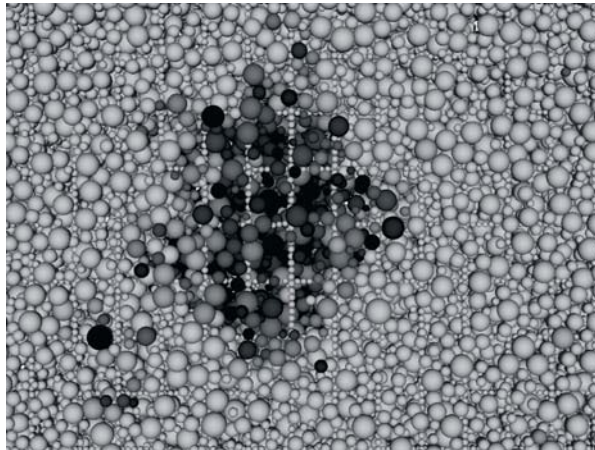


Fig. 6 – Endommagement de la dalle au point d'impact

Pour l'essai de 30 m d hauteur sur le bord, les trois fusibles les plus proches de la position de l'impact ont cloqué. Le calcul a montré les mêmes résultats (voir la fig. 8) : ces trois fusibles ont cloqué, comme un quatrième, situé au coin opposé, sans doute en raison d'une violente onde de réflexion (la dalle rebondit sur les fusibles). Ceci peut être un artefact lié au fait qu'un tiers de la dalle ait été modélisée.

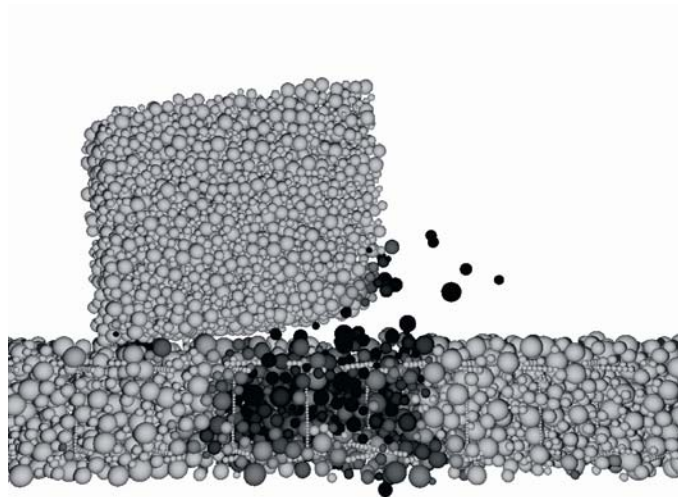


Fig. 7 – Vue en coupe de l'endommagement du bloc et de la dalle au temps $t = 20 \text{ ms}$.

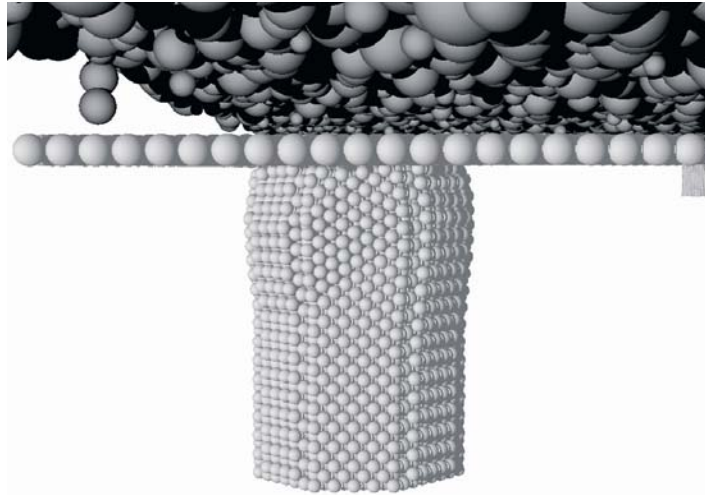


Fig. 8 – Cloquage de fusible

4.4. Conclusion sur la modélisation discrète

Une approche discrète tridimensionnelle d'élément pour étudier le comportement dynamique du béton. Les spécificités principales de cette approche sont les suivantes : l'échelle de modélisation est plus grande que l'échelle des hétérogénéités, ainsi le modèle peut être employé pour simuler de vraies structures, qui signifie que la MED est principalement employée ici pour sa capacité de traiter des discontinuités ;

Les lois d'interaction entre les éléments discrets sont très simples et ont une formulation proche des lois macroscopiques ; un procédé d'identification fondé sur des essais quasi-statiques est employé, permettant de bien reproduire le comportement quasi-statique du béton. Ce procédé d'identification est le point clé, car il permet des calculs prédictifs. La validation du modèle est prolongée par la simulation des essais dynamiques, comme les essais compressifs et de tension de SHPB : l'effet du taux de déformation est alors pris en considération. La façon dont le renfort est présenté a été validée par la simulation d'un essai de flexion quatre points.

Ici, trois essais de chute de blocs ont été simulés, pour différentes tailles et à différentes positions. La dalle en béton armé a été représentée à l'échelle un. Les résultats ont été comparés aux résultats expérimentaux : qualitativement, la cinématique, l'endommagement et la déformation des fusibles sont très cohérents résultats expérimentaux. Quantitativement, les déflexions maximum sont très proches des données expérimentales, malgré le fait que seulement un tiers de la dalle ait été modélisée.

Ces résultats confirment que cette approche discrète peut être employée comme un outil prédictif puissant pour la conception des structures de sûreté. La Méthode des Éléments Discrets est particulièrement intéressante pour la zone d'impact très localisée qui est fortement endommagée, tandis que le reste de la dalle demeure élastique. Ceci mène à l'idée d'optimisation de cette approche en la couplant avec une méthode continue, ce qui serait particulièrement efficace en termes de coût de calcul.

5. Développement de structures dissipatives multicouches

Le principe de fonctionnement de la structure multicouche est d'utiliser un système permettant de diminuer l'intensité de la force d'impact grâce au couplage d'une dalle de béton faiblement armé et d'un matériau granulaire (Montani, 1996, 1998).

Grâce à la dalle en béton armé soumis à l'impact, l'effort est réparti sur toute la couche granulaire dissipatrice et celui-ci peut dissiper une partie de l'énergie lors de l'impact par déformation plastique des aciers (Perrotin, 2002) (Mougin et al., 2005), poinçonnement, compaction et flexion du béton (Burlion et al., 2001). Le matériau granulaire est lui, contenu dans des pneus de voitures, permettant d'obtenir un degré de compaction important pendant l'impact, dû au vide laissé entre les pneus.

Au niveau international, des études similaires sont menées pour tester ce type de structures composites. Par exemple, des études au Japon ont permis de tester une structure composée de trois couches. Celles-ci montrent l'effet de répartition de l'effort d'impact grâce à une dalle en béton faiblement armé et la dissipation de l'énergie issue de la déformation d'une couche de poly styrol expansé (Kishi, 1999), (Kawase, 2001).

La structure « sandwich » doit répondre à des attentes d'ordres technologiques mais aussi économiques pour devenir une solution envisageable. Les avantages présentés par cette structure sont exposés ci-dessous :

- ❑ Cette structure se caractérise par une faible épaisseur (inférieure au mètre). Elle permet donc une implantation aisée,
- ❑ L'endommagement de la dalle en béton armé et de la structure granulaire est toléré et pris en compte dans les phénomènes de dissipation. C'est donc une structure modulaire ou chaque élément est échangeable,
- ❑ Les matériaux mis en œuvre sont des matériaux courants et bons marchés : tout venant, pneus usagés, géotextile, dalle béton faiblement armé,

A la suite des essais expérimentaux, les efforts transmis par la structure en fonction de l'énergie cinétique incidente sont quantifiés.

5.1. Présentation des tests expérimentaux



Fig. 9 – structure sandwich et l'impacteur en béton ductal

La figure 9 présente La structure testée dont la longueur est de 2 m et la largeur de 1,5m. Un matériau granulaire type tout venant 0-31.5mm est utilisé comme couche de dissipation. Celui-ci est inséré dans des pneus de voiture. La dalle de répartition est une dalle en béton armé de 10 cm d'épaisseur composée de béton classique dont la résistance à la compression est de 35MPa. Le ferrailage est composé de deux lits de treillis soudés correspondant à un rapport d'acier sur béton de 60 kg.m^{-3} .

L'impacteur est une sphère en béton ductal de 80 cm de diamètre et pesant 650 kg. Le béton est préféré à l'acier car sa masse volumique est très proche de celle des blocs rocheux. Aussi, nous avons choisi le matériau ductal pour obtenir un impacteur rigide et la forme sphérique dans le but de connaître précisément la forme du point de contact.

Pour la première partie expérimentale, l'impacteur est lancé pour des hauteurs comprises entre 1 et 5m soit des énergies de l'ordre de 30 kJ.

Le support de la structure est un bloc en béton de hauteur 70 cm dont le taux de ferrailage est très important pour assurer une grande rigidité par rapport à la structure testée.

5.1.1. Instrumentation

La structure est équipée de différents capteurs reliés à une station d'acquisition dont la fréquence d'échantillonnage est de 7000 Hz. Les capteurs suivants ont été installés :

- ❑ 1 accéléromètre ($\pm 5000g$ verticalement, bande passant de 1 à 10 000Hz) placé sur l'impacteur. Celui-ci permet de mesurer le pic de décélération de l'impacteur dans la direction de la sollicitation et d'estimer la force d'impact en multipliant l'accélération mesurée dans l'impacteur par sa masse.

- ❑ 3 capteurs de force (capacité 100kN) positionnés sous le support. L'effort d'impact transmis est calculé en sommant les valeurs des trois capteurs de force en supposant que la distribution des efforts est axisymétrique et que l'impact se produit au centre de la structure.
- ❑ 2 accéléromètres ($\pm 500g$ verticalement, bande passant de 1 à 10 000Hz) placés sous le support. Ceux-ci permettent de mesurer les vibrations du socle.
- ❑ 2 caméras rapides (1000 images par seconde, champ de 2m sur 2m, 256*240 pixels). Ces 2 caméras permettent de suivre le mouvement de l'impacteur et de la structure selon les 3 dimensions de l'espace.

5.2. Premiers résultats

Après de nombreux tests de références, une première structure composite est testée. Une dalle en béton armé est posée sur les 21 pneus remplis de tout venant. 4 essais ont été effectués pour une hauteur variant de 2 m et de 5 m.



Fig. 10 – A gauche, impact sur la dalle (première phase) + pneus. A droite cratère à la suite d'un impact d'une hauteur de 5m

Lors de l'impact, la dalle est endommagée mais n'est pas perforée comme la fig. 10, le montre. L'armature retient l'impacteur. On peut décrire un réseau de fissures qui correspond à du poinçonnement et à de la flexion. Durant l'impact, on peut mettre en évidence trois phases comme le montre la figure 11 :

- ❑ Un premier pic d'impact, mesuré par l'accéléromètre dans l'impacteur (effort impacteur), est mesuré. Il correspond à la réponse de la dalle en béton armé soumis à l'impact. L'effort au pic est très important, soit 300 kN et la dalle est poinçonnée.
- ❑ Le deuxième pic d'impact mesuré par l'accéléromètre dans l'impacteur est du à la déformation globale de la structure. On peut remarquer que la valeur au pic est beaucoup plus faible 90 kN.

- Le dernier pic est dû au rebond de la structure dans son ensemble. En effet, l'impacteur reste solidaire de la structure. On peut mesurer son intensité grâce aux capteurs de force qui donnent l'effort d'impact transmis, soit 25kN.
- Enfin, on peut constater que l'effort d'impact transmis par la structure est plus faible (230kN) que celui mesuré pour une couche de tout venant (315kN).

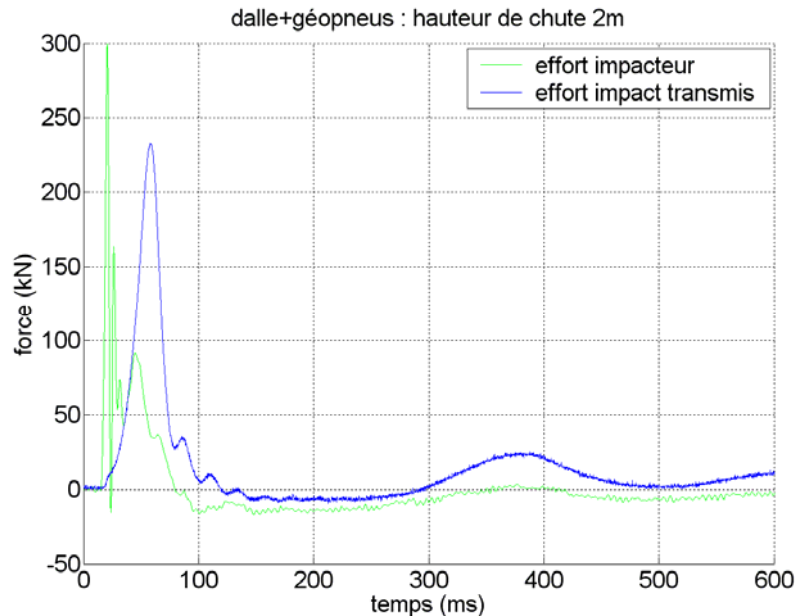


Fig. 11 – efforts mesurés lors d'un impact sur une dalle + 21 pneus pour une hauteur de chute de 2m

5.3. Conclusions et perspectives sur la campagne d'essais d'impact sur structures multicouches

L'efficacité d'une structure de protection dépend fortement de sa capacité à dissiper l'énergie d'impact, c'est à dire transmettre l'effort le plus faible. Les premiers résultats expérimentaux montrent que, pour des énergies cinétiques de 30 kJ, le couplage d'une couche de matériaux granulaire comme matériau dissipant à une dalle en béton armé répartissant et dissipant par compaction et flexion de l'effort d'impact, peut s'avérer une solution intéressante.

D'autres configurations vont être testées et comparées à ces premiers résultats. Aussi, une étude de l'effort transmis en fonction de la hauteur de chute sera mise en œuvre pour la configuration présentant les meilleures caractéristiques.

Enfin, des simulations numériques utilisant la Méthode des Eléments Discrets aideront au dimensionnement de telles structures pour des énergies cinétiques plus élevées.

6. Bibliographie

BURLION N., PIJAUDIER-CABOT G., DAHAN N., Experimental analysis of compaction of concrete and mortar, International journal for numerical and analytical methods in geomechanics 25, 1467-1486, 2001.

CUNDALL, P. A. Numerical experiments on localization in frictional materials. ingénieur-archiv **59**, 148-159, 1989.

DELHOMME F, MOMMESSIN M., MOUGIN J.P., PERROTIN P., Behavior of a structurally dissipating rock-shed : experimental analysis and study of punching effects, International journal of solids and structures, p4204-4219, 2005

DONZE F. V. & S.-A. MAGNIER, « Spherical Discrete Element Code » In: *Discrete Element Project Report no. 2*. GEOTOP, Université du Québec à Montréal, 1997.

HENTZ, S., DAUDEVILLE, L. & DONZÉ, F.-V. *Discrete element modelling of concrete submitted to dynamic loading at high strain rates*. Computers and Structures. **82** No 29-30, 2509-2524, 20043

KAWASE R, KISHI N, KONNO H, MATSUOKA KG, Falling-weight impact tests and impact response analyses of two-layered absorbing system, 4th Asia-Pacific Conference on SHOCK & IMPACT LOADS ON STRUCTURES : November 21 – 23, Singapore, 2001

KISHI N, Absorbing performance of sand cushion and three-layered absorbing system, 3th Asia-Pacific Conference on SHOCK & IMPACT LOADS ON STRUCTURES : November 24-26, Singapore, 1999

MONTANI S, DECOEUDRES F. Etude expérimentale de la chute de blocs impactant une dalle en béton armé recouverte par des matériaux amortissant, département fédéral des transports, des communications et de l'énergie, Office fédéral des routes, p-93, 1996.

MONTANI S, sollicitation dynamique de la couverture des galeries de protection lors de chute de blocs, Thèse EPFL, Lausanne, Suisse, 1998

MOUGIN JP, PERROTIN P, MOMMESSIN M, TONNELO J, AGBOSSOU A, Rock fall impact on reinforced concrete slab : an experimental approach, International journal of impact engineering 31, 169-183, 2005

PERROTIN P., MOMMESSIN M., MOUGIN J-P, TONNELO J., étude expérimentale du comportement d'une dalle pare-bloc, revue française de génie civil volume 6, 2002