



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

**Programme de recherche 2006
financé par le Conseil Général de l'Isère**

MERLONS PARE-BLOCS A STRUCTURE CELLULAIRE

CAPACITE DISSIPATIVE

DES CELLULES COMPOSITES CONSTITUTIVES



Rapport 15/11/2007

Gestionnaire/Responsable du projet : Philippe Gotteland,
philippe.gotteland@hmg.inpg.fr, 3S-R, Grenoble

Co-responsable : Stéphane Lambert

Stephane.lambert@cemagref.grenoble.fr, Cemagref-Etna,



1. CADRE GENERAL DU PROJET

1.1 Objectifs du programme

Ce projet a pour objectif de contribuer à améliorer le dimensionnement des merlons pare-blocs (figure 1) par une meilleure prise en compte des sollicitations et par une adaptation innovante de leur conception en utilisant la technique des parements cellulaires.

Le programme de recherche vise à **améliorer la conception et le dimensionnement des ouvrages de protection passive contre les chutes de blocs rocheux.**

Il s'intéresse à un type particulier d'ouvrage dont le principe technologique innovant repose sur la construction cellulaire par partie de la structure. Le concept technologique repose sur l'utilisation d'éléments préfabriqués élaborés à partir de matériaux composites souples assemblés entre eux (Figure 2). Dans le cas ciblé, chaque élément se présente sous la forme d'une cellule grillagée, ouverte ou fermée, remplie d'un matériau de caractéristiques (nature, granulométrie...) adaptées en fonction de la position de la cellule dans l'ouvrage et au rôle joué par la cellule lors de l'interception d'un bloc rocheux. Ces différents éléments peuvent glisser ou non les uns par rapport aux autres, permettant de dissiper ou localiser l'énergie des blocs incidents. Ce type de structure par l'utilisation de matériaux de remplissage adaptés présente une souplesse importante qui évite de générer des concentrations de contraintes préjudiciables à la stabilité de la partie de l'ouvrage à l'aval.

La modularité résultant de la nature cellulaire de ce type d'ouvrage offre des possibilités d'adaptation et d'évolution, par rapport au site et au cours de la vie de l'ouvrage. La réparabilité en cas d'événement est également facilitée. Par rapport aux structures existantes, tels que merlons renforcés, filets ou écrans, ce type d'ouvrage a pour finalité l'interception de blocs d'énergie modérée dans des zones à forte contrainte d'emprise au sol.

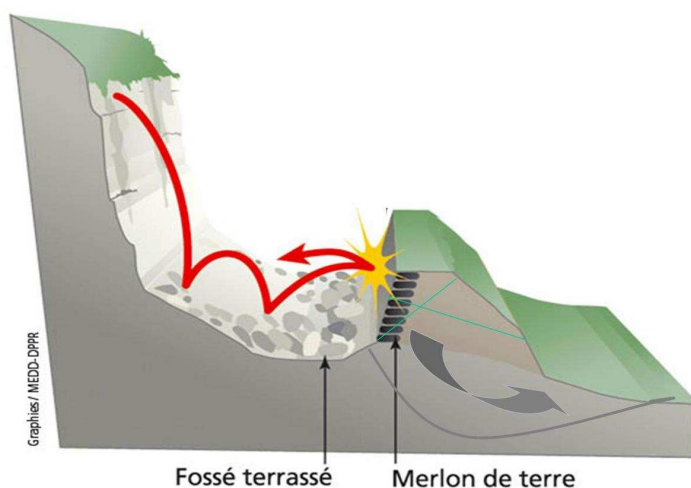


Figure 1 Principe de fonctionnement des merlons pare-blocs

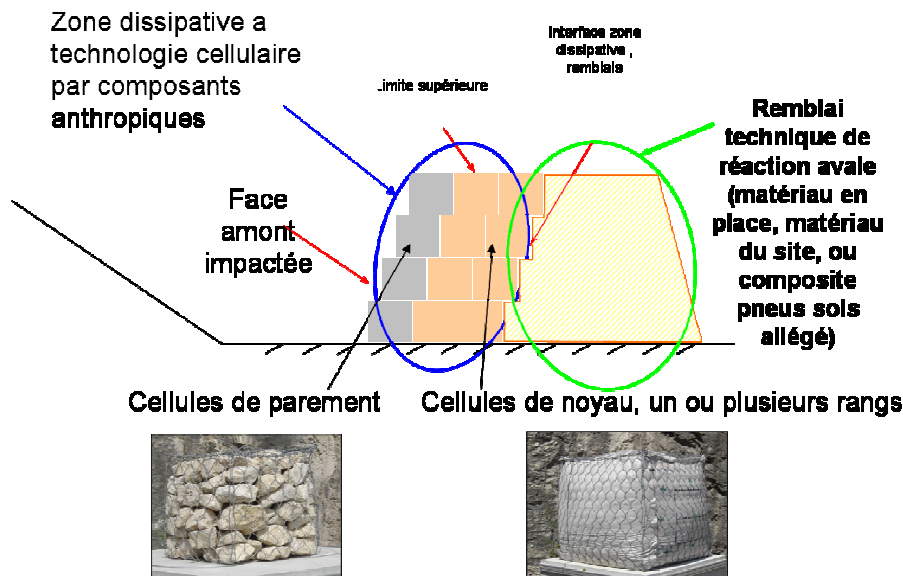


Figure 2 : concept de fonctionnement des merlons à structure cellulaire

Le programme de recherche général fait l'objet d'un support par l'ANR 2006 dans le cadre du projet de recherche REMPARE « ré-ingénierie des merlons de protection par composants anthropiques recyclés ». Le programme s'inscrit également dans la structure fédérative VOR-RNVO (Risques Naturels & Vulnérabilité des Ouvrages) ainsi que dans le projet régional envirohonalpe.

1.2. Structuration et organisation du programme général

Le programme se compose de deux volets interdépendants : un volet de modélisation numérique et un volet expérimental, abordant chacun les différentes échelles, depuis les matériaux constitutifs jusqu'à l'ouvrage. Le travail de recherche s'inscrit dans une **approche multi-échelles**, permettant un « dialogue » entre **différents niveaux de représentation de la structure** : (i) l'échelle locale de l'impact, à laquelle des mécanismes de localisation peuvent se développer ; (ii) l'échelle de la cellule, qui peut être décrite à l'aide d'une technique d'homogénéisation adéquate par un objet continu; et enfin (iii) l'échelle de l'ouvrage, qui intéresse l'ingénieur et le gestionnaire. L'intérêt d'aboutir à un modèle à l'échelle de l'ouvrage permet d'assurer à la démarche proposée une application pratique.

Le programme s'articule autour des axes suivants :

- Modélisation du **comportement mécanique d'un élément cellulaire** par la méthode des éléments discrets.
- Construction d'une **loi de pénétration d'un bloc** au sein d'un élément cellulaire à l'aide de la méthode des éléments discrets.
- Campagnes **d'expérimentations de laboratoire et sur site** nécessaires aux investigations et calages des paramètres, approche quasi-statique et dynamique.

- Développement d'un outil **de calcul à destination du partenaire industriel et des opérationnels**, afin de simuler l'impact d'un bloc sur un ouvrage.
- Campagne de **validation sur ouvrage(s) en vraie grandeur**.

1.3. Positionnement du projet dans le programme

Le projet se positionne sur la partie expérimentale, à l'échelle du composant cellulaire. Pour faire suite aux étapes expérimentales précédentes_ (cf. rapport PGRN 2004) qui avaient pour objectifs : de **comprendre** phénoménologiquement le fonctionnement sous impact des cellules et **d'accompagner la démarche de modélisation** numérique 3D des cellules soumises à une sollicitation dynamique, en fournissant des données de calage obtenues dans des conditions parfaitement définies, la présente étape s'intéresse au comportement des cellules sous sollicitations d'impact dans des conditions opérationnelles proches de celles attendues au sein de l'ouvrage. L'objectif a été de reproduire des conditions aux limites des essais sur les cellules proches de l'environnement réel, condition que l'on appellera confinement matériaux (CM). Ces essais sont qualifiés **d'essais de performance**.

2. LE PROGRAMME EXPERIMENTAL SPECIFIQUE

Les expérimentations ont été menées sur le site de la carrière de Grésy sur Aix 73 rattaché à la structure fédérative VOR-RNVO qui en a financé l'équipement de largage.

La cellule testée est placée sur un socle indéformable. L'application des sollicitations dynamiques se fait par largage d'un impactant autorisant des énergies d'impact allant jusqu'à 18 kJ. L'instrumentation mise en œuvre permet l'acquisition en continu du déplacement du bloc largué ainsi que les forces transmises au socle par la cellule ; ces mesures sont obtenues par le biais de 3 capteurs de force placés sous le socle et un accéléromètre dans la sphère (Figure 3). En complément, certains essais ont été filmés à titre phénoménologique (comescope numérique) ou à des fins de mesure (caméra rapide) afin de recalibrer les mesures directes (Lambert, 2007).

Afin de réaliser des conditions aux limites sur la cellule proches de celles appliquées dans l'ouvrage par les cellules voisines, le confinement latéral des cellules doit opposer une résistance à la déformation des 4 faces sans toutefois être rigide, reproduisant l'effet de confinement par les cellules contiguës au sein d'un ouvrage. Après étude de faisabilité de trois alternatives pour appliquer le confinement :

- confinement par d'autres cellules, placées au contact des 4 faces latérales (Figure 4 a);
- confinement par un matériau ou un système élasto-plastique (Figure 4 c),
- confinement par le matériau de remplissage disposé autour de la cellule (Figure 4 b) - la cellule est placée au milieu d'un 'massif' de section carrée de 1,2*1,2 m rempli du même matériau,

la solution confinement matériaux a été retenue. En complément, et dans l'objectif de reproduire les conditions réelles de fonctionnement des cellules, la possibilité d'intercaler un matériau déformable entre la cellule et le socle sera également envisagée dans une phase ultérieure (Figure 4d).



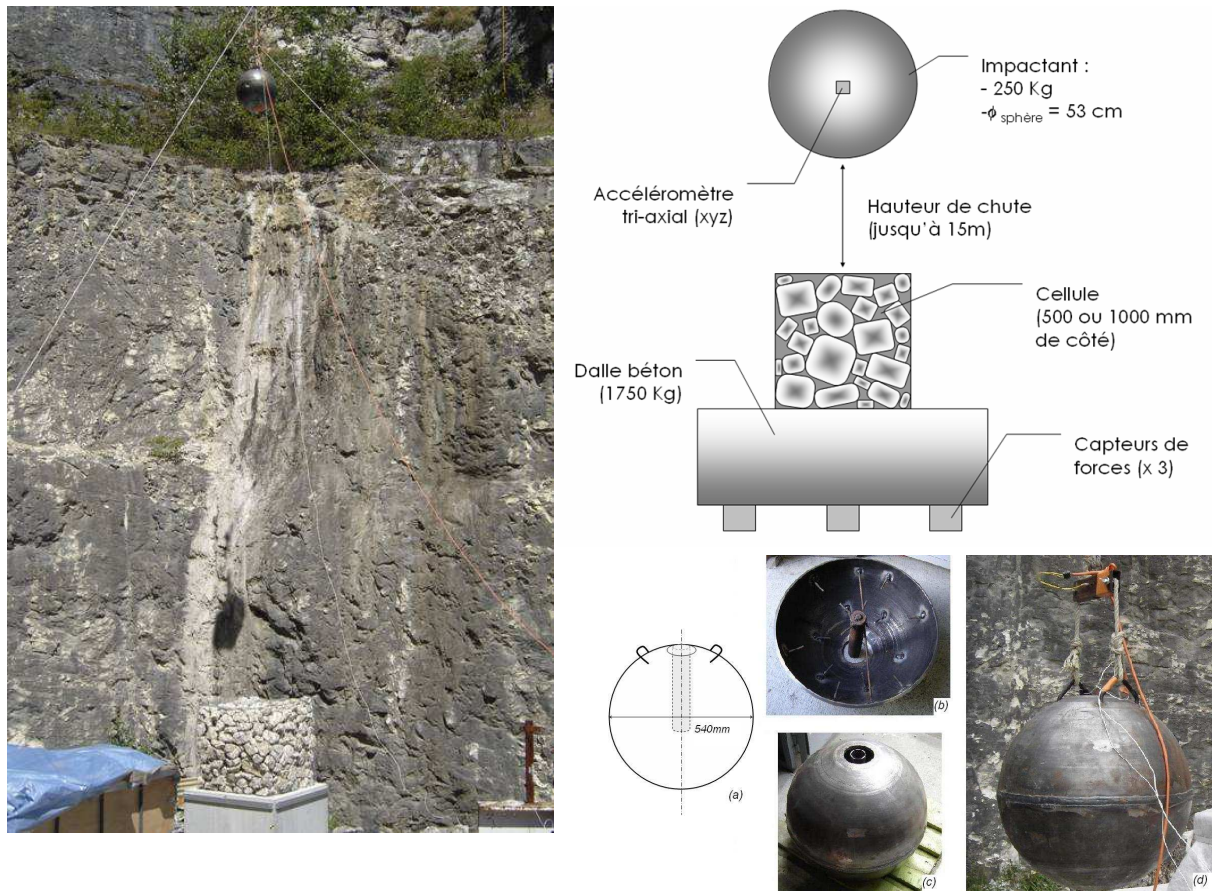


Figure 3. Principe du dispositif expérimental, description de l'impactant avec fourreau pour l'accéléromètre.

Deux types de matériaux de remplissage des cellules ont été utilisés : matériaux grossier: assemblage granulaire, matériaux fins : sable et composite sable-inclusion pneus. Le composite sable inclusion est envisagé afin de diminuer le poids volumique, et investiguer le rôle dissipatif potentiel de tels mélanges.

Les objectifs visés à travers ces expérimentations étaient :

- de quantifier la **dissipation d'énergie** propre à chaque type de cellule, et donc d'évaluer l'influence des conditions aux limites sur la réponse de la cellule; comparaison avec les essais antérieurement réalisés sur cellule confinées rigide (conditions CR), et cellules libre non confinées (conditions NC)
- **améliorer le modèle numérique** par prise en compte des données expérimentales dans des conditions de confinement proche du réel (confinement matériaux CM);
- **compléter la préparation** de la campagne expérimentale à l'échelle de l'ouvrage.

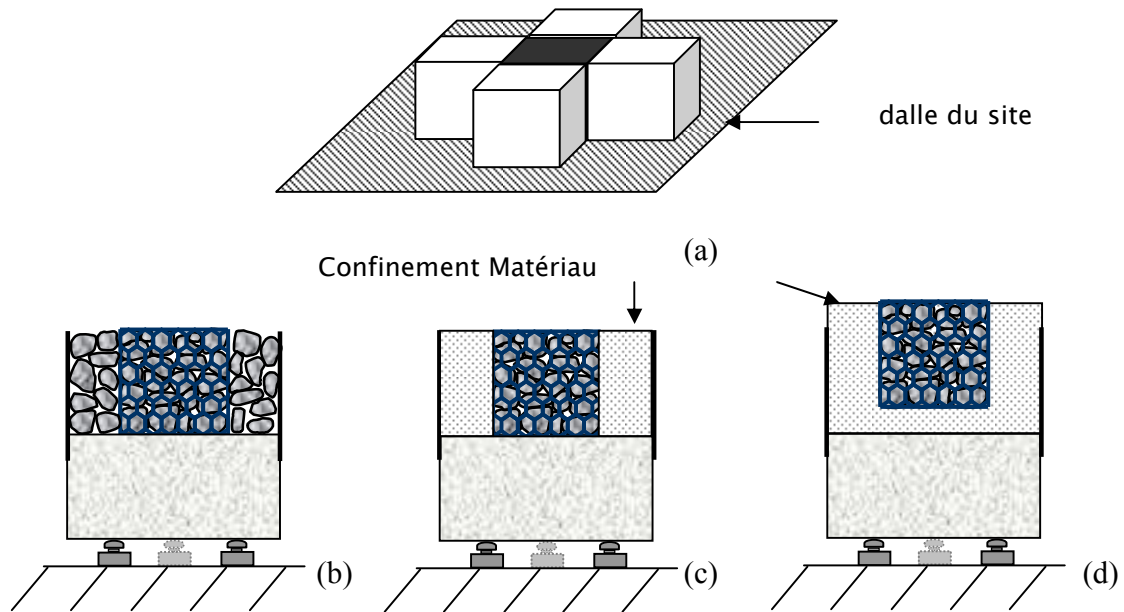


Figure 4: Schéma de principe des différentes alternatives envisagées pour les essais

3. LES ESSAIS REALISES

Les cellules impactées sont de taille 500 et 1000.

Le grillage des cages a une maille 80100 et un fil de diamètre 2,7mm.

Le géotextile utilisé pour les cellules remplies de matériaux fins est un non tissé (S61, Tencate); il est disposé en une bande continue sur les faces latérales, contrairement aux essais sous chargement pseudo-statiques sur cellules 500.

Les matériaux de remplissage sont des granulats ou du sable, ou mélange pneu-sable. Les matériaux sont identiques à ceux utilisés pour l'étude du comportement de la cellule sous chargement pseudo-statique, tout comme les modalités de montage de la cellule et de mise oeuvre des matériaux de remplissage (Lambert, 2007).

Les différents essais sur cellules sont présentés (Figure 6, tableau 1). L'identifiant est explicite : il fait successivement référence à la taille de la cellule (500 ou 1000), au type de matériau de remplissage (G, S et M respectivement pour granulats, sable et mélange pneu-sable), et aux conditions aux limites de la cellule (NC, CR et CM respectivement pour non confiné, confinement rigide et confinement matériau) et à la hauteur de chute libre, en mètre. Le chiffre supplémentaire indique, le cas échéant, s'il y a eu 2 essais effectués dans les mêmes conditions. Un essai a également été réalisé sur couche de sable seul.

Identifiant de l'essai	Taille nominale (mm)	Cellule		Conditions d'essai						
		Matériau de remplissage	Masse (kg)	Conditions aux limites	Hauteur de chute (m)					
500-G-NC-3	500	Granulats	208	Non confiné	3					
500-G-NC-4,1			205		4,1					
500-G-NC-4,2			208		4,2					
500-G-NC-4,25			215*		4,25					
500-G-NC-5,5/1			215		5,5					
500-G-NC-5,5/2			205		5,5					
500-G-CR-5,5			204		Confinement rigide	5				
500-G-CM-5,5/1			215		Confinement matériau	5,5				
500-G-CM-5,5/2			201			5,5				
500-S-NC-3,2			Sable		200	Non confiné	3,2			
500-S-NC-4,25							205	4,25		
500-S-NC-5,5							202	5,5		
500-S-CR-5							206	Confinement rigide	5	
500-S-CM-5,5/1							201	Confinement matériau	5,5	
500-S-CM-5,5/2							201		5,5	
500-M-NC-5,5/1							Mélange	190	Non confiné	5,5
500-M-NC-5,5/2										190
500-M-CM-5,5	199	Confinement matériau		5,5						
1000-G-NC-7,4	1000	Granulats		Non confiné						7,4
1000-S-NC-7,25										Sable

Tableau 1 : conditions expérimentales pour les essais d'impact réalisés sur cellules



Figure 5 : mise en œuvre du confinement matériau CM pour une cellule 500 granulat : cage avant remplissage, cage remplie et cage confinée matériau (vue de dessus).



Figure 6 : vue des cellules avant et après impact : cellules 500 granulats non confinée, et confinée, cellule 500 sable non confinée et confinée matériau, cellule 1000 non confinée granulat et sable.

4. RESULTATS ET DISCUSSION

Pour les cellules granulat, on observe en fonction des conditions aux limites de la cellule que contrairement aux cellules non confinées l'impacteur remonte lorsque la cellule est confinée par du matériau et rebondit lorsque le confinement est rigide. Plus le confinement est rigide, plus le nombre de fracturations observées est élevé, plus la durée de l'impact est réduite (100, 38 et 26ms) et plus faible est l'enfoncement relatif (75, 25 et 15 %) (Tableau 2).

Sur les 8 premières millisecondes d'impact, correspondant à un enfoncement d'environ 8cm à ces vitesses, la force d'impact est peu affectée par les conditions aux limites de la cellule (Figure 7). Ensuite, cette force continue de croître relativement linéairement lorsque la cellule est soumise à confinement rigide, alors qu'elle marque un palier pour les autres types de conditions aux limites, à une valeur de force plus faible lorsque la cellule est libre de se déformer.

La **force transmise aux appuis** est modifiée par une réduction de la durée de transmission des efforts et une augmentation de sa valeur maximale. Les mesures sont également moins affectées par les oscillations du système. La **force d'impact maximale** varie nettement en fonction des conditions aux limites de la cellule, avec un rapport de l'ordre de 2 entre les deux situations extrêmes. Elle est cependant nettement inférieure à celle de la force transmise aux appuis, avec un rapport de l'ordre de 5 entre CR et NC (Figure 7).

Lors du démontage des cellules en conditions CM, il a été mis en évidence que les bords du système avaient été sollicités lors de l'impact. En effet, les granulats de confinement situés sur les 20cm juste au dessus du socle constituaient un assemblage rigide. Du fait de la diffusion des efforts, la cellule, en se déformant, est venue s'appuyer sur les granulats de confinement, eux mêmes en appui sur la frontière du système. Ce blocage ne concernait pas les granulats situés dans la partie supérieure du massif de confinement.

	Force				Variations dimensionnelles		En fin d'impact ^(a)	
	d'impact, F_I 1 ^{er} pic (kN)	Maxi (kN)	d'impact, F_I 1 ^{er} pic (kN)	Maxi (kN)	Enfonc. (%)	Périm. (%)	t_3 (ms)	R_I (-)
500-G-NC-3	68	= ^(b)	47	58	58	42	103	< 0,1 ^(c)
500-G-NC-4,1	76	=	53	77	63	35	106	< 0,1 ^(c)
500-G-NC-4,2	91	=	54	74	67	nd ^(d)	112	< 0,1 ^(c)
500-G-NC-4,25	112	=	52	68	64	39	100	< 0,1 ^(c)
500-G-NC-5,5/1	128	=	77	=	75	nd ^(d)	100	< 0,1 ^(c)
500-G-NC-5,5/2	144	=	43	75	77	46	110	< 0,1 ^(c)
500-G-CR-5,5	242	=	377	=	15	-	26	0,12
500-G-CM-5,5/1	107	=	188	=	25	10	36	< 0,1 ^(c)
500-G-CM-5,5/2	104	=	214	=	25	nd ^(d)	40	0
1000-G-NC-7,4	128	=	97	=	64	25	>150	< 0,1 ^(c)

Tableau2 : résultats des impacts sur cellules granulats

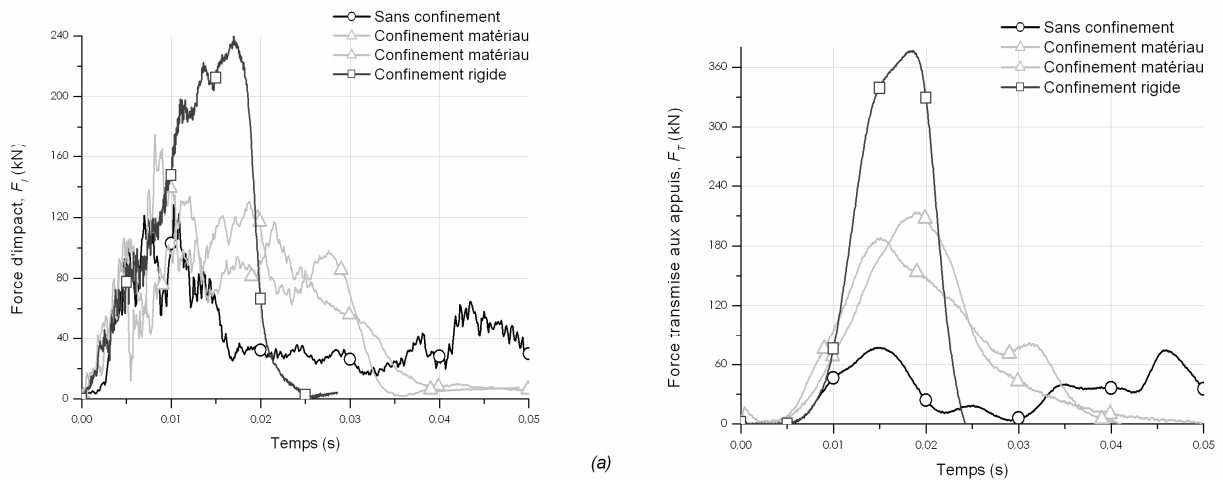


Figure 7: influence des conditions aux limites sur les forces d'impact et sur la force enregistrée aux appuis lors d'impact sur cellules 500 granulats.

Les mesures de force d'impact permettent de proposer un modèle de comportement simplifié pour les cellules 500. Ce modèle, présenté figure est décliné en fonction des conditions aux limites et concerne des impacts de 13,5kJ. La force d'impact augmente linéairement et indépendamment des conditions aux limites avant d'atteindre un maximum et de rejoindre un palier, qui sont fonctions des conditions aux limites. La décharge n'est pas représentée sur ce modèle. La courbe relative aux cellules **en conditions confinement matériau CM, plus proche des conditions de fonctionnement in-situ, reproduit un comportement élastique parfaitement plastique.** Ce modèle semble pouvoir être extrapolé à des énergies d'impact et des tailles de cellules différentes, en adaptant à la fois les valeurs de force d'impact maximales et de force au palier.

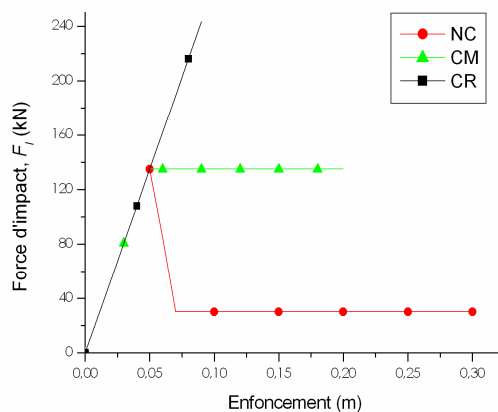


Figure 8 : modèle simplifié de comportement de cellule (500 granulats) pour les différentes conditions aux limites NC, CM, CR

Le confinement matériau CM a été modélisé à partir du modèle développé par la méthode des éléments discret (Bertrand, 2006), en appliquant à chaque particule de grillage des faces latérales une force normale au plan défini localement par celui-ci, F_{cn} . En première approche les forces appliquées sont de valeur constante, estimée à partir des essais de chargement pseudo-statique sur cellules confinées : les simulations donnent un rapport de 0,13 entre la force de chargement et la force totale sur chaque face latérale. Connaissant les sollicitations sur les cellules lors des impacts et le nombre de nœuds par face, on déduit un ordre de grandeur de la force locale à appliquer sur chaque nœud. Des simulations d'impact ont été menées pour différentes valeurs de force (Figure 9). En augmentant la force de confinement, la forme de la courbe évolue, la durée de l'impact est réduite et la force maximale augmente. Cette évolution est tout à fait similaire à celle observée expérimentalement (figure 7).

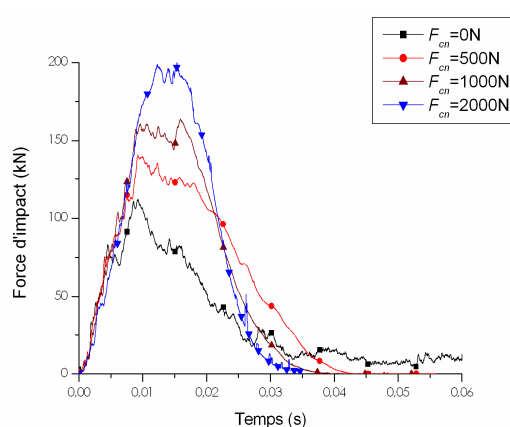


Figure 9 : modélisation numérique de l'effet de confinement matériau par application d'une force aux nœuds du grillage modèle.

Pour les **cellules matériaux fin**, des conditions aux limites plus restrictives pour les déplacements latéraux réduisent la durée d'impact et l'enfoncement. Elles augmentent les valeurs maximales de force d'impact et de la force aux appuis (Tableau 3, Figure 10). La sensibilité de la force d'impact maximale aux conditions aux limites de la cellule est nette, avec un rapport de l'ordre de 3,8 entre les deux situations extrêmes. Elle est sensiblement supérieure à celle de la force transmise aux appuis, avec un rapport de l'ordre de 3 entre confinement rigide et sans confinement. La force d'impact est indifférente aux conditions aux limites jusqu'à environ 4ms (Figure 10). La différence entre une couche de sable et une cellule sable en conditions CM porte sur la présence de l'enveloppe. La réponse de la couche de sable se différencie par un impact plus court, une absence de rebond et une diminution de la force d'impact moins rapide en fin d'impact. La valeur maximale de force transmise est également plus faible avec du sable seul. Ces différences illustrent l'effet de l'enveloppe.

Lorsque la cellule non confinée est remplie de mélange pneu-sable, l'impacteur rebondit plus haut. Ce rebond n'est pas vertical et l'impacteur est éjecté. Ceci résulte de la difficulté d'assurer, lors de la mise en œuvre, l'homogénéité de ce matériau composite. La forme de courbe de force d'impact se différencie de celle d'une cellule sable par l'absence du pic aux alentours de 20ms (Figure 11). La valeur de force au premier pic est plus faible et la valeur maximale atteinte en fin

d'essai est plus élevée. L'enfoncement est également plus important avec une cellule remplie de mélange (Tableau 3).

Par contre, pour les cellules CM, le mélange pneu-sable conduit à des valeurs de forces plus élevées et le coefficient de rebond est plus élevé. Il apparaît ainsi que **l'influence du confinement sur la réponse d'une cellule est différente selon que le matériau de remplissage est du sable ou du mélange pneu-sable**. Pour le mélange, le coefficient de restitution est augmenté par le confinement matériau, et inversement pour le sable. Il est essentiel de souligner que, quel que soit le mode de confinement, **la force maximale transmise par une cellule remplie de mélange pneu-sable est plus élevée que celle transmise par une cellule remplie de sable** (Figure 11).

	Force				Variations dimensionnelles		En fin d'impact ^(a)	
	1 ^{er} pic (kN)	Maxi (kN)	1 ^{er} pic (kN)	Maxi (kN)	Enfonc. (%)	Périm. (%)	t ₃ (ms)	R _f (-)
500-S-NC-3,2	43	50	27	73	40	13	84	0,09
500-S-NC-4,25	60	60	37	90	42	13	78	0,1
500-S-NC-5,5	81	90	46	128	40	16	69	0,13
500-S-CR-5,5	346	= ^(b)	377	601	12	-	22	0,18
500-S-CM-5,5/1	129	=	220	=	21	3	31	< 0,1 ^(c)
500-S-CM-5,5/2	130	=	226	=	21	nd ^(d)	32	< 0,1 ^(c)
500-M-NC-5,5/1	48	140	39	143	44	12	60	≈ 0,1
500-M-NC-5,5/2	74	98	40	157	51	19	60	≈ 0,15
500-M-CM-5,5	140	=	269	=	16	nd ^(d)	60	0,25
1000-S-NC-7,25	86	=	75	=	53	10	125	0
Couche de sable ^(e)	109	=	170	170	30	-	41	0

Tableau 3 : résultats caractéristiques des impacts sur cellules remplies de sable et mélanges pneu-sable. Comparaison sur couche de sable seule.

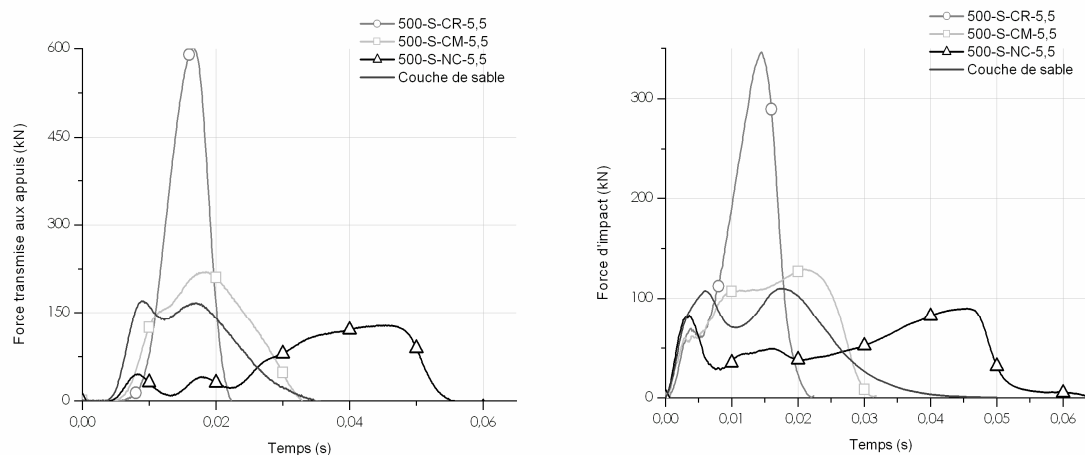


Figure 10 : influence des conditions aux limites NC, CM, CR, sur la réponse d'une cellule 500 sable. Comparaison avec couche de sable seule.

Afin de juger de l'endommagement des cellules en conditions confinée matériau CM, la réponse lors d'un second impact, de même énergie, sur une cellule est présentée (Figure 11). La durée de l'impact est réduite et les forces d'impact et transmises aux appuis sont plus élevées. Pour le sable, cet effet est plus marqué que pour le mélange pneu-sable. Ces tendances peuvent s'expliquer notamment par le compactage dynamique subit par le sable lors du premier impact.

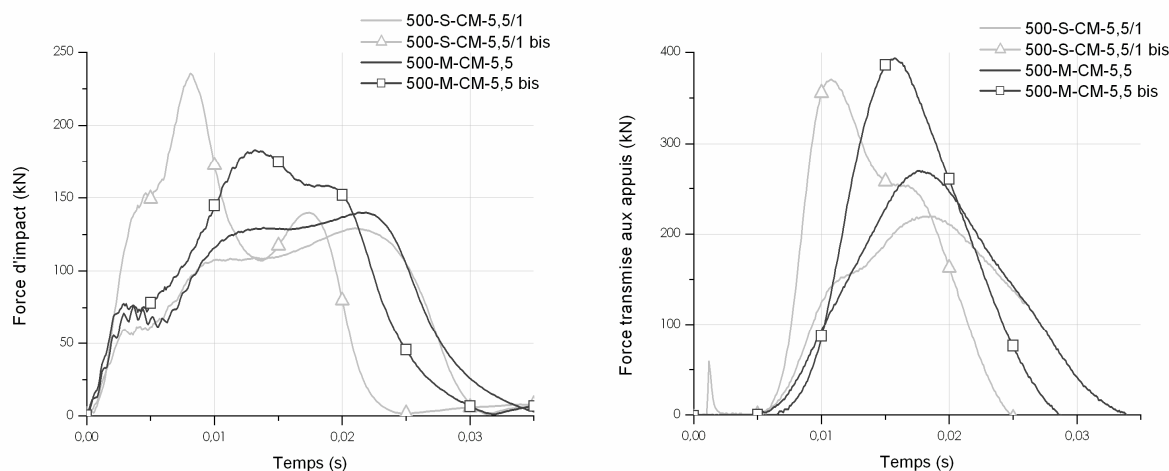


Figure 11: Evolution de la réponse d'une cellule 500 matériau fin, en condition de confinement matériau CM, entre deux impacts successifs de même énergie.

La réponse des **cellules remplies de matériaux fins apparaît donc très complexe**. Les caractéristiques de tous les matériaux constitutifs de la cellule jouent un rôle, même sous faible déformation. L'interaction entre enveloppe et matériau de remplissage est également influante. Les conditions aux limites influencent de façon différente la réponse de la cellule selon la nature du matériau de remplissage, avec certainement un lien avec l'élasticité du matériau de remplissage. Quelles que soient les conditions aux limites, l'impact conduit à une modification des caractéristiques mécaniques du matériau de remplissage.

Considérant les résultats obtenus, dans ces conditions expérimentales, l'utilisation de mélange pneu-sable, dans un rapport massique 30/70, semble peu judicieuse dans l'objectif d'une réduction des efforts transmis. Ces mélanges, qui présentent un meilleur comportement sous sollicitations pseudo-statiques par rapport aux autres matériaux fins, avaient été retenus dans l'objectif de favoriser la dissipation d'énergie, par frottement entre les pneus et le sable notamment. En fait, les forces transmises sont plus élevées qu'avec du sable. Ce matériau reste toutefois intéressant pour le poids spécifique.

Dans la **configuration du confinement matériau, CM**, le **comportement comparé** de la réponse entre une cellule granulats et une cellule sable est moins prononcée que dans les conditions NC et CR (Figure 12). Les valeurs de force d'impact maximale pour les 3 matériaux sont assez proches. Par contre, les cellules remplies de granulats présentent une valeur maximale de force transmise plus faible (Tableau 4).

	Non confiné		Conf. matériau		Conf. rigide	
	F_I^{max} (kN)	F_T^{max} (kN)	F_I^{max} (kN)	F_T^{max} (kN)	F_I^{max} (kN)	F_T^{max} (kN)
Sable	90	128	130	223	346	600
Mélange	92	150	150	270	-	-
Granulats	136	73	155	200	240*	370*

Tableau 4: récapitulatif de la réponse des cellules dans les différentes configurations (Hauteur de chute 5m) valeurs moyennes.

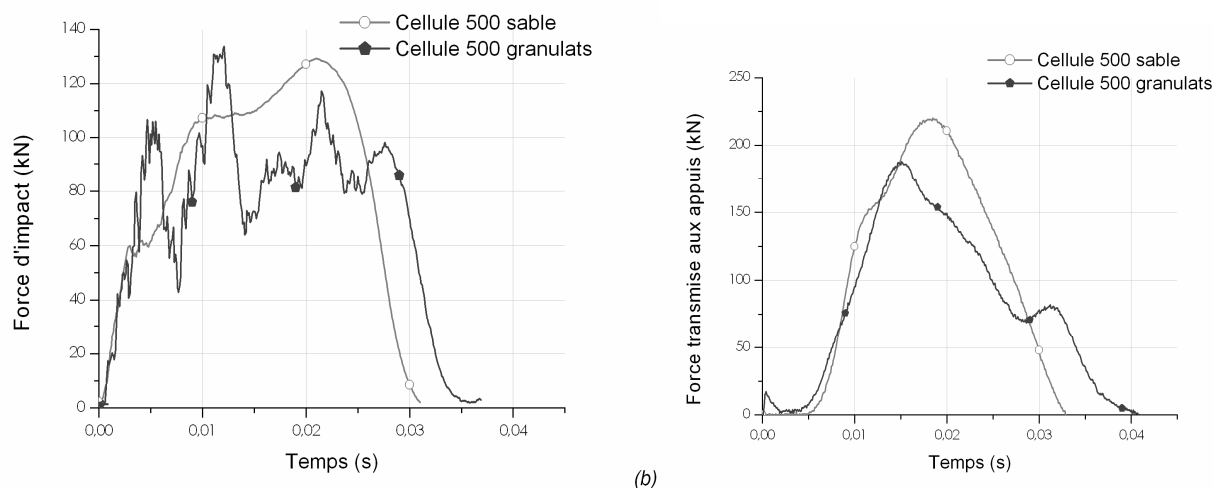


Figure 12 : comparaison de la réponse en fonction du matériau de remplissage en condition de confinement matériau CM

6. CONCLUSION

Dans le cadre de ce projet, la mise en œuvre d'une expérimentation originale a été réalisée. La sollicitation dynamique d'impact est appliquée par largage en chute libre d'une sphère sur la cellule. Trois types de conditions aux limites (NC, CM et CR) sont examinés, la condition aux limites CM ayant fait l'objet de développements spécifiques. La réponse de la cellule est évaluée à travers la force d'impact sur la cellule et la force transmise par la cellule.

Les expérimentations ont montré que, quelles que soient les conditions aux limites, les cellules remplies de granulats permettent une plus grande réduction des efforts transmis au support rigide. La fracturation des granulats en est la raison. Les matériaux fins transmettent un effort plus élevé et l'impact conduit à l'augmentation de leur raideur apparente. Le mélange pneu-sable à 30% en masse de pneus, défini comme optimum sous sollicitations pseudo-statiques, conduit à une force transmise supérieure au sable. **Cet effet matériau reste toutefois moins important que l'effet des conditions aux limites: la force transmise par une cellule non confinée est toujours moindre que celle transmise par une cellule en confinement matériau.**

Il semble donc que l'objectif de réduction des efforts transmis au sein de l'ouvrage puisse être atteint en agissant sur les matériaux de remplissage et aussi sur les conditions aux limites des cellules (création de vides). Cet aspect fera l'objet d'investigation à l'échelle d'un ouvrage test.

Le modèle numérique, calé et validé sous sollicitations pseudo-statiques, a bien reproduit la réponse de la cellule sous sollicitations dynamiques en terme de force d'impact, en conditions CR et NC. Des développements spécifiques montrent ses potentialités pour la modélisation en CM. On notera toutefois que le confinement matériau CM ne reproduit pas idéalement les conditions aux limites sur les faces latérales de la cellule dans l'ouvrage. En effet, les dimensions du socle, et donc du massif de confinement, restent limitées avec une surface carrée de 1,2m de côté.

La recherche menée dans le cadre de ce projet doit aboutir à des recommandations de dimensionnement de telles structures cellulaires protectrices. Ceci constitue un objectif du programme élargi soutenu par l'ANR. Une validation expérimentale des concepts à l'échelle d'un ouvrage test, avec justification de modélisation numérique permettra une mise en œuvre opérationnelle de ce type de structures.

7. REFERENCES

D Bertrand (2006) « Modélisation du comportement mécanique d'une structure cellulaire soumise à une sollicitation dynamique localisée, application aux structures de protection contre les éboulements rocheux », thèse de doctorat, février 2006, UJF, Grenoble.

S Lambert (2007) « comportement mécanique de géocellules, application aux constituants de merlons pare blocs cellulaires », thèse de doctorat, décembre 2007, UJF, Grenoble

8. VALORISATION SCIENTIFIQUE DES TRAVAUX période 2006-2007

Bertrand D., Gotteland P., Lambert S., Nicot F., Derache (2006), Multi-scale modelling of cellular geo-composite structure under localized impact. *Revue Européenne de Génie Civil*, (10)3, pp. 309-322.

Nicot F., Gotteland P., Bertrand D., Lambert, S. (2007)– Multi-scale approach to geo-composite cellular structures subjected to rock impacts. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, accepted March 2007, à paraître Décembre 2007

Bertrand, D., Nicot, F., Gotteland, P., Lambert, S. (2008) D.E.M. numerical modelling of double twisted hexagonal mesh, *Canadian Geotechnical Journal*, en cours d'expertise après revision mineure



- Gotteland, P., Lambert, S., Salot, C., Villard, P., (2006), Réponse au défi de la valorisation des déchets de pneus; comportement mécanique et modélisation numérique de mélanges de copeaux de pneus – sol, *Annales du Bâtiment et des travaux publics*, Vol 5, pp 49-53
- Lambert, S., Gotteland, P., Bertrand, D., Nicot, F. (2007) “ comportement mécanique de géo-cellules sous impact – application aux ouvrages pare-blocs », *Revue Française de Géotechnique*, 15p, Novembre 2007
- Bertrand D., Gotteland P., Lambert S., Nicot F. (2006). D.E.M. modeling in impact condition of geocomposite cells dedicated to rockfall protection barrier. NUMGE, Graz (Austria), pp. 849-856.
- Bertrand D., Gotteland P., Lambert S., Nicot F. (2006). Numerical modelling of cellular soil geocomposite material, First Euro Mediterranean in Advances on Geomaterials and Structures – Hammamet (Tunisia), 10p
- Gotteland, P., Lambert, S., Salot, Ch., (2007), Investigating the Strength characteristics of tyre chips – sand mixtures for geo-cellular structure engineering, Int Workshop on scrap tire derived geomaterials, yokosuka, Japan, 10p
- Gotteland, P., Nicot, F., Bertrand, D., Lambert, S., Aubry, K. (2007), Modelling of impacted structures reinforced with cellular geocomposite, XIV Congrès Européen de mécanique des sols et géotechnique, Madrid, Septembre, 8p

