



Internationales Symposion INTERPRAEVENT 2004 – RIVA / TRIENT

VERS LA MISE AU POINT D'OUTILS D'EXPERIMENTATIONS NUMERIQUES

**MODELISATION DE LA REPONSE DES GALERIES DE PROTECTION PARE-
BLOCS STRUCTURELLEMENT DISSIPANTES.**

FOR THE DEVELOPMENT OF NUMERICAL EXPERIMENTATION TOOLS

MODELING OF THE STRUCTURALLY DISSIPATIVE ROCK-SHEDS RESPONSE

Ph. Berthet-Rambaud^{2,3}, A. Colombo¹, J. Mazars¹, L. Daudeville¹

RESUME

Dans les régions où les chutes de rochers constituent un risque majeur pour les infrastructures, les ouvrages de protection consistent généralement en des structures en béton surdimensionnées supportant une épaisse couche de matériau amortissant pour empêcher l'impact direct du bloc et se contenter d'une conception statique de l'ouvrage. De récentes expérimentations ont été réalisées sur un nouveau type de galerie de protection constituée uniquement d'une dalle béton s'appuyant sur ses appuis via des systèmes fusibles en acier. Le but de cette étude est de prédire le comportement de ce nouveau type de structure grâce à une modélisation poussée de la dalle et de ses supports. L'analyse introduit notamment la charge d'impact de la même manière que dans la réalité et utilise une loi de comportement permettant de représenter correctement le matériau béton sous chargement dynamique et son endommagement correspondant.

Mots-clefs : Chutes de blocs, galeries de protection, béton, modélisation numérique

ABSTRACT

In region where rock fall constitute a major hazard to civil structures, the protective structural systems are usually composed of over dimensioned reinforced concrete elements covered by a thick backfilling layer that prevents the direct impact of rocks on structures thus dimensioned for static dead loads. Recent experiments were performed on a new type of road protection gallery characterized by a roof slab without damping layer and simply supported on vertical elements by a set of "fuse" steel supports. The aim of the present study is to predict the

Plateforme de recherche "Risques Naturels & Vulnérabilité des Ouvrages" et

1 : R&V, Laboratoire 3S, BP 53, 38041 Grenoble cedex 9, France

2 : UR ETNA, Cemagref, 2 rue de la papeterie, BP 76, 38402 Saint-Martin d'Hères, France

3 : CETE-LRPC, Lyon, 25 avenue François Mitterrand, Case n°1, 69674 Bron Cedex, France

structural response of this new system by a rigorous three-dimensional modelling of the roof slab and its supporting elements. The analysis introduces the impact load in a way similar to that of the performed experiment, and uses a stress-strain concrete relationship that allows a realistic representation of the concrete behaviour under dynamic loads and its corresponding damages.

Keywords : Rock fall, rock-shed, concrete structure, numerical modeling

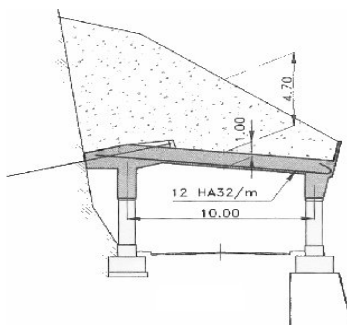
INTRODUCTION

La protection vis-à-vis des chutes de blocs et rochers est un problème important, notamment pour assurer la sécurité des infrastructures routières dans les zones de montagnes. Parmi les différentes stratégies mises en place, il faut principalement différencier les ouvrages souples (type filets) et les ouvrages rigides (type galeries ou casquettes).

Parmi ces derniers, il faut encore distinguer les galeries conventionnelles recouvertes d'une couche de matériau dissipant et dont la structure en béton fonctionne finalement de manière statique (sans difficultés particulières de dimensionnement pour les règlements actuels) et les ouvrages dont la structure est directement impactée par les blocs. Dans ce dernier cas, il faut intégrer le comportement dynamique de l'ouvrage sous impact ce qui dépasse le domaine d'application des règles habituelles de dimensionnement.



Fig1 : Galerie de protection routière conventionnelle
Fig.1 : Traditional rock-shed



L'étude réalisée ici s'intègre donc dans ce nouveau champ d'expérimentation et de recherche en étudiant plus particulièrement le cas des galeries pare-blocs structurellement dissipantes (PSD) : ces ouvrages fonctionnent en dynamique (chute du rocher directement sur la dalle béton, elle-même horizontale ou inclinée) en utilisant des appuis fusibles pour le cas des impacts en rive.

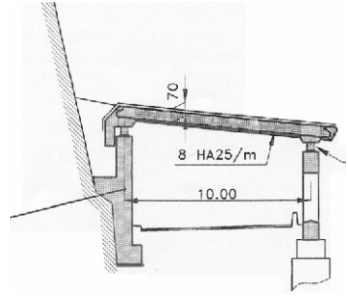


Fig.2 : Galerie Pare-bloc Structurellement Dissipantes à dalle horizontale
 Fig.2 : Structurally dissipative rock-shed with horizontal slab

EXPERIMENTATIONS

L'ouvrage plus particulièrement concerné ici est la maquette à échelle 1/3 d'une galerie "pare-blocs structurellement dissipante" (PSD) à dalle inclinée. Cette maquette est représentative de la Galerie de la Poniente dont la construction est prévue dans les gorges de l'Arly dans les Alpes françaises.

Cette galerie PSD à dalle inclinée profite de l'expérience acquise sur la galerie PSD à dalle horizontale (Tonello 2001). La pente a ensuite été introduite pour gérer les risques d'éroulement en masse et l'évacuation des matériaux.

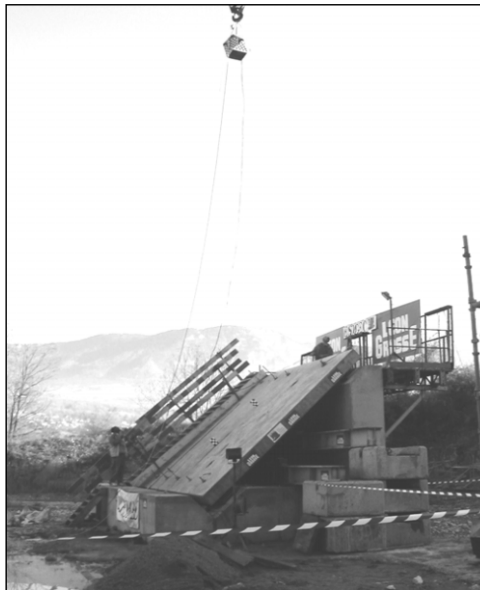


Fig.3 : Maquette de galerie PSD à dalle inclinée
 Fig.3 : PSD rock-shed model with inclined slab

Selon le principe des ouvrages PSD (Tonello 2001), la dalle repose sur deux lignes d'appuis fusibles, perpendiculaires à son plan et chacun espacé de 1.057 m (soit 16 fusibles au total). Ces fusibles sont constitués d'un cylindre métallique soudé entre 2 platines. Pour cette maquette, ils sont fixés à la dalle et reposent sur une cale en chêne dont la surface a été graissée.

Du fait de la pente, cinq systèmes d'appui en pied ont été introduits dans le plan de la dalle (espacés de 1.50m), constitués de deux éléments néoprènes en parallèle et d'un capteur de force supposé rigide. Ce système repose également sur une cale en chêne.

Dans la suite, nous parlerons respectivement des fusibles et des néoprènes.

De manière analogue aux essais sur maquette à dalle horizontale (Perrotin & al, 2002), cette dalle a été testée avec plusieurs lâchers de blocs à différentes hauteurs et en différentes positions. Nous n'aborderons ici que le premier lâcher au centre d'un bloc à facette en béton armé de 450 kg d'une hauteur de 30m.

Il faut souligner ici l'originalité de ces essais dont des exemples équivalents n'ont pu être trouvés dans la littérature. En effet, soit les références trouvées concernent typiquement l'étude du comportement du matériau béton en dynamique (très) rapide et sont essentiellement basées sur des expériences avec des échantillons de taille réduite aux barres de Hopkinson. Soit les études s'appliquent effectivement aux galeries de protection routière mais selon la solution classique intégrant une couche amortissante au-dessus de la dalle (Montani Stoffel, 1998), (Nakata & al, 1997).

DES OUTILS NUMERIQUES PERFORMANTS

L'approche utilisée est basée sur l'utilisation d'un modèle d'endommagement pour le comportement du matériau béton. Cette approche dépasse donc largement le cadre réglementaire du BAEL où les calculs justificatifs sont conduits, en statique, suivant la théorie des états limites.

“Un état limite est celui pour lequel une condition requise d'une (structure) est strictement satisfaite et cesserait de l'être en cas de modification défavorable d'une action” (BAEL 1991). Dans ces conditions, le diagramme déformation - contrainte du béton utilisé dans le règlement est lui-même “corrigé” dans sa forme (dite “parabole – rectangle”) et ses valeurs par rapport au comportement naturel du matériau ce qui permet d'en simplifier l'usage en intégrant également des considérations sécuritaires. Le problème est qu'on ne peut plus alors mener directement des calculs à caractère déterministe et que cet outil ne permet pas de traiter correctement les sollicitations liées aux phénomènes dynamiques comme les chutes de blocs.

Dans cette situation, de nombreux modèles ont été développés, selon différentes théories pour justement répondre à ce besoin et permettre d'approcher le “déterminisme”. Parmi ceux-ci, la mécanique de l'endommagement appliquée au béton vise à décrire les effets de la dégradation du matériau, notamment sur ses caractéristiques mécaniques et en particulier sur sa rigidité, par l'apparition de la fissuration (Mazars, 1984).

Ici nous utilisons le modèle PRM (Pontiroli-Rouquand-Mazars) dont la réponse en charge décharge uniaxiale pour un échantillon de béton est donnée ci-après.

Les qualités de ce modèle sont notamment de pouvoir décrire correctement les divers phénomènes physiques importants intervenant dans le comportement du béton (totalement 3D, dissymétrie en tension et compression, phase post-rupture, prise en compte des déformations anélastiques, caractère unilatéral, effet des vitesses de déformation, frottement interne propre au matériau) mais aussi de présenter robustesse et surtout rapidité grâce à une écriture explicite permettant une formulation relativement simple et conviviale.

L'écriture du modèle est tridimensionnelle ce qui lui permet d'aborder tous types de chargements de nature multiaxiales (Pontiroli 1995). L'expression tensorielle du modèle est la suivante :

$$\underline{\underline{\sigma}} = \underline{\underline{\sigma}}_{ff} + (1 - D) \left[\lambda_o . Trace(\underline{\underline{\varepsilon}} - \underline{\underline{\varepsilon}}_{ff}) . \underline{\underline{1}} + 2\mu_o (\underline{\underline{\varepsilon}} - \underline{\underline{\varepsilon}}_{ff}) \right]$$

où λ_o et μ_o sont les coefficients de Lamé et D est la variable d'endommagement.

Une particularité de la courbe représentative suivante est ainsi un changement de la raideur lorsque la contrainte ($\sigma - \sigma_{ft}$) change de signe où σ_{ft} représente la contrainte à appliquer pour refermer des fissures déjà créées.

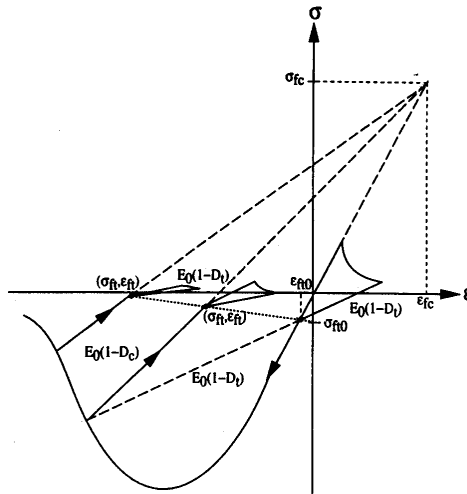


Fig.4: Comportement mono dimensionnel du béton
Fig.4 : 1D concrete behaviour

Ce modèle de comportement est implémenté dans le code non linéaire "éléments finis" Abaqus basé sur un schéma en temps explicite et présentant un panel complet de possibilités pour modéliser correctement les différents aspects du problème qui nous intéresse.

PRINCIPES DE CALCUL

Les calculs ont été menés en profitant de l'expérience de la première étude menée sur les essais de la galerie PSD à dalle horizontale (Berthet-Rambaud & al, 2003) et en essayant au

maximum de limiter le nombre de paramètres de calage : autant que possible, lorsqu'elles étaient connues, les valeurs numériques des différents paramètres correspondent ainsi aux caractéristiques réelles et aux valeurs physiques des ouvrages et des matériaux.

Par ailleurs, la possibilité offerte par le code Abaqus de gérer plusieurs entités permet de créer des modèles où un bloc vient effectivement impacter une dalle. Le chargement lié à l'impact n'est donc pas entré artificiellement via une force localisée évoluant dans le temps mais directement comme l'action du bloc sur l'ouvrage. Ceci permet de s'approcher au plus près de la réalité et de gérer le chargement subi par la dalle via des paramètres physiques comme la vitesse d'impact du bloc ou le coefficient de frottement entre les matériaux des deux entités.

Par commodité, notamment pour l'exploitation des résultats, signalons enfin que l'ensemble du problème a été ramené dans le repère principal du code de calcul. Dans ce repère, la dalle est horizontale et la pesanteur a donc du être inclinée à 45° .

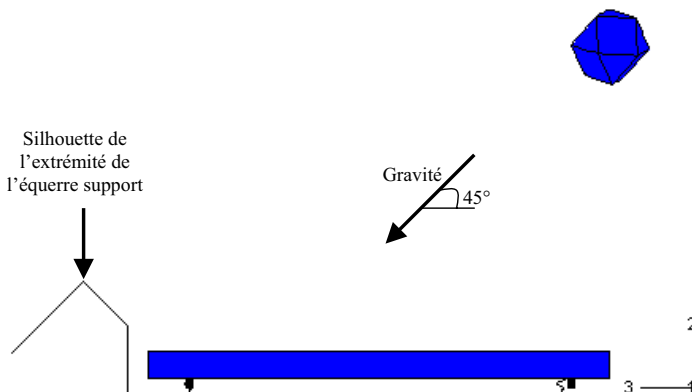


Fig.5 : Impact du bloc sur la dalle
Fig.5 : Block impact on the slab

Rappelons également que les calculs utilisent un schéma d'intégration en temps explicite qui se traduit par un suivi pas à pas de l'évolution du problème. Dans ces conditions, le temps de calcul est directement lié à la durée d'évolution modélisée.

CARACTERISTIQUES DE L'IMPACT

La phase d'impact est celle de la transmission de l'énergie du bloc à la dalle. De la qualité de sa modélisation dépend donc la qualité de la simulation globale dont elle est finalement la base. Or, cette phase d'impact comprend des phénomènes complexes qui nécessiteraient de manière idéale une échelle d'étude très fine (pour ne pas dire microscopique) et pour laquelle les approches "éléments finis" ont pu être dépassées, par exemple par les approches discrètes. Or, ces dernières marquent ensuite le pas au moment de simuler la réponse de structures entières, encore plus avec la présence de nos conditions aux limites complexes. Par ailleurs, des approches multi-échelle qui associeraient les atouts de ces deux principales approches ne sont pas disponibles pour mener des calculs de manière suffisamment opérationnelle.

Dans ce contexte, en utilisant au mieux les possibilités des “éléments finis” (Agardh & Laine, 1999) et à la lumière des résultats obtenus, le choix “éléments finis + modèle d’endommagement” s’est finalement avéré un compromis performant permettant aussi d’intégrer et de retranscrire de manière satisfaisante les phénomènes se produisant au moment de l’impact pour obtenir une modélisation réaliste de la sollicitation mutuelle entre la dalle et le bloc.

Les meilleurs résultats ont ainsi été obtenus avec un choc de type “dur”, n’autorisant pas de pénétration mutuelle des deux entités en choc. En fait, la description par le modèle de l’endommagement local du béton sur les 2 corps en impact nous à paru être un élément suffisant pour considérer la solution « choc dur » qui présente par ailleurs l’avantage de limiter l’usage de paramètres locaux difficiles à déterminer. Le paramètre important est également le coefficient de frottement entre les deux surfaces en contact.

A noter enfin que pour s’approcher au mieux des conditions réelles, le position du bloc à son arrivée sur la dalle et son angle d’attaque ont été fixés en fonction de la situation réelle.

MODELE COMPLET TRIDIMENSIONNEL

La complexité des conditions aux limites et des différents moyens d’appuis utilisés (interface frottante avec la dalle, comportement tridimensionnel des fusibles) a nécessité un maillage complet tridimensionnel pour l’ensemble de la structure : dalle, appuis, dispositifs anti-soulèvement et bloc. En effet, la modélisation des dispositifs d’appui à partir d’éléments ressorts a pu donner certains bons résultats pour le premier enfoncement de la dalle après l’impact mais reste limitée pour suivre ensuite les oscillations suivantes.

Ainsi, les fusibles sont donc modélisés en 3D de manière à fonctionner comme dans la réalité avec un fusible et une platine frottante en contact avec la dalle. L’intérêt de ce maillage complet est notamment de correctement décrire le comportement du fusible, prépondérant par exemple pour les chocs sur appuis.

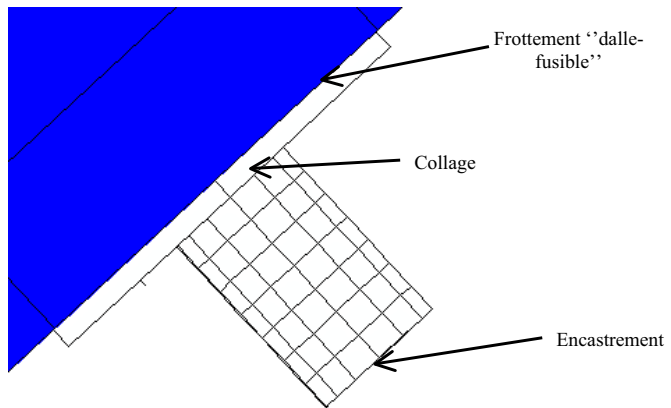


Fig.6 : Modèle de fusible
Fig.6 : Fuse model

Ainsi, pour le choc au bord, le positionnement est le même que celui utilisé pour le rapport intermédiaire avec un impact sur la face correspondante. En revanche, pour le choc au centre, la manière avec laquelle impacte le bloc a été retravaillée pour s'approcher au mieux de la réalité. Nous verrons au IX.2.3 l'influence importante que peut avoir le positionnement du bloc au moment de l'impact.

MATERIAUX ET EFFETS DE VITESSE

Les essais de la maquette PSD conduisent à des vitesses de déformations pouvant dépasser localement les 10s^{-1} pour le bloc et jusqu'à quelques $0,1\text{s}^{-1}$ pour la dalle.

Or, de nombreuses études expérimentales ont pu montrer une sensibilité importante du béton à cette vitesse de déformation se traduisant par des capacités de résistance pouvant être largement majorées dans le cas de sollicitations très rapides (Malvar & Crawford, 1998)

Ce phénomène existe aussi bien en traction qu'en compression et le modèle PRM le prend en compte au travers d'un seuil d'endommagement, en traction ou en compression, dépendant de la vitesse de déformation selon une formule du type :

$$\varepsilon_o^d = \varepsilon_o^s \cdot (1 + a \cdot (\dot{\varepsilon})^b)$$

où

- ε_o^d et ε_o^s sont respectivement les seuils d'endommagement dynamique et statique, de traction ou de compression
- $\dot{\varepsilon}$ la vitesse de déformation
- a et b des paramètres intrinsèques du matériau, d'une part en traction et d'autre part en compression

Le seuil d'endommagement est donc repoussé à une valeur plus élevée pour des vitesses de déformations plus importantes ce qui se traduit par un endommagement "retardé" du matériau et donc une meilleure résistance de la structure.

L'identification des paramètres a et b , en traction et en compression a pu être réalisée à partir de données disponibles dans la littérature (Cf. figures précédentes) et en considérant que l'effet de la vitesse sur le rapport "seuil d'endommagement dynamique/ seuil d'endommagement statique" est du même ordre que sur le rapport plus classique "résistance dynamique/résistance statique" (Pontiroli 1995).

Bien entendu et par cohérence, ces effets de vitesse sont appliqués au bloc et à la dalle mais concernent aussi les matériaux acier (Lee & Lin, 2001) et néoprène utilisés dans la structure. Les améliorations correspondantes ont donc également été menées dans ces domaines.

RESULTATS

Les résultats obtenus sont très encourageants. Le tableau ci-dessous présente par exemple les valeurs maximums du déplacement normal de la dalle en différents points de la zone d'impact lors du premier enfoncement après le choc :

Tab.1 : Déplacements normaux à la dalle dans la zone d'impact
 Tab.1 : normal displacements in the impact zone

N° position	Déplacement expérimental (mm)	Déplacement calculé (mm)
1	6	5,6
2	7,5	7,7
3	6,5	7,8
4	5	5,5
5	9,5	9,1
6	9	9,0
7	6,5	5,8
8	7	7,5
9	7	7,4
10	5,5	5,6
Point B	7,8	8.2

Ensuite, le calcul permet de suivre l'évolution des oscillations de la dalle après l'impact. La courbe suivante présente le déplacement normal au point B, proche du point d'impact.

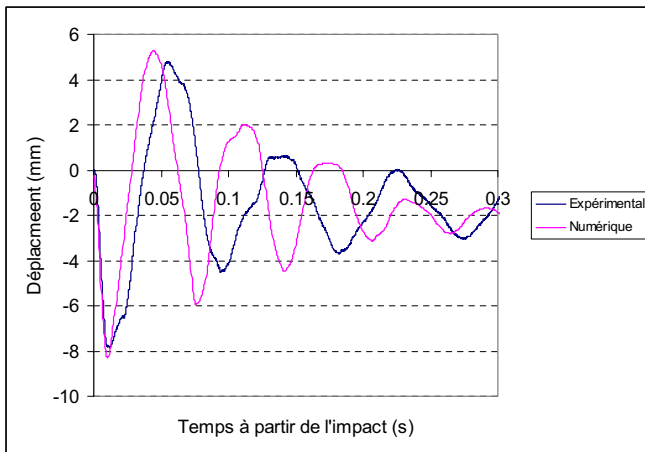


Fig.7 : déplacement normal au point B en fonction du temps
 Fig.7 : normal displacement à point B in time

Ainsi, si on compare les pentes des différentes oscillations, très proches entre expérimental et numérique, la raideur générale de la dalle est correctement retranscrite par le calcul. Ensuite, l'amortissement global est également bon. Au final, il a également pu être vérifié que la déformation permanente était équivalente de l'ordre de 2 mm. Seul le décalage progressif des oscillations a été relativement mal retranscrit, lié surtout à l'apparition, expérimentalement, de perturbations au niveau des états extrêmes de la dalle.

Concernant maintenant le comportement tangentiel de l'ouvrage, sa réponse est directement liée aux caractéristiques des néoprènes. Malgré un modèle simplifié élastique, les résultats suivants ont pu être obtenus :

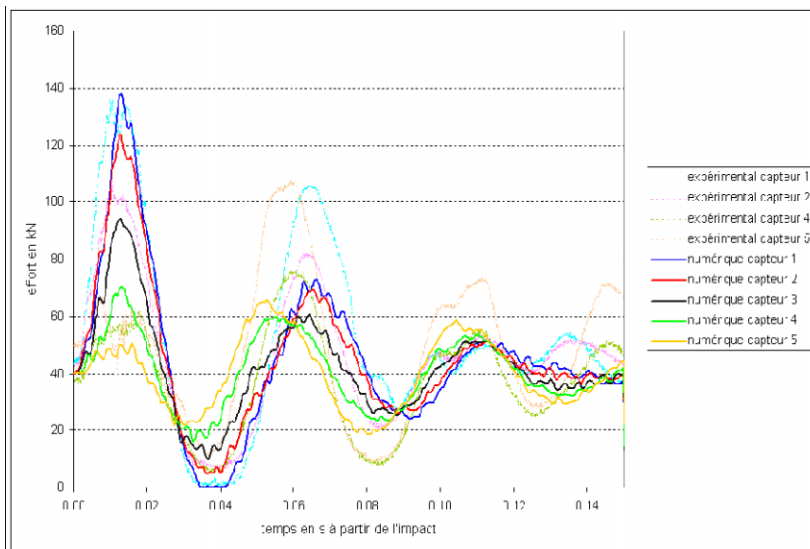


Fig.8: efforts tangentiels
Fig.8: tangential efforts

Cette figure présente ainsi la comparaison des évolutions des efforts obtenus au niveau des différents capteurs en pied de dalle. On retrouve une très bonne adéquation des résultats, notamment en fréquence. Pour les amplitudes, les résultats sont également très intéressants pour la 1^{ère} oscillation complète. On retrouve aussi le décollement de la dalle du capteur n°1 (effort annulé pendant quelques centièmes de secondes) et une évolution relativement fidèle juste après l'impact pour les capteurs les plus éloignés n°4 et 5.

Enfin, on retrouve une trajectoire du bloc qui vient impacter le support général de l'ouvrage 0,20 secondes après le choc initial comme cela a été le cas dans la réalité et comme l'illustre la figure ci-dessous.

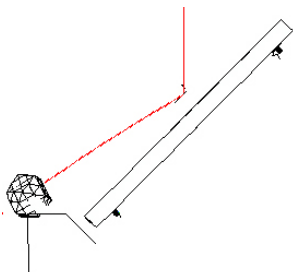


Fig.9 : Trajectoire du bloc après l'impact
Fig.9 : block trajectory after impact

PERSPECTIVES ET CONCLUSIONS

Les résultats cités précédemment qui ne sont qu'une partie des résultats obtenus montrent les capacités des méthodes et outils employés pour modéliser ce problème complexe de chutes de blocs sur ouvrages rigides. L'objectif affiché de développer un outil numérique performant permettant à terme de mener des expérimentations numériques paraît ainsi largement accessible. Cet outil apportera alors des possibilités pour mieux dimensionner les infrastructures de protection soumises aux aléas gravitaires rapides en montagne mais aussi pour expertiser correctement leur vulnérabilité, notamment avec l'étude des endommagements, sans recourir à des essais lourds et coûteux. Pour cela, des améliorations et des validations sont encore nécessaires et la prochaine piste de recherche consiste au développement de méthodes de modélisations simplifiées pour un transfert vers l'ingénierie

REFERENCES

- BAEL (1991) Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en béton armé suivant la méthode des états limites, fascicule 62, titre 1er, section 1 du CCTG, Direction des Journaux officiels, Paris, 1992.
- Berthet-Rambaud P., Y. Timsah, L. Daudeville, J. Mazars (2003) "Structural Modelling of reinforced concrete slabs subjected to falling rock impacts", *Computational Modelling of Concrete Structures*, Proceedings of the Euro-C conference 2003, A.A Balkema Publishers.
- Lee W.S., C.F. Lin (2001), "Impact properties and microstructure evolution of 304L stainless steel", *Materials science and engineering*, Vol. A38, pp 124-135.
- Malvar L.J., J.E. Crawford (1998), "Dynamic increase factors for concrete", *28th DDESB Seminar*, Orlando (USA).
- Mazars J. (1984) "Application de la mécanique de l'endommagement au comportement non linéaire et à la rupture du béton", *Thèse de doctorat d'état*, Univ. Paris VI, Paris, France.
- Montani Stoffel S. (1998), "Sollicitation dynamique de la couverture des galeries de protection lors des chutes de blocs", *Thèse de doctorat de l'EPFL*, Suisse.
- Nakata Y., H. Masuya, Y. Kajikawa, T. Okada (1997) "The analysis of impact behaviour of rock-shed by combination of Distinct Element Method and finite element method", *2nd Asia-Pacific Conference on shock & Impact loads on structures*, Melbourne, Australie.
- Perrotin P., M. Mommessin, Jp. Mougin, J. Tonello (2002), "Etude Expérimentale du Comportement d'une Dalle Pare-Bloc", *Revue Française de Génie Civil*, Vol. 6.
- Pontiroli C. (1995) "Comportement au souffle des structures en béton armé, analyse expérimentale et modélisation", *Thèse de l'ENS Cachan*, Cachan, France.
- Tonello J. (2001), "Couverture pare-blocs structurellement dissipante", *Label IVOR 01.1*. Mission Génie Civil, Ministère de l'Equipement, France.