

CHUTE DE BLOCS ROCHEUX PAR APPROCHE DEM DE TYPE NSCD

ROCKFALL BY DEM APPROACH BASED ON NSCD

Jean-François FERELLEC¹, Robert PERALES², Gilles SAUSSINE¹, Laurent BREDIER¹, Franck RICHARD¹

¹ SNCF Réseau, Ingénierie & Projets, La Plaine Saint Denis, France

² AD'missions, Paris, France

RÉSUMÉ – Les lignes ferroviaires sont parfois exposées au risque de chute de bloc rocheux. Il est essentiel de pouvoir prédire leur trajectoire afin de pouvoir placer et dimensionner des ouvrages de détection ou d'interception. L'approche NSCD de la DEM a été utilisée pour prédire la trajectoire de blocs sur un versant réel surplombant une voie par simulation de chute individuelle de blocs ou par groupes.

ABSTRACT – Railway lines can be exposed to the risk of rock fall. It is essential to be able to predict their trajectory in order to place and design adequately detection or interception equipment. An NSCD based approach of DEM has been used to predict the trajectory of blocks on a slope overlooking a line by simulation of single blocks fall or group of blocks.

1. Introduction

Le tracé des lignes ferroviaires dans les reliefs accidentés expose les voies aux risques de chute de blocs rocheux. La chute de blocs rocheux sur les voies ferroviaires représente un risque dont les conséquences ont un impact à la fois sécuritaire et économique sur le trafic ferroviaire. La présence de blocs rocheux sur les voies peut entraîner l'arrêt complet des circulations et l'impact plus rare de blocs avec un train un coût humain additionnel. L'estimation du risque d'exposition à ce type d'événement demeure une tâche difficile et les solutions techniques adoptées pour prévenir ces accidents ont des coûts substantiels. La difficulté principale réside dans la prédiction de la trajectoire des blocs rocheux avec précision pour la construction de solutions d'interception ou de déviation. La prédiction de trajectoire de ces blocs constitue donc un maillon essentiel de la prévention de ce risque.

La modélisation par éléments discrets est un outil qui peut apporter des réponses nouvelles par rapport aux modèles traditionnels de prédiction de trajectoire qui sont en 2D et représentent les blocs par seulement des points. Elle offre également la possibilité d'analyser la pertinence des solutions proposées pour remédier à ce problème jusqu'à éventuellement apporter un soutien au dimensionnement des ouvrages de détection, de déviation ou d'arrêt des blocs rocheux.

L'objectif global de la présente étude est d'évaluer le potentiel de l'approche des éléments discrets pour réaliser une étude trajectographique de la chute de blocs rocheux dans l'environnement des voies ferrées. Cette approche s'appuie sur l'outil éléments discrets LMGC90 déjà utilisé à SNCF depuis plus de dix ans pour la modélisation des voies ballastées.

L'étude comprend la simulation de la chute de blocs rocheux sur un versant réel. Cette zone comporte un versant donnant sur une risberme maintenue par un ouvrage en maçonnerie en pente donnant sur la voie. Une étude précédente a procédé à la digitalisation d'une partie de cette zone par photogrammétrie afin d'en obtenir une

représentation numérique en trois dimensions. Ces données ont été exploitées pour procéder à la simulation des chutes de blocs.

La simulation repose sur l'approche éléments discrets permettant d'évaluer le mouvement de blocs soumis à des sollicitations extérieures (poids, effort) ou des efforts de contact. Cette méthode permet de prendre en compte une surface digitalisée d'une zone réelle proche d'une voie où des études de risque doivent être menées.

Dans cet article, est dans un premier temps brièvement décrite la méthode DEM ainsi que son approche de type NSCD. La section suivante présente les conditions des simulations DEM utilisées en commençant par la digitalisation du versant, puis le type d'interaction bloc-versant utilisé et enfin l'étude paramétrique proposée. Les résultats sont présentés et discutés dans la section finale avant conclusion.

2. Modèle DEM

2.1. Principes de la DEM

La méthode des éléments discrets (Discrete Element Method en anglais ou DEM) considère tout matériau granulaire comme un ensemble d'objets qui interagissent par l'intermédiaire d'une loi de contact (Cundall, 1979). Les modèles DEM conventionnels comprennent implicitement l'interaction mécanique entre les objets en utilisant une force élastique qui dépend de l'interpénétration entre ces objets, associée à un critère de glissement de type Mohr-Coulomb qui limite la force tangentielle au contact entre les objets et potentiellement une force d'amortissement fonction de la vitesse d'interpénétration. Trois phases composent un cycle de calcul : la détection des contacts entre les objets, le calcul des forces de contact à partir des interpénétrations et le calcul des déplacements des objets par double intégration de leur accélération sur un intervalle de temps appelé pas de temps en utilisant la seconde loi de Newton. Les positions des objets sont ainsi mises à jour et prêtes pour un autre cycle.

L'objet le plus commun en DEM est la sphère parce qu'elle facilite la détection des contacts. Cependant elle ne reproduit le comportement des matériaux granulaires que de manière qualitative. D'autres approches ont été développées pour obtenir des résultats quantitativement fiables mais ils ne furent pas effectifs dans la reproduction de la forme irrégulière de particules réelles (Cleary 2004, Lin et NG 1997, Mustoe and Miyamata 2001, Pournin 2005, Williams et Pentland 1992). Ce n'est que récemment que certains modèles ont réussi à reproduire la forme de particules réelles en utilisant des arrangements de sphères (Ferrellec et McDowell 2010a, Ferrellec et McDowell 2010b, Hart et al. 1988, Lee 2009, Price et al. 2007, Wang et al. 2007).

2.2. Approche NSCD

La méthode NSCD (Non-Smooth Contact Dynamics), une approche particulière de la DEM (Dubois et Renouf 2007, Moreau 1994, Moreau 2004, Saussine et al. 2006), a été utilisée dans cette étude. Au contraire de la DEM conventionnelle, elle est implicite. Un coefficient de restitution qui relie les vitesses relatives avant et après contact peut être introduit dans la loi de contact au lieu du modèle Mohr-Coulomb. Les coefficients de restitution normal et tangentiel peuvent être fixés à zéro pour refléter la dissipation totale de l'énergie cinétique d'une particule dans un amas de particules de ballast par exemple. Le code NSCD utilisé ici est le code LMGC90 capable de modéliser des particules rigides de forme polyédrique et a déjà été utilisé avec succès dans la modélisation du ballast à SNCF (Ferrellec et al. 2015).

3. Conditions de simulation

3.1. Modèle de versant

La présente étude concerne une zone pour laquelle SNCF a observé des chutes de blocs rocheux et pour laquelle un certain nombre de données a été récolté. Un relevé partiel de cette zone basé sur la photogrammétrie a été utilisé pour produire un maillage (Figure 1). La zone comprend un versant qui domine une risberme créée pour faciliter l'accès aux voies ferroviaires en contrebas. La risberme est maintenue par un remblai dont la face est couverte de maçonnerie. A partir de cette surface est généré un assemblage de trois blocs fixés dans l'espace: le versant, la risberme et le remblai. Cette partition de la surface de la zone est nécessaire car le code LMGC90 ne peut pas gérer les interactions entre corps à forte concavité.

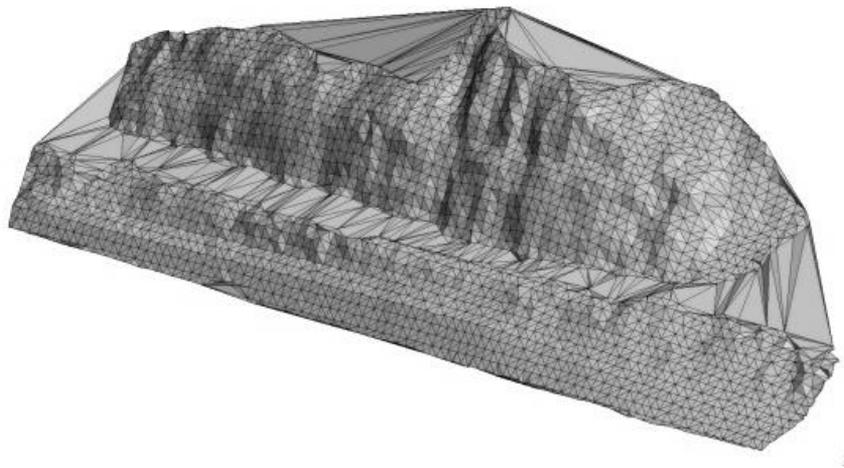


Figure 1. Maillage surfacique du versant étudié.

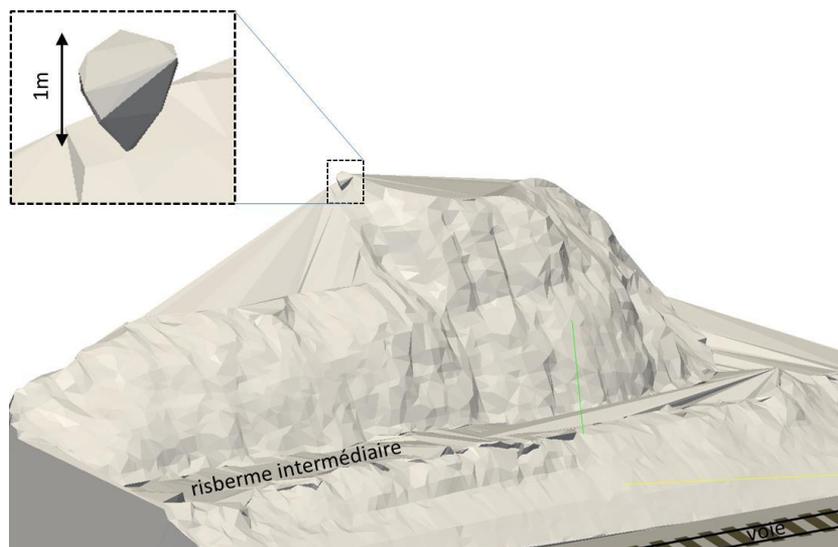


Figure 2. Versant modélisé en simulation avec bloc rocheux en position avant chute

3.2. Interaction bloc-versant

Les blocs rocheux sont modélisés par des volumes irréguliers représentant visuellement les blocs rocheux réels et de tailles similaires (Figure 2). Plusieurs types d'interactions entre la zone et les blocs rocheux ont été étudiées et la plus prometteuse après comparaison avec les quelques données expérimentales disponibles est de type frottement Mohr-Coulomb. Ces étapes préliminaires ont montré qu'un coefficient de frottement de l'ordre de 2 représente le mieux cette interaction. Ce coefficient qui peut paraître élevé tient en fait également compte de la rugosité de la surface qui caractérise l'irrégularité géométrique du versant à une échelle macroscopique.

3.3. Paramètres des simulations

Trois types de simulations ont été réalisés : chutes individuelles de blocs rocheux, chutes simultanées avec interaction possible entre blocs avec ou sans ouvrage d'interception. Dans la première série de chutes individuelles, une centaine de blocs avec position initiale variable sont utilisés. Dans la deuxième série, un groupe d'une vingtaine de blocs adjacents a été déposé sur le versant grâce à une paroi temporaire puis laissé chuter sur le versant. La troisième série correspond à la deuxième série en incluant un ouvrage d'interception hypothétique des blocs rocheux implanté à la limite de la risberme avec mesure de son efficacité. Cet ouvrage est modélisé par une paroi verticale de deux mètres de hauteur. Dans les trois séries, la trajectoire des blocs a été analysée dans les trois dimensions. Les temps de simulations, bien que supérieurs à ceux des modèles trajectographiques traditionnels, restent convenables et atteignent un maximum de quelques heures.

4. Résultats des simulations

4.1. Chutes individuelles de blocs

Des simulations de chute individuelle de blocs de différentes formes et de taille de l'ordre du mètre ont été menées. La figure 3 montre la trajectoire d'une centaine de blocs de formes différentes avec la même position initiale sur la zone. Ces trajectoires montrent qu'une petite partie des blocs atteint la voie mais également que les blocs dévient très peu transversalement. En fait le coefficient de frottement de 2 introduit dans le modèle est celui qui procure le pourcentage de blocs arrivant sur la voie observé expérimentalement pour cette zone, soit 10%, le reste des blocs rocheux étant stoppé au niveau de la risberme. La figure 3 montre clairement qu'une grande partie des blocs sont stoppés au niveau de la risberme. La figure 4 montre ces mêmes trajectoires dans une vue de côté du versant, une vue frontale et une vue de dessus. Grâce à ces graphes il devient facile de prédire, avec une fiabilité statistique certaine, les trajectoires de chute de blocs rocheux le long d'un versant après avoir identifié les blocs susceptibles de se décrocher. Les simulations permettent de déterminer avec une certaine fidélité ces trajectoires et leur déviation latérale possible. Prédire la position optimale pour installer des ouvrages soit de détection pour avertir le trafic des trains, soit d'interception sous la forme de filet en acier ou d'ouvrage en terre, est facilitée.

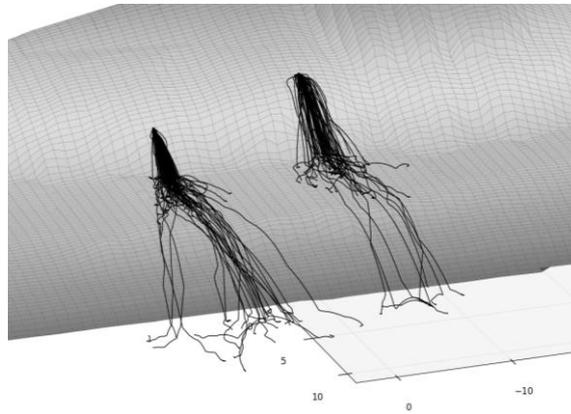


Figure 3. Trajectoire 3D de la chute de blocs individuels

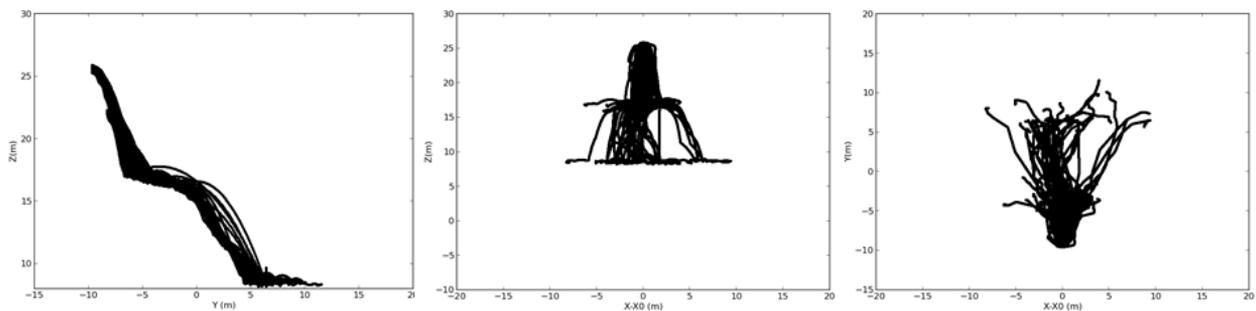


Figure 4. Projection des trajectoires des blocs en chutes individuelles dans le plan YZ perpendiculaire à la voie (gauche), déviation latérale des blocs individuels dans les plans XZ vertical parallèle à la voie (milieu) et XY horizontal (droite)

4.2. Chute simultanée de blocs

Comme mentionné précédemment, la chute simultanée de blocs a été réalisée en déposant et retenant des blocs avec une paroi temporaire sur le versant. Du fait de leur chute simultanée, ces blocs peuvent interagir entre eux au cours de leur chute. Les paramètres du modèle d'interaction entre blocs et versant ainsi que la taille des blocs restent inchangés par rapport aux simulations de chutes individuelles. La figure 5 montre la trajectoire de blocs en chutes simultanées. Certains blocs ont été séparés du groupe initialement pendant la préparation. Les trajectoires ne semblent pas être très différentes de celles des chutes individuelles. On remarquera la faible déviation latérale similaire des blocs. Une partie de ceux-ci sont également stoppés au niveau de la risberme mais pas autant en pourcentage que dans le cas des chutes individuelles. Sur la figure 6 qui montre les trajectoires et écarts dans différents plans, on observe des distributions similaires. On note cependant plus de cas avec rebond au niveau de la risberme que dans les chutes individuelles. Ce phénomène est probablement dû à des interactions entre blocs. La chute simultanée de blocs avec possible interaction entre eux peut ainsi modifier la distribution des blocs. Il semble donc important de pouvoir prendre en compte dans les modèles d'analyse de chute de blocs l'interaction entre ces blocs pour une meilleure prédiction des trajectoires de chute. Cette simulation permet également de localiser le meilleur endroit pour positionner un ouvrage d'interception des blocs.

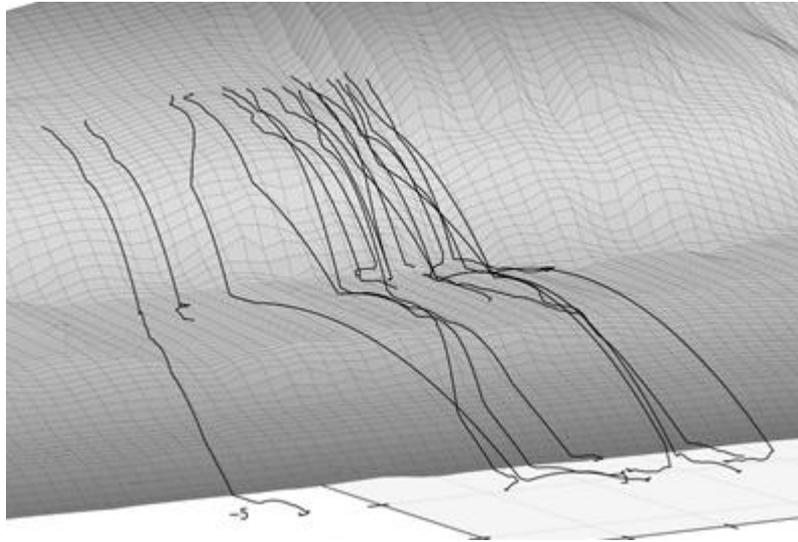


Figure 5. Trajectoire 3D de la chute simultanée de blocs

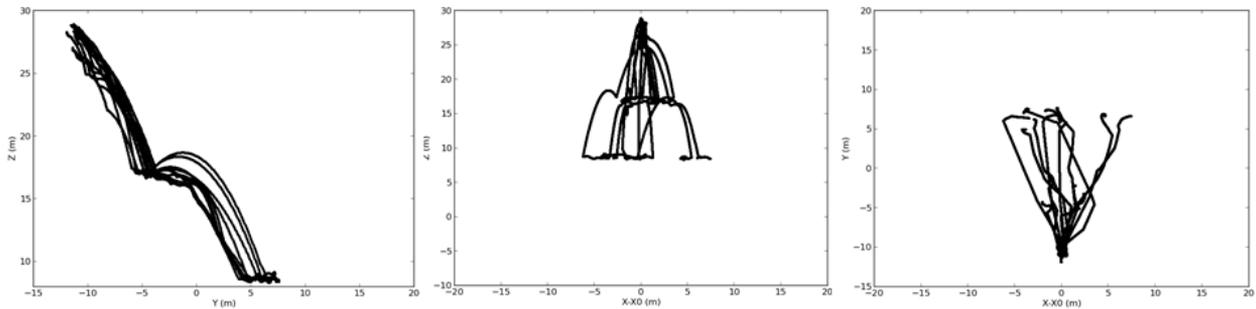


Figure 6. Projection des trajectoires de blocs en chutes simultanées dans le plan YZ perpendiculaire à la voie (gauche), déviation latérale des blocs individuels dans les plans XZ vertical parallèle à la voie (milieu) et XY horizontal (droite)

4.3. Chute simultanée de blocs avec interception

Une fois que les trajectoires de chute des blocs dans une zone sont identifiées, il devient plus facile de planifier des ouvrages de détection ou d'interception. Les résultats du cas précédent de chutes simultanées ont montré qu'une paroi de deux mètres de haut représentant un filet en acier étudié pour retenir les blocs rocheux d'une certaine taille peut être placée à la limite de la risberme permettant une accumulation sécurisée des blocs. La figure 7 montre la trajectoire des blocs lorsque ce filet (pas représenté sur la figure) est mis en place. L'ensemble des blocs a été stoppé par l'ouvrage de façon adéquate. Bien que le filet soit représenté par une paroi rigide, aucun bloc n'a rebondi. La figure 8 montre les trajectoires et écarts dans les différents plans de vues. On notera que les blocs qui rebondissaient le plus ont bien été interceptés par la paroi confirmant la hauteur de 2 mètres nécessaire. Les résultats de cette simulation montrent la pertinence de l'utilisation de la méthode DEM pour analyser des solutions de parade à la chute de blocs sur versant le long des voies ferroviaires et aussi pour les dimensionner.

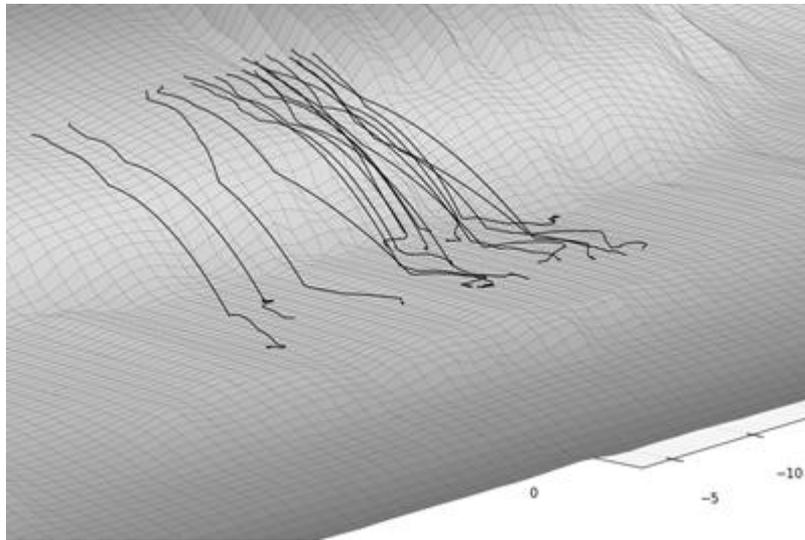


Figure 7. Trajectoire 3D de la chute simultanée de blocs avec ouvrage d'interception

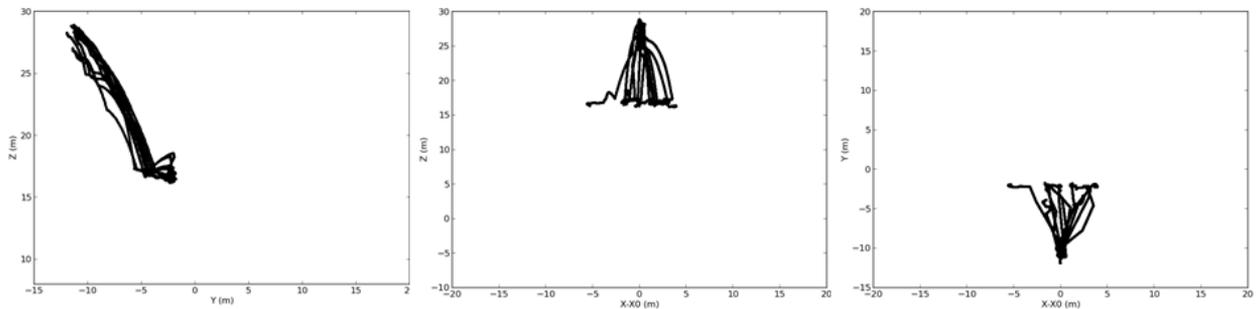


Figure 8. Projection des trajectoires des blocs en chutes simultanées avec ouvrage d'interception dans le plan YZ perpendiculaire à la voie (gauche), déviation latérale des blocs individuels dans les plans XZ vertical parallèle à la voie (milieu) et XY horizontal (droite)

5. Conclusions

L'analyse de la chute de blocs rocheux sur un versant le long d'une voie ferroviaire a été réalisée en utilisant la méthode numérique des éléments discrets. Les trajectoires de chute de blocs, individuellement ou en groupe, ont été déterminées par cette méthode.

Les résultats de simulations ont permis de localiser une position optimale pour placer un ouvrage d'interception des blocs mais également de dimensionner ces ouvrages. La DEM constitue donc un outil utile, plus précis que les modèles conventionnels utilisés dans le domaine de trajectographie de chute de blocs rocheux.

Certains points de cette analyse requièrent des améliorations certaines afin de pouvoir prédire avec plus de fiabilité la chute de blocs rocheux. L'identification des blocs susceptibles de se détacher de la paroi mériterait ainsi une attention particulière. Des recherches commencent à se pencher sur la visualisation des lignes de faille des roches lors des relevés topographiques des versants par photogrammétrie ou lasergrammétrie. De même des modèles DEM prenant en compte la fracture des blocs au cours de leur chute apporterait un bénéfice non négligeable aux analyses. Des études récentes vont dans ce sens.

L'entreprise ferroviaire SNCF, déjà familière avec la méthode DEM pour étudier le comportement mécanique des voies ballastées, ouvre, avec cette étude exploratoire de la DEM dans le domaine des chute de blocs rocheux, un nouveau chapitre qu'elle va très probablement développer dans un futur proche.

6. Références bibliographiques

- Cleary P.W. (2004). Large scale industrial DEM modelling. *Engineering Computations*, vol. 21, n°2-4, pp. 169-204.
- Cundall P.A., Strack O.D.L. (1979). A discrete numerical model for granular assemblies. *Geotechnique*, vol. 29, n°1, pp. 47-65.
- Dubois F., Renouf M. (2007). Numerical strategies software architecture to the modelling of dynamical systems in interaction. Application to multibody dynamics. *Proceedings of Multibody 2007, Politecnico di Milano, Milano, Italy*.
- Ferrellec J.-F., McDowell G.R. (2010a). A method to model realistic particle shape and inertia in DEM. *Granular Matter*, vol. 12, n°5, pp. 459-467.
- Ferrellec J.-F., McDowell G.R. (2010b). Modelling realistic shape and particle inertia in DEM. *Geotechnique*, vol. 60, n°3, pp. 227-232.
- Ferrellec J.-F., Perales R., Laurens P.-E., Woné M., Plu J., Saussine G. (2015). Non-smooth contact dynamic approach for railway engineering : investigation of ballast behaviour under stabilisation process. *Proceedings of IV International conference on Particle-based Methods – Fundamental and Applications, Particles 2015, Barcelona, Spain*.
- Hart R., Cundall P.A., Lemos J. (1988). Formulation of a three-dimensional distinct element method - Part II : Mechanical calculations for motion and interaction of a system of many polyhedral blocks. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, vol. 25, n°3, pp. 117-125.
- Lee Y. (2009). A packing algorithm for three-dimensional convex particles. *Granular Matter*, vol. 11, n°5, pp. 307-315.
- Lin X., Ng T.T. (1997). A three-dimensional discrete element model using arrays of ellipsoids. *Geotechnique*, vol. 47, n°2, pp. 319-329.
- Moreau J.J. (1994). Some numerical methods in multibody dynamics: application to granular materials. *European J. Mech. A Solids*, vol. 13, n°4, suppl., pp. 93-114.
- Moreau J.J. (2004). An introduction to unilateral dynamics. *Novel approaches in civil engineering, Lecture Notes in Applied and Computational Mechanics, 14, Springer-Verlag Berlin Heidelberg*, pp. 1-46.
- Mustoe G.G.W., Miyata M. (2001). Material flow analyses of non-circular-shaped granular media using discrete element methods. *J. Eng. Mech.*, vol. 127, n°10, pp. 1017-1026.
- Pournin L. (2005). Three-dimensional distinct element simulation of spherocylinder crystallization. *Granular Matter*, vol. 7, n°2-3, pp. 119-126.
- Price M., Murariu V., Morrison G. (2007). Sphere clump generation and trajectory comparison for real particles. *Proceedings of Discrete Element Methods Conference, Brisbane, Australia*.
- Saussine G., Cholet C., Gautier P.E., Dubois F., Bohatier C., Moreau J.J. (2006). Modelling ballast behaviour under dynamic loading. Part 1: A 2D polygonal discrete element method approach. *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, vol. 195, pp. 2841-2859.
- Wang L.B., Park J.Y., Fu Y.R. (2007). Representation of real particles for DEM simulation using X-ray tomography. *Construction and Building Materials*, vol. 21, n°2, pp. 338-346.
- Williams J.R., Pentland A.P. (1992). Superquadric and model dynamics for discrete elements in interactive design. *Eng. Comput.*, vol. 9, pp. 115-127.