

**Full Length Research Paper**

Modélisation des tirs de mine en fonction des caractéristiques géologiques du massif

Rokhaya SALL^{1*}, Abdoul Aziz NDIAYE², Serigne Bira GUEYE³,¹Université Cheikh Anta Diop, ED-PCSTUI, FST/ENSMG, Dakar, Sénégal²Université Cheikh Anta Diop, ENSMG, Dakar, Sénégal³Université Cheikh Anta Diop, FST, Dakar, Sénégal*Received June 2025 – Accepted October 2025***Corresponding author. Rokhaya10.sall@ucad.edu.sn*

Author(s) agree that this article remain permanently open access under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0 International License.

Résumé:

La maîtrise des tirs de mine en exploitation minière ou de carrière constitue un atout important pour la rentabilité de la production. Plusieurs logiciels permettent de simuler des résultats concernant les déplacements après tir des tas de minerais ou de roche mais aucun ne tient compte des caractéristiques géologiques du massif en particulier la géométrie des couches, la caractéristique intrinsèque de la roche et la fracturation naturelle. L'objectif de cet article est de proposer une méthode d'optimisation des tirs de mine en combinant plusieurs paramètres entre eux : paramètres géologiques, paramètres des plans de tir (maille, types d'explosifs), paramètres post-tirs (dilution, granulométrie). Deux tirs ont été effectués sur une roche composée de marnes avec des caractéristiques précises et les paramètres empiriques de la roche ont été introduits dans le programme BMS. Les différents paramètres de la roche sont pris en compte lors de la modélisation du tir. Le modèle a bien été reproduit par le programme en un massif homogène sans fracturations ou discontinuités. En effet, la comparaison modèle numérique / images réelles montre de bonnes similitudes sur 5 parmi les 6 indicateurs considérés (départ de la séquence de tir, projections, également, granulométrie, effets à l'arrière du tir et forme générale du front). Ce travail montre l'importance d'intégrer de la manière la plus exhaustive possible, la géologie du massif lors du développement de modèles numériques.

Mots clés: Modélisation Géologique, Tirs de mine, Simulations, Dilution du minerai, Carrières.**Cite this article:**

Bamol Ali Sow, Siny Ndoye, Ramatoulaye Diagne, Birane Ndom, Youssouph Badji, Amadou Diouf, Issa Ba, Arame Dièye, Moustapha Sow, Habib Boubacar Dieng, Eliane Diatta, Penda Touré, Ousmane Diankha, Issa Sakho. (2025). Stratégie de modélisation de l'estuaire de la Casamance et identification des zones exposées en cas de déversement d'hydrocarbures. Revue RAMReS – Sci. Appl. & de l'Ing., Vol. 7(1), pp. 28-33. ISSN 2630-1164.

1. Introduction

La première étape dans l'extraction de minerai ou de roche au niveau des mines et des carrières de roches dures consiste à détacher le matériau de la roche mère. Ce processus se fait à travers le forage-minage ou abattage.

Le matériau ainsi détaché est ensuite traité en fonction des besoins :

- concassage pour la production de granulats ;
- concassage, cuisson puis broyage pour la production de ciment ;
- concassage puis traitement en usine pour extraction de minerai (or, fer, etc.).

Une bonne modélisation du tir de mine permet :

- d'éviter les situations de risques d'accidents : projection, gaz

- de prévoir le déplacement du minerai identifié lors des sondages (dilution) et optimiser l'extraction du minerai sans qu'il ne se dilue dans le stérile et ainsi augmenter les coûts de production.
- éviter les « backbreak » qui correspondent à un excès de fissuration en dehors du tir et qui peuvent créer une instabilité au niveau des talus ;
- maîtriser les vibrations.

Plusieurs logiciels permettent de prévoir le comportement du massif lors des tirs mais les paramètres géologiques et géotechniques de la roche ne sont pas pris en compte.

L'objectif de ce travail est donc :

- d'analyser comment la nature géologique de la roche impacte le comportement du massif rocheux lors du tir de mine ;
- prédire la fragmentation des roches : développer une capacité de prédition de la fragmentation des roches résultant des tirs, en tenant compte des variations géologiques, pour évaluer l'efficacité de l'abattage.

2. Matériels et méthodes

Dans le but de renforcer le caractère général de la modélisation, les gisements suivants seront utilisés :

- marno-calcaires de Bargny ;
- calcaires de Pout ;
- basaltes de Diack.

La figure 1 donne la situation des basaltes de Diack. Ils sont exploités en carrière pour fournir le secteur du BTP sénégalais en matériaux de construction pour les routes et l'habitat. Le site se situe à 97 km de Dakar sur la route nationale N°3.

Le contexte géologique général du site de Diack est décrit dans Fraudet (1973) et dans (Dia, 1982). Roger *et al.* (2009) délivrent le dernier travail de cartographie sur le bassin sédimentaire dans le cadre du Projet d'appui au secteur minier de 2009.

Le Basalte est une roche magmatique effusive très commune dans la partie occidentale du bassin sénégalo-mauritanien qui a été le siège d'un important volcanisme vers la fin du Tertiaire sur l'ensemble du Cap Vert et du Plateau de Thiès. Le premier épisode volcanique a lieu au Miocène. Il se manifeste par des épanchements de basalte dans la presqu'île du Cap-Vert et des intrusions dans la région de Thiès notamment à Diack (Roger *et al.* 2009).

Sur le site de Diack, le Basalte se présente comme une roche noire (mésocrate à mélanocrate), microlitique, comportant des plagioclases, et des pyroxènes, accompagnés selon les cas d'olivine, d'hypersthène, de magnétite, d'ilmenite ; il peut s'y ajouter, en faible pourcentage, soit du quartz, soit des feldspathoïdes.

Trois types de faciès ont été identifiés à Diack :

- un faciès à grains fins, majoritaire, représenté essentiellement par des Basanites. Il a une structure microlitique porphyrique à phénocristaux de pyroxène et d'olivine, dans une mésostase riche en verre et en microlites de plagioclase, de microcristaux de pyroxène et d'olivine.
- un faciès à grain moyen moins abondant que le faciès précédent. La structure est doléritique intersertale avec pourcentage élevé de plagioclase en lattes englobant des pyroxènes et/ou des olivines en phénocristaux ou en microcristaux.
- un faciès à gros grain représenté par une roche grenue entièrement cristallisée, sans mésostase interstitielle. La structure est de type grenue pegmatitoïde contenant de nombreuses lattes de plagioclase et des cristaux de pyroxène.

Tous ces faciès sont imbriqués et exploités ensemble au niveau des carrières dont un des fronts de taille est présenté sur la figure 2. On y observe un faciès massif et un autre fracturé en grand, en prismes verticaux. Ces types de massifs constituent deux environnements dont on déterminera les comportements lors des tris.

Les marno-calcaires de Bargny sont exploités en carrière par la cimenterie SOCOCIM. Bargny est située en bordure de la Petite Côte, à environ 30 km à l'Est de Dakar par la route nationale N°1.

Le site de Bargny s'inscrit dans le cadre géologique de la presqu'île du Cap-Vert, à l'extrême occidentale du bassin sédimentaire sénégalo-mauritanien (figure 3). Cette région présente une géologie dominée par des formations sédimentaires d'âge tertiaire, essentiellement éocènes à miocènes, reposant sur un substratum plus ancien (Roger *et al.* 2009).

La carrière elle-même est implantée dans une formation calcaire massive d'âge éocène, connue localement sous le nom de calcaires de Bargny. Ces calcaires sont généralement compacts, à grain fin à moyen, de teinte beige à grisâtre, et se présentent en bancs subhorizontaux. Ils constituent la principale matière première pour la fabrication du ciment dans la région.

Les figures 4, 5 et 6 présentent trois types de massifs qui seront utilisés dans la modélisation des tirs de mines.

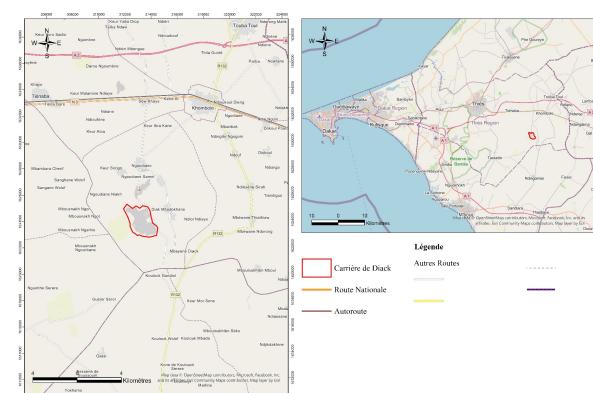
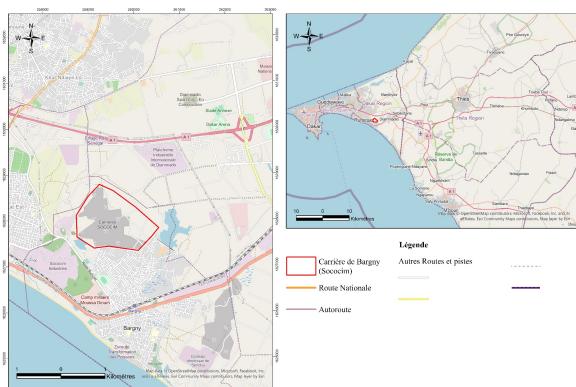


Figure 1 Carte de situation du basalte de Diack



Figure 2 : Ressources minières, gazières et pétrolières du Sénégal (PNADT, 2020).



La démarche consiste à :

• **Concevoir et réaliser le tir**

- identifier des massifs rocheux différents :
 - un faciès A homogène avec un massif rocheux uniforme sans structurations majeures ;
 - un faciès B hétérogène en bicouche ;
 - un faciès C hétérogène en bicouche faillé.
- effectuer un tir de mine sur chaque type de faciès :
 - prises de photos et avant et après le tir ;
 - vidéo du tir ;
 - plan du tir (forage, chargement, amorçage).

En l'absence pour l'instant des données mécaniques des différents faciès dont les essais sont en cours, les données empiriques habituelles seront utilisées (Bürgisser & Chandler 1999, Johansson & Johansson 2008 et Nakhaei & Amir 2018).

Les données des tirs sont introduites sur le logiciel BMS développé par EPC France avec les données empiriques utilisées habituellement sur le programme à partir des travaux de Ashraf & Iqbal (2015), de Wang & Fang (2019), de Meyer (2013) et de Hinojos-Mendoza & Jiménez (2019).

Les vidéos des tirs sont comparées avec les simulations numériques du logiciel.

Ensuite les données mécaniques empiriques sont modifiées et un suivi du comportement de l'évolution de la roche est intégré lors de la conception du plan de tir.

• **Analyser les résultats**

Les résultats sont exploités ainsi qu'il suit :

- étudier l'influence des propriétés des roches : analyser comment les différentes caractéristiques des roches, telles que la densité, la dureté et la structure géologique, affectent les résultats des tirs de mines, et intégrer ces variations dans le modèle.

- optimiser les paramètres d'explosifs : explorer la modélisation pour optimiser les paramètres des explosifs, tels que la quantité, la consommation spécifique et la séquence d'amorçage, afin d'améliorer l'efficacité de l'abattage tout en minimisant les effets environnementaux.
- valider du modèle sur le terrain : tester et valider le modèle en l'appliquant à des situations réelles sur des sites miniers comme ceux de Diack et Bargny, en comparant les résultats simulés avec les données réelles collectées après les tirs de mines.

3. Résultats

Les résultats présentés ci-dessous permettent également d'intégrer les aspects environnementaux en évaluant les vibrations du sol, les émissions de poussières et d'autres effets potentiels sur l'écosystème.

3.1. Tirs de mine effectués

Deux tirs ont été effectués sur une roche composée de marnes avec des caractéristiques précises et les paramètres empiriques de la roche ont été introduits dans le programme BMS.

Tableau 1. : Résumé des paramètres de modélisation

Paramètres	Unités	Données
Type de simulation		Dynamique Mouvement Study
Pression initiale P_0	MPa	4300
Module de Young	Pa	3×10^9
Coefficient de Poisson		0,25
Densité	Kg/m ³	2800
Angle de friction	Pa.s ⁻¹	0.2
Maillage		6
Temps de simulation	s	6.0
Total Itération		300

Le tableau 1 présente les différents paramètres de la roche pris en compte lors de la modélisation du tir.

L'un des paramètres les plus importants est le module d'élasticité longitudinale de Young (E). Ce module mesure la rigidité d'un matériau. Il correspond au rapport entre la contrainte mécanique σ (force appliquée par unité de surface) et la déformation unitaire ε (variation relative de longueur), dans la zone où la loi de comportement du matériau reste linéaire et réversible.

La relation s'écrit : $E = \sigma/\varepsilon$

Cette expression signifie que plus E est grand, plus le matériau s'oppose à l'allongement ou à la compression sous l'effet d'une charge

3.2. Avant le tir

Les deux images de la figure 7 montrent que le modèle a bien été reproduit par le programme en un massif homogène sans fracturations ou discontinuités.

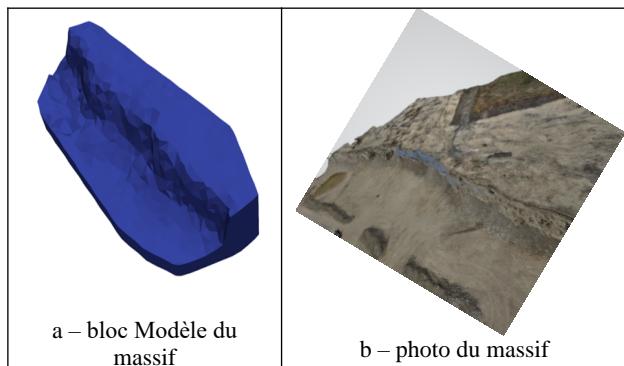


Figure 7 : Photo avant tir et modèle numérisé de la zone de tir

3.3. Après le tir

Les images de la figure 8 montrent l'étalement du matériau ainsi que l'état du massif après le tir.

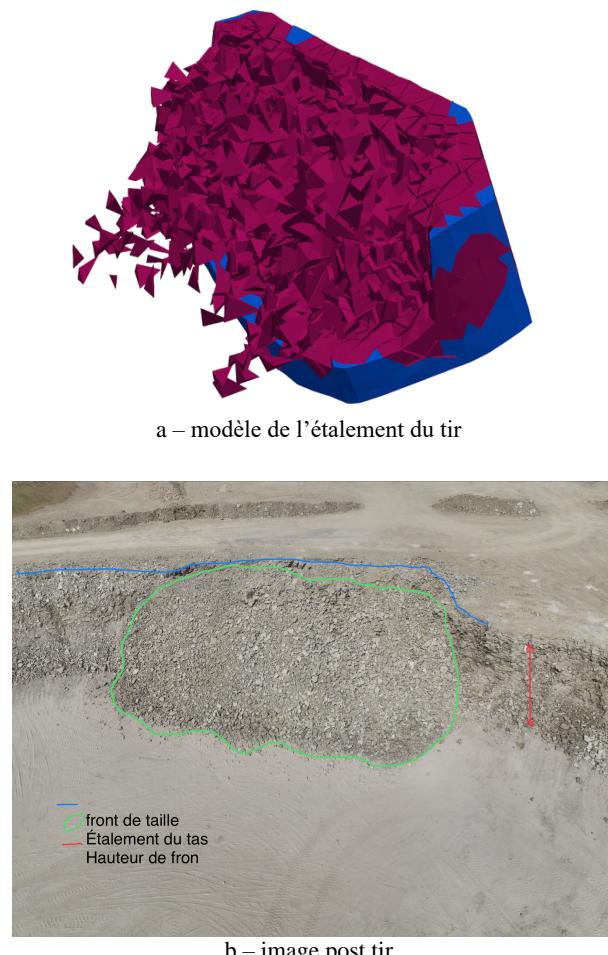


Figure 8 : Photo après tir et modèle numérisé de la zone après le tir

3.4. Bilan de l'opération

Le tableau 2 présente un bilan du tir.

Tableau 2 : Comparaison modèle numérique / images réelles

LOGICIEL BMS	TIR RÉALISÉ
Départ de la séquence de tir de la droite vers la gauche	Départ de la séquence de tir de la droite vers la gauche
Aucune projection sur le premier trou	Légère projection sur le premier trou
Etalement de la matière limitée	Etalement de la matière plus importante
Granulométrie non prise en compte par la taille des éléments	Granulométrie fine
Effets à l'arrière du tir perpendiculaire au front de taille	Effets à l'arrière du tir parallèle au front de taille
Forme générale du front de taille correcte	Forme générale du front de taille correcte

Des paramètres supplémentaires recueillis sur le terrain peuvent être ajoutés afin de prendre en compte l'hétérogénéité du massif. En effet, les données issues de la foration sont souvent sous-utilisées et peuvent constituer des renseignements primordiaux sur la roche.

La figure 9 représente l'évolution des paramètres de forage en fonction de la profondeur de la roche : de gauche à droite la Pression de rotation en MPa, la Pression de poussée en MPa, la pression de percussion en MPa et la vitesse de pénétration en m/s. Ces paramètres recueillis sur chaque trou permettent de mettre en place un modèle hétérogène (figure 10) qui se rapproche le plus de la réalité.

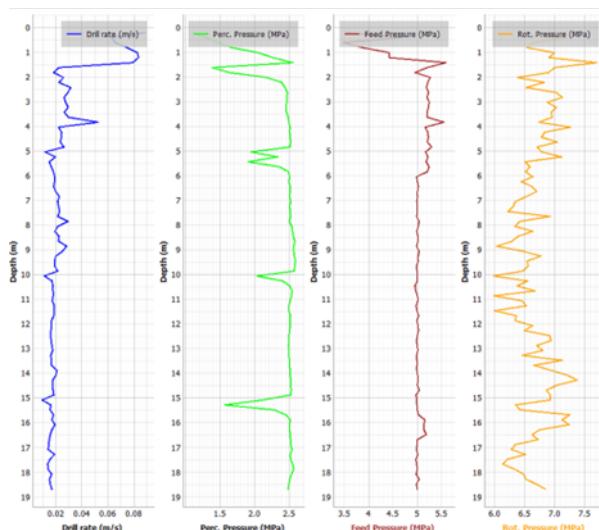


Figure 9 : Photo après tir et modèle numérisé de la zone après le tir

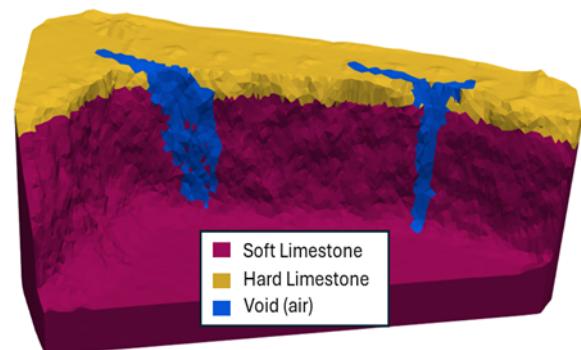


Figure 10 : Photo après tir et modèle numérisé de la zone après le tir

4. Conclusion

L'observation des différences notées entre les modèles numériques et les tirs sur le site ainsi que l'évolution du modèle lorsque les paramètres géotechniques sont modifiés montrent bien l'influence de la géologie sur le résultat du tir.

Dès lors il est primordial que les modèles développés intègrent de manière exhaustive la géologie du massif. Dès lors les technologies émergentes telles que l'intelligence artificielle ou l'apprentissage automatique pourraient être intégrées dans la modélisation pour améliorer la précision des prédictions.

Remerciements

Nous remercions les différents services d'EPC France et EPC MINEEX Sénégal qui nous ont donné accès à leur banque de donnée ainsi qu'au logiciel BMS.

REFERENCES

- [1] Ashraf, M. A., & Iqbal, M. A. (2015). A Review on Blasting Techniques in Hard Rock. Journal of Mining World Express, 4(1), 1-5.
- [2] Bürgisser, J., & Chandler, N. A. (1999). The Mechanics of Rock Breakage by Blasting. Taylor & Francis.
- [3] Dia, A. (1982). - Contribution à l'étude des caractéristiques pétrographiques pétrochimiques et

géotechniques des granulats basaltiques de la presqu'île du Cap-Vert et du Plateau de Thiès (Carrière de Diack - Sénégal), Thèse de 3ème cycle, Fac Sciences, 179 pages.

[4] Fraudet P. (1973) : Contribution à l'étude des roches éruptives de la région de Thiès (République du Sénégal). In : Documents des Laboratoires de Géologie de la Faculté des Sciences de Lyon, n°57, 1973. Notes et Mémoires. pp. 15-86. https://www.persee.fr/doc/geoly_0076-1672_1973_num_57_1_1325

[5] Hinojos-Mendoza, J., & Jiménez, J. R. (Eds.). (2019). Explosives Engineering (1st ed.). Springer.

[6] Johansson, D., & Johansson, T. (2008). The Influence of Rock Properties and Explosive Energy on the Fragmentation of Rock in Blasting. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 45(3), 315-324.

[7] Meyer, R. L. (2013). Explosives and Blasting Technique (1st ed.). CRC Press.

[8] Nakhaei, M., & Amir Hassani, F. (Eds.). (2018). Handbook of Rock Engineering (1st ed.). CRC Press

[9] ROGER J., NOËL B.J., BARUSSEAU J.P., SERRANO O., NEHLIG P., DUVAIL C. (2009) – Notice explicative de la carte géologique du Sénégal à 1/500 000, feuilles nord-ouest, nord-est et sud-ouest. Ministère des Mines, de l'Industrie et des PME, Direction des Mines et de la Géologie, Dakar, 61 pages.

[10] Wang, J., & Fang, Q. (2019). Theories and Techniques of Explosive Synthesis. Elsevier.