DÉVELOPPEMENT D'UN OUTIL D'ÉVALUATION DES EFFETS DU PROCESSUS DE SAUTAGE EN MILIEU URBAIN

par

Marc-Alexandre ALLARD

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE
LA MAÎTRISE EN GÉNIE DE L'ENVIRONNEMENT
M. SC. A.

MONTRÉAL, LE 21 NOVEMBRE 2020

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

 <Marc-Alexandre Allard, 2020>



Cette licence Creative Commons signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette œuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'œuvre n'ait pas été modifié.

PRÉSENTATION DU JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Mathias Glaus, directeur de mémoire
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Frédéric Monette, président du jury
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Robert Hausler membre du jury
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 11 NOVEMBRE 2020

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier tous ceux qui m'ont aidé lors de l'élaboration et de la rédaction de ce mémoire.

D'emblée, je veux remercier mon directeur de mémoire Mathias Glaus pour ses conseils judicieux ayant permis de pousser mes réflexions et surtout pour ça patience et ça bonne humeur en dépit de mes lacunes.

Je remercie spécialement Pierre Groleau, mon mentor dans le domaine des explosifs sans qui tout ce travail aurait été impossible.

Merci à Philippe et Dominique pour leur support moral dans ce projet comme dans les autres.

Je remercie également mes parents Céline et Jean-Luc ainsi que mon frère David pour leur soutiens et leur encouragements infaillibles en particulier lors de mes tempêtes verbales.

Finalement, merci à Stéphanie B, ma source de courage tout au long de cette aventure.

Développement d'un outil d'évaluation des effets du processus de sautage en milieu urbain

Marc-Alexandre ALLARD

RÉSUMÉ

Les sautages en milieux urbains sont de plus en plus fréquents dans nos sociétés. Qu'ils s'agissent de travaux de réfection d'infrastructures, d'élaboration de réseaux de transport souterrain ou d'un rapprochement des zones résidentielles des carrières ou des sites miniers, une pression s'accentue sur l'industrie du forage et du sautage avec des normes de plus en plus strictes et des attentes citoyennes grandissantes. Dans ce contexte, la capacité à estimer les impacts de sautages devient un enjeu pour répondre au besoin de précision accrue des nouveaux chantiers.

Dans le cadre de cette recherche, les données de sautage d'une carrière en milieu urbain sont analysées sur quatre années afin d'intégrer l'effet de facteurs liés à la configuration des essais de sautage sur les résultats de vibration qui en sont induite. Par ailleurs, un outil d'aide à la réflexion a été développé afin de faciliter l'identification des valeurs des paramètres de forage et sautage en regard aux conditions fixées. L'outil développé est, par la suite, testé sur une étude de cas qui présentait des conditions aux limites d'acceptabilité.

Le traitement des données historiques de la carrière a permis d'établir un facteur « direction » paramétrable pour chaque configuration de sautage. L'intégration de ce facteur caractérisé sur les données des années 2016-2018, a démontré une amélioration de la précision des estimations de vibration de 15% lorsqu'il est appliqué à la série de données pour l'année 2019. La structuration des données associée au développement de l'outil permet de générer des jeux de valeurs pour l'identification des paramètres de sautages, facilitant la prise de décision pour l'opérateur tout en s'assurant de minimiser les risques de dépassement des valeurs seuils.

Mots-clés : forage, sautage, travaux urbains, carrière, outil d'aide à la réflexion

Development of a tool for evaluating the effects of the blasting process in an urban environment

Marc-Alexandre ALLARD

ABSTRACT

Blasting in urban areas is more and more frequent in our societies. Whether it concerns infrastructure repair work, the development of underground transport networks or the bringing together of residential areas, quarries or mining sites, pressure is increasing on the drill and blast industry with increasingly strict standards and growing citizen expectations. In this context, the ability to estimate the impacts of blasting becomes an issue to meet the need for increased precision on new sites.

As part of this research, blasting data from an urban quarry are analyzed over four years in order to integrate the effect of factors related to the configuration of blasting tests on the results of vibration induced by blasting. In addition, a reflection aid tool has been developed to facilitate the identification of the values for the drilling and blasting parameters with respect to the set conditions. The tool developed is then tested on a case study that presented boundary conditions of acceptability.

Processing of historical data from the quarry made it possible to establish a configurable "direction" factor for each blasting configuration. The integration of this factor characterized on the data of the years 2016-2018, demonstrated an improvement of the precision of the vibration estimates of 15% when it is applied to the data series for the year 2019. The structuring of the data associated with the development of the tool makes it possible to generate sets of values for the identification of blasting parameters, facilitating decision-making for the operator while ensuring that the risks of exceeding the threshold values are minimized.

Keywords : drilling, blasting, urban works, quarry, thinking aid tool

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION 1

CHAPITRE 1 ÉTAT DES CONNAISSANCES.....3
1.1 Les différents explosifs et leurs utilisations.....3
1.1.1 Historique..... 3
1.1.2 Principe de fonctionnement 5
1.2 Processus de sautage 10
1.2.1 Nomenclature..... 10
1.2.2 Principe de conception d'un plan de forage et sautage..... 14
1.2.3 Impact des sautages et mesures d'atténuation 16
1.2.4 Paramètres du site de sautage 25

CHAPITRE 2 MÉTHODOLOGIE.....31
2.1 Adaptation du modèle d'estimation des vibrations aux conditions d'un site 31
2.1.1 Configuration du site et données associées..... 31
2.1.2 Modèle d'estimation des vibrations..... 33
2.1.3 Intégration du facteur de correction « direction » à l'estimation de la vibration 36
2.2 Élaboration d'un outil de paramétrage des critères de sautage.....38
2.2.1 Développement de l'outil d'élaboration des paramètres de forage et sautage..... 39
2.2.2 Validation de l'outil par une étude de cas..... 41

CHAPITRE 3 RÉSULTATS.....45
3.1 Comparaison des estimations de vibration avec les mesures in situ.....45
3.1.1 Établissement des constantes du site à l'étude..... 45
3.1.2 Évaluation de l'impact des facteurs spécifiques sur les vibrations de sautages..... 48
3.1.3 Détermination du facteur « Direction » 53
3.2 Développement de l'outil d'aide à la planification de patrons de forage et sautage ...57
3.2.1 Processus de traitement..... 58
3.2.2 Étude de cas 62

CHAPITRE 4 DISCUSSION.....65
4.1 Aspect opérationnel et limite d'utilisation.....65
4.2 Perspective de développement des connaissances du domaine 68

CONCLUSION ……71

ANNEXE I Fiche technique des explosifs comparés……..74

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....80

LISTE DES TABLEAUX

Page

Tableau 1.1 Comparaison des explosifs commerciaux 8

Tableau 1.2 Nomenclature d'un patron de forage 12

Tableau 1.3 Nomenclature des activités de chargements d'explosifs et de traitement des résultats de sautage 13

Tableau 1.4 Norme sismique Directive 019 29

Tableau 1.5 Norme sismique de la ville de Montréal 30

Tableau 2.1 Recensement des données enregistrées de 2016 à 2018 33

Tableau 2.2 Variables de l'équation de prédiction des vibrations d'un sautage 34

Tableau 2.3 Facteurs analysés 35

Tableau 2.4 Contraintes environnementales et définitions 39

Tableau 2.5 Contraintes techniques considérées 40

Tableau 2.6 Variables des équations de prédictions des distances de projections de roc d'un sautage 41

Tableau 2.7 Paramètre du sautage de l'étude de cas 42

Tableau 3.1 Analyse des sautages par années 47

Tableau 3.2 Analyse par zone de sautage 50

Tableau 3.3 Comparaison des courbes d'atténuations par direction 54

Tableau 3.4 Nombre de données analysées par direction en 2019 et impact du facteur direction (FD) sur la courbe d'atténuation théorique de Oriard (2002) et du site en 2016 et 2018 55

Tableau 3.5 Calculs associés aux séquences de traitement des données permettant d'établir les paramètres de forage et sautage 61

Tableau 3.6 Contraintes pour étude de cas 62

Tableau 3.7 Paramètres suggérés pour l'étude de cas 63

LISTE DES FIGURES

Page

Figure 1.1 Réaction d'un explosif....6

Figure 1.2 Insertion d'un détonateur dans une amorce....9

Figure 1.3 Illustration d'un patron de forage tirée de Alaattin, Huseyin et Halim (2016) 11

Figure 1.4 Impact de la séquence de mise à feu sur le front de dégagement d'un sautage 16

Figure 1.5 Exemple de courbe d'atténuation, tirée de Trépanier (2018, p. 12)....18

Figure 1.6 Matelas pare-éclats....24

Figure 1.7 Norme sismique USBM....28

Figure 2.1 Les différents facteurs de direction....36

Figure 2.2 Illustration du facteur direction....37

Figure 2.3 Donnée sismique et séquence de mise à feu....42

Figure 3.1 Comparaison des résultats in situ de 2016 à 2018 entre la courbe d'atténuation du sommaire considérant les vibrations en dessous des seuils de détection, la courbe d'atténuation du sommaire sans les vibrations en dessous des seuils de détection et la courbe d'atténuation théorique. 46

Figure 3.2 Schémas en plan du site évalué....49

Figure 3.3 Comparaison des résultats d'enregistrements en fonction des positions des trois sismographes....52

Figure 3.4 Comparaison entre les prédictions de vibrations de site avec les constantes théoriques et celles sommaire du site en 2016 et 2018 en considérant l'ajout du facteur direction pour prédire les vibrations réelles enregistrées en 2019 ..56

Figure 3.5 Schéma logique du processus de traitement des données associé à la planification de patron de forage et sautage....60

INTRODUCTION

Les carrières ainsi que les chantiers de construction font partie intégrante des activités de développement des infrastructures pour supporter l'évolution des sociétés modernes. L'exploitation des carrières permet d'extraire les matériaux et les chantiers permettent d'aménager l'espace ainsi que d'assurer la réfection ou la construction des infrastructures et des bâtiments. Actuellement, l'utilisation d'explosifs est implicite dans l'exploitation des carrières et primordiale pour une partie des travaux de construction. Pourtant, la fabrication d'explosifs servants aux travaux civils d'envergure ne remonte qu'à l'avènement de la nitroglycérine en 1847 par Ascanio Sobrero (Fant, 2006), bien que la poudre noire découverte au 6e siècle fut utilisée plus tôt pour certains travaux.

L'utilisation des explosifs en génie civil eu pour effet d'augmenter l'efficacité des travaux et le rendement des carrières en plus de permettre la réalisation d'infrastructures auparavant inimaginable tel que des routes et tunnels traversant des montagnes ou, plus récemment, les réseaux de métros. Avec le temps, les travaux aux explosifs se sont multipliés aux abords des centres urbains et les milieux résidentiels se sont rapprochés des carrières créant une proximité nouvelle entre les opérations de sautage et les citoyens. Au début des années 2000, au Québec, entre 1000 et 1500 travaux aux explosifs étaient effectués chaque année à proximité d'ouvrages de génie civil ou d'habitations (Martel et al., 2002).

Afin de limiter les risques reliés à l'utilisation des explosifs, des normes ont été établies afin de règlementer ses différentes formes d'applications. Ces normes visent à proscrire son emploi par des utilisateurs inexpérimentés ainsi qu'à encadrer son utilisation lors de travaux en raison notamment de la proximité des citoyens, des infrastructures publiques ainsi que de composantes environnementales (faune et flore).

Pour répondre à ces exigences, l'industrie du forage et sautage doit continuellement s'adapter afin de conserver sa capacité à répondre aux besoins du génie civil. Ainsi, la majorité des

méthodes employées pour réaliser un sautage doivent être ajustées d'un chantier à l'autre en fonction des particularités spécifiques du site et de ses environs. Dans ce contexte, les travaux réalisés dans le cadre de la maitrise se sont intéressés à l'élaboration d'un outil d'aide à l'évaluation des effets du processus de dynamitage en milieu urbain en visant les deux objectifs spécifiques suivants :

- déterminer, par analyse de séries de sautage, les facteurs contrôlant les principaux effets associés à un sautage;
- Élaborer un facteur permettant d'améliorer la capacité de prédiction des sautages;
- élaborer un outil de paramétrage des critères d'un sautage en fonction des conditions limites à respecter dues au contexte du site.

Le présent document est organisé en quatre chapitres. Le premier aborde l'état des connaissances dans le domaine du forage et sautage résumant les différents types d'explosifs, les processus de sautage ainsi que les paramètres de contrôle des effets d'un sautage. Par la suite, le deuxième chapitre présente la méthodologie employée pour le traitement des données, l'estimation de nouveaux facteurs ainsi que le développement d'un outil d'optimisation des paramètres de forage et sautage. Les résultats sont présentés dans le troisième chapitre, suivie du quatrième qui amène une discussion sur le travail réalisé, les conditions d'applications, les limites associées à la démarche et les perspectives associées. La conclusion finalise le mémoire.

CHAPITRE 1

ÉTAT DES CONNAISSANCES

Ce chapitre aborde la connaissance associée à l'utilisation d'explosifs dans le cadre d'activités de forage et sautage. Plus spécifiquement, la structure du chapitre est organisée en trois sections qui présentent respectivement les caractéristiques des différents explosifs et leurs utilisations, les processus de sautage et finalement, les paramètres de contrôle des effets d'un sautage.

1.1 Les différents explosifs et leurs utilisations

Dans un premier temps, la section présente un historique du développement des explosifs afin de mieux situer les orientations actuelles dans le domaine. Dans un deuxième temps, la section aborde les principes de fonctionnement des explosifs, à savoir leurs propriétés physiques ainsi que les méthodes d'initiations.

1.1.1 Historique

En se fiant à la culture générale, l'utilisation des explosifs est associée à un aspect militaire et à la création de diverses armes. Pourtant, à travers l'histoire, une multitude d'explosifs ont été développés pour diverses applications.

Selon le sinologue Needham (1954), la poudre noire est le premier explosif utilisé par l'homme. Sa découverte daterait du septième siècle en Chine durant la dynastie Tang (618-907). Au fil du temps, les concentrations des composants de la poudre noire, soit le salpêtre, le souffre et le charbon ont été modifiés en fonction du type d'utilisation visé. Depuis sa création, la poudre noire et ses dérivés ont été utilisés pour des applications militaires, civiles et récréatives telles que des feux d'artifices (Corréard 1835). Dans ce dernier cas, la couleur,

originellement blanche, est modifiée par l'ajout de différents composés chimiques tels que le potassium et le cuivre (Wilson 2017).

L'avènement de la chimie au 18^{e} siècle a permis la découverte de nouveaux explosifs. Ainsi, Woulfe (1771) a développé l'acide picrique [$(NO_2)_3C_6H_2$–OH] qui initialement était reconnu comme un colorant. Au départ, la qualité explosive de l'acide picrique était perçue comme un élément négatif en raison de la dangerosité associée à sa manipulation et était plutôt utilisée comme colorant synthétique. Ce n'est qu'en 1885 que Turpin réussit à maitriser la capacité explosive de l'acide picrique à l'aide de coton pressé et ainsi former un nouvel explosif connu sous le nom de mélinite (Sprengel, 1903). Cet explosif est par la suite repris par différents gouvernements et largement utilisé durant la Première Guerre Mondiale pour la fabrication d'obus.

La nitroglycérine [$C_3H_5(NO_3)_3$] inventée par Sobrero en 1847 est un explosif liquide plus puissant que la poudre noire (Fant, 2006). Pourtant, les dangers rattachés à sa fabrication et sa manipulation amènent Sobrero à s'opposer à son utilisation. Ce n'est que dans les années 1860 que Nobel commence la manufacture d'un mélange de poudre noire et de nitroglycérine afin d'exploiter la capacité explosive du mélange (Fant, 2006). À la suite d'une série d'accidents mortels, Nobel stabilise son produit en mélangeant la nitroglycérine avec une poudre siliceuse afin de limiter les risques associés à sa manipulation. Il invente ainsi la dynamite en 1866 (Fant, 2006). La dynamite est encore aujourd'hui couramment utilisée sur les chantiers de forage et de sautage.

Le trinitrotoluène ou TNT [$C_7H_5N_3O_6$] développé en 1863 par Wilbrand (Smith, 1918) est un explosif ayant comme particularité de nécessiter une plus grande quantité d'énergie pour amorcer sa réaction explosive. Cette particularité qui parait initialement négative est par la suite très recherchée puisqu'elle permet une manipulation plus sécuritaire. Il est également utilisé pour des applications militaires et le développement, par exemple, de torpilles en permettant de traverser un blindage avant d'exploser (Smith, 1918).

Bien que l'arrivée de l'ANFO (ou Ammonium Nitrate and Fuel Oil) varie selon les sources disponibles, son application dans les travaux de génie civil comme celle de son dérivé l'émulsion débute en 1956 (Petes, 1983). L'atout principal de l'ANFO dans le domaine de la construction est son faible coût de fabrication et sa manipulation facile en raison de son risque limité de détonation involontaire ce qui le différencie des autres explosifs présentés précédemment. Il est aujourd'hui, avec ses dérivés, le principal explosif utilisé à des fins civiles.

1.1.2 Principe de fonctionnement

Un explosif est un composé chimique ayant la propriété, sous une contrainte d'énergie, de changer rapidement d'état pour former une quantité importante de gaz à haute température. L'énergie pour initier la réaction explosive peut être sous forme de pression ou de chaleur. La Figure 1.1 illustre la pression développée par un explosif durant sa réaction complète (Hermans, 2005).

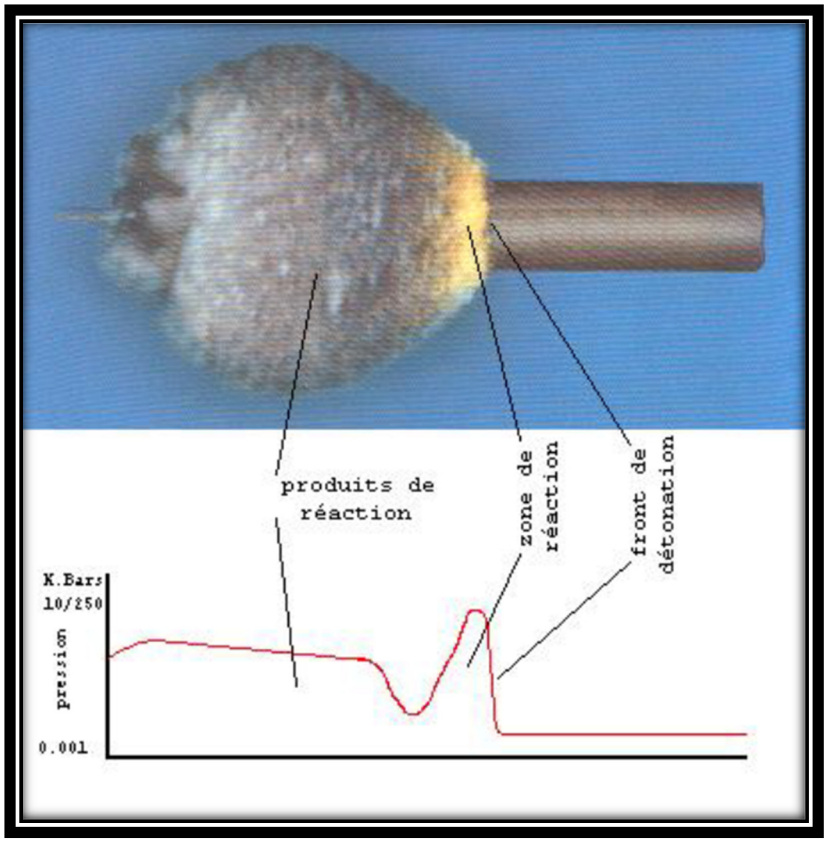


Figure 1.1 Réaction d'un explosif

Tel qu'illustré à la Figure 1.1, le front de détonation représente l'énergie d'activation de la réaction bien qu'il soit lui-même un produit de l'initiation originale. Ce front de détonation se déplace généralement à des vitesses situées entre 1500 et 8000 m/s (Dyno Nobel, 2014) et développe une pression de l'ordre de 10 à 250 kbar selon l'explosif et les conditions de réaction (Hermans, 2005).

Le passage du front de détonation permet d'amorcer la réaction exothermique de l'explosif. La zone de réaction illustrée dans la deuxième partie de la Figure 1.1 représente le composé explosif se transformant en gaz à haute température (de l'ordre de 1000 à 3500°C). La pression chute rapidement après la zone de réaction puis se stabilise à la hausse jusqu'à la réaction complète de l'explosif (Hermans, 2005).

La vitesse du front de détonation permet de catégoriser les explosifs en deux grandes familles soit les explosifs brisants créant une détonation et les explosifs à effet de souffle créant une déflagration (USBM, 1996). Dans le cas d'un explosif brisant, le front de détonation avance plus vite que la formation des gaz générés par la réaction tel qu'illustré à la Figure 1.1. La vitesse de ce front de détonation et sa pression élevée engendrent ainsi une capacité élevée de pénétration au sein du matériel encaissant.

Dans le cas d'un explosif déflagrant, la vitesse des gaz est plus rapide que celle du front de détonation générant ainsi une pression moins élevée. Le résultat est un souffle avec une plus faible capacité de pénétration dans le matériel encaissant. La poudre noire en est un bon exemple. Bien que tous les explosifs soient prompts à dégager leur énergie dans la direction offrant la plus faible résistance, les explosifs déflagrants ne développent généralement pas suffisamment de pression pour endommager une surface s'ils n'y sont pas confinés (Hermans, 2005). Cette capacité permet d'ailleurs l'utilisation de la poudre noire dans les canons en concentrant l'énergie explosive vers la propulsion d'un projectile. Ceci étant, si le degré de confinement est suffisamment élevé, même les explosifs déflagrants sont capables de pénétrer le matériel encaissant.

Les explosifs utilisés pour les travaux de génie civil sont généralement tous dans la catégorie des explosifs détonants. Pourtant, la vitesse du front de détonation reste une variable déterminante dans la sélection d'un explosif puisqu'une vitesse de détonation plus élevée a tendance à mieux pénétrer le matériel encaissant et donc générer une meilleure fragmentation (Hermans, 2005) alors qu'une vitesse plus basse a tendance à occasionner un meilleur déplacement de la masse fragmenté. Cependant, cette vitesse idéale n'est généralement pas atteinte en raison des divers facteurs qui la régulent tels que la présence d'impureté ou de vide au sein d'une colonne explosive, donnant ainsi place à une vitesse effective moins importante et diminuant alors la quantité d'énergie dégagée.

En raison des nombreux types d'explosifs disponibles pour les activités de forage et sautage, il est pertinent de comparer leurs caractéristiques. En effet, un explosif idéal pour un travail en carrière peut être inutilisable pour un chantier en ville ou même une autre carrière qui présente des conditions différentes. Pour mieux visualiser ces principales caractéristiques, le Tableau 1.1 présente les caractéristiques intrinsèques aux différentes familles d'explosifs commerciaux. Sachant que les caractéristiques retenues sont variables d'un produit à l'autre ainsi que d'un fabricant à l'autre, les valeurs indiquées le sont à titre indicatif et correspondent respectivement à l'émulsion Titan 1000G et à la dynamite Unimax de la compagnie Dyno Nobel ainsi qu'au dérivé du TNT Riobooster DET et à l'ANFO Rioxam de la compagnie Maxam. Leurs fiches techniques sont présentées à l'Annexe I.

Tableau 1.1 Comparaison des explosifs commerciaux

Explosif	Unité	Émulsion	Dynamite	TNT	ANFO
Vitesse de détonation	m/s	4500	5300	7620	4150
Énergie	cal/g	680	1055	1000	890
Densité	g/cm³	1,2	1,51	1,65	0,84
Initiation	N/A	Amorce	Détonateur	Détonateur	Amorce
Diamètre critique	mm	65	25	N/A	65
Résistance à l'eau	N/A	Excellent	Excellent	Excellent	Faible

Le choix du type d'initiation est déterminé par la quantité d'énergie qui est nécessaire pour amorcer la réaction de l'explosif choisi. Les explosifs modernes peuvent être classés selon leur sensibilité dans les deux grandes catégories suivantes : les explosifs sensibles aux détonateurs et ceux non-sensibles aux détonateurs. Le détonateur est constitué d'une petite charge explosive très sensible ainsi que d'un mécanisme permettant de déterminer le délai exprimé en millième de seconde après lequel la charge explosive est initiée. Il permet d'établir une séquence de mise à feu pour chaque charge explosive constituant le sautage (AEL, 2014).

Pour les explosifs qui ne sont pas suffisamment sensibles pour être initié par un détonateur l'emploi d'une amorce est nécessaire. Une amorce est constituée d'un explosif sensible au détonateur permettant de développer la quantité d'énergie nécessaire à l'initiation des explosifs non sensible aux détonateurs (Dick, Fletcher et D'Andrea, 1983). La Figure 1.2 illustre l'insertion d'un détonateur dans une amorce à base d'un dérivé du TNT.



Figure 1.2 Insertion d'un détonateur dans une amorce

Le confinement du forage dans lequel est inséré un explosif permet de conserver la pression nécessaire à la détonation des explosifs tout au long d'une même charge explosive. À ce titre, pour développer sa pleine vélocité, un explosif aura besoin d'un diamètre minimal appelé diamètre critique (AEL, 2014). Le diamètre critique d'un explosif est lié à sa sensibilité. Ainsi, un explosif plus sensible permet généralement un diamètre critique plus faible.

L'énergie d'un explosif (cal/g) définit la quantité d'énergie libérée pour un poids donné lors de sa réaction complète. Ce chiffre est néanmoins trompeur puisque la puissance explosive est généralement considérée pour un même volume d'explosif plutôt qu'un même poids. Cette situation s'explique par les contraintes associées à l'utilisation des explosifs, notamment celui

du coût des forages pour confiner les explosifs. Ainsi, la densité et l'énergie d'un explosif sont complémentaires lors de l'évaluation de sa puissance explosive (Dyno Nobel, 2010).

Pour ce qui est de la résistance à l'eau, bien que les sautages sous-marins soient relativement rares, les sautages en conditions humides sont fréquents. Que ce soit en raison de l'infiltration de l'eau de pluie dans les forages ou simplement de l'interception de veines d'eau souterraine, la résistance à l'eau d'un explosif est un facteur à prendre en considération (Groleau, 2012). Certains explosifs tels que l'ANFO sont solubles dans l'eau et perde donc leur efficacité en condition humide. D'autres tels que des combinaisons d'émulsion et d'ANFO, ne sont pas directement affectés par le contact avec de l'eau et peuvent conserver la majorité de leurs capacités pendant plusieurs heures ou mêmes plusieurs jours. Finalement, certains explosifs tels que les explosifs encartouchés ne sont théoriquement pas affectés par le contact avec l'eau (Dyno Nobel, 2014).

1.2 Processus de sautage

Les processus de sautage regroupent l'ensemble des activités de chargement, de raccordement et de mise à feu d'explosifs. Dans cette section, il est tout d'abord question de la nomenclature employée dans le domaine du forage et sautage afin de servir de référence pour le reste de ce document. Une fois les termes établis, les principes de conception d'un plan de forage et sautage sont décrits permettant de comprendre les étapes d'élaboration d'un sautage. Puis, les impacts induits par un sautage sont élaborés pour constater leurs relations. Finalement, les paramètres à considérer pour un site de sautage sont abordés.

1.2.1 Nomenclature

La nomenclature associée aux activités de forage et de sautage est spécifique au domaine. Cette section présente d'une part les termes associés aux patrons de forage et, d'autre part, aux activités de chargement des explosifs et de traitements des résultats de sautage. Les termes et

les définitions présentés sont en accord avec le « Blasting and Explosives Quick Reference Guide 2010 » de Nobel (2010) et le « Surface Blasting Handbook » publié par AEL (2014). La Figure 1.3 illustre la configuration des termes de référence d'un patron de forage.

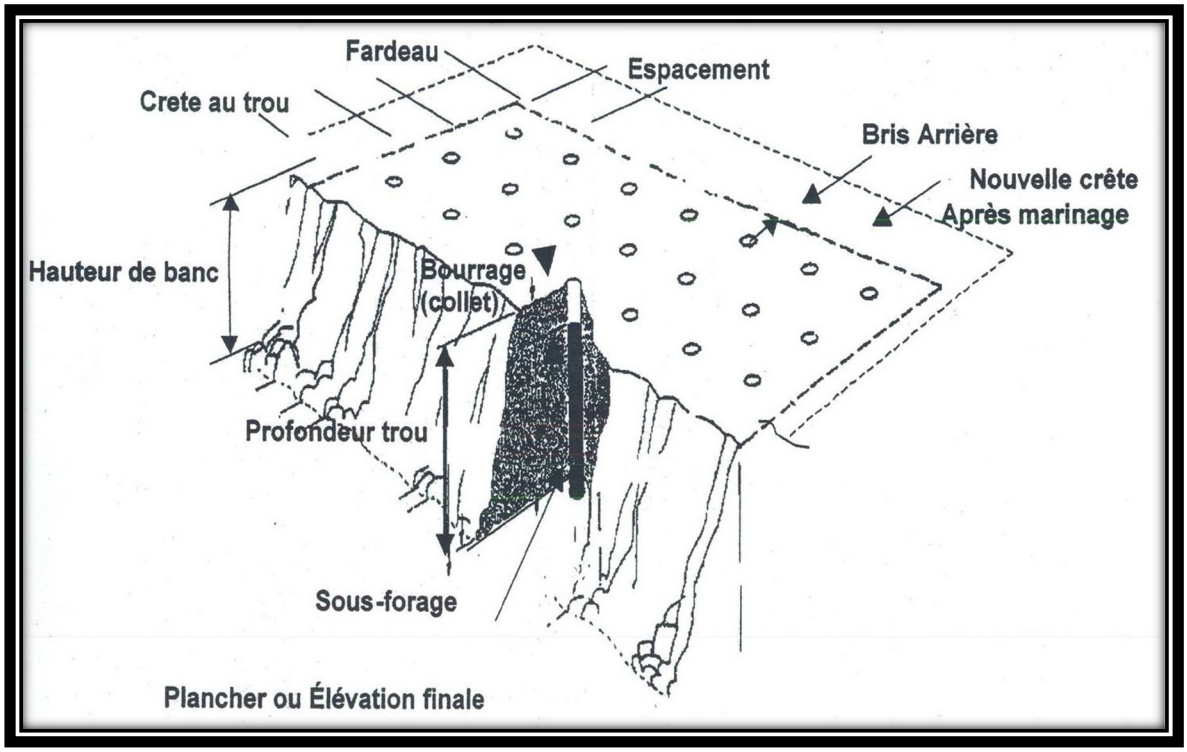


Figure 1.3 Illustration d'un patron de forage tirée de Alaattin, Huseyin et Halim (2016)

Basé sur les éléments présentés à la Figure 1.3, la définition des différents termes en lien avec un patron de forage est présentée au Tableau 1.2.

Tableau 1.2 Nomenclature d'un patron de forage

Banc (ou banquette)	Excavation ayant au moins une face libre et effectuée à partir de trous de forage dans le matériel à abattre.
Bris arrière	Section de roc brisé à l'extérieur de la zone de forage.
Crête	Jonction entre le plancher de forage et la face libre.
Face libre	Façade de dégagement du sautage.
Front de dégagement	Direction de déplacement de la masse fragmenté lors d'un sautage.
Hauteur de banc	Distance entre le plancher de marinage et de forage.
Log de forage	Rapport du foreur sur la géologie et les difficultés rencontrées lors du forage d'un trou.
Maille de forage	Distance entre les rangées (fardeau) et entre les trous au sein d'une même rangée (espacement).
Patron de forage	Regroupe tous les éléments de forage pour un ou plusieurs sautages.
Plancher de forage	Représente le niveau où les foreuses sont installées pour effectuer les opérations de forage. Corresponds au niveau auquel auront lieu les activités de chargement des explosifs.
Plancher de marinage	Représente le niveau obtenu suites aux opérations de marinage, soit les opérations de ramassage du roc abattu.
Profondeur de forage	Longueur totale d'un forage.
Radier final	Représente le niveau du roc désiré suite aux opérations de sautages et de marinages.
Sous-forage	Longueur de forage sous le niveau du radier final.
Tonnage	Quantité de roc fragmenté correspondant au volume du sautage multipliée par la densité du roc.
Trou de forage	Forage destiné au chargement d'explosifs.

Les activités associées au plan de forage permettent la suite des opérations de chargements d'explosifs. Le Tableau 1.3 présente les différents termes techniques employés pour décrire les activités de chargement d'explosifs ainsi que le traitement des résultats une fois le sautage effectué.

Tableau 1.3 Nomenclature des activités de chargements d'explosifs et de traitement des résultats de sautage

Bourre	Matériel inerte généralement constitué de pierre concassée nette servant à arrêter l'énergie explosive.
Charge explosive	Quantités d'explosifs initier simultanément
Charge explosive maximale par délai	Quantité d'explosifs maximale initiée sur un même délai de mise à feu lors d'un sautage.
Collet	Section supérieure d'un forage non-chargé aux explosifs servant à retenir l'énergie explosive au sein du massif rocheux.
Décibel (dB)	Unité utilisée pour mesurer sur une échelle logarithmique l'intensité du son.
Décibel pondéré A (dBA)	Décibel pondéré afin de s'approcher de ce que l'oreille humaine entend.
Délai	Temps entre la détonation de plusieurs charges explosives lors d'une même séquence de mise à feu.
Distance scalaire	Distance entre le sautage et le point d'enregistrement de sa vibration divisé par la racine carrée de la charge d'explosifs par délai.
Sautage (dynamitage ou tir)	Ensemble des activités de chargement, de raccordement et de mise à feu d'explosifs
Explosifs civils	Explosifs conçus et fabriqués par un manufacturier reconnu et utilisés à des fins commerciales ou industrielles.
Fréquence	La fréquence en Hertz (Hz) d'un phénomène périodique correspond au nombre de répétitions de ce dernier sur une durée d'une seconde.
Fumées de tir	Gaz nocifs produits lors d'un sautage, tels que le monoxyde de Carbone (CO), le sulfure d'hydrogène (H_2S) et les oxydes d'azote (NOx).
Séquence de mise à feu	Séquence de détonation des charges explosives pour un sautage donné.
Sismographe	Instrument pouvant enregistrer les vibrations du sol ainsi que les surpressions d'air
Surpression d'air	Valeur absolue des variations de la pression atmosphérique ambiante, provoquées par des ondes de choc, l'expansion des gaz et le déplacement de la masse rocheuse lors d'un sautage.
Vibration du sol	Déplacement des particules du sol causé par les ondes élastiques résultantes d'un sautage.
Vitesse des particules	Déplacement des particules du sol par unité de temps.
Vitesse sismique	Vitesse de propagation de l'onde sismique dans un matériau déterminé.

Les prochaines sections de ce chapitre se rapportent donc aux termes techniques élaborés dans cette section.

1.2.2 Principe de conception d'un plan de forage et sautage

Le plan de forage et sautage indique comment sont distribué les charges explosives au sein d'une masse à fragmenter lors d'un ou de plusieurs tirs, ce faisant, il permet d'extrapoler les résultats d'un sautage. Pour ce faire, il doit minimalement indiquer les informations suivantes: le diamètre des trous de forage (mm), la hauteur de banc (m), la maille de forage (m), la hauteur de sous forage (m), la hauteur de collet (m), les types d'explosifs et la densité des explosifs (kg/m^3) (Phelan, 2019).

Le diamètre des trous de forage, la hauteur de banc, le sous-forage et la hauteur de collet indiquent le volume disponible pour les explosifs au sein d'une même colonne explosive. Avec le type d'explosif et sa densité, il est donc possible de déterminer l'énergie dégagée pour chaque charge explosive. Finalement, la maille de forage permet de définir le volume de roc que devra fragmenter chacune des charges explosives.

Pour évaluer la validité de ces paramètres, les travaux de forage et sautages considèrent généralement le facteur poudre d'un tir soit le ratio de kilogramme d'explosifs par mètre cube de roc à fragmenter. Ce facteur permet d'estimer la quantité d'énergie dégagée lors du sautage et donc d'évaluer approximativement un manque ou un surplus d'énergie en fonction du type de sautage effectué et de la géologie du site. À titre d'exemple, le guide de Dyno Nobel (2010) propose un facteur poudre variant de 0,15 kg/m^3 pour une masse de roc « Very Soft » à 0,8 kg/m^3 pour une masse de roc « Hard » lors de tir de banquette.

Bien que le facteur poudre soit un paramètre utile sur le terrain, il ne représente pas une évaluation exacte de l'énergie disponible du sautage. En effet, tel que mentionné précédemment (Tableau 1.1), les différents explosifs ne développent pas forcément une

quantité d'énergie équivalente pour une même masse. Dès lors, l'effet du facteur poudre d'un tir chargé avec un explosif dense sera surévalué par rapport au même facteur poudre pour un explosif plus léger ayant une énergie similaire.

Par ailleurs, le facteur poudre considère une distribution homogène de la charge explosive au sein du massif rocheux à excaver. Or, une mauvaise distribution de celle-ci peut grandement affecter les résultats d'un sautage tels que les vibrations, les projections de roc et les surpressions d'air issues d'un sautage. Il est donc requis de considérer toutes les variables présentées dans le plan de forage et sautage plutôt que de ne se fier qu'au facteur poudre (Corkery et Cavers, 2013).

Dans la pratique, il arrive que plusieurs forages soient finalement trop proches les uns des autres en raison de la trop forte énergie explosive dégagée ou encore d'une géologie fissurée ou autrement altérée. Dans ce cas de figure, certains explosifs sont à risque d'une détonation sympathique correspondant à une initiation non contrôlée de la colonne explosive adjacente. Pour d'autres explosifs, ils sont plutôt à risque d'une désensibilisation « dead press ». Cette situation survient lorsque la pression de la détonation adjacente n'est pas suffisamment importante pour initier la colonne explosive, mais suffisante pour neutraliser l'explosif. Afin de pallier à cette situation, certains explosifs sont conçus pour répondre au phénomène de « dead press ». Ils sont généralement sélectionnés lors de sautages sous-marins prompts à ce type de phénomène (Hermans, 2005).

Un même plan de forage et sautage peut être associé à plusieurs tirs. Il est donc important de l'associé à un plan de tir précisant les particularités du sautage effectué. Celui-ci peut, par exemple, contenir les informations suivantes : positionnement du tir, nombre de trous de forage, charge maximale par délai ainsi que la séquence de mise à feu.

Le positionnement du tir permet de délimiter la zone de travail ainsi que de déterminer les distances entre le sautage et les différents éléments à protéger. L'identification du nombre de

trous de forage et de leur disposition permet de planifier les variables opérationnelles telles que le temps de chargement, la taille de l'équipe de travail, la quantité d'explosif, le ou les chemins d'accès et la zone d'exclusion autour des opérations de chargement. La charge maximale par délai sert dans la prévision des résultats du tir.

La séquence de mise à feu d'un plan de tir permet de déterminer l'orientation du déplacement de la masse fragmentée lors du sautage, soit le front de dégagement et son étalement (AEL, 2014). Une séquence de mise à feu indique en millième de seconde l'ordre de détonation des charges explosives au sein du tir. La Figure 1.4 illustre l'effet de la séquence de mise à feu sur le front de dégagement d'un tir.

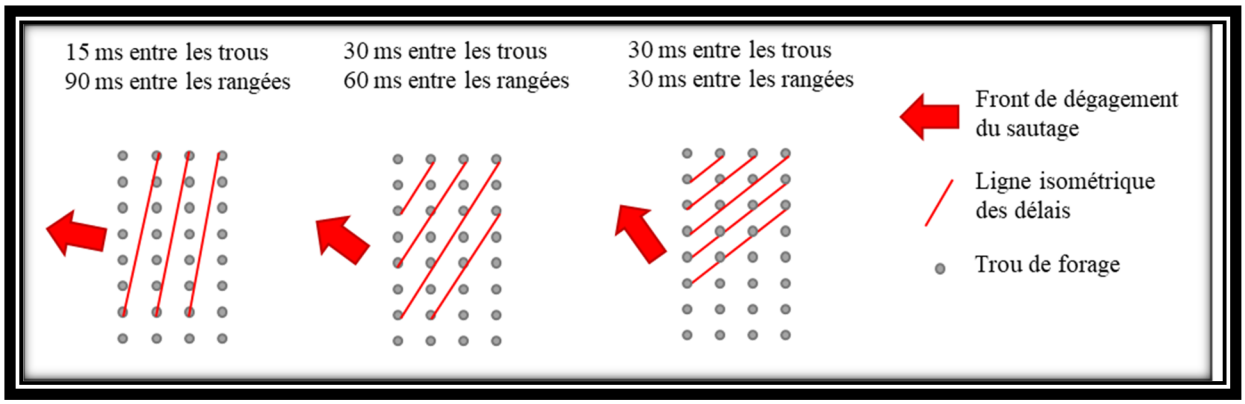


Figure 1.4 Impact de la séquence de mise à feu sur le front de dégagement d'un sautage

La Figure 1.4 considère l'initiation du trou en haut à gauche à 0 ms. Les rangées présentées sont verticales, donc chaque délai entre trous représente la différence de temps d'initiation entre un trou et celui au-dessous duquel il se trouve. La différence de temps entre les rangées représente le délai entre un trou et celui directement à sa gauche.

1.2.3 Impact des sautages et mesures d'atténuation

Bien que l'objectif premier d'un sautage soit généralement la fragmentation du roc ou d'un autre matériel encaissant, l'énergie développée lors d'un tir se dissipe sous plusieurs forment.

Parmi ses formes; la vibration dans le sol, la projection de roc ainsi que la surpression aérienne ou marine. Ces sous-produits sont généralement perçus comme étant des éléments nuisibles en raison de leurs impacts parfois difficile à prévoir.

Ces impacts pouvant aller du dérangement des citoyens avoisinants jusqu'à la mise en danger de ceux-ci ainsi que des infrastructures à proximité de la zone de sautage. L'étude de ces paramètres s'avère pertinente afin d'améliorer les prévisions et ainsi minimiser les écarts entre les prévisions et les résultats obtenus à la suite d'un sautage (Jonsén, 2012). En effet, une estimation fiable des effets d'un sautage permettra d'ajuster les paramètres lors de l'établissement du plan de forage et de dynamitage tout en minimisant les incertitudes et l'obligation d'adopter une approche trop conservatrice et souvent plus onéreuse.

Lors d'une mesure de vibration, des sismographes sont utilisés pour mesurer à la fois la vitesse des particules dans les trois dimensions (vertical, longitudinal et transversal), mais aussi leurs fréquences (longueur d'onde). La fréquence d'une vibration est dérivée des équations de fourrier puisqu'un sautage est généralement constitué d'une multitude d'évènements (Thomas, Bernard, 2012).

D'un point de vue opérationnel, sur plusieurs chantiers du Québec, seule la vitesse des particules est considérée. Cependant, l'équation 1.1 permet de constater que le déplacement des particules engendré par une même vitesse de vibration est grandement affecté par la fréquence de celle-ci. Dès lors, pour protéger une structure, il faut de considérer le déplacement des particules, soit la distance maximale qu'elle atteindra par rapport à son point d'origine (Dowding, 1980).

$$\frac{V}{2\pi f} = D \tag{1.1}$$

Avec :
V : vitesse en mm/s
F : fréquence en Hz
D : déplacement en mm

En pratique, le déplacement des particules d'un sautage n'est que rarement considéré. Les chantiers s'intéressent donc principalement à la formule empirique de prédiction des vibrations d'un sautage. Celle-ci provient d'une régression linéaire telle qu'illustrée à la Figure 1.5. Elle est obtenue en rapportant la vitesse des particules (vibrations) obtenues par plusieurs sautages en fonction de la distance scalaire. La Figure 1.5 représente donc les résultats de vibrations de sautages enregistrés pour un seul site.

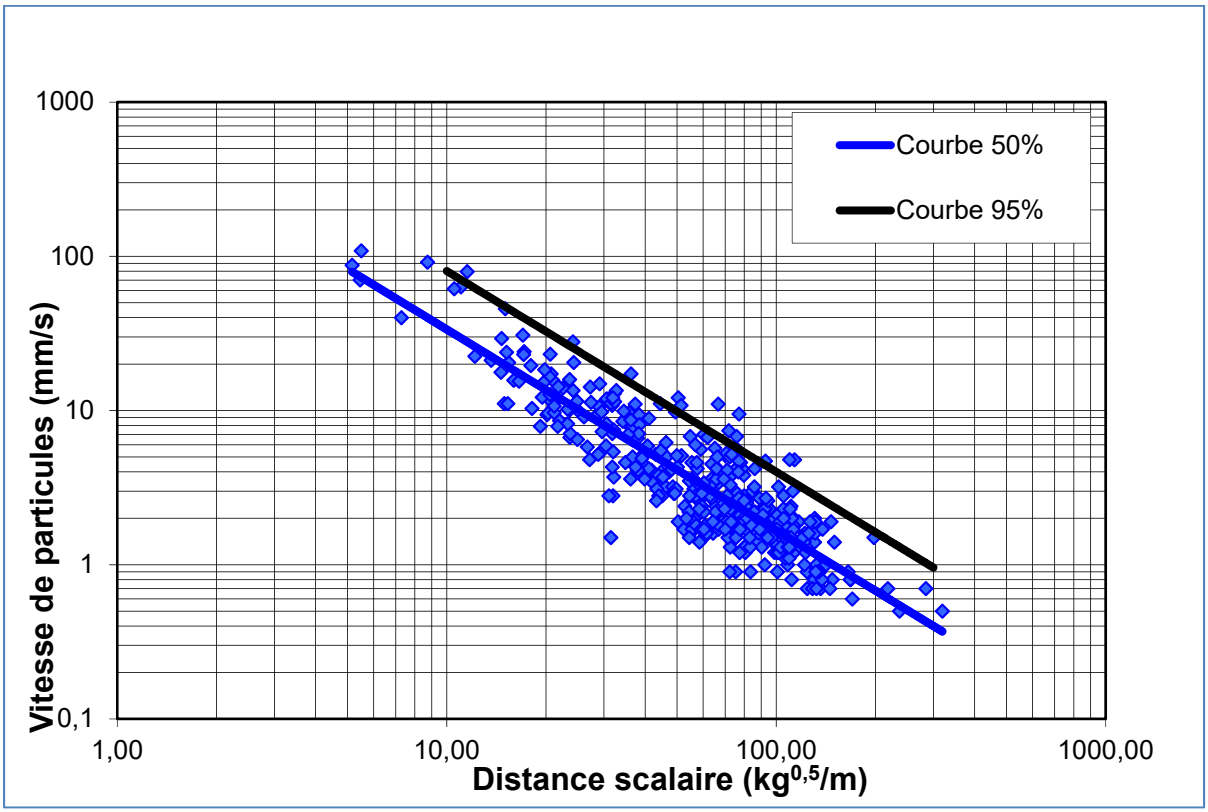


Figure 1.5 Exemple de courbe d'atténuation, tirée de Trépanier (2018)

En étudiant le type de courbes de la Figure 1.5, la formule empirique décrite à l'équation 1.2 est établie par une courbe de tendance afin de mettre en relation divers facteurs d'un sautage avec les vibrations engendrées par celui-ci. Elle est mondialement reconnue et adoptée au Québec par le ministère de l'Environnement et de la lutte contre les changements climatiques (MELCC) ainsi que le ministère de l'Environnement, de la protection de la nature et des parcs de l'Ontario (MOECP, 1985).

$$PPV = K(\frac{W^{0,5}}{D})^n \quad (1.2)$$

Avec :
PPV: Peak Particle Velocity (ou vitesse maximale des particules) en mm/s
K : constante sismique
W : charge par délai en kg par délai
D : distance en m
n : constante d'atténuation

La valeur K obtenue est dépendante de plusieurs facteurs dont ; la géologie, le type de sautage, la qualité du patron de forage, la qualité du chargement, la séquence de mise à feu, etc. Elle est donc dépendante à la fois de facteurs humains et géologiques. De manière générale, les éléments facilitant le déplacement du roc fragmenté auront tendance à diminuer la valeur K et vice-versa. Dans la littérature, il est reconnu de considérer une valeur K de 1725 pour les calculs théoriques avant d'obtenir une constante basée sur les résultats du site (Oriard, 2002). La valeur N représente l'atténuation sismique et est donc strictement relié à la géologie du terrain. Un même site peut tout de même posséder plusieurs valeurs N pour des secteurs et des directions différentes en raison de l'hétérogénéité géologique du terrain. Pour cette constante, la littérature suggère une valeur de 1,6 pour les calculs théoriques avant d'obtenir une constante basée sur les résultats du site (Oriard, 2002).

La courbe de régression établie entre la valeur de vibration du sautage en fonction de la vitesse des particules (Figure 1.5) est ainsi corrélée avec des conditions locales spécifiques et d'un type de sautage précis. Dès lors, il devient pertinent d'établir différentes régressions linéaires

pour les différents sites et types de sautages étudiés afin d'améliorer le coefficient de corrélation (Siskind et al., 1980).

La courbe supérieure de 95% permet de fixer les conditions limites pour prédire les vibrations obtenues suites à un sautage lorsqu'un dépassement des vibrations permises n'est pas tolérable (Trépanier, 2018). Dans le cas où les vibrations prédites surpasseraient celles permises, plusieurs options sont applicables pour limiter les vitesses de particules obtenues suites au sautage.

La plus commune des options consiste à limiter le diamètre de forage et conséquemment redéfinir le patron de forage. Cette technique limite la charge explosive détonée par délai (W) en limitant le volume au sein de chaque forage. Dès lors, pour conserver une distribution énergétique équivalente au sein du sautage, le patron de forage doit être resserré ce qui implique une augmentation du nombre de forages nécessaire pour un même volume de roc excavé et donc les coûts d'excavations de la zone exploitée reliée au temps de forage et de chargement.

Afin de limiter la charge par délai (W) ainsi que la valeur K, la séquence de mise à feu doit être adéquatement ajustée. Une séquence de mise à feu bien conçu devrait permettre un déplacement adéquat de la masse tirée, mais aussi chacune des charges explosives du sautage dans une direction optimisant leur distribution énergétique au sein de la masse rocheuse à fragmenter en considérant que chaque charge doit fragmenter un volume de roc proportionnel (Dick, Fletcher et D'Andrea, 1983).

Dans la planification d'un sautage, les vibrations des charges devraient être décalées dans le temps afin de minimiser l'amplitude du phénomène de vibration et limitant leur propagation aux structures environnantes. Le principe est de créer une rafale de vibrations à basse amplitude plutôt qu'une seule vibration à plus grande amplitude (Siskind et al., 1980). Par analogie, le comportement est similaire au lancement d'une grosse roche dans l'eau comparativement à

plusieurs petites roches d'une masse totale équivalente; la grosse roche engendre une plus grande vague et a donc un potentiel d'impact plus élevé.

Les détonateurs non-électrique (avec tube de choc) servant à mettre en place la séquence de mise à feu sont conçus avec un délai fixe et peu précis qui nécessite régulièrement le recours à une séquence de mise à feu avec répétition de délais. Dans certains cas, il faut donc utiliser des détonateurs électroniques permettant un haut niveau de flexibilité, mais à un coût deux à cinq fois plus élevé que les détonateurs classiques. Ceux-ci peuvent être programmés avec n'importe quel délai (Davey Bickford, 2006).

La réduction de la charge par délai présente l'avantage de réduire les vibrations engendrées par le sautage tel que décrit dans l'équation 1.2. Dans la planification du plan de forage et de dynamitage, la réduction de la charge par délai peut être atteinte par une technique connue sous le nom de chargement étagé et couramment utilisée dans les chantiers de construction ou les carrières en milieu urbain. Elle consiste à diviser la colonne explosive au sein d'un même trou de forage en plusieurs segments avec de la pierre concassée (bourre) et en initiant chaque segment individuellement. Cette technique complique la séquence de mise à feu en ajoutant plusieurs délais par trou. De plus, puisqu'elle réduit la charge explosive totale par forage, il est parfois nécessaire de resserrer la maille de forage ce qui augmente les coûts d'exploitations.

Afin de délimiter une zone de matériel à extraire, des barrières artificielles peuvent être créées soit avec une série de forages rapprochés, soit en utilisant des explosifs pour fissurer le roc dans un axe défini (Uysal et Cavus, 2013). En agissant sur les phénomènes de propagation des ondes sismiques au même titre qu'une anomalie géologique, cette technique permet d'affecter les valeurs de K et de N. Les barrières artificielles sont généralement utilisées en dernier recours en raison de leur coût élevé en comparaison des autres techniques de régulation (Uysal et Cavus, 2013).

Le contrôle des projections de roc lors d'un sautage constitue un enjeu sur le plan environnemental, mais également au niveau de la sécurité, et ce particulièrement lorsque les sautages sont effectués en milieu urbain (Blanchier, 2013). Au moment de l'élaboration des paramètres de forage et dynamitage, une analyse des distances de projections maximale peut être entreprise dans chaque direction par rapport au sautage et tenir compte également des différences d'élévations. Cette analyse différencie les structures à protéger des zones potentiellement habitées ou abritant du personnel. Il est généralement accepté d'allouer le double de la distance de projection prévue pour délimiter la distance minimale pour les équipements et le quadruple pour le personnel. Les calculs d'estimation des projections de roc et les distances d'exclusions sont basés sur les formules balistiques semi-empiriques issues de Richard and Moore (2002).

Le calcul des distances de projection commence par la détermination de la vitesse théorique initiale des projections de roc soit l'équation 1.3.

$$V_0 = p\left(\frac{m^{0,5}}{SH}\right)^{1,3} \sin 2\theta_{LA} \tag{1.3}$$

Avec :
V_0 : vitesse initiale en m/s
p : constante de projection
m : charge explosive linéaire en kg
SH : fardeau ou épaisseur de bourre en m
θ_{LA} : angle de projection (Launch Angle) en °

D'un point de vue opérationnel, une valeur approximative est attribuée au roc en prenant compte de ces différentes caractéristiques (p). Cette valeur se situe généralement entre p = 13 pour un sol peu compétent (exemple : schiste) et p = 27 pour un très solide (exemple : granite). À la suite des premiers tirs, cette valeur est ajustée pour refléter le comportement réel. Les facteurs de chargement sont considérés, soit la charge par mètre (m) et la distance la plus faible entre le fardeau et le collet du trou (SH) ainsi que l'angle de projection (θ_{LA}).

Une fois la vitesse de projection initiale connue, les distances maximales de projection horizontale (équation 1.4) et verticale (équation 1.5) sont calculées selon différents angles de projection pour déterminer les limites sécuritaires en fonction de la profondeur de l'excavation.

$$R_2 = V_0 \cos\theta_{LA}\left(\frac{V_0 \sin\theta_{LA} + \sqrt{(V_0 \sin\theta_{LA})^2 - 2gH}}{g}\right) \quad (1.4)$$

$$h_2 = \frac{{V_0}^2 \sin^2\theta_{LA}}{2g} + H \quad (1.5)$$

Avec :
R_2 : distance horizontale maximale en m
V_0 : vitesse initiale en mm/s
θ_{LA} : angle de projection (Launch Angle) en °
H : hauteur de banc en m
h_2 : distance verticale maximale en m

Sur un terrain plat, la projection horizontale sera maximale à 45°, mais si la zone de dynamitage est plus basse que le milieu à protéger, des projections de 50°, 55° et 60° peuvent envoyer des projectiles de roc plus loin. Plusieurs autres éléments peuvent influencer la distance de projection. C'est d'ailleurs ce qui explique que deux tirs théoriquement identiques puissent résulter en des distances de projection différente (Dick, Fletcher et D'Andrea, 1983).

Les équations 1.3, 1.4 et 1.5 prennent en considération un roc homogène ce qui ne correspond généralement pas avec le terrain où un changement de lithologie, une fissure et/ou de l'altération du roc peuvent causer une modification des propriétés du roc. À ce niveau, les prédictions de projection de roc devraient être revues à la suite de la réception des logs de forages. Pour des fins de calculs, certains experts du domaine (Groleau, 2018) suggèrent de considérer chaque mètre de roc de mauvaise qualité comme un demi-mètre de roc compétent. Ainsi, un collet de deux mètres dont le premier mètre est altéré devrait être ajusté à 2,5 m.

Par ailleurs, la face libre des sautages doit être inspectée avant le début des opérations de chargement. Cette inspection permet de s'assurer qu'il n'y ait pas d'anomalie géologique, mais aussi de confirmer l'épaisseur de fardeau réel tout au long de la face libre. En cas de fardeau plus mince que prévu, un deuxième type d'explosif moins énergétique doit être considéré afin d'éviter une augmentation de la distance de projection de roc.

Le type de bourre utilisé joue également un rôle quant à sa capacité à retenir l'énergie explosive. Le matériel idéal comme bourre est composé de pierre concassée nette d'une taille approximative de 10 à 20 % du diamètre de forage (Dyno Nobel, 2010).

Finalement, il est possible de confiner un sautage pour restreindre son déplacement et ainsi son potentiel de projections de roc à l'aide de remblais ou de matelas pare-éclats (Figure 1.6) lourds composés de caoutchouc. Lorsque bien confinée, cette énergie explosive est redistribuée tout en augmentant la fragmentation du roc et la création de vibrations. Par contre, si le confinement n'est pas homogène, le surplus d'énergie est à risque de créer des projections plus importantes qu'initialement prévues.



Figure 1.6 Matelas pare-éclats

1.2.4 Paramètres du site de sautage

Connaitre et comprendre les particularités d'un site est primordial à l'optimisation d'un plan de forage et sautage. Pour ce faire, les sautages doivent être adaptés à la géologie du site ainsi qu'à son entourage. Alors que la géologie influence des aspects techniques d'un sautage dans le but d'obtenir les résultats recherchés, l'entourage du site indique les limites à considérer dans l'élaboration des plans et dans la mise en œuvre des travaux.

Les caractéristiques numériques de la géologie à considérer sont la densité du roc, son module de Young et sa résistance en tension et compression. Ensemble, ils permettent d'estimer comment une masse de roc homogène réagit aux contraintes exercées sur lui lors d'un sautage. Les paramètres du plan de forage et sautage y sont donc reliés lors des simulations de résultats de sautage dans plusieurs simulateurs (Bernard, 2009).

Bien qu'indispensable pour déterminer les paramètres de forage et sautage idéal pour un site, les caractéristiques numériques de la géologie d'un site sont rarement exactes lors de l'élaboration d'un tir spécifique. En effet, la géologie d'un site étant une image de son passé, elle est remplie de cicatrices et de particularités la rendant unique. Un granite ne définit donc pas l'ensemble des caractéristiques d'un site, mais seulement sa composition chimique et ces paramètres pour un bloc homogène.

La présence d'anomalie géologique peut modifier le type de sautage effectué dans certains secteurs touchés. Par exemple, la présence d'une faille ou joint majeur devrait être considérée afin d'éviter de finir un tir à mi-chemin à travers celle-ci ou d'en adapter les paramètres si cette situation est inévitable. Lorsqu'elles ne sont pas prises en comptes, les anomalies géologiques peuvent affecter la qualité des parois obtenues lors de sautage ce qui menace la stabilité du site, mais surtout la sécurité des gens qui y travaillent (Cebrian, 2013).

La présence d'altération est aussi à considérer lors du chargement d'un tir puisqu'elle diminue la compétence du roc dans la région affectée. Tel que décrit dans la section de la projection de roc, une altération non considérée au niveau du collet ou de la face libre peut résulter en une projection importante et potentiellement dangereuse.

La géologie du site influencera aussi la propagation des ondes sismiques engendrées par un sautage. Typiquement, un roc plus dense et plus rigide occasionnera une vitesse sismique plus élevée, la présence d'eau, d'anomalies géologiques et de changements de lithologies auront aussi un impact notable sur la propagation des ondes sismiques. Les ondes sismiques sont réfléchies ou réfractées lors de changements d'élasticité et/ou de densité de leur milieu de propagation (Ozer and al, 2012). De plus, selon les recherches du « Incorporated Research Institutions for Seismology » (IRIS, 2018) les vibrations transmises par le roc auraient tendance à avoir de plus haute fréquence et basse amplitude que ceux transmis par un mort terrain saturé en eau. Or les hautes fréquences s'atténuant plus rapidement avec la distance. La composition du terrain entourant un site agit donc sur la constante d'atténuation des vibrations de ce site.

De plus, les angles de clivage naturel de la géologie doivent être considérés afin d'établir l'alignement des tirs et ainsi de maximiser la qualité des résultats d'un sautage. Ce point peut faire la différence entre un mur final droit et sécuritaire ou un mur instable, et ce pour deux tirs ayant les mêmes paramètres de forage et sautage (Cebrian, 2013).

Au niveau de l'entourage d'un site, la proximité entre les travaux de dynamitage et les citoyens s'accentue au fil du temps en raison de la volonté des politiques de densifier les milieux urbains et d'accroitre les capacités des infrastructures à supporter les activités humaines : tunnels de métro ou routier et fondations. Cette proximité est propice à générer des tensions entre le confort des citoyens et le désir de productivité des gestionnaires de projet. C'est à ce niveau que l'entourage d'un site de forage et de sautage prend son importance (Lusk, 2006).

Le seul respect de l'intégrité physique tant des infrastructures en place que des personnes n'est pas un critère suffisant à l'acceptation d'un plan de forage et de sautage. L'acceptabilité sociale des opérations nécessite l'identification et l'évaluation des mesures de mitigations des vibrations, et de projection de rocs en fonction de la présence de citoyens en périphérie des travaux. Bien que cette étape ne soit pas toujours considérée, la hausse des plaintes liées aux travaux de forage et de sautage amène les instances gouvernementales à légiférer (Lusk, 2006).

Les normes établies dans le domaine du forage et sautage varient selon les pays, mais aussi selon les domaines d'applications. Elles sont généralement basées sur des études d'essai destructif de structures ou sur des standards de perceptions humaines. Puisqu'aucun consensus international ou même canadien n'existe à ce niveau, les normes à respecter en vue de la protection d'une même habitation ne sont pas les mêmes pour une mine, une carrière ou un chantier de construction (Loeb et Tannant, 2012).

Les normes du United States Bureau of Mines (Siskind et al., 1980) présentées à la Figure 1.7 sont le résultat de nombreuses études destructrices effectuées sur des structures afin d'évaluer les risques de dommage à des bâtiments.

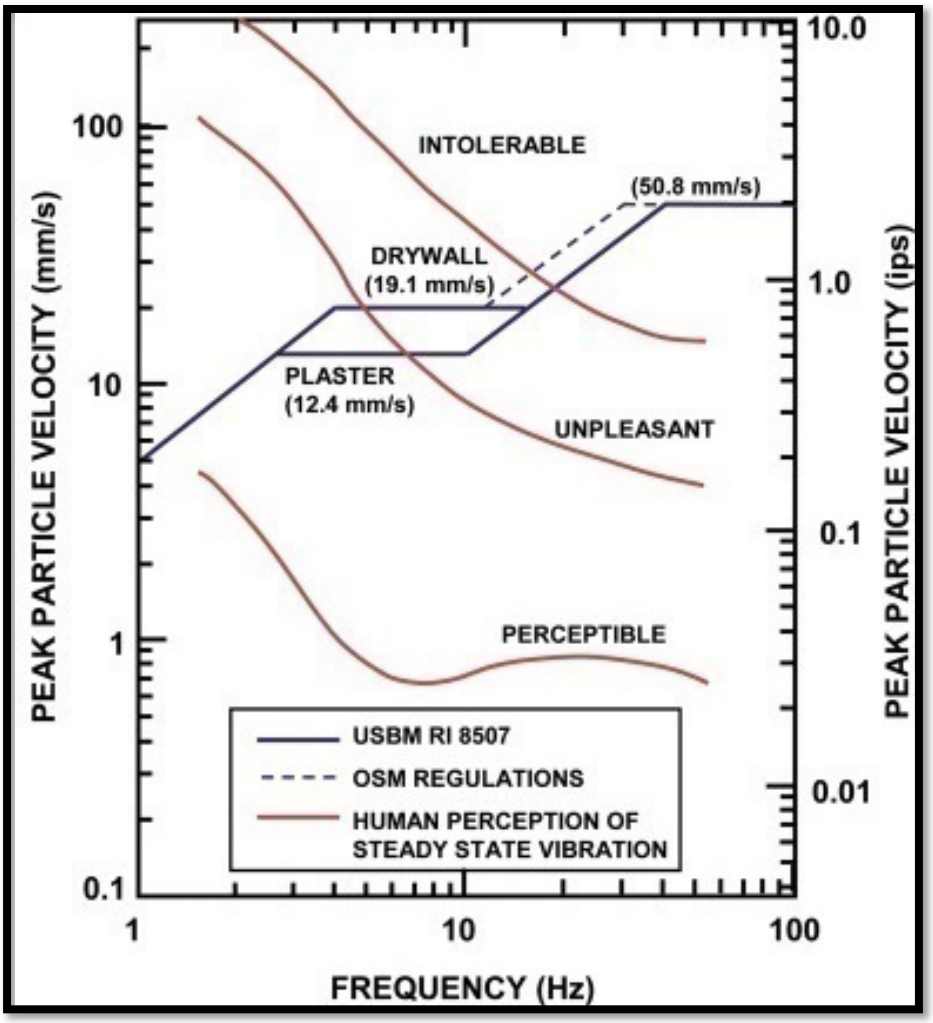


Figure 1.7 Norme sismique USBM

Cette norme de 1980 considérait donc déjà l'impact de la fréquence sur la capacité destructrice des vibrations, sachant qu'une vibration à basse fréquence induit un plus grand déplacement qu'une même vibration à haute fréquence. Les courbes de perceptions humaines sont un autre aspect présenté à la Figure 1.7. Elles indiquent la sensibilité des humains aux vibrations de hautes fréquences (Siskind et al., 1980). Par ailleurs, le USBM recommande une limite sécuritaire de surpressions d'air de 128 dB afin de minimiser les effets sur les infrastructures. La limite à ne pas dépasser pour les bris de fenêtres, élément le plus sensible, est de l'ordre de 150 dB.

Inspirées des normes de l'USBM, les normes environnementales appliquées au Québec pour les travaux de sautage de toute opération minière sont définies dans la Directive 019 sur l'industrie minière (MELCC, 2012). Le Tableau 1.4 représente les limites de vibration à respecter à tout point d'impact se trouvant à moins d'un kilomètre des opérations de sautages.

Tableau 1.4 Norme sismique Directive 019

Fréquence des vibrations au sol (Hz)	Vitesse maximale permise (mm/s)
Fréquence ≤ 15	12,7
15 < fréquence ≤ 20	19,0
20 < fréquence ≤ 25	23,0
Fréquence > 25	25,0

Les normes établies dans l'industrie minière du Québec sont donc un peu plus sévères qu'aux États-Unis pour les fréquences au-dessus de 25 Hertz ce qui permet une meilleure coexistence avec les citoyens. Cependant, elles dépassent toujours les limites de la courbe intolérable de la perception humaine (Figure 1.7). Pour ce qui est des surpressions d'air, la limite est toujours à 128 décibels.

La Ville de Montréal limite quant à elle les activités de forage et sautage du domaine de la construction à ses propres standards. Le Tableau 1.5 indique les vitesses de particules maximales pour des fréquences données selon la Direction de l'eau potable de la Ville de Montréal, il s'adresse aux immeubles d'habitation et bâtiment semblables de par leur utilisation ou leur construction ainsi qu'aux égouts, aqueducs et services d'utilité publique.

Tableau 1.5 Norme sismique de la ville de Montréal

Fréquence des vibrations au sol (Hz)	Vitesse maximale permise (mm/s)
Fréquence ≤ 10	5,0
10 < fréquence ≤ 50	15,0
Fréquence > 50	20,0

Ces limites sont établies en considération de la densité de population élevée de Montréal et respectent les courbes de perception humaine pour toutes fréquences de moins de 50 hertz. Il est à savoir qu'un tel tableau limitera donc les vibrations à 15 mm/s pour la plupart des excavations puisqu'il n'est généralement pas possible de prédire qu'aucune fréquence ne sera en dessous de 50 hertz à moins d'avoir déjà débuté les travaux.

Pour le secteur des carrières, l'ancienne réglementation québécoise applicable jusqu'en 2018, limitait les vibrations à 40 mm/s sans égard à la fréquence. Cette limitation était problématique au niveau de la perception humaine, mais aussi, dans certaines situations, pour les structures résidentielles avoisinantes. La nouvelle règlementation québécoise (Règlement sur les carrières et sablières du Québec, 2018) fixe la limite à 10 mm/s pour toutes les gammes de fréquences. Elle autorise toutefois un dépassement des vibrations jusqu'à 15 mm/s pour un maximum de 10% des sautages effectués par la carrière. Cette nouvelle limite permet de répondre aux préoccupations associées à la protection des structures et aux conforts des citoyens.

CHAPITRE 2

MÉTHODOLOGIE

Ce chapitre présente la méthodologie mise en œuvre dans le cadre du présent projet de recherche. La structure de ce chapitre est organisée en deux volets, soit un premier sur l'estimation des vibrations selon les conditions du site divisé en trois sections et un deuxième volet sur l'élaboration d'un outil de paramétrage pour sautages.

2.1 Adaptation du modèle d'estimation des vibrations aux conditions d'un site

Pour ce premier volet de la méthodologie, la section initiale porte sur les techniques de collecte d'information de sautage en carrière. La deuxième introduit les méthodes de traitement des données de sautage en vue d'en analyser les résultats et la dernière porte sur la démarche suivie afin d'ajouter un facteur « direction » dans l'estimation des vibrations émise par un tir.

2.1.1 Configuration du site et données associées

La méthode d'analyse choisie considère la compilation et l'analyse de données réelles d'une carrière en milieu urbain dans l'objectif d'évaluer la validité des équations décrites au chapitre 1 ainsi que l'impact de différents paramètres de sautage sur celle-ci. L'échantillon choisi est séparé en deux groupes soit un premier servant à l'analyse des résultats et un deuxième validant les constats du premier.

Chaque donnée considérée représente l'enregistrement d'une vibration par un sismographe. Un même événement de sautage produit donc un nombre de données équivalent au nombre de sismographes en fonction. Pour chaque donnée, les informations suivantes sont considérées pour permettre leur traitement : la distance entre le sismographe et le sautage, la charge explosive maximale par délai du sautage et sa vibration enregistrée par le sismographe. Les

sautages effectués sur ce site sont tous de même nature, soit considérant des patrons de forages et des types d'explosifs équivalents.

Dans le cadre de ce projet de recherche, deux autres facteurs ont été considérés soit la zone dans laquelle le sautage a été effectué et le positionnement du sismographe qui a enregistré l'événement. Les zones de sautages évaluées doivent permettre d'isoler les secteurs exploités différemment ou possédant des topologies distinctes. La position des sismographes sert à examiner l'impact de sa distance et de la géologie dans lequel se propage l'onde sismique.

Sur la base des données collectées, puisque ce mémoire vise avant tout à établir des liens généraux et non spécifiques à certains tirs, les données aberrantes doivent être retirées afin de ne pas influencer les moyennes avec une situation particulière étant survenue sur un tir. Par exemple, les enregistrements relevés comme problématique pour diverses raisons dans le rapport de sautage tel que les données résultantes d'une problématique lors du chargement, de la mise à feu ou encore d'une erreur d'installation du sismographe sont considérées comme aberrantes.

De plus, les sismographes peuvent être programmés pour ne pas enregistrer les vibrations en dessous d'un certain seuil afin d'éviter de saturer leur mémoire de trop d'évènements anodins. Lorsque le sismographe se déclenche en raison de la surpression d'air, mais que la vibration est en dessous du seuil de détection, il considère une vibration à ce seuil. Les enregistrements de vibration au seuil de détection des sismographes peuvent donc être considérés comme aberrants puisque leurs vibrations exactes ne sont pas connues. Ils ne sont cependant pas écartés d'emblée pour tester différents traitements de données.

Le Tableau 2.1 recense les données enregistrées pour cette étude en classifiant le nombre de données spécifiques par années, zone de sautage et position des sismographes tout en précisant le nombre de données totales, aberrantes, sous les seuils de détection et valides pour chaque

catégorie. Les données valides représentent le nombre de données totales en soustrayant les données aberrantes et sous les seuils de détection.

Tableau 2.1 Recensement des données enregistrées de 2016 à 2018

Année	nombre de sautages	sismographe 1			sismographe 2			sismographe 3			Total
		Zone A	Zone B	Zone C	Zone A	Zone B	Zone C	Zone A	Zone B	Zone C	
2016	Total	0	32	9	0	30	8	0	32	9	120
	Aberant	0	4	0	0	3	0	0	4	0	11
	limite de détection	0	4	0	0	0	0	0	4	0	8
	Valide	0	24	9	0	27	8	0	24	9	101
2017	Total	17	24	6	16	23	6	16	24	6	138
	Aberant	0	0	0	0	0	1	2	0	1	4
	limite de détection	7	0	0	6	1	0	0	1	0	15
	Valide	10	24	6	10	22	5	14	23	5	119
2018	Total	13	4	9	14	4	9	13	4	8	78
	Aberant	0	1	0	0	0	0	0	0	1	2
	limite de détection	9	0	1	8	0	1	0	0	0	19
	Valide	4	3	8	6	4	8	13	4	7	57
2016 à 2018	Total	17	56	23	19	56	22	29	56	23	336
	Aberant	0	5	0	0	3	1	2	4	2	17
	limite de détection	3	0	0	3	0	0	0	1	0	42
	Valide	14	51	23	16	53	21	27	51	21	277

2.1.2 Modèle d'estimation des vibrations

L'impact d'un facteur sur les vibrations d'un sautage a été déterminé en se basant sur l'équation de prédiction des vibrations d'un sautage, soit l'équation 1.2.

$$PPV = K\left(\frac{W^{0,5}}{D}\right)^{n} \tag{1.2}$$

Le Tableau 2.2 explicite les différentes variables énumérées dans l'équation 1.2.

Tableau 2.2 Variables de l'équation de prédiction des vibrations d'un sautage

Variable	Définition	Unité
PPV	Vibration du sautage établit comme le Peak Particle Velocity (ou vitesse maximale des particules)	mm/s
K	Constante sismique variable en fonction de divers facteurs	-
W	Charge explosive maximale détonnée par délai	kg
D	Distance entre le sautage et le sismographe	m
n	Constante d'atténuation variable en fonction de la géologie	-

Dans l'équation 1.2, les variables W et D sont déterminées en s'appuyant sur les plans de tir alors que la variable PPV est enregistrée par les sismographes en fonction lors du sautage. Une fois ces variables connues, elles sont utilisées pour monter un graphique exprimant les valeurs K et n de l'ensemble de données testé à l'aide d'une courbe de tendance.

En isolant les données des sautages correspondent à un facteur particulier, il est ainsi possible de développer plusieurs courbes de tendances et de comparer leur coefficient de corrélation (R^2) ainsi que les variations des constantes K et n pour les différents facteurs analysés. Le Tableau 2.3 indique les différents ensembles de facteurs analysés en référence aux données recensés dans le Tableau 2.1.

Tableau 2.3 Facteurs analysés

Facteur analysé	Données considérées	Définition
Sommaire sans données en dessous des seuils de détection	**277** valides pour 2016 à 2018	Évaluation globale du site en considérant toutes les données valides récoltées entre 2016 et 2018
Sommaire avec données en dessous des seuils de détection	**277** valides et **42** en dessous des seuils pour 2016 à 2018	Évaluation globale du site en considérant les données sous les seuils de détections comme ayant enregistré la moitié du seuil de détection.
Année des sautages	**101** valides pour 2016, **119** valides pour 2017, **57** valides pour 2018	Les données valides de chaque année sont évaluées séparément pour comparer les variations annuelles.
Zone des sautages	**57** valides pour zone A, **155** valides pour zone B, **65** valides pour zone C	Les données valides de chaque zone sont évaluées séparément pour comparer leurs impacts
Position des sismographes	**88** valides pour sismo 1, **90** valides pour sismo 2, **99** valides pour sismo 3	Les données valides de chaque position des sismographes sont évaluées séparément pour comparer leurs impacts

Une fois les données compilées selon chacun des facteurs évalués, leur analyse est effectuée sous forme de graphique ou de tableau. Dans le cadre de cette recherche, la méthode comparative est utilisée pour évaluer une courbe d'atténuation sommaire pour le site étudié. Cette courbe sommaire est ensuite comparée aux courbes issues de l'isolement des différents facteurs considérés ainsi qu'au valeurs fixes de 1725 pour K et de 1,6 pour n (Oriard, 2002).

Ces courbes pouvant évaluer les résultats de vibrations pour un ensemble de sautage permettent de comparer l'effet des différents facteurs sur la dispersion des résultats. Un paramètre de forage et sautage ayant un impact sur les résultats de vibrations doit permettre de modifier le

niveau de corrélation une fois isolée. Il a donc été possible de comparer les courbes d'atténuation du site et d'en distinguer les facteurs ayant un impact notoire.

2.1.3 Intégration du facteur de correction « direction » à l'estimation de la vibration

Considérant que la constante sismique K peut varier en fonction des secteurs et des techniques d'exploitations au sein d'un même site, un facteur « direction » a été intégré pour estimer les valeurs de vibration. Ce facteur considère la direction du front de dégagement du tir ainsi que la topologie du terrain afin de corriger la constante sismique K.

Pour ce faire, la totalité des sautages valides récoltés entre 2016 et 2018 ont été triés selon un nouveau facteur, soit le critère « direction ». Ce nouveau facteur considère la position du sismographe en fonction de la direction du front de dégagement de la masse fragmentée. À ce titre, l'identification du facteur de correction repose sur cinq directions possibles telles qu'illustrées à la Figure 2.1.

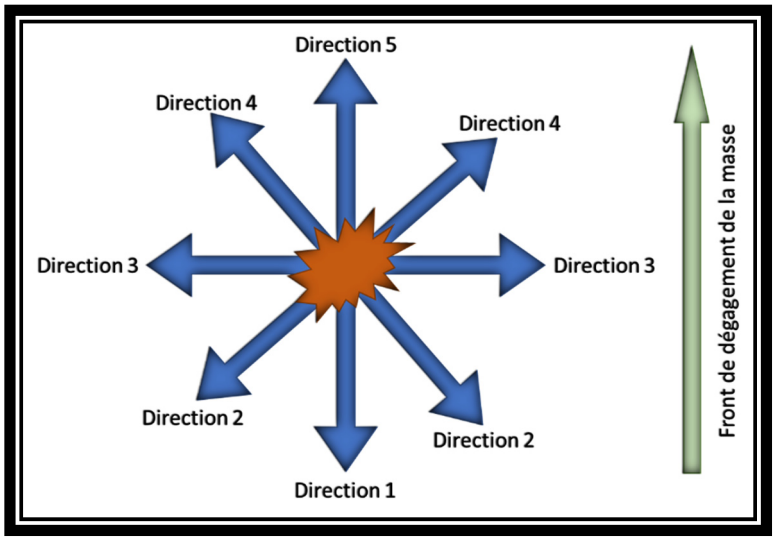


Figure 2.1 Les différents facteurs de direction

La direction 1 représente un sismographe situé directement à l'opposé de la direction de dégagement du sautage alors que la direction 5 positionnerait le sismographe directement en face du front de dégagement. Les directions 2, 3 et 4 sont les intermédiaires afin d'obtenir un facteur valide pour toutes les directions.

La topologie du terrain a aussi été considérée pour ce facteur afin de tenir compte du chemin réel traversé par les vibrations à travers le sol. La Figure 2.2 illustre les différentes situations rencontrées sur le terrain en expliquant le facteur direction qui serait associé à chacune des positions du sismographe.

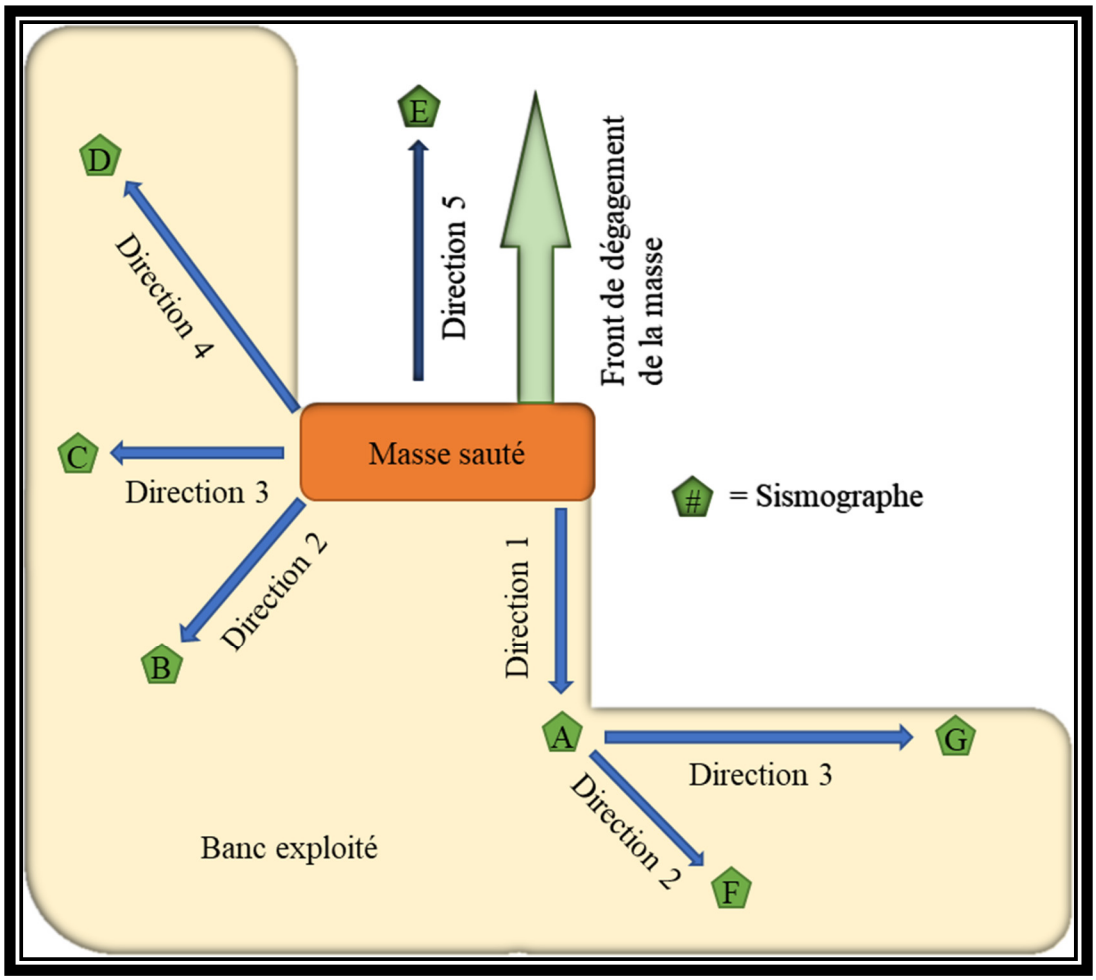


Figure 2.2 Illustration du facteur direction

La Figure 2.2, représente un sautage avec 7 différentes positions de sismographes afin d'illustrer le processus d'attribution du facteur direction. Les sismographes A, B, C, D et E sont en lien direct avec le front de dégagement et le facteur de direction FD.x associé est, respectivement FD.1, FD.2, FD.3 FD.4 et FD.5. Pour les sismographes F et G, ils représentent des points de mesure qui sont séparés de la masse sauté par une zone « vide » (absence de roc permettant de propager les vibrations). Dans ces deux cas de figure, le sismographe est en lien indirect avec le front de dégagement du sautage et FD.x correspond respectivement à FD.3 (FD.1+FD.2) et FD.4 (FD.1+FD.3). Pour les fins d'identification de la direction finale retenue, les directions de propagation (combinaisons de 2 directions) sont additionnées permettant d'obtenir une direction finale maximale correspondant à FD.5.

Une fois la variable direction calculée pour tous les sautages, la méthode d'analyse décrite dans la section 2.1.2 est utilisée pour établir un écart moyen pour chaque FD. Pour déterminer l'impact de ce nouveau critère dans la précision des prévisions de sautage, il a été testé avec une nouvelle série de données comportant une géologie et des paramètres de forage et sautage similaires issue des 90 enregistrements de sautages (72 valides) de 2019 réalisés sur le même site.

2.2 Élaboration d'un outil de paramétrage des critères de sautage

Le second volet de la méthodologie se concentre sur l'élaboration d'un outil d'identification des paramètres de sautage en fonction de contraintes environnementales (configuration du site et incidences limites souhaitées) et de conditions techniques. Ce deuxième volet est divisé en deux sections soit, la démarche associée à l'élaboration d'un outil d'évaluation des effets d'un sautage et la validation de cet outil à l'aide d'une étude de cas.

2.2.1 Développement de l'outil d'élaboration des paramètres de forage et sautage

Le développement de l'outil est divisé en deux sections. La première section comprend les informations sur les contraintes environnementales et techniques nécessaires à caractériser le site évalué, alors que la seconde porte sur les processus de traitement des données. Les contraintes environnementales doivent permettre d'établir les limites à respecter selon les distances et sensibilités des différentes zones à protéger. Le Tableau 2.4 présente les contraintes environnementales considérées.

Tableau 2.4 Contraintes environnementales et définitions

Donnée	Unité	Description
Distance des zones	(m)	Distance la plus courte entre la zone de sautage et les structures à protéger.
Vibration à respecter	(mm/s)	Vitesse de vibration maximale permise en regard des structures à protéger.
Différence d'élévation	(m)	Différence d'élévation entre les sautages et les structures à protéger en considérant le radier comme référence.
Hauteur à excaver	(m)	Hauteur totale du matériel à excaver par sautage.
Constante sismique (K)	(-)	Valeur par défaut : 1725 (Oriard, 2002).
Atténuation sismique (n)	(-)	Valeur par défaut :1,6 (Oriard, 2002).
Constante projection (p)	(-)	Valeur par défaut : 20,5 (Richard, Moore, 2002).

Les contraintes techniques permettent d'évaluer les caractéristiques des travaux à effectuer, elles sont donc attachées aux capacités de l'entrepreneur effectuant les travaux plus qu'au matériel à fragmenter. Le Tableau 2.5 présente les contraintes techniques considérées.

Tableau 2.5 Contraintes techniques considérées

Donnée	Unité	Description
Facteur poudre	(kg/m³)	Quantité d'énergie jugée nécessaire par l'utilisateur.
Densité de l'explosif	(kg/m³)	Densité de l'explosif principal choisi.
Diamètre de forage	(mm)	Diamètre des trous de forage.
Ratio de collet	(-)	Hauteur de collet attribué en fonction du diamètre de forage. Un ratio habituel est de 20 fois le diamètre de forage (Dyno Nobel, 2010).
Ratio de sous-forage	(%)	Profondeur de sous-forage en fonction d'un pourcentage de l'épaisseur de fardeau de la maille de forage.

Afin de tenir compte qu'un site peut être défini en plusieurs secteurs, il est attendu, dans le développement de l'outil que les paramètres explicités au Tableau 2.4 et au Tableau 2.5 puissent être divisés en plusieurs jeux de données.

Les vibrations représentent pour plusieurs chantiers le facteur limitant pour leurs opérations en raison des normes établies. La seconde section de cet outil, soit les processus de traitement des données doit donc se basé sur l'équation 1.2 afin de produire des paramètres de forage et sautage initiaux en accord avec les limites de vibrations.

Une fois les paramètres initiaux établis, l'outil doit déterminer les critères de projection de rocs suivants : vitesse initiale (Équation 1.3), distance horizontale maximale (Équation 1.4) et distance verticale maximale (Équation 1.5).

$$V_0 = p\left(\frac{m^{0,5}}{SH}\right)^{1,3} \sin 2\theta_{LA} \tag{1.3}$$

$$R_2 = V_0 \cos\theta_{LA}\left(\frac{V_0 \sin\theta_{LA} + \sqrt{(V_0 \sin\theta_{LA})^2 - 2gH}}{g}\right) \tag{1.4}$$

$$h_2 = \frac{{V_0}^2 \sin^2\theta_{LA}}{2g} + H \tag{1.5}$$

Le Tableau 2.6 explique les différentes variables énumérées dans les équations 1.3, 1.4 et 1.5.

Tableau 2.6 Variables des équations de prédictions des distances de projections de roc d'un sautage

Variable	Définition	Unité
$\mathbf{V_0}$	Vitesse initiale de la projection de roc	m/s
p	Constante de projection de roc	-
m	Charge explosive linéaire	kg/m
SH	Valeur minimale entre le fardeau et l'épaisseur de bourre	m
$\boldsymbol{\theta_{LA}}$	Angle de projection (Launch Angle)	°
H	Hauteur du banc sauté	m
$\mathbf{R_2}$	Distance horizontale de projection de roc maximale	m
$\mathbf{h_2}$	Distance verticale de projection de roc maximale	m

La distance de projection de roc ainsi calculé doit être plus petite que la moitié de la distance avec les structures à protéger et le quart de la distance avec les citoyens à protéger (Richard, Moore, 2002). Le cas échéant, le processus de traitement des données doit comprendre une option de modification des contraintes techniques afin de satisfaire les contraintes environnementales.

2.2.2 Validation de l'outil par une étude de cas

Pour confirmer la pertinence de l'outil, une étude de cas est effectuée en condition réelle dans une carrière en milieu urbain nécessitant un ajustement quant à ses paramètres de forage et sautage. L'étude de cas s'appuie sur un sautage ayant généré une vibration de 18,1 mm/s à la résidence la plus proche. Bien que cette vibration respectait les normes des carrières et sablières applicables jusqu'en 2018, elle ne répond plus aux exigences de 10,0 mm/s de la nouvelle norme (Règlement sur les carrières et sablières du Québec, 2018). Le Tableau 2.7 indique les paramètres utilisés lors de l'élaboration de ce sautage. Ces paramètres comprennent l'utilisation de la technique du chargement étagé.

Tableau 2.7 Paramètre du sautage de l'étude de cas

Paramètre	Unité	Valeur
Hauteur à excaver	(m)	10,6
Facteur poudre	(kg/m³)	0,54
Densité explosif	(kg/m³)	950
diamètre de forage	(mm)	100
ratio collet	(-)	30
ratio sous-forage	(%)	20
Distance du sismographe	(m)	115
Patron de forage	(m x m)	3,2
Charge par délai	(kg)	30

La Figure 2.3 présente les résultats du sautage à la base de cette étude de cas ainsi que sa séquence de mise à feu.

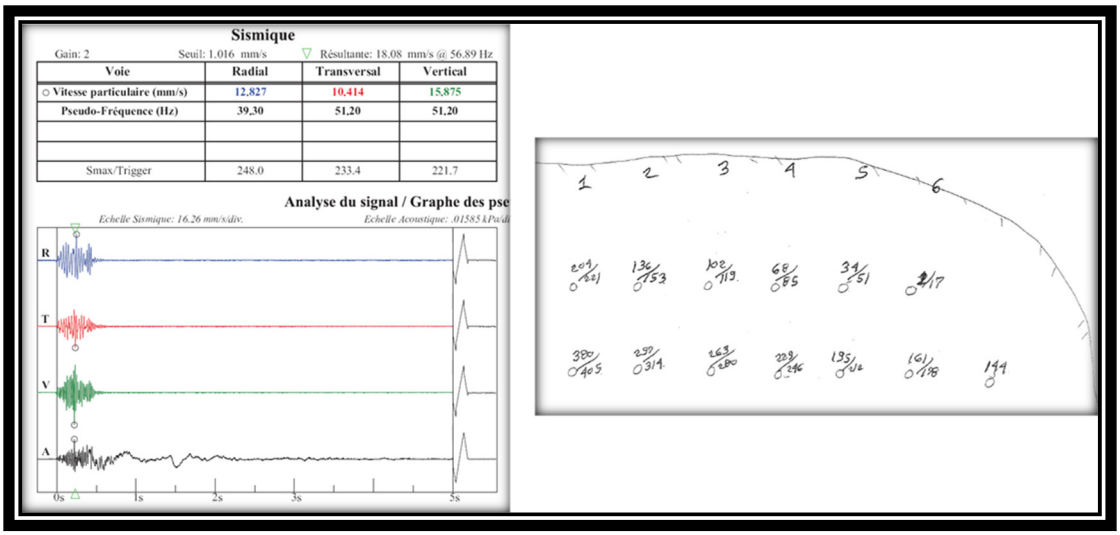


Figure 2.3 Donnée sismique et séquence de mise à feu

Les résultats du sismographe en comparaison avec la séquence de mise à feu du sautage (Figure 2.3) indiquent qu'une seule section du tir à obtenue une amplitude de vibration de 18,1 mm/s alors que le reste du tir génère des vibrations maximums de 13,5 mm/s. Dans ce

contexte, l'approche d'identification des paramètres de sautage à l'aide de l'outil développé viserait à définir une valeur limite maximale de 8,0 mm/s, valeur établie en considérant une marge d'erreur de 20% en dessous de la valeur seuil de 10,0 mm/s.

Pour évaluer cette situation à l'aide de l'outil développé, il est nécessaire d'établir la constante sismique (K) de ce secteur. En considérant la distance du tir, la charge par délai, la vibration évaluer à 13,5 mm/s et une constante d'atténuation générale n à 1,6, une constante K à 1761 a été déterminé selon l'équation de prédiction des vibrations (1.2).

CHAPITRE 3

RÉSULTATS

Ce chapitre présente les résultats obtenus à la suite de la mise en œuvre de la méthodologie présentée au chapitre précédent. La structure de ce chapitre est organisée en deux parties, soit une première sur l'estimation des vibrations selon les conditions d'un site divisé en trois sections et une seconde partie sur l'outil d'aide aux paramétrages de sautages en deux sections.

3.1 Comparaison des estimations de vibration avec les mesures in situ

Cette première partie du chapitre des résultats a pour objectif d'évaluer des facteurs à même d'améliorer les prédictions de vibrations. Pour ce faire, cette partie sera divisée en trois sections. Une première section établit une courbe d'atténuation pour le site évaluer afin de servir de base comparative pour la suite. Une seconde évalue l'impact de divers facteurs considérés et la dernière établit la validité du facteur direction.

3.1.1 Établissement des constantes du site à l'étude

À cette première étape du traitement des données enregistrées in situ, il s'agit d'établir la relation entre la mesure de vibration et la distance scalaire (relation entre la charge explosive détonée par délai et la distance entre le sautage et le point de mesure) exprimée sur une échelle logarithmique pour l'ensemble du site étudié. La compilation des données sommaires, soit sur l'ensemble des événements enregistrés, a pour but premier de déterminer une courbe d'atténuation représentative du site exploité afin de servir de base comparative à l'étape de l'analyse de l'effet des différents facteurs qui influencent les estimations des vibrations. La Figure 3.1 présente les courbes de tendance sommaire établie à partir des 277 données valides et 42 données en dessous des seuils de détection enregistrées au cours des trois années 2016 à 2018 ainsi que la courbe théorique « construite » à partir des paramètres généraux proposés par Oriard (2002).

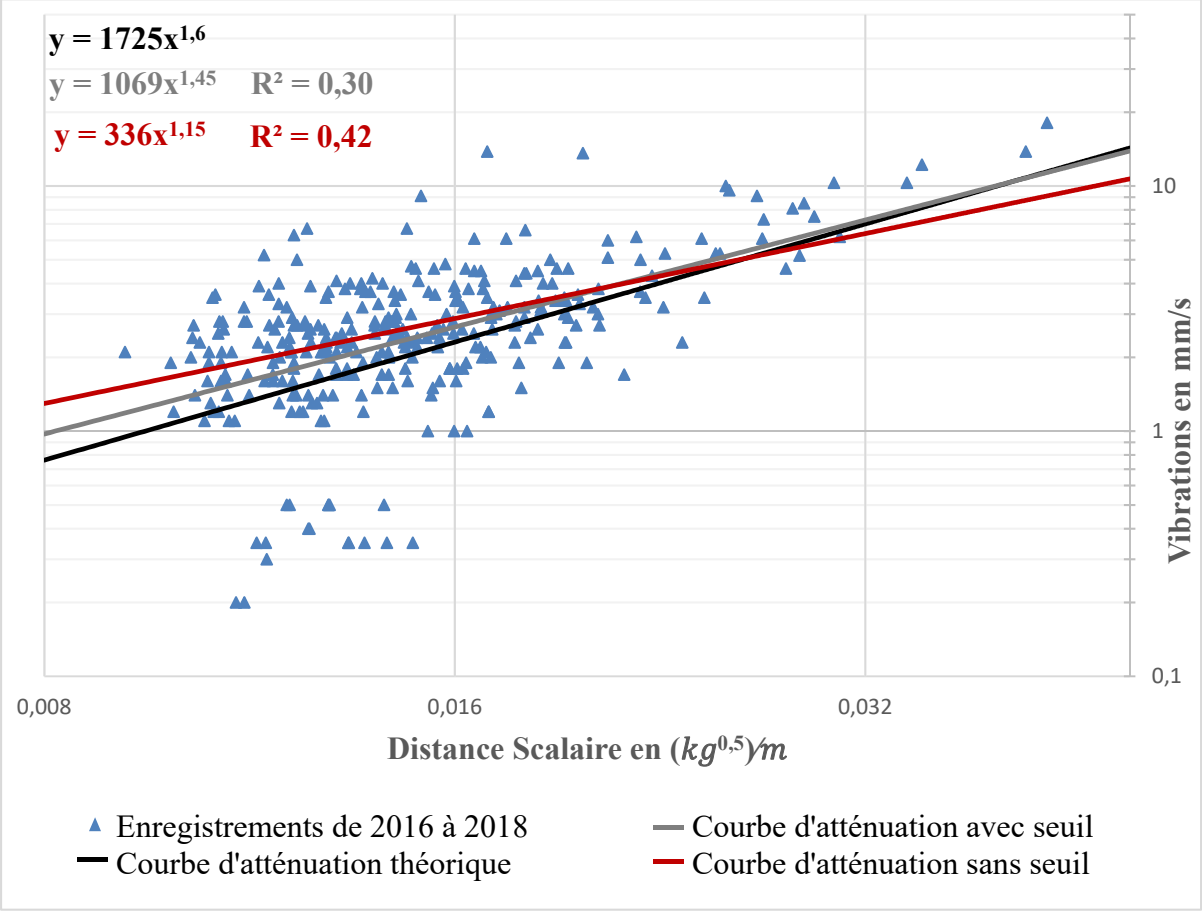


Figure 3.1 Comparaison des résultats in situ de 2016 à 2018 entre la courbe d'atténuation du sommaire considérant les vibrations en dessous des seuils de détection, la courbe d'atténuation du sommaire sans les vibrations en dessous des seuils de détection et la courbe d'atténuation théorique.

La courbe d'atténuation sans les données en dessous des seuils de détection présentée à la Figure 3.1 est représentative des données qui seraient considérées sur un chantier, soit toutes les données à l'exception des données aberrantes et de celles en dehors des champs évalués. Pourtant, son coefficient de corrélation ($R^2 = 0,42$) est relativement faible ne permettant pas une estimation fiable des vibrations pour les sautages à venir. Puisque les sautages effectués sur ce site sont de même nature, ce facteur de corrélation pourrait indiquer une géologie hétérogène expliquant ainsi la faible corrélation.

La Figure 3.1 révèle également une différence notable entre la constante sismique K (336) et celle d'atténuation n (1,15) de la courbe sommaire sans seuil par rapport aux constantes de la courbe théorique K (1725) et n (1,6). Néanmoins, les deux courbes se croisent dans le champ de vibrations enregistrées indiquant que leurs prédictions, bien qu'imprécise, sont sensiblement équivalentes pour des distances scalaires du même ordre que celui des résultats obtenus. La constante d'atténuation n, soit la pente de la courbe d'atténuation, est donc la différence majeure ce qui pourrait s'expliquer par la suppression des résultats de vibrations en dessous des seuils de détections des sismographes. Cette absence adoucit artificiellement la pente en enlevant les résultats les plus faibles ce qui induit des prévisions de vibration plus élevées pour les distances scalaires basses.

À ce niveau, l'ajout de la courbe d'atténuation sommaire avec les résultats sous les seuils de détection des séismographes permet d'obtenir une pente plus prononcée et ainsi une courbe se rapprochant de la courbe d'atténuation théorique, ce qui valide l'intérêt de considérer les constantes théoriques pour l'ouverture d'un nouveau site de forage et sautage. Cependant, le coefficient de corrélation de cette nouvelle courbe (R^2 = 0,30) indique qu'elle est moins représentative des résultats généraux obtenus sur le site et n'est donc pas retenue.

Une comparaison a été effectuée entre les trois années (2016 à 2018) d'enregistrement des données afin d'évaluer si une tendance était observable. Le Tableau 3.1 présente les équations des courbes de tendances pour chacune des trois années.

Tableau 3.1 Analyse des sautages par année

Série de données	Équation de la courbe de tendance	Nb. de données analysées
2016	$y = 616x^{1,29}$, $R^2 = 0,49$	101
2017	$y = 254x^{1,07}$, $R^2 = 0,22$	119
2018	$y = 678x^{1,34}$, $R^2 = 0,53$	57
2016 & 2018	$y = 571x^{1,28}$, $R^2 = 0,50$	158

Les données collectées aux années 2016 et 2018 sont comparables avec des facteurs de corrélations plus élevées que celui du sommaire des trois années. En revanche, les données de 2017 sont plus erratiques avec un faible coefficient de corrélation. Dès lors, la combinaison des données de 2016 et 2018 permet d'obtenir un échantillon de près de 60% des données récoltées avec un taux de corrélation plus élevé que celui du sommaire des trois années. Ce taux de corrélation suggère un lien, bien qu'indirect, entre la distance scalaire et les vibrations induites par un sautage. La courbe d'atténuation sommaire de 2016 et 2018 servira donc de base comparative à l'étape d'analyse des différents facteurs influençant les résultats de vibrations.

3.1.2 Évaluation de l'impact des facteurs spécifiques sur les vibrations de sautages

Dans le cadre de cette section, deux facteurs spécifiques sont analysés quant à leur impact sur les vibrations enregistrées lors d'un sautage, soit : (1) la zone du sautage et (2) la position du sismographe enregistrant la vibration. La zone de sautage permet de mesurer l'impact cumulatif de la direction du front de dégagement d'un sautage et de la topologie du terrain. La position du sismographe considère la géologie du terrain entre le sautage et le sismographe ainsi que la variation de la distance des sautages.

La première étape consistait donc à établir des zones de sautages représentatives de la distribution du site. La Figure 3.2 illustre une vue en plan schématique du site avec les zones de sautages choisies et les positions relatives des sismographes.

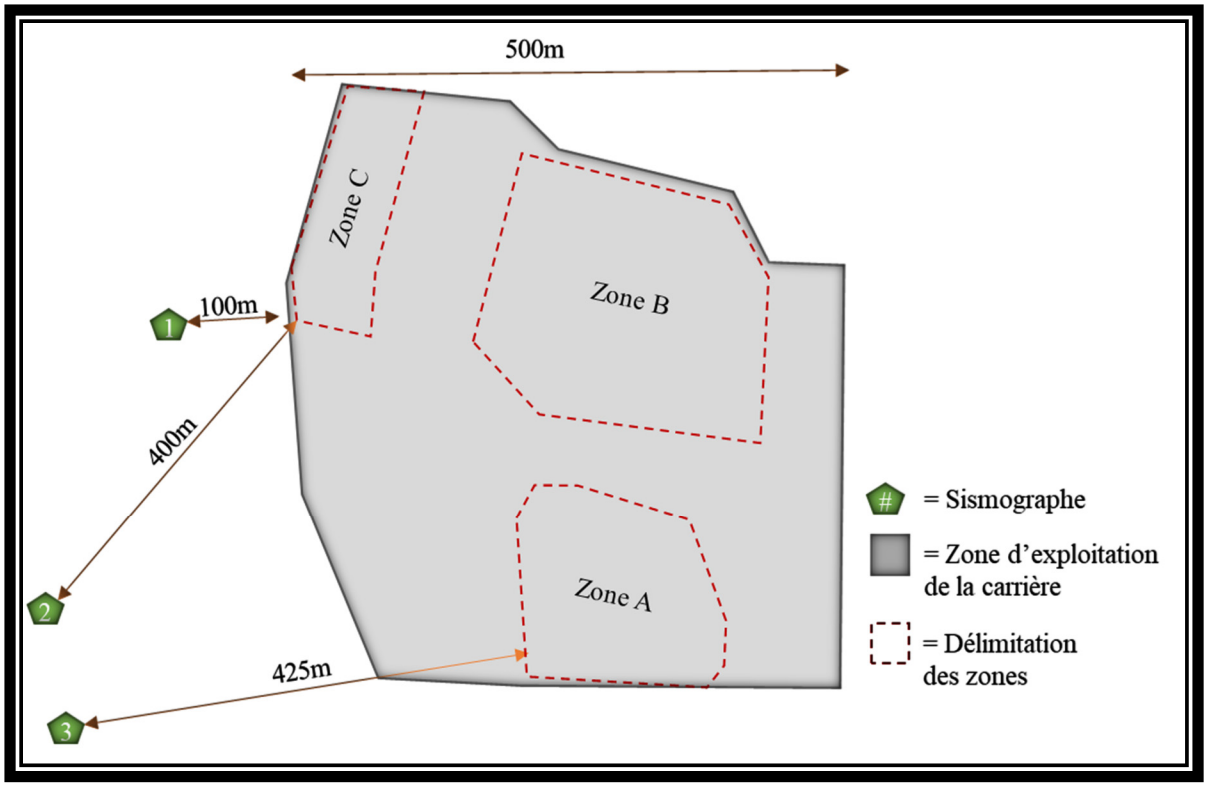


Figure 3.2 Schéma en plan du site évalué

La zone A identifiée à la Figure 3.2 se situe proche d'un ancien centre de concassage de la carrière ce qui explique qu'il soit légèrement surélevé par rapport au reste de la topologie du site (le roc alentour ayant déjà été excavé dans les années antérieures). Les sautages qui y sont effectués sont réalisés dans des directions variables selon les besoins. Il apparait qu'un lien direct par le roc entre le sautage et les sismographes est rare. La zone B est le palier le plus bas de la carrière. Des tirs de plus grande ampleur y sont effectués et un lien direct à indirect peut y être tracé entre eux et les sismographes en fonction de la direction du front de dégagement du tir. La zone C correspond au mur final adjacent à la ville où les sismographes sont installés. Tous les tirs effectués dans cette zone peuvent donc être reliés en ligne directe avec les sismographes. La direction du front de dégagement de ces tirs est toujours le même.

Pour ce qui est des positions de sismographe présenté à la Figure 3.2, la position 1 est la plus proche des sautages effectués à cette carrière à une distance variant de 100 à plus de 600 mètres. Le sismographe de l'emplacement 1 est situé sur une faible épaisseur de mort terrain avant d'atteindre le roc de la montagne. Pour le deuxième emplacement de sismographe, l'épaisseur de mort terrain sur lequel il est installé est de quelques mètres avant le roc et sa distance aux zones de tir est moins variable allant de 400 à 675 mètres. Dans le cas du sismographe 3, il rassemble des données à distance de 425 à 700 mètres des sautages et se situe au pied de la montagne sur une épaisseur importante de mort terrain.

Le Tableau 3.2 compare les vibrations projetées pour une même distance scalaire de la courbe d'atténuation obtenue pour les sautages de 2016 et 2018 aux courbes des zones A, B et C comprenant respectivement 57, 155 et 65 données.

Tableau 3.2 Analyse par zone de sautage

Distance scalaire	Vibration			
	2016 & 2018	Zone A	Zone B	Zone C
$(kg^{0,5})/m$	(mm/s)			
0,010	1,5	1,6	1,9	2,1
0,012	2,0	1,8	2,2	2,6
0,014	2,4	2,0	2,4	3,2
0,016	2,8	2,2	2,7	3,8
0,018	3,3	2,4	3,0	4,4
0,020	3,8	2,5	3,2	5,1
0,025	5,0	2,9	3,8	6,8
	$y = 571x^{1,28}$	$y = 28x^{0,61}$	$y = 70x^{0,79}$	$y = 864x^{1,31}$
	$R^2 = 0,50$	$R^2 = 0,03$	$R^2 = 0,20$	$R^2 = 0,69$

Les distances scalaires utilisées pour le Tableau 3.2 représentent un éventail englobant plus de 90% des données récoltées pour le site entre 2016 et 2018 afin d'éviter d'extrapoler les données récoltées à l'extérieur de leur zone d'influence réelle.

Une première observation en regard des résultats du Tableau 3.2 est la diminution du coefficient de corrélation dans la zone A et B par rapport au facteur de corrélation ($R^2 = 0,50$) obtenu au sommaire des années 2016 et 2018. Ce facteur diminue presque à 0 dans la zone A indiquant que la corrélation entre la distance scalaire et la vibration n'est pas valable dans toutes les circonstances de terrains et/ou directions de front de dégagement des sautages. La zone B représente aussi ce phénomène à plus petite échelle puisqu'une partie des tirs ont été effectués selon une orientation et une topologie permettant un lien direct entre les séismographes et le tir.

La zone C montre une forte corrélation permettant de confirmer la validité de l'équation empirique internationale de prédiction des vibrations lorsqu'elle est utilisée pour simuler des tirs pour lesquels il existe une présence de roc entre les points du sautage et d'enregistrement permettant la propagation des vibrations. Les vibrations obtenues sont aussi plus élevées que celle prédite par la courbe d'atténuation sommaire des années 2016 et 2018. Cette augmentation renforce l'idée d'une corrélation entre l'orientation du tir, la topologie du terrain et la vibration induite par sautage et valide donc l'intérêt d'intégrer un facteur directionnel aux formules de prédictions des vibrations.

Pour ce qui est d'évaluer l'incidence du positionnement de chaque sismographe sur les vibrations enregistrées, la Figure 3.3 compare les 88 enregistrements perçus à l'emplacement 1, les 90 de l'emplacement 2 et les 99 de l'emplacement 3. Elle illustre également leur courbes d'atténuation respectives.

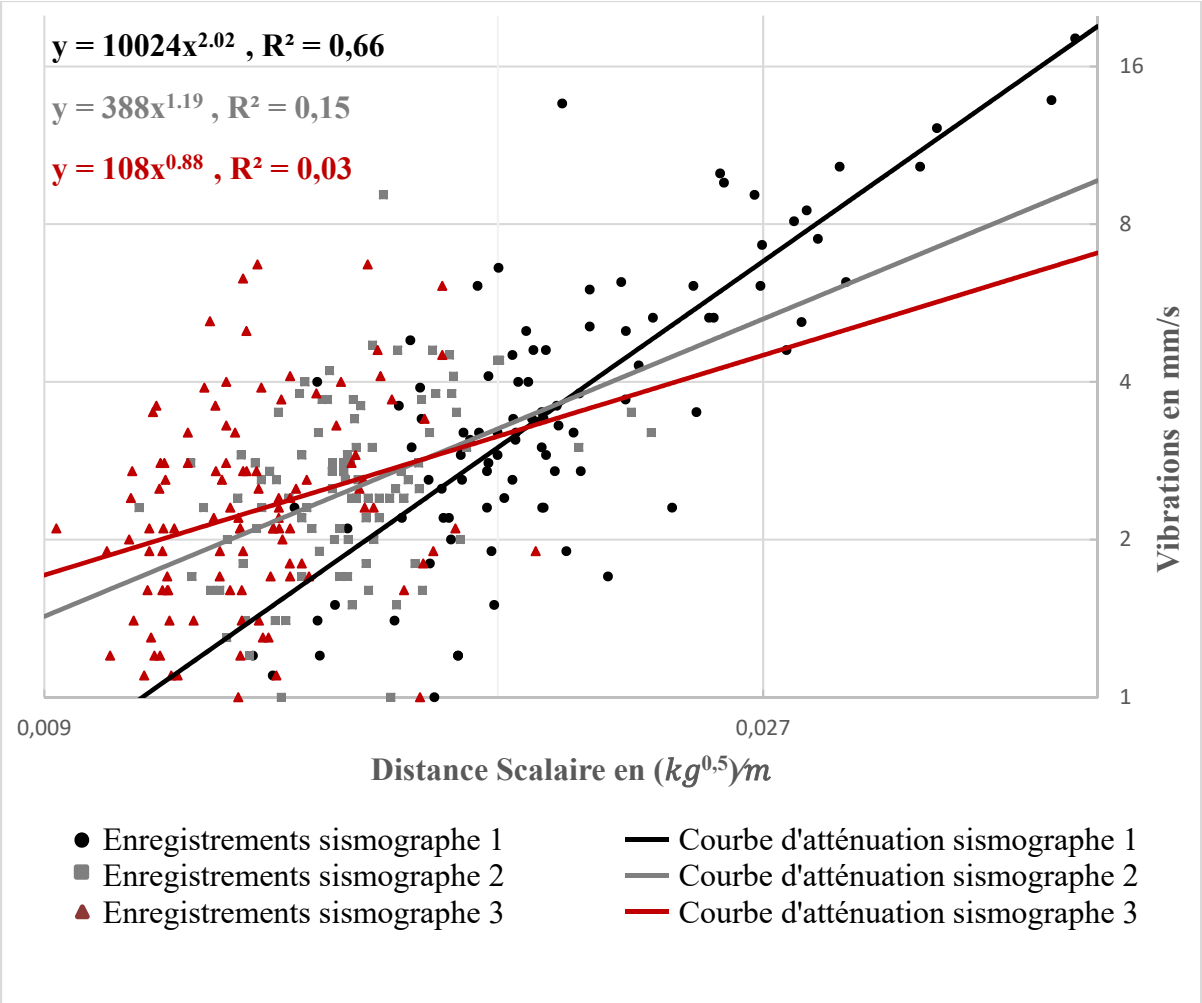


Figure 3.3 Comparaison des résultats d'enregistrements en fonction des positions des trois sismographes

Les enregistrements du sismographe 1 présentent une grande variation de distances tout en conservant un degré de précision supérieur sur toute sa courbe d'atténuation avec un facteur de corrélation supérieur (R^2 = 0,66). Pour les positions des sismographes 2 et 3, la faible dispersion des données sur la distance semble nuire à l'obtention d'une courbe d'atténuation avec un facteur de corrélation acceptable en laissant plus d'importance aux autres facteurs influençant les vibrations induites d'un sautage. Pour le sismographe 3 en particulier, le facteur de corrélation s'approche de 0 indiquant un lien nul entre la distance scalaire et les vibrations perçues lors d'un sautage.

L'hypothèse proposée au niveau des données du sismographe 3 est que la présence importante de mort terrain modifie la distribution des vibrations dans cette zone. Tel que mentionné dans l'état des connaissances, un mort terrain saturé en eau a pour effet de diminuer les fréquences et d'augmenter l'amplitude des vibrations. Les sautages enregistrés ne considérant pas les épisodes de pluie ou de fonte des neiges des jours précédant le sautage, il serait donc logique d'observer une fluctuation dans l'amplitude des vibrations enregistrées selon les conditions météorologiques du moment. Cette dernière information semble validée par la constante d'atténuation élevée du sismographe 1 soit n = 2,02 par rapport au n = 1,28 du sommaire des années 2016 & 2018 de la carrière. En effet, ce sismographe étant situé presque directement sur le roc et les vibrations en haute fréquence s'amenuisant plus rapidement à grande distance, les distances de 100 à plus de 600 mètres de ce sismographe ont eu l'occasion de bien capter ce phénomène. Cette dernière donnée suggère aussi que la courbe d'atténuation réelle des vibrations soit plus complexe qu'une simple exponentielle.

3.1.3 Détermination du facteur « Direction »

L'objectif de cette section est d'attribuer une valeur au facteur direction puis de déterminer sa validité et son potentiel d'amélioration des prédictions de vibrations induite par sautage. Pour ce faire, l'ensemble des données valides de 2016 à 2018 sont réévalués en cinq catégories distinctes, soit les cinq directions considérées et une courbe d'atténuation est calculée pour chacune de ces directions. Le Tableau 3.3 indique les vibrations projetées pour les cinq directions selon leur courbes d'atténuations. Il compare ensuite l'écart en pourcentage entre ces vibrations et celles du sommaire des sautages de 2016 & 2018 de la carrière puis indique un écart moyen pour chaque direction.

Tableau 3.3 Comparaison des courbes d'atténuations par direction

Distance Scalaire	Sommaire	Direction 1		Direction 2		Direction 3		Direction 4		Direction 5	
	$R^2 = 0,50$	$R^2=0,61$		$R^2=0,59$		$R^2=0,54$		$R^2=0,31$		$R^2=0,48$	
$(kg^{0,5})/m$	(mm/s)	(mm/s)	Écart	(mm/s)	Écart	(mm/s)	Écart	(mm/s)	Écart	(mm/s)	Écart
0,010	1,5	2,2	41%	1,5	-1%	1,3	-16%	1,2	-22%	0,4	-71%
0,012	2,0	2,7	40%	2,0	3%	1,7	-15%	1,5	-23%	0,7	-66%
0,014	2,4	3,3	38%	2,5	6%	2,0	-14%	1,8	-23%	0,9	-60%
0,016	2,8	3,9	38%	3,1	8%	2,4	-14%	2,2	-24%	1,3	-55%
0,018	3,3	4,5	37%	3,7	11%	2,9	-13%	2,5	-24%	1,6	-50%
0,020	3,8	5,1	36%	4,3	13%	3,3	-13%	2,8	-25%	2,1	-45%
0,025	5,0	6,7	34%	5,9	18%	4,4	-11%	3,7	-26%	3,4	-33%
Moyenne		38%		8%		-14%		-24%		-54%	
Nombre de données		92		103		58		17		4	

Une première donnée notable sur le Tableau 3.3 est le coefficient de corrélation relativement élevé des courbes d'atténuations pour les directions 1,2 et 3. Ce résultat comprenant toutes les données y compris celles de la zone A et celles enregistrées par les sismographes 2 et 3. Cette augmentation du coefficient R^2 démontre une corrélation entre la direction du front de dégagement, la position des sismographes et les vibrations enregistrées.

Dans le Tableau 3.3, la direction 4 et 5 montre une diminution du nombre de données ainsi que du facteur de corrélation. Cette diminution est due à deux éléments. Premièrement, l'orientation générale des sautages dans cette carrière vise à minimiser les faces libres en direction du centre urbain où se situe les sismographes, ainsi la majorité des sautages enregistrés représentent des directions de sautage 1,2 ou 3. De plus, les quelques sautages effectués avec des directions 4 et 5 sont plus affectés par la limite du seuil de détection des sismographes en raison de leurs résultats de vibration plus faible.

Le Tableau 3.3 indique une diminution systématique des vibrations projetées avec l'augmentation du facteur direction. Selon ce tableau, une vibration théorique enregistrée à X mm/s par l'équation empirique de prédiction des vibrations serait perçue 38% plus élevé

directement derrière ce sautage (direction 1) alors qu'elle serait perçue 54% plus faible directement en face de celui-ci (direction 5) impliquant un effet significatif du facteur direction sur l'estimation de la valeur de vibration. L'amplitude de ce facteur peut donc partiellement expliquer l'effet disparate des vibrations analysées dans la zone A possédant des variations importantes au niveau de son facteur de direction. Pour fin de calcul, la constante sismique K est ajustée par le pourcentage du facteur direction.

Une nouvelle série de données a été étudiée à partir des sautages de 2019 réalisés dans la même carrière afin d'évaluer l'effet de l'introduction du facteur de direction sur la prévision des valeurs enregistrées. Le Tableau 3.4 présente le nombre d'enregistrements de 2019 classés selon leurs directions ainsi que l'impact prévu du facteur direction sur les équations de prévisions des vibrations.

Tableau 3.4 Nombre de données analysées par direction en 2019 et impact du facteur direction (FD) sur la courbe d'atténuation théorique de Oriard (2002) et du site en 2016 et 2018.

	Direction 1	**Direction 2**	**Direction 3**	**Direction 4**	**Direction 5**
Nb de données	26	23	15	8	0
Théorique	$y = 1725x^{1,6}$				
Théorique FD	$2381x^{1,6}$	$1863x^{1,6}$	$1484x^{1,6}$	$1311x^{1,6}$	$794x^{1,6}$
2016&2018	$y = 571x^{1,28}$				
2016&2018 FD	$788x^{1,28}$	$617x^{1,28}$	$491x^{1,28}$	$434x^{1,28}$	$263x^{1,28}$

Le nombre de données enregistrées en 2019 pour chaque direction est proportionnellement similaire à ceux enregistrés entre 2016 et 2018. La Figure 3.4 présente graphiquement l'impact du facteur direction en comparant les vibrations prédites par les courbes théoriques de Oriard (2002) et celles de la courbe d'atténuation sommaire des années 2016 et 2018 avec et sans le facteur direction aux résultats réels enregistrés en 2019, sachant que la diagonale centrale représente les résultats réelles obtenus.

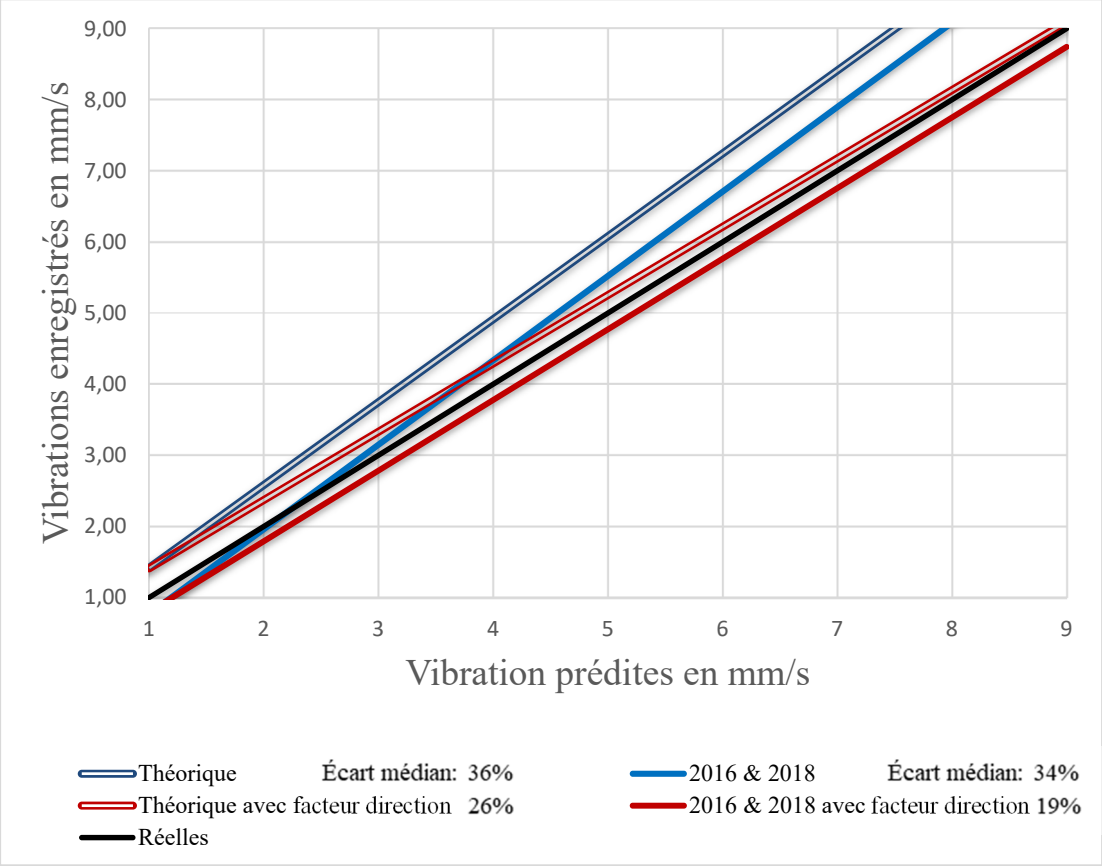


Figure 3.4 Comparaison entre les prédictions de vibrations de site avec les constantes théoriques et celles sommaire du site en 2016 et 2018 en considérant l'ajout du facteur direction pour prédire les vibrations réelles enregistrées en 2019

La Figure 3.4 montre un rapprochement significatif entre la courbe réelle des vibrations enregistrées en 2019 et les courbes issues des prédictions prenant en compte le facteur direction (courbe rouge). À ce niveau, l'écart médian en absolu entre les vibrations projetées et enregistrées permet de quantifier la précision de chaque fonction.

La courbe de tendance des constantes théoriques sans le facteur direction avec un écart médian de 36% par rapport aux vibrations réelles est la moins précise des fonctions au niveau de la

prédiction des résultats. Puisque cette formule est utilisée indifféremment pour diverses géologies, types de sautages et de chantiers, il va de soi que sa précision est limitée.

Pour ce qui est de la courbe sommaire des années 2016 et 2018 sans le facteur direction, malgré l'utilisation des données de cette même carrière durant les années précédentes l'écart médian des vibrations projetées avec les résultats réels est de 34%. Les résultats d'un site requièrent un niveau de traitement plus important afin d'être employés avec précision lors de l'estimation des constantes d'un site.

La courbe théorique avec le facteur direction montre une augmentation de la qualité des résultats, non seulement avec son écart médian à 26% soit 10% moins d'écart que sans le facteur direction, mais aussi avec la pente de sa courbe se rapprochant de la pente des résultats obtenus. Cela indique une précision généralement plus élevée indépendamment des différentes distances scalaires. Ces résultats étant basés sur les constantes internationales, ce niveau de précision est donc potentiellement transposable pour d'autres ouvrages de nature équivalente dans le domaine du forage et sautage.

La courbe sommaire avec facteur direction a obtenu un écart médian de 19% entre ces prédictions et les résultats réels enregistrés, soit suffisamment précis pour répondre aux demandes de la majorité des chantiers prouvant ainsi l'efficacité du facteur direction.

3.2 Développement de l'outil d'aide à la planification de patrons de forage et sautage

La deuxième section du chapitre des résultats se concentre sur le développement et l'application d'un outil permettant de déterminer les paramètres du patron de forage et sautage. Pour ce faire, une première sous-section présente le processus de traitement établi alors que la deuxième vise à valider la démarche proposée à l'aide d'une étude de cas tout en présentant l'interface utilisateur.

3.2.1 Processus de traitement

Le processus de traitement décrit dans cette section permet d'obtenir un patron de forage adapté aux restrictions d'un site. Les scénarios qu'il présente doivent répondre à diverses limites afin de laisser à l'utilisateur le choix du scénario adéquat à sa situation. Les limites considérées sont un diamètre de forage précis, une excavation de la hauteur finale avec l'exploitation d'un seul banc et une excavation selon un chargement étagé. Cet agencement est adéquat pour une première série de limites puisqu'il représente des limites communes soit le type de foreuse disponible, le besoin de réaliser les travaux avec un seul banc d'excavation et la maximisation de la production selon des limites de vibrations sévères.

La

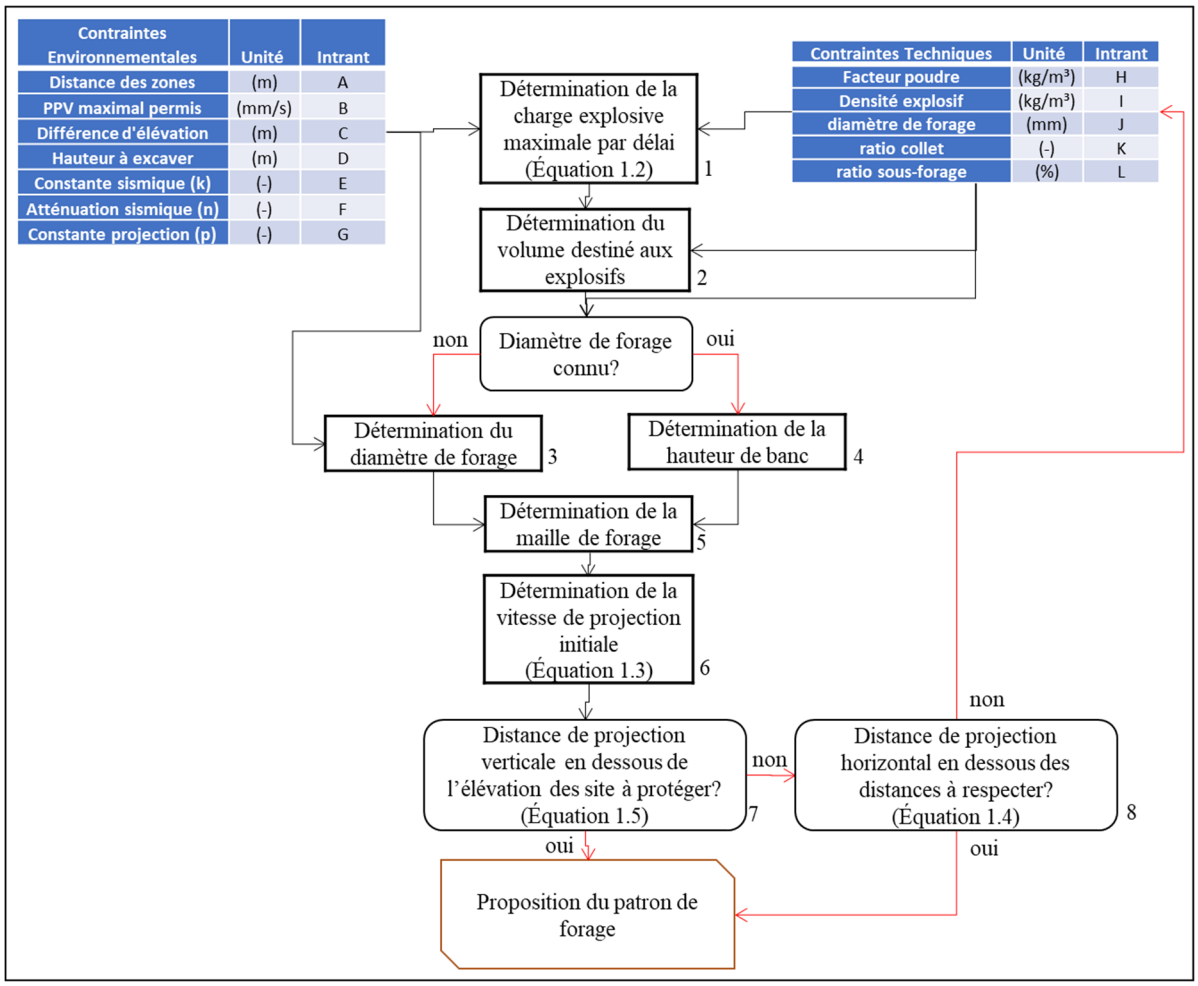


Figure 3.5 présente le schéma logique du processus de traitement des données par l'outil développé en partant des contraintes environnementales et techniques entrées par l'utilisateur jusqu'au calcul d'un patron de forage. Les chiffres inscrits en bas à droite des cellules indiquent les étapes comportant un calcul.

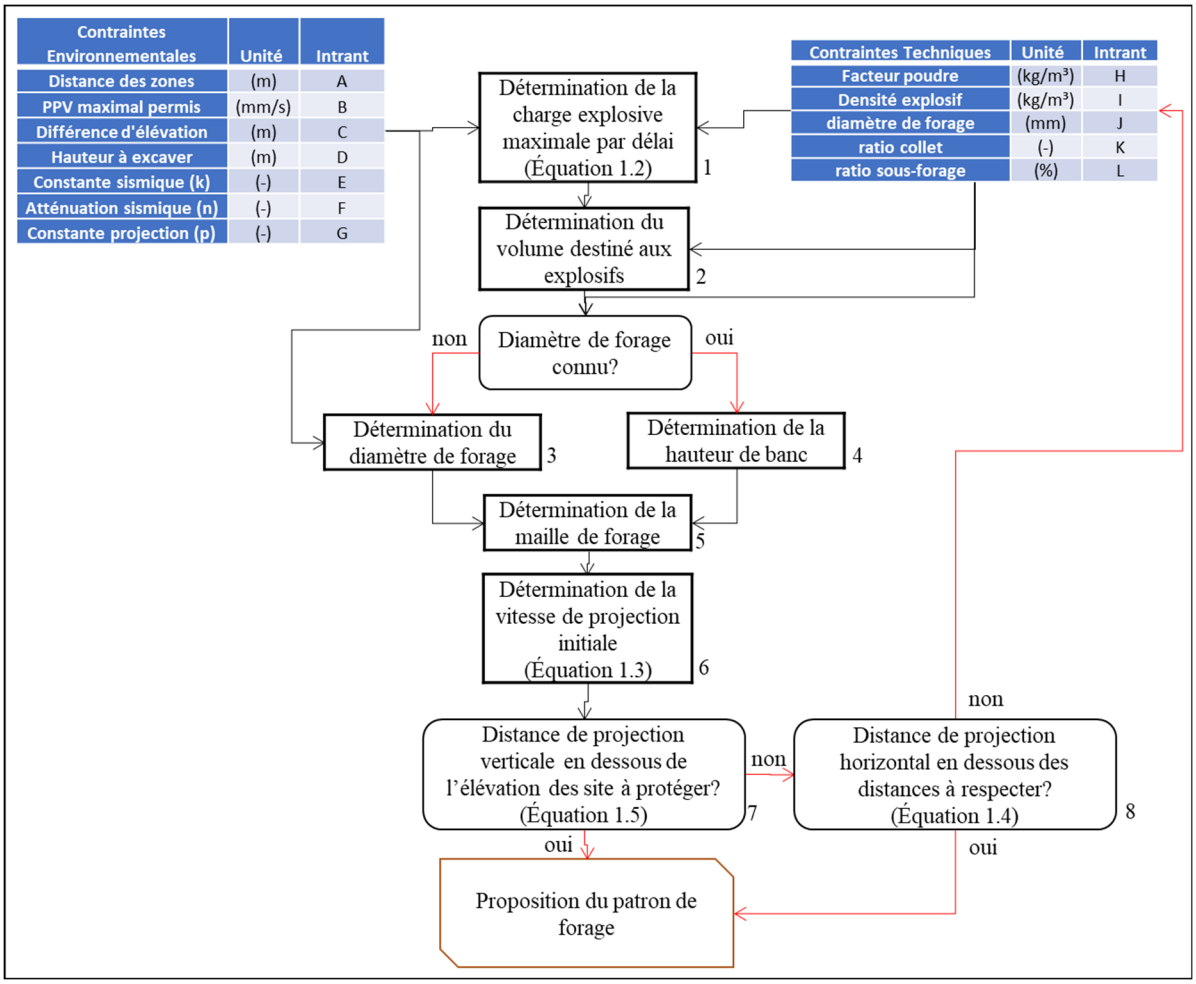


Figure 3.5 Schéma logique du processus de traitement des données associé à la planification de patron de forage et sautage

Le Tableau 3.5 explique les calculs effectués lors du traitement des données par l'outil d'élaboration des paramètres du patron de forage et sautage.

Tableau 3.5 Calculs associés aux séquences de traitement des données permettant d'établir les paramètres de forage et sautage

Calcul	Équation	Explication
1	Équation 1.2	Isoler la variable W en considérant la limite de vibration à respecter pour la variable PPV.
2	Volume = $W/Densité\ de\ l'explosif$	Détermine le volume d'explosif par charge.
3	Volume d'un cylindre	Isoler le diamètre du cylindre en additionnant la hauteur du collet et en soustrayant le sous-forage. La hauteur de banc totale est considérée.
4	Volume d'un cylindre	Isoler la hauteur du cylindre en additionnant la hauteur du collet et en soustrayant le sous-forage.
5	$Maille\ de\ forage = (W/(HxFacteur\ poudre))^{0,5}$	Isoler un patron de forage carré, soit avec un fardeau et un espacement égal.
6	Équation 1.3	Isoler la vitesse de projection de roc initiale.
7	Équation 1.5	Si h_2 est plus petite que la différence d'élévation entre le sautage et le site à protéger, les projections de roc sont respectées.
8	Équation 1.4	Si R_2 est plus petite que la moitié de la distance avec les structures à protéger et le quart de la distance avec les citoyens à protéger, les projections de roc sont respectées (Richard et Moore, 2002).

Le processus de traitement des données explicitées au Tableau 3.5 permet d'obtenir différents patrons en fonction des contraintes du site et des informations disponibles. Ainsi, la constante sismique (K), la constante d'atténuation (n), la constante de projection (p), le diamètre de forage, le ratio de collet et le ratio de sous-forage ne sont pas nécessaires à l'obtention d'un patron de forage et sautage, bien qu'ils permettent d'augmenter la précision des calculs.

3.2.2 Étude de cas

Pour confirmer l'applicabilité de l'outil, un test a été effectué en condition réelle dans une carrière en milieu urbain nécessitant un ajustement quant à ses paramètres de forage et sautage. Cette carrière indique qu'un de leur secteur d'exploitation a enregistré une vibration de sautage à 18,1 mm/s en 2017, soit au-dessus de leur limite désirée de 10,0 mm/s. Les valeurs présentées au Tableau 3.6 sont obtenues à la suite d'une analyse détaillée dans la méthodologie à la section 2.2.2.

Tableau 3.6 Contraintes pour étude de cas

Contraintes Environnementales	**Unité**	**A**	**B**
Distance des zones	(m)	115	115
PPV maximal permis	(mm/s)	8,0	8,0
Différence d'élévation	(m)	30	30
Hauteur à excaver	(m)	10,6	10,6
Constante sismique (K)	(-)	1761	1761
Atténuation sismique (n)	(-)	1,6	1,6
Constante projection (p)	(-)	20	20
Contraintes Techniques	**Unité**	**A**	**B**
Facteur poudre	(kg/m³)	0,54	0,54
Densité explosif	(kg/m³)	950	950
Diamètre de forage	(mm)	100	90
Ratio collet	(-)	30	30
Ratio sous-forage	(%)	20	20

Le Tableau 3.6 exprime les contraintes telles qu'affichées pour l'utilisateur avec les cellules bleues représentant les intrants nécessaires aux calculs et les cellules vertes représentant les intrants permettant d'améliorer la précision de l'outil. La colonne A considère un diamètre de forage à 100 mm alors que la colonne B considère un diamètre de forage de 90 mm. La distance des zones, la hauteur à excaver et la constante de projection sont établies selon les données fournies par le site.

Le Tableau 3.7 présente les paramètres des trois patrons de forage et sautage générés en fonction des contraintes présentés au Tableau 3.6.

Tableau 3.7 Paramètres suggérés pour l'étude de cas

Patron de forage	**unité**	**A**	**B**
- OPTION 1 -			
Paramètres fonction : **diamètre de forage**	(mm)	100	90
Maille de forage	(m)	2,4	2,3
Hauteur de banc	(m)	5,1	5,3
Sous-forage	(m)	0,5	0,5
- OPTION 2 -			
Paramètres fonction : **hauteur banc max**	(m)	10,6	10,6
Maille de forage	(m)	1,56	1,56
Sous-forage	(m)	0,30	0,30
Diamètre de forage	(mm)	48	48
- OPTION 3 -			
Paramètres fonction : **charge étagée**	(-)		
Maille de forage	(m)	2,7	2,6
Hauteur de banc	(m)	8,2	8,8
Sous-forage	(m)	0,50	0,50

Les options présentées dans le Tableau 3.7 sont identifiées en bleu ou vert selon l'emploi ou non des intrants de même couleur, c'est-à-dire que les options vertes ne sont disponibles que si les intrants verts du Tableau 3.6 sont entrés. La première option, soit les paramètres pour un diamètre de forage de 100 millimètres (colonne A) sans chargement étagés demande à la fois un resserrement de la maille de forage (3,2 x 3,2 m à 2,4 x 2,4 m) et la diminution de la moitié de la hauteur des bancs exploités (10,6 m à 5,1 m). Cette option ne fut pas conservée puisqu'elle représente une trop grande perte au niveau de la productivité et du coût d'exploitation.

La deuxième option soit l'excavation de la pleine hauteur de banc avec un diamètre de forage variable a été rejetée en raison du risque trop élevé de déviation des forages. En effet, plus le diamètre de forage est petit, plus il est à risque de déviation en raison de la pression qui s'exerce sur ces tiges d'acier. Pour cette raison, un forage de plus de 10 m avec un diamètre de forage

de 50 mm (48 selon l'outil) est plus à risque de déviation qu'un forage ayant un diamètre de 100 mm.

Finalement, la troisième option fut présentée soit celle du chargement étagé. Cependant, bien que le résultat était théoriquement satisfaisant, la diminution de la hauteur de banc à 8,2 mètres restait trop grande au niveau des coûts d'exploitation. À la suite de discussions, une diminution du diamètre de forage a été considéré afin d'augmenter la hauteur de banc. L'entrepreneur étant en mesure de forer sur un diamètre de 90 mm tout en conservant les mêmes équipements sur le terrain, le scénario de la colonne B a donc été évalué.

Selon un diamètre de forage de 90 mm et un chargement étagé (option 3, colonne B), la hauteur de banc maximale selon le Tableau 3.7 est de 8,8 m. Au cours de l'année suivante, les trois premiers sautages effectués dans ce secteur selon les paramètres établis par cet outil ont enregistrés les vibrations suivantes 8,1 mm/s, 7,4 mm/s et 7,6 mm/s. Les prévisions de l'outil étant de 8,0 mm/s, les résultats enregistrés sont satisfaisants.

CHAPITRE 4

DISCUSSION

Ce chapitre porte sur la mise en application des résultats de cette recherche ainsi que les perspectives de développement dans le domaine du forage et sautage. La structure du chapitre est séparée en deux sections. Une première section aborde l'aspect opérationnel des résultats de cette recherche ainsi que les limites d'utilisation du facteur direction et de l'outil développé. La deuxième section vise à développer les connaissances du domaine en proposant des projets ayant le potentiel d'ajouter aux résultats de cette étude.

4.1 Aspect opérationnel et limite d'utilisation

Dans le cadre de processus d'amélioration continue des travaux de forage et sautage en milieu urbain, la capacité d'augmenter la précision des prédictions de vibrations comporte de nombreux avantages pour un gestionnaire. En effet, une meilleure précision permet de limiter les pertes de temps associés à un dépassement des normes, mais aussi à augmenter la production basée sur des limites trop conservatrices. Au cours de cette recherche, deux éléments ont été développés en ce sens soit, le facteur direction et l'outil de paramétrage des patrons de forage et sautage.

Dans le cas du facteur direction, il est basé sur des sautages provenant tous d'une même carrière effectuant des sautages de nature similaire les uns aux autres. Cette particularité est avantageuse lors de la comparaison des sautages puisqu'elle permet d'isoler plus précisément certains facteurs clés parmi une multitude éléments contributeur. Pourtant, elle limite aussi la portée des résultats obtenus. Par exemple, les travaux d'élaboration de puits et de tunnel représentent une partie majeure des travaux de sautage en ville. Malheureusement, ils sont difficilement associables aux tirs de banquette effectués en carrière puisqu'ils comportent leurs

propres particularités. Or, bien que les résultats du facteur direction ne soient pas intégralement transposables pour d'autres sites, ils permettent de constater l'importance de considérer la topologie du site et le sens du front de dégagement des sautages. En effet, sur le site des sautages étudiés, la précision des prédictions des vibrations de sautage a augmenté de l'ordre de 15 % à la suite de l'application de ce facteur.

Dans le cas de l'ouverture d'un site de forage et sautage ne disposant pas encore de suffisamment données pour déterminer les valeurs du facteur direction pour ce site. Un gestionnaire pourrait comparer les données du facteur direction décrites dans cette recherche avec les résultats obtenus dans un site de nature semblable au site à ouvrir. Cela lui permettrait aussi d'évaluer la transférabilité pour son nouveau site avec un ordre du pourcentage d'erreur.

En ce qui concerne les valeurs attribuées au facteur direction dans cette étude, deux limitations principales sont observées. Tout d'abord, le manque de données attribuées aux directions 4 et 5 pose un doute sur la précision du facteur direction dans ces situations. En raison de la quantité limitée de données récoltées dans ces directions, le facteur direction devrait être considéré conjointement à des valeurs conservatives pour prédire des vibrations selon les directions 4 et 5. De plus, l'application du facteur dans sa forme actuelle s'applique directement sur la constante sismique (K) plutôt que la constante d'atténuation (n) et ne tient donc pas compte de la distance scalaire du sautage. Or, les résultats présentés montrent une variation du pourcentage d'écart du facteur direction selon les distances scalaires considérées. Ainsi, l'utilisation des valeurs présentées du facteur direction devrait se limiter à des distances scalaires comparables à ceux de cette étude.

Dans le cas de l'outil d'aide au paramétrage des travaux de sautage, son utilisation à permis lors d'une étude de cas d'optimiser les patrons de forage et sautage afin de maximiser la production du site tout en conservant une précision de prédiction des vibrations de sautage avec une marge d'erreur de moins de 10 %. Pour ce qui est des limites de cet outil, trois points majeurs sont à considérer.

D’emblée, l’outil se limite actuellement à fournir 3 patrons distincts. Bien que ces patrons soient choisis pour représenter des situations communes, ils ne sont pas suffisamment versatiles pour être déployés sur tous les chantiers. De ce côté, maintenant que le processus de traitement est établi, une multitude de nouveaux patrons pourraient être ajoutés pour répondre au besoin.

La deuxième limite de cet outil est plus restrictive. Il ne peut pas dans sa forme actuelle répondre au besoin d’un novice en ce qui concerne l’élaboration d’un patron de forage et sautage. En effet, cet outil ne distingue pas les patrons de forage absurdes puisqu’il se contente d’appliquer les équations en fonction des contraintes indiquées. Ainsi, puisque l’outil cherche la combinaison optimale, plusieurs patrons suggérés ne seront pas applicables sur le terrain et il en revient donc à l’utilisateur d’user de son jugement. L’application actuelle de cet outil est donc principalement orientée vers l’accélération des calculs et l’ajout de perspective pour un utilisateur possédant une connaissance de base du domaine des explosifs.

La troisième limite observée avec la mise en application de cet outil est l’impact du type d’explosif utilisé. En effet, les propriétés d’un explosif à l’autre ont un impact important sur les résultats d’un sautage. Cependant, seule la densité de l’explosif utilisé est considérée dans les équations de l’outil développé ce qui néglige donc la puissance relative au poids de l’explosif. Par exemple, dans le cas des deux explosifs principalement rencontrés en carrière soit l’ANFO et son dérivé l’émulsion, l’ANFO possède une densité autour de 840 kg/m³ alors que l’émulsion pure est autour de 1 200 kg/m³. Pourtant, la puissance relative au poids de l’ANFO étant plus grande que celle de l’émulsion leur énergie pour un même volume est similaire alors que la différence selon l’outil développé sera de l’ordre de 40% autant pour la prédiction des vibrations que pour les projections de roc. Pour éviter cette situation, il faudrait développer de nouvelles équations pour qu’elles soient basées sur la puissance relative au volume d’un explosif plutôt que sur sa densité. En attendant, il en revient à l’utilisateur de considérer un facteur poudre conséquent du type d’explosif prévu.

4.2 Perspective de développement des connaissances du domaine

Plusieurs aspects appartenant au domaine du forage et sautage en milieux urbains n'ont pas été abordés lors de cette recherche. Plus spécifiquement, l'impact des surpressions d'air et le facteur humain ne furent pas ou peu abordés. Les surpressions d'air sont parfois négligées lors de l'élaboration de sautage. Pourtant, ils représentent un des facteurs principaux des plaintes enregistrés en milieux urbains. Les surpressions d'airs sont souvent perçues par les citoyens comme une vibration puisqu'elle produit la sensation d'une vibration à l'intérieur de leur résidence ce qui incite souvent les efforts à s'orienter vers les vibrations plutôt que les surpressions d'air. Il est donc important pour un expert d'être en mesure de différencier une plainte liée aux surpressions d'air d'une liée aux vibrations puisque les techniques minimisant l'une n'auront pas nécessairement d'effets bénéfiques sur l'autre. Une recherche axée vers les facteurs de corrélations entre les pratiques de forage et de sautage et les surpressions perçus permettrait donc une amélioration au niveau de la collaboration entre les citoyens et les travaux aux explosifs.

Pour ce qui est du facteur humain, bien que les limites de vibrations puissent être revues à la baisse par rapport aux normes en vigueur pour améliorer les relations avec le voisinage, elles ne seront pas nécessairement suffisamment basses pour satisfaire les citoyens les plus anxieux. Pour tout travail avec des explosifs dans un environnement proche des citoyens, il est donc conseillé de faire preuve d'ouverture avec les résidents du milieu. Une communication honnête des risques et des méthodes de protections qui leur sont associés pourrait représenter une défense efficace face aux préoccupations des citoyens.

Afin de tenir compte du facteur humain et des surpressions d'air induites par sautage, une étude serait de mise. Cette nouvelle recherche pourrait être effectuée dans une mine ou carrière située à proximité des zones urbaines. Pour la moitié des citoyens volontaires du site étudié, un programme de communication et d'information sur les sautages effectués serait mis en place.

Puis, à l'aide de sondage, les réactions des citoyens informés seraient comparées aux autres afin de quantifier la valeur ajoutée du programme de communication. De plus, cette recherche pourrait enregistrer les surpressions d'air à l'aide de sismographe durant l'exploitation normale du site. Une fois collectées, ces informations pourraient être traitées de façons similaires aux traitements des vibrations dans le cadre de cette recherche afin d'isoler les facteurs notables au niveau des surpressions d'air et de la perception humaine.

Lors de l'analyse des données des différents sismographes, deux questions sont ressorties des résultats de corrélations. La pente prononcée (n = 2,02) des résultats du sismographe 1 par rapport aux autres sismographes amène la question suivante: l'atténuation des vibrations dans le sol est-elle réellement une fonction exponentielle? Quant à la deuxième question, amenée par les résultats de vibration disparates du sismographe 3; la propagation des ondes sismiques sur une épaisseur importante de mort terrain est-elle affectée par la météorologie?

Au niveau de l'atténuation des vibrations, les résultats analysés dans cette recherche suggèrent plutôt une relation plus complexe. D'ailleurs, d'autres éléments de la littérature semblent aussi s'enligner vers une relation plus complexe tel que la déformation cassante versus élastique du roc à courte portée, la diminution plus rapide des hautes fréquences à longue portée et le changement des caractéristiques du médium de transport des vibration (IRIS, 2018).

Cette question pourrait engendrer un changement dans l'élaboration des plans de forage et sautage. En effet, lors des travaux de sautages, il est rare de disposer d'un sismographe pour chacune des zones à surveiller, soit par manque de budget ou simplement par manque d'accessibilité. Ainsi, les vibrations sont généralement enregistrées à un point puis extrapolées à la zone voulue en suivant l'équation de prévision des vibrations de sautage (elle-même basés sur une fonction exponentielle). Si cette équation est fausse à courte ou à longue distance, les travaux basant leur suivi des vibrations sur de telles extrapolations de lectures sismiques en seront affectés. En d'autres mots, les vibrations enregistrées à grande distance représenteraient mal celles propagées à courte distance et vice-versa.

Dans l'objectif d'évaluer ce phénomène, une nouvelle recherche pourrait analyser les ondes sismiques induites par des sautages à l'aide d'une série de sismographes à distance variable enlignée selon une même direction. Du même coup, si cette étude était réalisée sur une épaisseur de mort terrain variable, l'analyse de la météorologie précédant les tirs pourrait tester l'hypothèse selon laquelle la présence d'eau dans le sol affecte la fréquence et l'amplitude des ondes sismiques induite par sautage.

CONCLUSION

Les travaux ayant recours aux explosifs à proximité des zones urbaines génèrent un besoin pour une amélioration de la capacité de prédiction des résultats sautages. Ce besoin est ressenti lors de la planification de travaux tant pour respecter les différentes normes que pour améliorer productivité des opérations. Ce mémoire propose donc deux améliorations aux capacités prédictions des vibrations induites par sautage, soit le facteur direction instauré dans ce mémoire à partir de l'analyse de 319 enregistrements sismiques de sautage et un outil de paramétrage.

L'analyse des résultats obtenus dans le cadre de ce mémoire a permis d'observer que la corrélation entre la distance scalaire et les vibrations enregistrées pour l'ensemble d'un site était limitée. Bien que la distance scalaire reste à ce jour le facteur le plus précis pour prédire les vibrations d'un sautage, le sommaire des sautages analysés ne démontre qu'une corrélation partielle variant de 0,3 à 0,5 entre celle-ci et les vibrations obtenues. Pour cette raison, l'utilisation d'un ou plusieurs autres facteurs influençant cette relation est nécessaire à l'obtention de prédictions de vibrations précises.

Parmi les facteurs qui pourraient expliquer un manque de corrélation directe, un des mieux connus pour sa variabilité entre chaque site est la géologie. Bien que ce facteur est théoriquement contenu dans les constantes K et n considérés par la formule de prévision des vibrations de sautage, la qualité de l'analyse sommaire des données récoltées entre 2016 et 2018 à la carrière étudiée ne devrait pas être réduite de façons importantes par ce facteur puisque les données y sont récoltées dans la même situation géologique. Bien qu'un certain niveau de variation des caractéristiques géologiques locales serait attendu, il ne peut pas expliquer une réduction aussi importante de la corrélation. Afin d'obtenir des prédictions de vibration précises, il est conclu que les résultats de vibrations d'un site ne devraient pas être tous considérés dans un même ensemble lors de l'évaluation des constantes K et n. Chaque site

devrait donc évaluer séparément les vibrations de ses sautages selon les zones d'opérations ainsi que les types de sautages qu'il effectue.

Dans ce contexte, le facteur direction présenté pourrait être considéré lors de l'utilisation de l'équation de prévisions des vibrations d'un sautage. En effet, la capacité du facteur direction à considérer à la fois la topologie du terrain et la direction du front de dégagement d'un sautage permet une augmentation de la précision de l'estimation des vibrations (19% d'écart médian par rapport à 34% sans le facteur direction). La quantité de données analysées a permis d'évaluer avec un degré de précision adéquat l'impact de ce facteur, ainsi que d'en confirmer sa validité à l'aide d'une nouvelle série de données indépendantes. De plus, le facteur direction a permis de prédire avec précision (26% d'écart médian) les résultats de vibrations de l'année 2019 au site de l'étude, et ce en considérant les constantes théoriques, soit une constante sismique (K) de 1725 et une constante d'atténuation (n) de 1,6. Les constantes théoriques n'étant pas spécifiques à la carrière de cette étude, les résultats de l'application du facteur direction sont potentiellement transposables à de nouveaux sites. Bien qu'il devra être ajusté pour les différentes situations et types de sautage, le facteur direction représente un progrès majeur dans le domaine puisqu'il confirme une croyance répandue dans le domaine tout en lui accordant une valeur quantifiable.

Finalement, l'outil de paramétrage des patrons de forage et sautage mis au point permet d'offrir de nouvelles pistes de solutions et un travail efficace pour un utilisateur expérimenté. Lors de l'étude de cas testant ces capacités, cet outil à permis d'élaborer un nouveau patron de forage permettant de réduire les vibrations induites par les sautages d'une zone spécifique de 13,5 à 8,0 mm/s au point d'enregistrement. Les vibrations des trois sautages subséquents effectués dans cette zone ont varié de 7,4 à 8,1 mm/s, soit une marge d'erreur de moins de 10%. Cependant, dans son état actuel, il n'est pas apte à permettre l'élaboration de paramètres forage et sautage à un utilisateur novice. Vu les responsabilités professionnelles reliées à l'élaboration des plans de forage et sautage, il reste fortement recommandé à toute personne intéressée par

le domaine de suivre une formation théorique et pratique auprès d'un professionnel compétent avant d'utiliser cette outil.

ANNEXE I

FICHE TECHNIQUE DES EXPLOSIFS COMPARÉS

TITAN® 1000 G

Information technique

Matrice d'émulsion en vrac gazéifiable et non sensibilisée



Description du produit

TITAN 1000 G est une matrice d'émulsion en vrac non sensibilisée formulée de façon à être sensibilisée pendant le chargement au trou de mine à l'aide de la technologie de gazéification chimique de Dyno Nobel. TITAN 1000 G, l'émulsion explosive de haute performance sensible aux amorces, peut être utilisé seul dans des trous de mine de 65 mm (2 ½ po), et plus, de largeur, ou dans des trous de mine encore plus grand si combiné à un mélange émulsion/ANFO.La gazéification chimique peut varier de densité, soit de 1,10 à 1,30 g/cc. De plus, le pourcentage de TITAN 1000 G peut être ajusté afin d'obtenir une performance explosive qui correspond le mieux aux exigences de dynamitage spécifiques. Veuillez vous reporter au tableau ci-contre pour tous les détails quant aux propriétés physiques et aux méthodes de chargement de certains mélanges explosifs typiques d'émulsion/ANFO TITAN 1000 G.

Recommandations d'applications

- La matrice d'émulsion TITAN 1000G est livrée sous forme d'agent de sautage et non agent oxydant et doit être sensibilisée à l'aide de la technologie de gazéification chimique de Dyno Nobel afin qu'elle puisse être apte à la détonation avant son utilisation.
- Seul l'ANFO fabriqué à partir de perles d'ANFO compatibles avec les émulsions est recommandé avec les mélanges explosifs d'émulsion/ANFO TITAN 1000 G.

Propriétés

MSDS #1052

	1000 G	1070 G	1060 G	1050 G
Pourcentage d'émulsion	100	70	60	50
Densité (g/cc) Avg	1,20	1,20	1,20	1,25
Énergie[a] (cal/g)	680	740	760	780
(cal/cc)	815	890	910	975
Puissance volumique				
Force[a,b]	0,77	0,84	0,86	0,89
Puissance massique[a,b]	1,13	1,23	1,26	1,36
Vitesse de détonation[c]				
(m/sec)	4 500	4 300	4 100	4 300
(ft/sec)	14 800	14 100	13 500	14 100
Détonation Pression[c] (Kbars)	61	55	50	58
Volume de gaza[a] (moles/kg)	45,4	44,8	44,6	44,4
Résistance à l'eau	Excellent	Excellent	Excellent	Bonne
Diamètre minimum				
(mm)	65	75	100	150
(pouces)	2,5	3	4	6
Méthode de chargement	Pompe	Pompe	Pompe	Tarière
Densité critique (g/cc)	1,30	1,30	1,30	1,30

[a] Toutes les valeurs énergétiques ont été obtenues à partir du logiciel PRODET[MC], un code machine développé par Dyno Nobel Inc. pour son usage exclusif. D'autres logiciels peuvent donner des valeurs différentes. [b] ANFO = 1,00 @ 0,82 g/cc

[c] Confiné à 150 mm (6 po) de diamètre à densité moyenne.

Désignation pour expédition de matières dangereuses

États-Unis

- Titan 1000G: Émulsion de nitrate d'ammonium, 5.1, UN3375, II
- Titan 1070G / 1060G / 1050G: Explosif de sautage, Type E , 1.5D, UN0332 II

Canada

Titan 1000G, Titan 1070G,Titan 1060G, Titan 1050G,

Voir l'avis de non-responsabilité à la page 2.

DYNO Dyno Nobel

Groundbreaking Performance

TITAN® 1000 G

Information technique

- Le poids minimal recommandé de l'amorce moulée pour amorcer les émulsions explosives TITAN 1000G ou les mélanges émulsion/ANFO explosifs est de 340 g (12 oz).
- **TOUJOURS** utiliser une amorce double lorsque la colonne d'explosif en vrac dépasse 6 m (20 pi). Une amorce devrait être placée près du fond du trou, alors que la deuxième devrait être placée davantage dans la partie supérieure de la colonne explosive.
- Ne pas utiliser de cordeau détonant dans des trous de mine dont le diamètre est inférieur à 159 mm (6 ¼ po).
- **NE JAMAIS** utiliser TITAN 1000 G dans des trous de mine plus profond que 30 m (100 pi). Communiquez avec votre représentant Dyno Nobel pour obtenir un produit de rechange.
- **TOUJOURS** utiliser une densité de chargement moyenne pour les plans de tir et pour évaluer les exigences en matière d'explosifs. Les émulsions explosives chimiquement gazéifiées fournissent un gradient unique de densité de chargement dans le trou de mine, la densité la plus élevée se trouvant dans la partie inférieure et la densité la plus faible se trouvant dans la partie supérieure. Consulter les courbes de densité/profondeur pour identifier la densité moyenne dans le trou de mine.
- **NE JAMAIS** charger par tarière le mélange TITAN 1000 G/ANFO comportant 50% d'ANFO dans les trous de mine dans lesquels se trouve de l'eau stagnante! Le mélange explosif d'une émulsion TITAN 1000 G/ANFO comportant 50 % d'ANFO doit servir uniquement dans des trous de mine secs ou dénoyés. Pour obtenir de façon constante de bons résultats, les trous de mine humides doivent être dénoyés. Suite au dénoyage, vérifiez le trou de mine pour vous assurer qu'il n'y a pas d'infiltration d'eau ou d'eau résiduelle. Aussitôt qu'il est constaté que le trou de mine est sec, procédez immédiatement à l'amorce et au chargement. Lorsqu'il y a encore présence d'eau dans le trou de mine, utilisez uniquement les mélanges pompés de TITAN 1000 G/émulsion d'ANFO composés de 0 à 40 % d'ANFO.
- Le temps de dormance maximum dans le trou de mine est de deux (2) semaines. Là où la situation géologique est humide et que des temps de dormance prolongés sont prévus, **TOUJOURS** limiter le pourcentage d'ANFO des mélanges TITAN 1000 G et ANFO lourd à mois de 50 %. Lorsque le produit restera en dormance toute la nuit et que des mélanges moins résistants à l'eau sont pris en considération, consultez votre représentant Dyno Nobel pour obtenir des recommandations en matière de chargement.
- **TOUJOURS** utiliser de l'équipement de chargement conçu spécifiquement pour ou approuver pour une utilisation avec TITAN 1000 G. Assurez-vous que les systèmes de sécurité sont fonctionnels avant chaque usage.
- Les émulsions explosives TITAN 1000 G ou les mélanges d'émulsion TITAN 1000 G /ANFO nécessitent un équipement de chargement spécifique qui ne doit être opéré que par du personnel ayant reçu une formation sur la gazéification chimique de Dyno Nobel.
- L'équipement de chargement de l'émulsion explosive TITAN 1000 G ou du mélange émulsion TITAN 1000 G/ANFO devrait être calibré régulièrement afin d'assurer la qualité du mélange et la puissance explosive.
- Surveillez continuellement la densité de l'émulsion explosive TITAN 1000 G et du mélange explosif d'émulsion TITAN 1000 G/ANFO pour assurer que l'équipement demeure calibré pendant le chargement.

Transport, entreposage et manutention

- Le TITAN 1000 G peut être entreposé pendant 3 mois à des températures variant entre -18 °C et 32 °C (0 °F et 90 °F). Les produits plus anciens devraient être utilisés en premier, et tous les réservoirs de stockage devraient être maintenus exempts de tout résidu.
- N'utilisez que des pompes ayant été approuvées par Dyno Nobel pour le transfert de la matrice d'émulsion 1.5 et non 5.1. Le type de pompe, la vitesse de la pompe, les pièces de pompes montrant de l'usure, le repompage et le pompage répétés contre des pressions de tuyau élevées peuvent augmenter la viscosité du TITAN 1000 G et en réduire la durée de conservation.
- Surveillez **TOUJOURS** le rendement de la pompe d'émulsion et vérifiez-la périodiquement pour identifier toutes pièces montrant une usure excessive. Organisez les installations d'entreposage afin de minimiser les pompages à répétition..
- Transportez, entreposez et manipulez le TITAN 1000 G conformément aux lois fédérales, de l'État, provinciales et locales régissant les liquides oxydants en vrac.

Avis de non-responsabilité Dyno Nobel Inc. et ses filiales s'exonèrent de toutes garanties expresses ou implicites concernant ce produit, sa sécurité ou sa pertinence, l'information contenue aux présentes ou les résultats qui en découleraient, Y COMPRIS MAIS NON DE FAÇON LIMITATIVE TOUTE GARANTIE IMPLICITE DE QUALITÉ MARCHANDE OU D'ADAPTATION À TOUT USAGE PARTICULIER ET/OU TOUTE AUTRE GARANTIE. Les acheteurs et les usagers assument tous risques, responsabilités et obligations de quelque nature que ce soit pour tous accidents (y compris la mort), pertes ou dommages à la personne ou à la propriété découlant de l'utilisation de ce produit ou de cette information. En aucun cas Dyno Nobel Inc. ou ses filiales ne seront tenues responsables de dommages spéciaux, indirects ou accessoires ou de pertes de profits escomptées.

Dyno Nobel Inc.
2795 East Cottonwood Parkway, bureau 500, Salt Lake City, Utah 84121 USA
Tél. : 800-732-7534 Téléc. : 801-328-6452 Web www.dynonobel.com

DYNO Dyno Nobel
Groundbreaking Performance™

UNIMAX®

Dynamite extra-gélatineuse à base de nitroglycérine

Information technique



Description du produit
L'UNIMAX est une dynamite extra-gélatineuse conçue pour satisfaire la plupart des applications de roc dur. Sa formulation offre avec consistance une haute vitesse de détonation ainsi qu'une excellente résistance à l 'eau. L'UNIMAX peut être utilisé comme charge principale d'explosifs là où un produit de haute densité et de puissance élevée est requis. L'UNIMAX peut également servir d'amorce pour les agents de sautage.

Recommandations d'application
- Diamètre minimal recommandé : 1 po (25 mm).
- Détonateur recommandé : force nº 8.
- L'entreposage à des températures élevées et/ou un taux d'humidité élevé pendant une période de 1 à 6 mois peut diminuer la performance de L'UNIMAX selon le diamètre de la cartouche. Consulter un représentant de Dyno Nobel pour des recommandations spécifiques.
- Les dynamites sont assujetties à la détonation sympathique lorsqu'elles sont utilisées dans des conditions très humides et où les trous de mine sont peu espacés et/ou des conditions géologiques sont propices. Consulter un représentant de Dyno Nobel pour des recommandations spécifiques à ces conditions.

Propriétés

MSDS #1019

Densité	(g/cc)	1,51
Énergie[a]	(cal/g)	1 055
	(cal/cc)	1 510
Puissance massique[a]		1,20
Puissance volumique[a,b]		2,10
Vitesse de détonation[c]	(m/s)	5 300
	(pi/s)	17 400
Pression de détonation[c]	(Kbars)	106
Volume de gaz[a]	(moles/kg)	32
Résistance à l'eau		Excellente
Classe des fumées		IME1 et NRCan1[d]

[a] Toutes les valeurs énergétiques ont été obtenues à partir du logiciel PRODETTM, développé par Dyno Nobel Inc. pour son usage exclusif. D'autres logiciels peuvent donner des valeurs différentes.
[b] ANFO = 1,00 @ 0,82 g/cc
[c] 2 po (50 mm) de diamètre, non confiné
[d] Ressources naturelles Canada, classe des fumées 1

Classification
Explosif de sautage, Type A, 1.1D, UN 0081 II



Voir la renonciation à la page 2.

DYNO Dyno Nobel
Groundbreaking Performance

UNIMAX®

Information technique

Transport, entreposage et manutention

- L'UNIMAX doit être transportée, entreposée, manipulée et employée en conformité avec toutes les lois et tous les règlements applicables aux niveaux fédéral, provincial et local.
- Afin de maximiser la durée du produit, la dynamite doit être entreposée dans un endroit frais, sec et bien ventilé. L'inventaire de la dynamite doit **TOUJOURS** se faire en mode de rotation en utilisant en premier les produits plus anciens. Pour connaître les bonnes pratiques recommandées pour le transport, l'entreposage, la manutention et l'usage de ce produit, consulter le livret intitulé « Prévention des accidents pendant l'utilisation des matériaux explosifs », inclus dans chaque caisse ainsi que les publications de Ressources naturelles Canada, Direction des explosifs.

Emballage

Diamètre x Longueur		Quantité/ Caisse	Type de caisse	Masse Nominale d'une Caisse	
mm	po			kg	lb
25 x 200	1 x 8	140	DA	20.4	44.8
32 x 200	1 1/4 x 8	88	DA	20.0	44.0
32 x 400	1 1/4 x 16	44	DA	20.0	44.0
40 x 200	1 1/2 x 8	60	DA	19.4	42.6
40 x 400	1 1/2 x 16	30	DA	20.5	45.0
50 x 200	2 x 8	34	DB	19.3	42.5
50 x 400[3]	2 x 16[3]	17	DB	19.3	42.5
60 x 400[3]	2 1/4 x 16[3]	14	DB	18.1	39.8
65 x 400[3]	2 1/2 x 16[3]	10	DB	18.6	41.0
75 x 200	3 x 8	16	DE	19.9	43.7
75 x 400[3]	3 x 16[3]	8	DE	20.4	44.8

* Disponible en cartouche de papier spirale.

** Disponible sur demande. Consultez le représentant Dyno Nobel de votre région si vous avez des questions..

- La densité du produit est de 1.50 g/cc pour des emballages dont le diamètre est moins de 50 mm (2 po.). Faire un décompte des cartouches afin de déterminer le poids de charge explosive.
- L'UNIMAX est offert dans une variété de dimensions. Certaines dimensions ne sont produites que sur commande spéciale et peuvent occasionner des frais supplémentaires et des délais de livraison plus importants.
- Pour toute question, consulter un représentant de Dyno Nobel.

Dimensions de la Caisse

DA	45 x 34 x 17 cm	17¾ x 13⅜ x 6⅝ po
DB	45 x 34 x 15 cm	17¾ x 13⅜ x 5⅞ po
DE	45 X 34 X 17 cm	17⅞ x 13 5/16 x 6¾ po

Renonciation Dyno Nobel Inc. et ses filiales n'offrent aucune garantie, implicite ou explicite sur ce produit, sa sécurité ou sa destination, ou sur les résultats escomptés, Y COMPRIS, MAIS SANS S'Y LIMITER, TOUTE GARANTIE IMPLICITE SUR SA VALEUR MARCHANDE OU SON EMPLOI DANS UN BUT PARTICULIER ET/OU QUELQUE AUTRE GARANTIE QUE CE SOIT. Les acheteurs et les usagers assument tous les risques et responsabilités, de quelque nature qu'ils soient, relatifs à toute blessure corporelle (y compris la mort), toute perte ou tout dommage occasionné à des personnes ou à des biens, découlant de l'emploi de ce produit. En aucun cas, Dyno Nobel ne sera responsable des bénéfices anticipés, ni de dommages exceptionnels ou accessoires pouvant résulter de l'emploi de ce produit.

Dyno Nobel Inc.
2795 East Cottonwood Parkway, bureau 500, Salt Lake City, Utah 84121 USA
Tél. : 800-732-7534 Téléc. : 801-328-6452 Web www.dynonobel.com

DYNO Dyno Nobel
Groundbreaking Performance™

RIOBOOSTER™ DET

Renforçateurs Moulés Sensibles aux Détonateurs

www.maxam.net

RIOBOOSTER

RIOBOOSTER™ DET est un renforçateur moulé sensible aux détonateurs, à haute energie, à haute densité et fiable qui possède un puits assez profond (102mm) pour accepter tous les détonateurs commerciaux.

RIOBOOSTER™ DET renforçateurs moulés utilisent une pastille sensibilisées brevetè pour ensurer "detonator sensitivity" (Minimum de force 8).

RIOBOOSTER™ DET est conçu pour tous les applications de surface et souterraines.

Le transport, l'entreposage et la manipulation doivent être effectués en confirmité avec les réglementations locales, provinciales et fédérales.

Les températures froides ne pas affecter la performance des renforçateurs moulés.

Les renforçateurs moulés sont sensible de rapture pendant manipulation dans les températures extrêmement froides.

RIOBOOSTER™ DET a une durée de vie de cinq ans lorsqu'il est entreposé dans une magazine endroit frais, sec et bien ventilé qui est approuvé pour les explosifs de 1.1D.

Classification de Matériel Dangereux
Renforçateur
Classe et Division 1.1D
PG II, UN 0042





RIOBOOSTER™ DET possède un puits assez profound (102mm) pour accepter tous les détonateurs commerciaux.

Avantages

- Fiable et facile à utiliser
- Plusieurs grosseurs disponibles pour répondre à toute application
- Haute pression de détonation
- Énergie de détonation concentré
- Un noyau à haute énergie sensibilisée
- Convient pour l'utilisation dans des températures froides
- Résistance à l'eau excellente

Toujours et Ne Jamais

TOUJOURS s'assurer que le détonateur est totalement inséré dans la cartouche de l'amorce ou du renforçateur et qu'il n'en ressort pas.

TOUJOURS utiliser des cartouches et/ou des renforçateurs qui sont compatibles avec le modèle spécifique du détonateur.

TOUJOURS préparer des amorces immédiatement avant leur chargement dans un trou de sautage et le plus près possible du moment du chargement des explosifs pour assurer que leur mise en place soit effectuée correctement, d'éviter qu'elles soient endommagées et obtenir une amorce efficace de la colonne explosive.

NE JAMAIS utiliser un renforçateur moulé si le trou du détonateur est trop petit.

NE JAMAIS agrandir le trou d'une amorce ou d'un renforçateur pour accepter un détonateur.

NE JAMAIS exposer des matières explosives à un choc ou friction excessif.

NE JAMAIS utiliser des matières explosives à moins de bien connaître les consignes de sécurité ou les l'utiliser sous la direction d'un superviseur qualifié.

NE JAMAIS charger RIOBOOSTER™ DET renforçateurs moulés dans un trou de sautage contenant des matières chaudes ou brûlantes.

NE JAMAIS préparer des amorces dans un entrepôt ou près de grandes quantités des matières explosives.

MAXAM

RIOBOOSTER™ DET

Caractéristiques Techniques

Grosseur du Renforçateur	Densité Nominale (g/cm³)	Vitesse de détonation nominale pi/s (m/s)	Diamètre Pouces (mm)	Longeur Pouces (mm)	Pression de détonation (kbars)	Unites par Caisse	NEM par Caisse (kg)
*90g (3,2 oz)	1,65	>25.000 (7.620)	1,000 (25)	4,70 (119)	262	112	10
*150g (5,3 oz)	1,61	>24.000 (7.315)	1,310 (33)	4,70 (119)	236	56	8,4
*230g (8 oz)	1,61	>24.000 (7.315)	1,503 (38)	4,70 (119)	236	60	14
*340g (12 oz)	1,61	>24.000 (7.315)	1,875 (48)	4,70 (119)	236	40	13,6
400g (14 oz)	1,61	>24.000 (7.315)	2,000 (51)	4,70 (119)	236	40	16
*450g (16 oz)	1,61	>24.000 (7.315)	2,170 (55)	4,70 (119)	236	28	12,6
*900g (32 oz)	1,61	>24.000 (7.315)	3,000 (76)	4,70 (119)	236	15	13,5

La vitesse de détonation est liée au type d'utilisation, au diamètre du trou, au confinement et à la densité.
Dimensions de la caisse: 19,5" x 11,625" x 5,25" (495mm x 295mm x 133mm)
Toutes les spécifications peuvent varier légèrement de la valeur nominale établie.
*Branded as Accurate Energetic Systems Cast Booster

Méthodes d'amorçage Recommandé



1ère étape: Insérer le détonateur dans le renforçateur moulé.



2e étape: faire passer le détonateur tout le long du renforçateur moulé.



3e étape: Insérer le détonateur dans le puits.

Exclusion de Responsabilité
Les produits décrits dans cette brochure sont vendus par l'entreprise sans garantie explicite, implicite ou légale, excepté pour la valeur commerciale, ou expressément mentionnée. En aucun cas, l'entreprise ne sera responsable des dommages ou des dépenses encourues, directement ou indirectement, par l'utilisation de tout produit ou méthode décrits dans la présente. Les produits sont destinés à être utilisés par des personnes ayant une compétence technique, à leur propre discrétion ou à leurs risques. Les propriétés et caractéristiques indiquées ainsi que les méthodes exposées sont basées sur des recherches et sur l'expérience. Elles sont considérées comme étant précises, et les acheteurs devraient appliquer de telles méthodes pour leurs fins particulières. L'acheteur et/ou l'utilisateur assument toute responsabilité pour toute lésion corporelle, dommage à la propriété ou autre perte causée par ou provenant de l'utilisation des produits décrits ou des données contenues dans la présente. L'acheteur et/ou l'utilisateur assument la pleine responsabilité pour l'application et la conformité aux lois fédérales, provinciales ou locales d'entreposage, de manutention et d'utilisation des produits décrits. Pour plus d'information sur les produits de RIOBOOSTER™ DET ou tout autre produit ou service de MAXAM North America, veuillez contacter votre représentant commercial ou encore une usine ou un bureau listés ci-dessous.

Distributeur:

Contactez votre représentant MAXAM pour plus d'information

(REV: 11/24/2015)

RIOXAM™

Mélange de Nitrate d'ammonium et de Mazout

www.maxam.net

RIOXAM

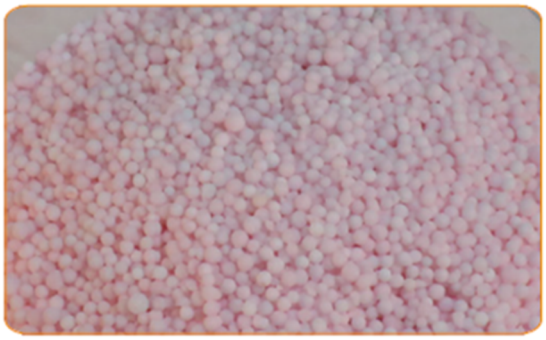
RIOXAM™ est un mélange de nitrate d'ammonium et de mazout efficace et économique.

RIOXAM™ est un agent de sautage écoule facilement sensible aux renforçateurs qui peut être versé, augurait, ou pneumatique chargé en des puits de forage secs ou humides de surface ou souterraine.

RIOXAM™ n'est pas recommendé pour l'utilisation dans des puits de forage humides.

RIOXAM™ se détériore rapidement lorsque la température se tient dépasse les 32°C (90°F).

RIOXAM™ doit être entreposé dans une poudrière pour produits explosifs en conformité avec les règlementations locale, provinciale et fédérale.



Toujours et Ne Jamais

NE JAMAIS verser RIOXAM™ dans un puits de forage de moins de 63,5 mm (2,5 pouces) de diamètre

NE JAMAIS charger RIOXAM™ par méthode pneumatique dans un puits de forage d'un diamètre de moins de 31,8 mm (1,25 pouces) ou de plus de 63,5 mm (2,5 pouces)

NE JAMAIS initier RIOXAM™ avec un cordeau détonant

Avantages

- Remplit complètement le puits de forage
- Manutention sécuritaire
- S'écoule facilement
- Faible coût

RIOXAM™ a une durée de vie de trois moins lorsqu'il est entreposé entre -17°C (0°F) et 32°C (90°F).

RIOXAM™ est emballé dans des sacs de papier multicouches en polyéthylène de 22,7 kg (50 lb) ou dans des sacs imperméables en polyéthylène de 25 kg (55 lb) ou peut être pré-mélangé et chargé en vrac par camion.

Classification de Matériel Dangereux
Explosif de Sautage de Type B
Classe et Division 1.5D
PG II, UN 0331
Classe de Fume 1

MAXAM

RIOXAM™



Caractéristiques Techniques	
[1]Densité Nominale g/cm³	0,84
[2]Vitesse de Détonation Nominale pi/s (ms/s)	9.800 - 17.400 (3.000 - 5.300)
Énergie kcal/kg	890
Puissance par unité de poids	100
Puissance par unité de volume	100
Résistance à l'eau	Faible
Diamètre de Puits de Forage Minimum (versé)	63,5 mm (2,5 in)
Diamètre de Puits de Forage Minimum (pneumatique)	31,8 mm (1,25 in)

[1]ANFO: Densité 0,84 g/cm³. Energie absolue 890 kcal/kg.
[2]La vitesse de détonation est liée au type d'utilisation, au diamètre du trou, au confinement et à la densité.
[3]La valeur maximale à l'intérieur de cette étendue représente la vitesse de détonation idéale.
Les calculs sont faits à partir du code W-Detcom, propriété de MAXAM.

Recommandations Relatives à l'utilisation

Exigences d'amorçage : RIOXAM™ est sensible aux renforçateurs et requis un RIOBOOSTER™ DET de 400g pour les trous de plus de 102 mm (4 pouces) de diamètre, et un renforçateur de 150g pour les trous de moins de 102 mm (4 pouces) de diamètre. Un renforçateur plus petit que 150g peut réduire la performance des explosifs et n'est pas recommandé. Des amorces additionnelles devraient toujours être utilisées lorsqu'il y a risque de perturbation de colonne et/ou que la longueur de la colonne excède 12 m. Il n'est pas recommandé d'utiliser des cordeaux détonants RIOCORD™ avec ce produit.

Imperméabilité : RIOXAM™ est approprié pour l'utilisation dans un sol sec seulement.

Durée de Séjour: RIOXAM™ peut avoir une durée de séjour allant jusqu'à six (6) semaines dans un sol sec. Contactez votre représentant de MAXAM si vous planifiez de laisser séjourner RIOXAM™ pour plus de 14 jours.

Ce produit n'est pas recommandé pour une utilisation dans un sol contenant des matières réactives.

RIOXAM™ ne doit être utilisé qu'à des températures de sol situées entre 0°C (32°F) et 55°C (131°F).

Exclusion de Responsabilité
Les produits décrits dans cette brochure sont vendus par l'entreprise sans garantie explicite, implicite ou légale, excepté pour la valeur commerciale, ou expressément mentionnée. En aucun cas, l'entreprise ne sera responsable des dommages ou des dépenses encourues, directement ou indirectement, par l'utilisation de tout produit ou méthode décrits dans la présente. Les produits sont destinés à être utilisés par des personnes ayant une compétence technique, à leur propre discrétion ou à leurs risques. Les propriétés et caractéristiques indiquées ainsi que les méthodes exposées sont basées sur des recherches et sur l'expérience. Elles sont considérées comme étant précises, et les acheteurs devraient appliquer de telles méthodes pour leurs fins particulières. L'acheteur et/ou l'utilisateur assument toute responsabilité pour toute lésion corporelle, dommage à la propriété ou autre perte causée par ou provenant de l'utilisation des produits décrits ou des données contenues dans la présente. L'acheteur et/ou l'utilisateur assument la pleine responsabilité pour l'application et la conformité aux lois fédérales, provinciales ou locales d'entreposage, de manutention et d'utilisation des produits décrits. Pour plus d'information sur RIOXAM™ ou tout autre produit ou service de MAXAM North America, veuillez contacter votre représentant commercial ou encore une usine ou un bureau listés ci-dessous.

Distributeur:

Contactez votre représentant MAXAM pour plus d'information

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

AEL Mining Services. 2014. *Surface Blasting Handbook*. En ligne. <https://mineportal.in/upload-study-material.php?imgaaa=1&imagename=BLASTING_HANDBOOK_601_mineportal.pdf>

Bernard, Thierry. 2009. *I-Blast 4 – Manuel de l'utilisateur.* Nice, France

Blanchier, Alain. 2013. *Quantification of the levels of risk of flyrock.* Londre, Angleterre

Cam, T & Bernard, S. 2012. *Uses for Blasting Instrumentation - Practical Applications.* Manotick (ON)

Cebrian, Benjamin. 2013. *Wall Control: Appropriate Techniques and Quality Controls for Good Results.* ISEE

Corkery, D & Cavers, W. 2013. *735-315 KV Switchyard Extension, Blasting Impact Assessment*. Nalcor Energy. St. John's (NL)

Corréard. 1835. *Journal des sciences militaires des armées de terre et de mer.* The Bavarian State Library. Munich, Allemagne

Davey Bickford Canada. 2006. *Le détonateur électronique: un système d'initiation de haute précision.* SEEQ

Dyno Nobel. 2010. *Blasting and Explosives Quick Reference Guide.* En ligne. <https://www.dynonobel.com/apac/resource-hub/publications/brochures>

Dyno Nobel. 2014. *Explosives Engineers' Guide* En ligne. <https://www.dynonobel.com/apac/resource-hub/publications/brochures>

Fant, Kenne. 2006. *ALFRED NOBEL : a Biography.* Arcade Publishing

Groleau, Pierre. 2012. *Expertise pour travaux de forage et de sautage en considération des impacts environnementaux.* Longueuil (QC)

Groleau, Pierre. 2018. *Expertise pour travaux de forage et de sautage.* Longueuil (QC)

H Dowding, Charles. 1980. *Structure Response and Damage Produced by Ground Vibration from Surface Mine Blasting.* Pittsburg (PA)

Hermans, Francis. 2005. *L'utilisation des Explosifs en Milieu Sous-Marin.* En ligne. <http://www.academia.edu/download/45380667/utilisation_des_explosifs_en_milieu_sous-marin.pdf>

Incorporated Research Institutions for Seismology. 2018. *Buildings & Bedrock: Effects of amplification & liquefaction.* En ligne. <https://www.iris.edu/hq/inclass/animation/buildings__bedrock_effects_of_amplification__liquefaction>

Loeb, J & Tannant, D. 2012. *Urban Blasting – Gaps in Regulatory Control*. Vancouver: University of British Columbia

Évaluation de la production de monoxyde de carbone associée aux travaux aux explosifs.

Martel, Richard et al. 2002. *Évaluation de la production de monoxyde de carbone associée aux travaux aux explosifs.* En ligne. <https://www.irsst.qc.ca/publications-et-outils/publication/i/857/n/evaluation-de-la-production-de-monoxyde-de-carbone-associee-aux-travaux-aux-explosifs-r-314>

MOECP. 1985. *Guidelines on information reqired for the assessment of blasting noise and vibration.* Toronto (ON)

Needham, Joseph. 1954. *Science and Civilisation in China*. Cambridge: Cambridge University Press

Oriard, Lewis L. 2002. *Explosives engineering, construction vibrations and geotechnology.* ISEE

Ozer, U, Karadogan, A, Kalayci, U, Aksoy, M & Keti, Z. 2012. *The effects of fault planes on the propagation of vibration waves.* Istanbul: Istanbul University

Petes, J , Miller, R & McMullan, F. 1983. *User's Guide and History of ANFO (Ammonium Nitrate/Fuel Oil) as a Nuclear Weapons Effect Simulation Explosive.* En ligne. <https://apps.dtic.mil/sti/citations/ADA151623>

Phelan, Keith. 2019. *Blast Impact Analysis of Proposed Quarry.* St. John's (NL)

P, Jonsén. 2012. *Modelling and simulation of explosions in soil interacting with deformable structures.* Central European Journal of Engineering

Reid, Richard. 2018. *Sautages d'essai d'atténuation des vibrations.* Longueuil (QC)

Richard A, D, Fletcher, L & D'Andrea, D. 1983. *Explosives and Blasting Procedures Manual.* Pittsburg (PA)

Richards, A & Moore, A. 2002. *Flyrock Control – By Chance or Design.* New Orleans (LA)

Sakcali, A, Yavuz, H & Cevizci, H. 2016. *Developing a Computer Software and an Android Application For Bench Blasting.* Istanbul, Turkey

Siskind, Stag, Kopp & Dowding. 1980. *Structure Response and Damage Produced by Ground Vibration from Surface Mine Blasting.* Pittsburg (PA)

Smith, Carlton. 1918. *TNT. Trinitrotoluenes and Mono- and Dinitrotoluenes, Their Manufacture and Properties.* Fb&c Limited

Sprengel, Hermann. 1903. *The discovery of picric acid (melinite, lyddite) "as a powerful explosive" and of cumulative detonation with its bearing on wet guncotton.* Eyre & Spottiswoode; 2. ed Edition

Trépanier, Francis. 2018. *Les pièges du dynamitage moderne*. SEEQ

Trex Lusk, Braden. 2006. *An analysis and policy implications of comfort levels of diverse constituents with reported units for blast vibrations and limits: closing the communication gap.* Missouri: University of Missouri

U.S. Bureau of Mines. 1996. *Dictionary of Mining, Mineral, and Related Terms.* U.S. Dept of the Interior; 2e Edition

Uysal, Ö. & Cavus, M. 2013. *Effect of a pre-split plane on the frequencies of blast induced ground vibrations.* Kütahya, Turkey

Wilson, Elizabeth K. 2017. *"What's in fireworks, and what produces those colorful explosions? Fireworks have thrilled crowds for centuries; now science is working to make their fallout more environmentally friendly".* En ligne. <https://cen.acs.org/articles/95/i27/s-fireworks-produces-those-colorful.html>

Woulfe, Peter. 1771. *A method of dying wool and silk, of a yellow colour, with indigo; and also with several other blue and red colouring substances.* Royal Society of London