MINES PARIS
ParisTech
CENTRE DE GEOSCIENCES

COLAS
La route avance

RAPPORT D'OPTION

ANALYSE ET OPTIMISATION DES PRATIQUES D'ABATTAGE A L'EXPLOSIF DANS UNE CARRIERE DE GRANULATS

Cécile COULOMBEZ

Option Sol et Sous-sol
REF : O070704CCOU

Juillet 2007

Résumé

Ce travail d'option repose sur l'analyse et l'amélioration des méthodes de tir à l'explosif dans une carrière de granulats, en vue de progresser dans la maîtrise de l'opération d'abattage.

L'étude a porté tout d'abord sur une caractérisation du contexte de la carrière choisie pour le travail, la carrière de Ruvernison dans le Finistère Nord, exploitée par la société Hélary Granulats.

La connaissance du phénomène de fragmentation à l'explosif a permis d'apporter un regard critique sur les principes théoriques de l'abattage réalisé. Afin d'évaluer les écarts qu'il peut y avoir entre théorie et mise en pratique, une analyse de la mise en œuvre effective de l'abattage au sein de la carrière a ensuite été effectuée, s'appuyant sur des données quantitatives obtenues par des mesures de chaque étape du processus. Ces mesures ont mis en évidence des écarts et incertitudes lors du passage à la pratique, à l'origine de résultats de tirs peu satisfaisants. Un tir-test travaillant sur quelques paramètres a fourni des conclusions encourageantes.

Ces résultats doivent permettre de progresser dans la qualité de la mise en pratique qui est actuellement faite, dans le but d'arriver à une meilleure maîtrise du tir et de ses conséquences directes.

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier le groupe Colas et particulièrement M. Genestar pour m'avoir offert l'opportunité de travailler au sein du groupe sur un sujet d'option vivement intéressant.

Merci également à Dominique Billon pour l'accueil qui m'a été réservé chez Hélary pendant ces quelques mois.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance à Olivier Guillou, responsable des carrières chez Hélary, et Bruno Mordelet, responsable du minage, pour leur accueil et leur patience à mon égard. Par leur intermédiaire, je voudrais remercier l'équipe de la carrière de Ruvernison et notamment le chef de carrière, Pierre-Yves Kergoat, pour sa disponibilité et sa coopération.

J'ai particulièrement apprécié travailler avec Luz-Deinny Cely-Hostos sur ce sujet, merci à elle pour son travail, son implication et sa compagnie lors de nos nombreux déplacements en Bretagne. Je tiens également à remercier chaleureusement son encadrant, Jean-Alain Fleurisson, pour ses précieux conseils.

Une pensée amicale et un grand merci à toute l'équipe de l'ancien CGES, notamment Michel Duchêne et Bruno Tessier, pour leur aide souvent indispensable, pour leur soutien et la bonne humeur qui règne à Fontainebleau.

Enfin, je tiens à exprimer toute ma gratitude à mon professeur d'option et tuteur de stage, Damien Goetz, pour ses conseils toujours avisés. Merci pour ces deux années d'études, pendant lesquelles il a patiemment supporté ses élèves turbulents…

Introduction

À mi-chemin entre l'usine et le chantier, une carrière de granulats exploite la masse rocheuse pour produire des agrégats de classe granulométrique donnée : ceci passe par un abattage, puis par un traitement par concassage et criblage, le matériel abattu subit alors une série de réductions et de classements granulométriques.

L'abattage à l'explosif est aujourd'hui la technique la plus simple et la plus répandue dans les carrières de roches massives. Elle permet de fragmenter des volumes importants de roche pour la reprise et le traitement du matériel abattu.

Tout en amont, première étape du processus, l'abattage à l'explosif constitue un élément clé de la chaîne : c'est le premier élément du processus industriel, et en particulier le premier élément de la chaîne de réduction granulométrique. L'abattage joue donc un rôle important sur une carrière : la maîtrise du tir va permettre de garantir la sécurité lors de l'opération, de limiter les coûts engendrés par l'opération en elle-même, de réduire les nuisances et satisfaire les contraintes règlementaires, et enfin d'obtenir une granulométrie adaptée aux installations et à ce que l'on veut faire du produit.

Cependant, les agrégats ayant une valeur unitaire faible, les marges dans l'industrie du granulat sont peu importantes. Par conséquent, les carriers ont souvent tendance à se concentrer sur l'aval du processus industriel, le produit fini, et peu sur l'amont, et les études techniques en recherche et développement dans le domaine de l'abattage souffrent quelque peu d'un manque de visibilité et d'enthousiasme quant à la mise en pratique chez les exploitants. Il existe toutefois différentes méthodes et divers outils qui permettent de mieux maîtriser l'abattage, pour améliorer son résultat. Mon étude m'a conduite à travailler avec ces différents éléments.

Mon travail d'option a porté sur l'analyse détaillée des méthodes d'abattage à l'explosif au sein d'une filiale du groupe Colas exploitant des carrières de roche massive en Bretagne. L'approche a été approfondie pour proposer des modifications dans les pratiques de tir sur la carrière de Ruvernison.

Dans la partie pratique de mon étude, j'ai été directement confrontée aux contraintes de production et au rythme de l'exploitation. Ainsi, le temps imparti était trop juste pour permettre une optimisation globale de la chaîne de production (ceci s'appuierait sur l'analyse du processus industriel complet, pour que l'abattage, le chargement, le transport et le concassage forment un ensemble le plus cohérent et le plus rentable possible, qui de plus limiterait les nuisances et répondrait aux exigences sécuritaires et légales). Une telle analyse nécessite des moyens, des données et des marges de manœuvre différents de ceux impartis dans le cadre d'un

travail d’option de quelques mois. Mais ce travail d’option s’inscrit dans cette optique et constitue une première étape vers la maîtrise du tir.

Après avoir replacé dans leur contexte les enjeux du travail d’option, nous détaillerons successivement dans ce rapport :

- les caractéristiques générales qui ont été établies pour la carrière sur laquelle le travail d’option s’est déroulé ;
- des aspects théoriques sur l’abattage, en vue d’apporter une réflexion sur le schéma de tir dimensionné pour cette carrière ;
- une évaluation de la qualité du passage à la pratique à partir de ce schéma de tir théorique ;
- des directions de travail suggérées à l’entreprise à l’issue du travail d’option.

Généralités

1. Présentation de l'entreprise et ses carrières

7 tonnes de granulats par habitant sont en moyenne produites chaque année en France : le granulat est donc le deuxième produit de consommation après l'eau.

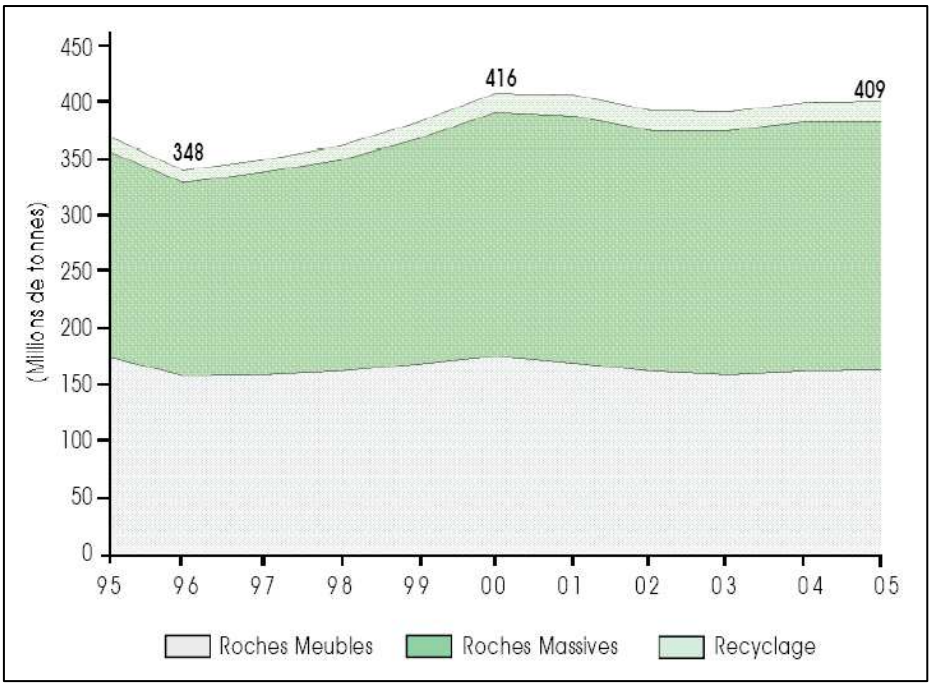


Figure 1
Production française de granulats, entre 1995 et 2005
Source UNICEM

La production française de granulats s'élève à 400 Mt par an, production à peu près constante depuis les dix dernières années même si la tendance actuelle, à la hausse, semble se confirmer. Comme représenté sur le graphe de la figure 1, on peut regrouper les sources de production de granulats en trois catégories :

- les roches meubles, de type alluvionnaire, granulats marins ou autres sables ;
- les roches massives, produites à partir de roches calcaires ou éruptives ;
- le recyclage, en très légère hausse, mais qui ne représente que 4% de la production nationale.

Le contexte règlementaire et environnemental actuel assez contraignant freine la production de granulats à partir de roches meubles : l'alluvionnaire ne progresse pas, les autorisations d'exploitation de gisements d'alluvions sont difficiles à obtenir. La croissance du marché est donc absorbée par les autres sources de production, c'est-à-dire essentiellement les roches massives.

La principale différence dans le procédé d'exploitation des carrières d'alluvions et des carrières de roches massives réside dans la première étape du processus : l'exploitation de

roches massives nécessite en effet un abattage du massif rocheux, abattage généralement réalisé à l'explosif.

Les prévisions quant à l'évolution du marché justifient donc l'intérêt actuel pour l'analyse et l'optimisation de l'opération d'abattage à l'explosif chez les exploitants.

Le premier acteur français dans la production de granulats est Lafarge, groupe français leader dans l'industrie extractive. Lafarge produit en effet des granulats et les valorise dans le ciment et les bétons (bétons prêts à l'emploi…). Les deux producteurs suivants en termes de volume sont respectivement Colas et Eurovia, deux groupes français dans le secteur des travaux publics. Aussi peut-on s'étonner de trouver à une si bonne position sur le marché des granulats deux groupes ayant un cœur de métier dans un secteur autre que l'extraction.

Il ne faut en fait pas perdre de vue que près de 40% de la production nationale de granulats est destinée au secteur des travaux publics, comme l'indique la figure 2. Les granulats sont valorisés par les entreprises de travaux publics dans la réalisation d'infrastructures routières (une route comprend plusieurs couches que l'on va réaliser avec des granulats de classes granulométriques différentes), et dans la fabrication de produits destinés aux TP et au génie civil, comme les enrobés, les bétons… Le marché des granulats représente ainsi, pour les entreprises de TP, un secteur économique clé et un pôle stratégique.

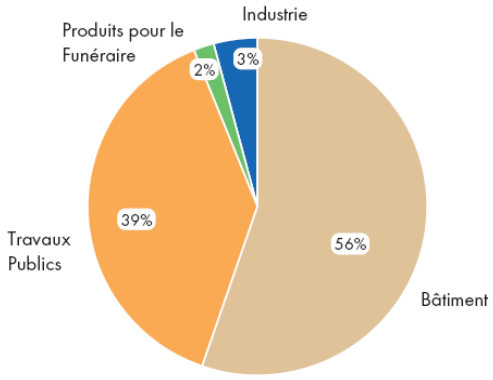


Figure 2
Le marché du granulat, répartition toutes branches réunies en 2005
Source UNICEM 2005

Présentation du groupe Colas

Colas est le leader français de la construction et de l'entretien d'infrastructures routières. Le chiffre d'affaire du groupe s'élève à 10,7 milliards d'euros en 2006. Le groupe français regroupe 60 000 collaborateurs dans près de 40 pays, mais réalise plus de la moitié de son chiffre d'affaire en France.

Près de 80% du chiffre d'affaire de Colas est effectué dans des activités liées au domaine de la route : ceci comprend la construction et l'entretien des routes, autoroutes, aéroports, plateformes logistiques, voiries urbaines, transports en commun en site propre, circuits automobiles, pistes cyclables, aires de loisirs, etc., mais aussi une importante activité industrielle. En 2006, Colas a produit 113 millions de tonnes de granulats (près de 59 millions de tonnes pour la France). L'activité industrielle comprend également la production d'émulsion de bitume et de liants ainsi que des enrobés réalisés dans plus de 600 centrales d'enrobage.

Néanmoins, les activités du groupe Colas s'étendent aussi dans d'autres métiers : sécurité routière, génie civil, canalisations, étanchéité, bâtiment, ferroviaire, dépollution de sites…

Depuis 2000, avec le rachat de Seco-Rail, le groupe diversifie ses activités dans le domaine du ferroviaire. Ce secteur est en développement, avec l'acquisition récente de la filière Spie-Rail. De plus, depuis janvier 2007, Seco-Rail exerce également une activité de fret ferroviaire : cette diversification contribue à renforcer l'indépendance du groupe dans le transport, notamment en ce qui concerne le transport des agrégats des carrières vers les centrales d'enrobage.

L'organisation administrative des différentes entreprises du groupe est assez complexe. Le groupe Colas regroupe plusieurs marques dans les différents secteurs d'activité : à titre d'exemple, le groupe Colas possède aujourd'hui trois réseaux d'entreprises, Colas, Screg et Sacer, qui sont concurrents sur le marché français des travaux routiers.

Le groupe Colas est ensuite organisé en filiales territoriales, zones d'influence régionales: la marque Colas est ainsi divisée en 7 filiales routières : Colas Nord-Picardie, Colas Centre-Ouest, Colas Est, Colas Ile-de-France Normandie, Colas Rhône-Alpes, Colas Midi-Méditerrannée, Colas Sud-Ouest.

J'ai ainsi réalisé mon travail d'option au sein de Colas Centre Ouest, dont la zone d'activité s'étend sur 17 départements appartenant à 4 régions (Bretagne, Pays de la Loire, Centre et Poitou). J'ai travaillé chez Hélary, filiale bretonne de Colas Centre Ouest.

Organisation du marché des granulats.

Les sources de production de granulats dépendent bien entendu du contexte local et des possibilités géographiques et géologiques. Les lieux de production sont généralement dans des zones économiquement pauvres, de type vieux massifs montagneux. Le socle granitique du massif armoricain représente par exemple une ressource importante de roches massives. Dans le tableau 1, qui représente les 5 premières régions productrices françaises, on remarque que l'exploitation de cette ressource place la région Bretagne en 3ème position dans les régions productrices françaises, avec environ 8% de la production nationale. La Bretagne est même la 2ème région pour l'exploitation de roches massives (produisant près de 12% de la production annuelle française).

Rang	Région	Roches meubles	Roches massives	Recyclage	Total
1	Pays de la Loire	11,3	32,2		43,5
2	Rhône Alpes	29	11,8	2	42,8
3	Bretagne	3,4	26,1	0,1	29,6
4	Provence	9,7	17,8	1,5	29
5	Midi Pyrénées	14	11,3	0,5	25,8
TOTAL NATIONAL		168,7	223,8	17,9	409,4

Tableau 1
Les cinq premières régions productrices françaises (en millions de tonnes par an)
Source UNICEM

Le granulat est un produit de faible valeur unitaire, considéré comme pondéreux : son prix de vente est de l'ordre de 6 € la tonne, mais l'opération de transport représente la majeure partie des coûts. Le granulat est ainsi un produit peu mobile, qui ne supporte pas un transport sur de grandes distances, d'où la nécessité d'avoir un réseau de carrières qui couvre harmonieusement le territoire de façon à répondre à la demande dans des conditions économiques acceptables.

Les transports du granulat se font en général par la route, pour des déplacements inférieurs à 150 km, puis par ferroutage pour les distances comprises entre 150 et 400 km. Des solutions mixtes existent également, s'appuyant par exemple sur des plateformes

reliées à la carrière par fer, puis transport par route ou voie d'eau, ou encore sur un transport par bateaux, depuis la Norvège ou l'Ecosse vers les ports du Havre ou d'Anvers où camions, trains ou barges prennent le relais pour le transport vers les zones de consommation.

Lorsque l'on considère l'organisation du réseau de carrières, la Bretagne est une région intéressante : la densité de carrières y est importante, et on y trouve de nombreuses petites exploitations. De plus, la carte des carrières en Bretagne (figure 3) est une bonne illustration du lien entre la densité de population et la densité de carrières.

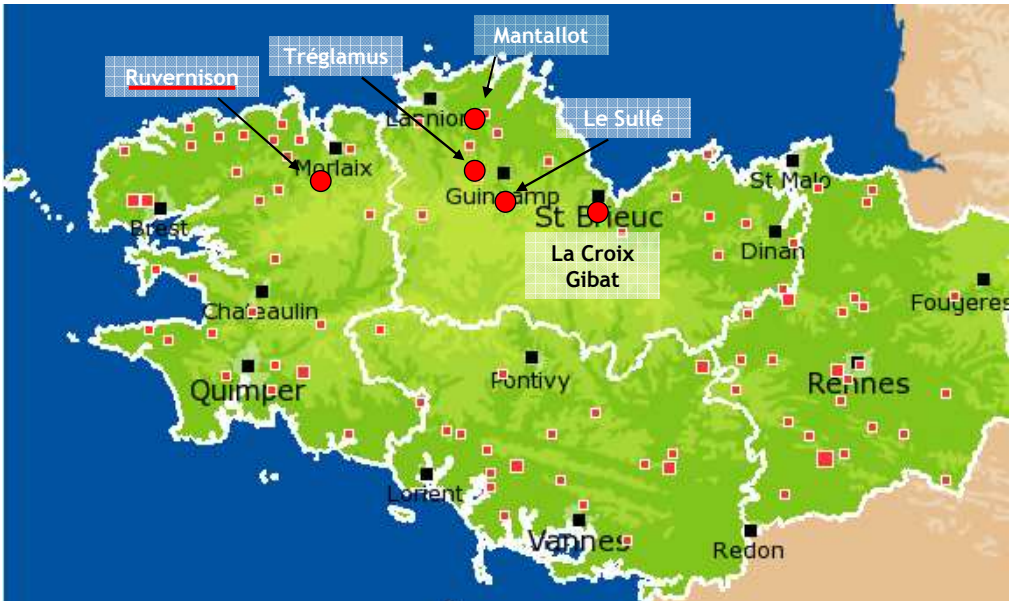


Figure 3
Carte des carrières de granulats en Bretagne,
Repérage des sites Hélary Granulats
Source UNICEM

J'ai effectué mon travail d'option au sein de la société Hélary, l'une des filiales bretonnes de l'entreprise Colas Centre Ouest. Hélary est une entreprise familiale de travaux publics, fondée en 1951, et rachetée en 1999 par le groupe Colas. Cette entreprise emploie 350 personnes réparties selon deux branches d'activité :

- une branche travaux publics qui réalise des opérations de construction et entretien d'infrastructures routières dans la région Bretagne et les régions avoisinantes ;
- une branche granulats qui exploite des carrières de roche massive dans les Côtes d'Armor et le Finistère. C'est au sein de cette branche que le travail d'option a été réalisé.

La branche Granulats regroupe une soixantaine de personnes entre le siège, à Ploumagoar dans l'agglomération de Guingamp, et les 5 sites d'extraction principaux et 3 zones d'emprunts (carrières exploitées plus occasionnellement). L'ensemble de ces sites représente une production annuelle de l'ordre de 1,2 millions de tonnes, destinées majoritairement à des centrales à béton, centrales d'enrobage, et entreprises de travaux publics, une partie de la production transitant en interne entre les branches Hélary Granulats et Hélary TP.

J'ai eu l'occasion de visiter les 5 exploitations principales d'Hélary Granulats : ces sites fonctionnent a priori sur un process similaire pour exploiter le même type de roche (roche éruptive issue du socle métamorphique armoricain), chaque site a néanmoins ses caractéristiques propres.

Le Sullé

Dans un contexte géologique très fracturé, la carrière du Sullé exploite une formation de gneiss granitoïde, à schistosité marquée. Des inclusions schisteuses traversent la carrière. La carrière entreprend actuellement une démarche de demande d'extension pour continuer à exploiter son gisement.

Cette exploitation, carrière historique de l'entreprise, produit environ 200 000 t/an, et possède un client particulier, la centrale d'enrobage d'Hélary TP installée sur le site.

Tréglamus

La carrière de Tréglamus est ouverte dans une formation métamorphique et volcanique. Le massif est peu homogène, divers faciès sont représentés.

La carrière vend 350 000 t par an, elle possède une installation de lavage des gravillons et une centrale d'enrobage mobile, en plus des traditionnelles installations de concassage primaire, secondaire et tertiaire.

Cette carrière arrive actuellement en fin d'autorisation, la demande d'extension est aujourd'hui en cours, et se confronte à l'acceptation de la population locale, peu réceptive au projet.

La Croix Gibat

Les activités de cette carrière ont repris fin 2006, après avoir été suspendues en 2006 en attendant l'acceptation de la demande d'extension. La carrière se situe dans la formation de migmatites de St Brieuc. On y retrouve deux faciès principaux, un gneiss et une gabbro-diorite. La carrière de la Croix-Gibat produit environ 200 000 t/an, principalement pour des centrales à béton.

De nouvelles contraintes ont été imposées pour l'extension de la carrière, à cause de la construction prochaine d'une rocade, qui passera à 30 m au nord de la carrière.

Mantallot

Située à proximité de Lannion, Mantallot exploite un gisement de cornéenne et produit environ 200 000 t/an. Cette carrière a été rachetée récemment, en 2005. Son acquisition récente la place dans un contexte particulier : Hélary Granulats se trouve actuellement obligée de corriger certains points insatisfaisants, conséquences des méthodes de l'ancien propriétaire, comme par exemple la géométrie de l'exploitation et l'allure des fronts.

Ruvernison

La carrière de Ruvernison, située dans le Finistère, produit, à partir d'un gisement de gneiss, environ 220 000 t/an de granulats.

Après un tour d'horizon de chaque exploitation, qui m'a permis de découvrir les méthodes de fonctionnement de ces carrières de granulats et les spécificités propres à chaque site, j'ai préféré sélectionner une carrière sur laquelle mon travail portera plus précisément, en élargissant éventuellement les méthodes testées sur les autres carrières si le temps imparti s'avérait suffisant.

La carrière de Mantallot n'a pas été retenue, car elle est en cours de correction (géométrie). Les carrières du Sullé et de Tréglamus ont également été écartées car elles arrivent en fin de gisement : sur ces trois carrières les marges de manœuvre au niveau de l'abattage semblaient très restreintes.

Restaient les carrières de la Croix-Gibat et de Ruvernison. La Croix Gibat a repris son activité après arrêt en 2006 dans l'attente de l'autorisation d'extension, qui a été accordée avec de nouvelles contraintes règlementaires, par exemple un abaissement du seuil de vibrations admissible de 10mm/s à 5mm/s. Ma préférence s'est donc orientée vers Ruvernison, carrière où les marges de manœuvre dans les différents domaines sont plus larges et suffisantes, et où le contexte règlementaire n'est pas trop contraignant.

2. Présentation du problème et du travail d'option

Le produit fini vendu par une carrière est un granulat : c'est un élément de roche, d'une taille inférieure à 125 mm. Les produits finis sont répartis en classes granulométriques, devant répondre à certaines normes : une classe granulométrique est définie par ses dimensions inférieures et supérieures, et la distribution des tailles à l'intérieur de cet intervalle. Les caractéristiques intéressantes pour un granulat varient en fonction de l'usage auquel ce granulat est destiné, la demande pour chaque classe granulométrique est ainsi fixée par le marché. Le prix du granulat dépend de la classe granulométrique. Typiquement, un sable, plus fin, est vendu plus cher. Cependant, il existe une taille en dessous de laquelle le produit fini n'est plus valorisable (car trop divisé et de moins bonne qualité au vu des particules argileuses qu'il peut contenir) : on désigne ces produits par le terme de « fines », qu'il va être intéressant de réduire.

Pour arriver au produit fini, la roche exploitée passe par des étapes successives :

- la première de ces étapes est l'abattage à l'explosif, qui regroupe les opérations d'implantation, de foration et de chargement du tir ;
- le tas abattu auquel on aboutit va alors être repris : ce sont les opérations de chargement et de transport du tas, réalisées au moyen d'engins de chantier type pelles hydrauliques et dumpers ;
- le produit arrive alors dans les installations de concassage/criblage. Après une série de réductions et de classements granulométriques, on aboutit au produit fini.

L'opération d'abattage est ainsi le premier élément du processus de réduction granulométrique, et joue un rôle particulièrement important dans une carrière :

- d'abord, sa maîtrise est essentielle pour limiter les coûts propres à cette opération : les opérations de foration et d'abattage représentent typiquement 25% à 30% du prix de revient des granulats. Un travail sur cette opération peut ainsi engendrer des économies notables ;
- ensuite, il faut voir que la maîtrise de l'abattage est essentielle pour limiter les nuisances générées par l'exploitation, répondre aux exigences réglementaires (en particulier en termes de vibrations) et garantir la sécurité de l'exploitation ;
- puis, une bonne maîtrise du tir permet de limiter les travaux de fragmentation secondaire des gros blocs qui peuvent être générés par le tir, et d'améliorer sensiblement les conditions de travail des équipements de chargement et de transport des produits abattus ;
- finalement, la granulométrie après tir a un impact non négligeable sur la répartition de la production finale entre les différentes classes granulométriques (la demande pour chacune de ces classes étant imposée par le marché), ainsi que sur la production de matériaux très fins, souvent non valorisables par les exploitants.

L’opération d’abattage à l’explosif s’insère ainsi dans une série d’opérations dont chacune a pour contrainte les résultats de l’opération précédente, et produit un résultat qui représentera par la suite une contrainte pour l’opération suivante… Aussi, en ne raisonnant pas uniquement sur l’opération d’abattage, mais sur une approche globale de la chaîne de production dans laquelle l’abattage est un élément, on va pouvoir dégager les contraintes et les objectifs, puis les moyens disponibles pour les atteindre, et trouver, non pas l’optimum, mais une solution qui satisfera la chaîne de production.

Tels sont ainsi les enjeux d’un travail d’option reposant sur l’analyse et l’amélioration de l’abattage à l’explosif dans une carrière de granulats. Deux directions de travail se dégagent dans ce problème, l’une plus théorique sur l’abattage en général, l’autre traitant de la mise en pratique de l’opération d’abattage au sein de la carrière de Ruvernison, en proposant des outils de mesure et de travail, puis des modifications éventuelles.

Ce travail d’option s’est ainsi déroulé en partie au centre de Géosciences de l’école des Mines de Paris, à Fontainebleau, pour ce qui concerne la partie théorie et traitement des résultats, et en partie sur le terrain chez Hélary pour les mesures et les expérimentations.

Une partie de ce travail a été effectuée en collaboration avec une stagiaire CESECO, formation spécialisée de l’école des Mines de Paris dans le domaine de la mine à ciel ouvert: Luz-Deinny Cely Hostos a en effet réalisé son projet de formation sur une méthodologie de mesure d’efficacité de tir, appliquée à la carrière de Ruvernison. Certains résultats établis par Mlle Cely Hostos ont été utilisés dans cette étude.

Partie 1 :
la carrière de Ruvernison

C'est la carrière de Ruvernison qui a été retenue pour l'application pratique du travail d'option. Dans cette partie, nous nous attacherons à décrire en détail le contexte et les caractéristiques de cette exploitation. La principale caractéristique d'un massif rocheux est en effet d'être globalement hétérogène et anisotrope ; l'étude des caractéristiques du massif est donc essentielle pour concevoir et réaliser un abattage bien maîtrisé.

1. Contexte général

1.1. Situation

La carrière de Ruvernison est l'une des 5 exploitations principales d'Hélary (voir figure 3 p.9). Elle est située dans le Finistère, au sud de Morlaix, sur la commune de Pleyber-Christ. Sur la carte géologique présentée en figure 4, elle est repérée par le cercle rouge.

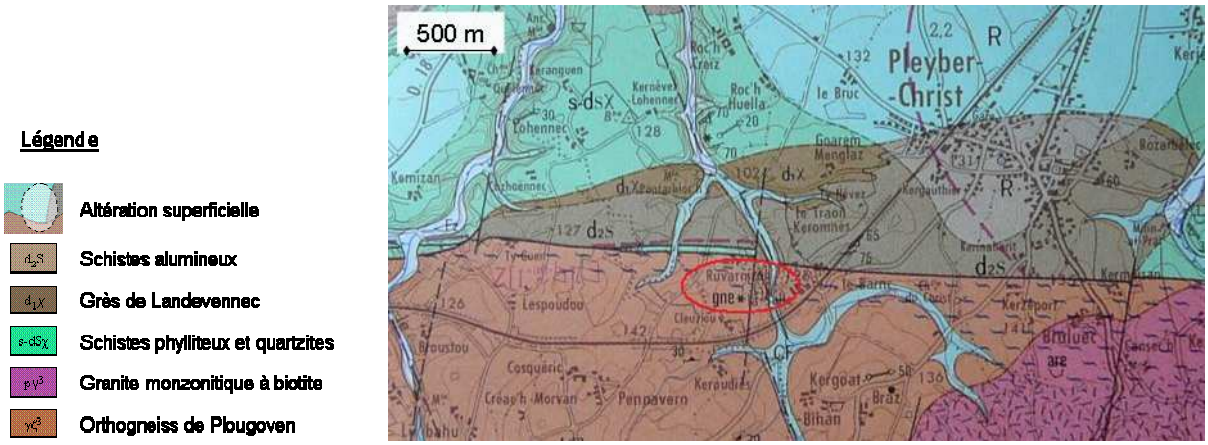


Figure 4
Carte géologique de la région de Morlaix

La région présente un affleurement important d'orthogneiss antéhercyniens. La carte géologique nous situe la carrière dans la formation d'orthogneiss de Plougoven. Un orthogneiss est une roche éruptive ayant été transformée par métamorphisme et déformation ductile : dans notre cas, il s'agit d'un granite qui, sous l'effet de hautes pressions et hautes températures, a été métamorphisé. Un mouvement associé à ce métamorphisme a déformé, étiré la roche lors de son métamorphisme, ce qui a conduit à orienter les cristaux dans une direction privilégiée appelée foliation. L'accident Nord Armoricain est à l'origine de ce métamorphisme et du déplacement associé.

La carrière se situe à proximité du cisaillement Nord Armoricain. Il s'agit d'un accident structural majeur du Massif Armoricain, un cisaillement dextre, orienté N100° qui peut être suivi sur près de 100 km (sur la figure 4, l'accident sépare en 2 zones de formations distinctes la carte géologique). Cet accident est une fracture crustale profonde, dont on peut observer des manifestations à plus petite échelle : sur une largeur excédent souvent 1 km, le

cisaillement a pu transformer les granites en mylonites. Une formation de mylonites affleure ainsi dans la partie nord de la carrière, mais n'est actuellement plus exploitée.

1.2. Exploitation

La vue d'ensemble de la carrière (figure 5) permet de visualiser la géométrie de l'exploitation. La surface de la carrière est aujourd'hui de l'ordre de 7 hectares. L'exploitation est menée selon 4 gradins (que l'on désigne en général par « palier »), par la méthode de l'abattage à l'explosif. Le premier palier est un palier de découverture de 7 à 8 m d'une roche très altérée, elle est tout de même valorisée en 0/80. Les paliers suivants ont des hauteurs de front de 15 m. Ils sont moyennement altérés (palier 2) à faiblement altérés voire sains (paliers 3 et 4).



Figure 5
Vue d'ensemble de la carrière de Ruvernison

Le tir d'abattage est réalisé à partir d'une vingtaine de trous, inclinés à 9°, de diamètre 102 mm, suivant une maille de 3,25 m de banquette et 3,5 m d'espacement. Les charges sont en général étagées, et l'amorçage est un amorçage fond de trou, par détonateurs électriques à court retard, tirés à l'aide d'un exploseur séquentiel à pas variable.

Quatre explosifs, délivrés par NitroBickford, sont en général utilisés sur la carrière, les descriptifs de ces explosifs sont fournis en annexe.

Le chargement et le transport du matériel abattu jusqu'aux installations de concassage/criblage est réalisé par pelle hydraulique et dumper. Le poste de concassage primaire produit une classe granulométrique de 0/30 valorisable, les concasseurs secondaires et tertiaires fabriquent le produit fini : sable, gravillon ou grave. Une station de lavage permet, en fonction de la demande, de produire un gravillon lavé.

La production de l'exploitation s'élève à 220 000 t/an. Les principaux clients de la carrière sont des centrales à béton, centrales d'enrobé et entreprises de TP. En cumulatif, les particuliers représentent environ 10% du chiffre d'affaire de la carrière.

Notons que, ces derniers temps, la productivité du poste primaire est quelque peu problématique. En effet, la présence régulière de blocs de dimensions importantes dans le tas abattu est à l'origine de bourrages dans le concasseur primaire, dont le gueulard de 1 m est assez petit ; les interruptions successives pour débloquer l'installation perturbent la production. Pour éviter ces blocages, le chauffeur de pelle se trouve obligé de trier le tas, mettant de côté certains blocs trop volumineux (pour un travail ultérieur au brise-roches hydraulique) ou pré-concassant les blocs par « drop-ball » (chute du bloc sur une boule en

acier). Là encore, ces opérations détournent les engins de leur utilisation habituelle, et perturbent la production. Ces blocs volumineux dans le tas abattu sont donc problématiques. Contrairement aux autres carrières Hélary, où les plus gros blocs sont produits lors de l'abattage des paliers inférieurs (plus sains donc moins pré-fracturés), à Ruvernison, c'est dans le deuxième palier (moyennement altéré) que l'on trouve statistiquement le plus de blocs.

2. Caractérisation du massif rocheux

Il ne faut pas perdre de vue que l'opération d'abattage travaille directement sur le massif rocheux, il est donc important de connaître le contexte dans lequel on travaille. J'ai pour cela cherché à caractériser le massif à deux niveaux :

- à petite échelle, pour connaître la roche et ses propriétés ;
- à grande échelle, le massif est caractérisé par son hétérogénéité et ses discontinuités potentielles

2.1. Caractérisation à petite échelle : caractérisation de la roche

La roche exploitée à Ruvernison est un gneiss granitoïde.

On dispose d'informations succinctes concernant la composition du matériau, via une étude géologique de la carrière effectuée en 2005.

La roche a l'aspect d'un granite assez clair. On distingue à l'œil nu le quartz, en cristaux vitreux millimétriques, les feldspaths plus beiges, millimétriques, et les micas noirs, plus ou moins disposés en petits lits ou en petits amas.

Les caractéristiques du matériau initialement disponibles sont rassemblées dans le tableau 2.

Densité	2,7
Los Angeles	17
MicroDeval	12
Teneur en alcalins actifs	0,0043 %
Teneur en sulfates	0,04 %
Teneur en ions chlore	0
Evaluation des fines – essai au bleu de méthylène	7,60 g
Soufre total	0,10 %

Tableau 2
Caractéristiques du granulat de Ruvernison,
Source LGTR, Hélary

Ces éléments sont des caractéristiques commerciales, destinées aux clients. Ce sont les caractéristiques des produits finis (granulats) qui vont servir à déterminer les utilisations envisageables pour le matériau (type de béton par exemple). Ces informations sont cependant insuffisantes pour une étude au niveau mécanique.

J'ai par conséquent réalisé des essais mécaniques et des mesures physiques sur les échantillons, de façon à obtenir des données parlantes en géotechnique.

Des échantillons des paliers 2 (moyennement altéré) et du palier 3 (roche saine) ont ainsi été prélevés, en vue :

- d'obtenir les caractéristiques mécaniques du gneiss exploité ;

- de mettre en évidence une éventuelle anisotropie et une éventuelle différence de propriétés entre les paliers supérieurs et inférieurs.

Des essais de compression simple avec jauge, des essais brésiliens, des essais de dureté et d'abrasivité CERCHAR et des mesures physiques (vitesse du son et densité) ont été réalisés à la halle d'essais de Fontainebleau. Les résultats seront présentés dans la suite.

Les essais mécaniques et physiques nous permettent de déterminer :

- la résistance à la compression simple ;
- la résistance en traction ;
- le module d'Young ;
- le coefficient de Poisson ;
- la vitesse du son ;
- l'abrasivité du matériau ;

2.1.1. Caractérisation de l'anisotropie

Une faible foliation était visible sur l'échantillon du palier 2 et nettement moins évidente sur l'échantillon du palier 3. J'ai donc choisi, pour l'échantillon du palier 2, de tailler des éprouvettes dans deux directions, parallèlement et perpendiculairement à la foliation, en vue de tester l'anisotropie de la roche.

Les résultats sont présentés dans le tableau 3 ci-dessous.

		Vitesse du son (m/s)	Résistance en compression simple (MPa)	Résistance en traction (MPa)
Palier 2	Parallèlement	4800	98,5	10,9
	Perpendiculairement	5000	96,6	9,0

Tableau 3
Caractéristiques mécaniques du palier 2

Sur les mesures de vitesse du son, on constate ainsi qu'une anisotropie est visible, ses effets ne sont cependant pas confirmés dans les mesures de résistances de la roche. Les variations dans les valeurs de résistance en compression simple mesurées s'inscrivent dans les dispersions des mesures. Notons cependant que, sur la résistance en compression simple, le résultat est contraire à ce qu'on attend car ici, l'échantillon taillé parallèlement à la foliation présente une résistance supérieure à celui taillé perpendiculairement.

Ceci confirme ce que l'on pouvait pressentir par nos observations à l'œil nu : la foliation difficilement identifiable n'engendre pas une anisotropie particulière. Ce gneiss se rapproche plutôt d'un granite.

Ces essais permettent donc de conclure qu'il existe donc bien une petite anisotropie géologique, due à la foliation. Mais il s'agit d'une orientation de minéraux et non de fracturation, et cette anisotropie géologique ne s'accompagne pas d'une anisotropie géotechnique. Cependant, ces conclusions sont tirées à l'échelle de l'essai ; à l'échelle de la carrière, les choses peuvent être différentes, si l'on a une fracturation préférentielle dans une direction donnée.

2.1.2. Effets de l'altération

La réalisation d'essais sur des échantillons de deux paliers, le deuxième et le troisième, permet de tester les effets de l'altération sur les propriétés physiques et mécaniques de la roche.

Les résultats obtenus (présentés dans le tableau 5) pour chacun des paliers sont quelque peu différents : l'altération joue un rôle, et la roche du palier 2 (plus altérée) est moins compétente que celle du palier 3.

Les résistances en compression simple de la roche sont comprises entre 95 MPa et 135 MPa, ce qui correspond à une roche très résistante.

Le rapport des résistances en compression simple et résistance en traction de la roche, ou degré de fragilité, nous donne pour le gneiss de Ruvernison un caractère fragile. Cet indice permet d'évaluer la forabilité et le comportement à la rupture des roches dures.

2.1.3. Essais d'abrasivité

Un comportement particulier de la roche a été observé lors du carottage (carottage long et difficile). Il m'a donc semblé pertinent de réaliser des tests d'abrasivité sur les échantillons de roche.

L'abrasivité CERCHAR est obtenue par la mesure du méplat engendré, sur une pointe conique, par un mouvement de rotation et translation standard.

Le test de dureté CERCHAR repose également sur la mesure de l'usure d'une pointe d'outil attaquant la roche. Il existe une corrélation entre les résultats de ce test et les mesures de résistance en compression simple de la roche.

Les résultats de ces tests, présentés dans le tableau 4, indiquent que l'on est face à une roche extrêmement abrasive, caractère qui va intervenir dans son comportement lors de la foration : la roche va être d'une part résistance donc difficile à forer, et d'autre part abrasive, donc user plus rapidement les taillants de foration. La roche de Ruvernison a en effet une abrasivité élevée (jusqu'à 5 pour certains tests, sachant que la roche la plus abrasive, le quartz, se place à 7 sur l'échelle d'abrasivité CERCHAR).

	Abrasivité CERCHAR	Dureté CERCHAR
Palier 2	4,0	29
Palier 3	4,5	38,0

Tableau 4
Mesures d'abrasivité et de dureté CERCHAR

2.1.4. Résumé des caractéristiques mécaniques et des mesures physiques

		Vitesse du son (m/s)	Résistance en compression simple (MPa)	Résistance en traction (MPa)	Module d'Young	Coefficient de Poisson	Abrasivité CERCHAR
Palier 2	//	4800	98,5	10,9	49200	0,2	4
	⊥	5000	96,6	9,0		*0,16*	
Palier 3		5500	135	8,9	61000	0,23	4,5

Tableau 5
Résumé des caractéristiques mécaniques et physiques de la roche de Ruvernison

NB : certaines régressions linéaires donnent un coefficient de Poisson de 0,16, qui n'est pas recevable. Avec des roches dures, les mesures du coefficient de poisson sont en effet parfois moins fiables ; d'autres problèmes expérimentaux peuvent également se présenter (position de la jauge par exemple). A partir de 0,2, les valeurs du coefficient de Poisson sont acceptables. Nous retiendrons ces valeurs.

Une première analyse de ces données nous indique donc que la roche exploitée à Ruvernison est une roche très compétente, d'où vraisemblablement une bonne qualité de matériau en sortie, mais de probables difficultés à l'abattage. Ces propriétés mécaniques et physiques vont nous servir par la suite à adapter le plan de tir au massif rocheux.

2.2. Caractérisation à grande échelle : caractérisation du massif rocheux

La principale caractéristique d'un massif rocheux est d'être hétérogène, ce qui vient compliquer la conception et la réalisation d'un plan de tir. Cette hétérogénéité va affecter la structure du massif, en fonction des contraintes tectoniques subies (présence de discontinuités) et de sa nature. Ainsi, la caractérisation de la carrière à grande échelle passe par l'étude de l'hétérogénéité et de la fracturation du massif.

2.2.1. Hétérogénéité du massif

La carte géologique situe l'exploitation dans une seule formation, celle des granites de Plougoven. Les formations métamorphiques sont en général données comme plus homogènes que les formations sédimentaires, mais la continuité de la matrice rocheuse peut être affectée par la présence d'hétérogénéités d'origine syngénétiques ou postgénétiques.

Pour le gneiss exploité à Ruvernison, on peut établir que la principale hétérogénéité synmétamorphique est la foliation.

D'autres phénomènes postgénétiques viennent affecter l'homogénéité du massif. On observe par exemple une poche de mylonites qui affleurent dans le nord de la carrière, et qui ne sont actuellement plus exploitées. D'autre part, les essais mécaniques ont mis en évidence l'altération des parties superficielles du massif, altération qui se manifeste également par l'oxydation, modifiant la couleur de la roche. On peut enfin remarquer l'affleurement de filons de quartz recristallisé au sud-ouest de la carrière.

Il est important d'avoir une connaissance des hétérogénéités du massif, qui vont pouvoir avoir une influence sur le tir et son efficacité, sur la stabilité du massif rocheux, sur la précision des opérations, mais également, bien plus en aval, sur le produit fini : on constate à Ruvernison que les filons de quartz peuvent par exemple engendrer des grains au comportement différent lors de l'enrobage.

2.2.2. Discontinuités du massif

On désigne par discontinuité une interruption de la roche qui résulte de la formation du massif. Les discontinuités dans la carrière de Ruvernison peuvent être d'origine métamorphique (diaclases, plans de foliation) ou tectonique (failles, fractures). Ce réseau de discontinuités confère au massif une structure, importante à connaître pour l'opération d'abattage.

2.2.2.1. Levés de discontinuités

Les informations mesurables sur les discontinuités sont de nature géométrique (orientation du plan, trace…) et de nature « mécanique » (altération des épontes, matériau de remplissage, rugosité, présence d'eau…). Les informations qualitatives sont intéressantes pour un traitement en profondeur et une reconstitution de l'histoire du massif. Mais pour notre étude, nous avons uniquement besoin des informations géométriques.

La caractérisation de chaque discontinuité va ainsi reposer sur les paramètres suivants :

- l'orientation, qui définit la position du plan de discontinuité dans l'espace, par deux valeurs (voir l'illustration sur la figure 6):
    - l'azimut (direction par rapport au nord) de l'horizontale du plan. C'est un angle compris entre 0 et 180° ;
    - le pendage, inclinaison de la ligne de plus grande pente du plan. En général, les valeurs de pendage sont prises entre 0 et 90°, ce qui laisse deux plans

possibles. On précise alors l'information par la direction de versement du plan ;

- l'espacement entre deux discontinuités est la distance entre elles ;
- l'extension de la discontinuité correspond, en toute rigueur, à la surface totale de la discontinuité dans l'espace. Sur le terrain, on approche ce paramètre en mesurant la trace de la discontinuité.

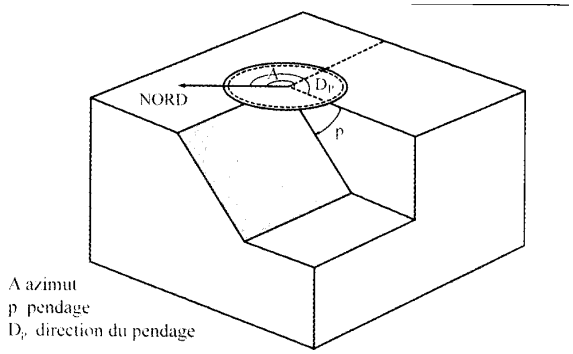


Figure 6
Orientation d'une discontinuité

Pour lever les discontinuités du massif, la méthode dite « de la ligne de mesure » est appliquée. Sur les fronts d'exploitation, une ligne est tendue, on mesure ensuite de manière systématique les paramètres des discontinuités qu'elle intercepte. Cela nous fournit alors un échantillon de discontinuités qui nous servira de base de données pour des traitements statistiques.

Les mesures des orientations des discontinuités du massif permettent un premier classement en familles de discontinuités (même orientation). En fonction de leur continuité et de leur connectivité, ces directions définissent également des blocs dans le massif, et vont gouverner l'anisotropie du massif (comportement mécanique, hydraulique...). Les informations de trace et d'espacement vont permettre ensuite de caractériser plus précisément ces familles.

Il faut voir que la méthode de la ligne de mesure n'est pas parfaite dans l'information qu'elle donne sur la distribution statistique des discontinuités. Cette méthode est en quelque sorte biaisée : les discontinuités de grande trace ont plus de chance d'être intersectées par la ligne de mesure, et vont ainsi sembler plus « rapprochées ». Cependant, le fait de prendre des lignes de mesures dans plusieurs directions permet de limiter ce biais par un échantillonnage en « 3D ».

Notons également que les discontinuités visibles sur le massif peuvent également résulter d'effets arrières de tirs précédents : il s'agit du cas où le travail de l'explosif d'un tir précédent a contribué à pré-fragmenter l'arrière du front. Il est cependant difficile de distinguer les discontinuités initiales de celles créées par le tir ; ceci n'a, en fin de compte, que peu d'importance dans notre étude, qui cherche à déterminer la structure globale du massif exploité.

Sur la carrière de Ruvernison, les levés systématiques de discontinuités ont été effectués sur les paliers jugés mesurables (accessibles et assez peu altérés). Nous avons effectué un certain nombre de mesures sur des lignes aux orientations variables (voir tableau 6). L'ensemble forme donc une base de 510 données de discontinuités, ce qui représente un échantillon suffisant pour être traité par des méthodes statistiques.

Palier No	Nombre de lignes de mesures	Nombre de discontinuités
2	5	139
3	14	371
Total	**19**	**510**

Tableau 6
Relevés de discontinuités sur la carrière de Ruvernison

2.2.2.2. Analyse des données.

Trois étapes successives sont proposées pour le traitement de la base de données de discontinuités: tout d'abord la représentation des orientations des discontinuités et le classement en familles directionnelles principales, puis la visualisation 3D et l'analyse de la densité de fracturation, et enfin la caractérisation de la blocométrie en place. Cette étude a été effectuée par Luz-Deinny Cely Hostos. Nous détaillons dans la suite le principe de la méthode utilisée, et les résultats obtenus.

2.2.2.2.1. Sélection des familles de discontinuités

Des méthodes de projection vont permettre de synthétiser et représenter les orientations des discontinuités en 2D. Les représentations classiques sont les projections dans un cercle équatorial selon les méthodes de Wulff ou de Schmidt.

Pour ces méthodes stéréographiques, on s'intéresse au vecteur normal au plan de discontinuité (qui contient à la fois l'information de pendage et l'information d'azimut). Ce vecteur intersecte la sphère de travail (sphère de référence), en un point appelé pôle, comme la figure 7 l'illustre. Les méthodes de Schmidt et de Wulff sont deux moyens possibles de projection de ce pôle dans le plan équatorial de la sphère : la projection de Wulff conserve les angles, et permet ainsi d'étudier les relations entre les positions dans l'espace des différentes familles de discontinuités. La seconde conserve les surfaces, et permet d'évaluer la densité des discontinuités en fonction de leur répartition.

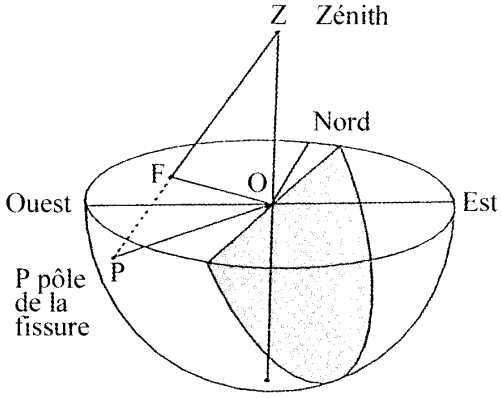


Figure 7
Projection de Wulff

Ces projections stéréographiques permettent ainsi de distinguer des familles directionnelles dans la base de données. Certaines familles pouvaient déjà être pressenties sur le terrain, ou peuvent être devinées sur les projections stéréographiques. Cette approche intuitive n'est cependant pas très rigoureuse : on la complète par l'analyse statistique des données d'orientation des familles de discontinuités.

Le logiciel DISTAT, développé par le Centre de Géosciences de l'Ecole des Mines de Paris, effectue ainsi une classification automatique de la base de données, en proposant des regroupements en familles directionnelles suivant les vecteurs normaux les plus proches. A

partir des écarts-types et des coefficients de corrélation des régressions statistiques, nous pouvons sélectionner un nombre de familles satisfaisant d'un point de vue statistique, et cohérent avec notre intuition du massif rocheux. Nous avons ainsi retenu 7 familles, en introduisant une petite subtilité : les discontinuités de grande trace (supérieure à 4 m) ont été traitées comme une famille à part, par une approche non pas statistique, mais déterministe.

On caractérise alors ces familles directionnelles par 4 paramètres, leur orientation, leur pendage, leur extension et leur espacement, définis par des distributions statistiques ajustées aux données mesurées. Les lois d'ajustement sont en général des lois log-normales ou des lois exponentielles négatives.

Les données des ajustements pour chacune des familles sont disponibles en annexe.

2.2.2.2.2. Modélisation des discontinuités du massif

Ces méthodes de levés de discontinuités ne fournissent qu'une information sur la trace et l'espacement tels qu'ils affleurent sur le front mesuré. A partir de ces données 2D, il faut maintenant passer en trois dimensions. L'approche réalisée par le logiciel SIMBLOC, développé par le Centre de Géosciences de l'ENSMP, considère que l'on peut simuler les discontinuités du massif rocheux en 3D par des disques. Il faut alors déterminer la densité volumique de ces disques et leurs rayons. Les rayons des disques sont les extensions des discontinuités, et on peut déterminer ces extensions à partir des traces des discontinuités mesurées dans la base de données. Le passage des paramètres de trace aux paramètres d'extension n'est cependant pas forcément évident, et peut introduire des biais (*J.-A. Fleurisson, 1995*).

Le logiciel SIMBLOC permet ainsi de simuler en trois dimensions les discontinuités présentes sur un bloc de massif rocheux, qui répondent aux distributions des 7 familles établies précédemment. Le massif rocheux de Ruvernison a été simulé de la manière suivante (d'après *Cely Hostos*, 2007) :

- le groupe de discontinuités de grande trace (supérieure à 400 cm) a été implanté de manière déterministe dans le bloc de simulation, c'est-à-dire qu'on a introduit dans le modèle les données brutes mesurées sur le terrain ;
- les discontinuités de petite trace ont été générées aléatoirement à partir des données statistiques.

Cette distinction a été faite pour que le modèle simulé approche au mieux la réalité observée sur le terrain : sur les fronts de la carrière, on distingue nettement un réseau de discontinuités de grande extension. De plus, cette distinction permet a priori d'éliminer une partie du biais introduit par les discontinuités de longue trace, pour lesquelles la probabilité d'intersecter la ligne de mesure est plus élevée.

Différentes simulations ont été réalisées, avec des lois normales ou exponentielles négatives pour les densités de discontinuités. Plusieurs tirages ont été réalisés pour chacune de ces simulations, afin d'éviter de trop particulariser un échantillon simulé.

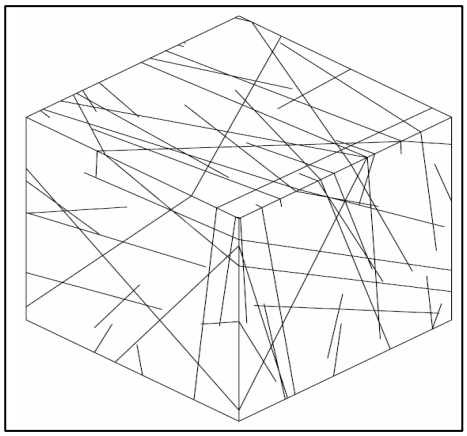


Figure 8
Simulation tridimensionnelle des discontinuités du massif rocheux de Ruvernison

Le modèle finalement retenu (figure 8) considère un bloc de simulation de 8 m x 8 m x 8 m, où les densités des disques suivent une loi exponentielle négative. Ce modèle a été adopté pour plusieurs raisons.

D'un point de vue statistique d'une part, c'est celui pour lequel l'écart entre les différents tirages est le moins important et le volume simulé correspond à un volume expérimental représentatif.

D'autre part, au niveau qualitatif, le bloc rocheux simulé est celui qui se rapproche le plus de la réalité du terrain. Le dernier argument s'appuie sur une interprétation structurale qualitative ; on constate en effet que les discontinuités dans les massifs rocheux suivent en général des lois log-normales ou des lois exponentielles négatives. Les massifs granitiques vérifient souvent les lois exponentielles négatives. En effet, en général plus anciens que les massifs sédimentaires, ils sont au départ relativement homogènes, puis ont subi différentes phases tectoniques ; chaque phase de déformation se superposant à la précédente, les discontinuités qu'elle crée recoupent les discontinuités plus anciennes. On se trouve alors face à un massif avec beaucoup de discontinuités de faible extension, et peu de très grandes (caractéristiques d'une loi exponentielle). Les massifs sédimentaires quant à eux, suivent plutôt des lois normales, on y mesure en effet beaucoup de discontinuités d'extension proches de la moyenne (tailles caractéristiques des bancs sédimentaires).

2.2.2.2.3. Blocométrie in situ et taille caractéristique

A partir du bloc que l'on a simulé, une analyse de continuité et de connectivité des discontinuités permet de déterminer le volume des blocs définis. On peut donc établir un histogramme de pourcentage du volume des blocs par rapport au volume total, en fonction de la taille des blocs. La taille est définie comme le côté d'un cube de même volume que le bloc, approximation qui n'introduit pas de facteur de forme. La courbe cumulée de cet histogramme correspond à la courbe blocométrique.

On approxime cette courbe blocométrique par une distribution théorique, dite de Rosin-Rammler. Cette courbe repose sur deux paramètres intrinsèques :

- x_c, ou taille caractéristique, qui correspond à la taille des blocs à 63% de passant ;
- n, indice de forme, qui traduit l'hétérogénéité de la distribution granulométrique.

La loi de Rosin Rammler est de la forme

$$F(x) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{x}{x_c}\right)^n\right)$$

Équation 1, courbe de Rosin Rammler

Avec F(x) : pourcentage de passants à la taille x
x_c : taille caractéristique
n : pente de la régression linéaire dans la méthode de Rosin-Rammler

La courbe blocométrique du massif rocheux de Ruvernison est présentée dans la figure 9 :

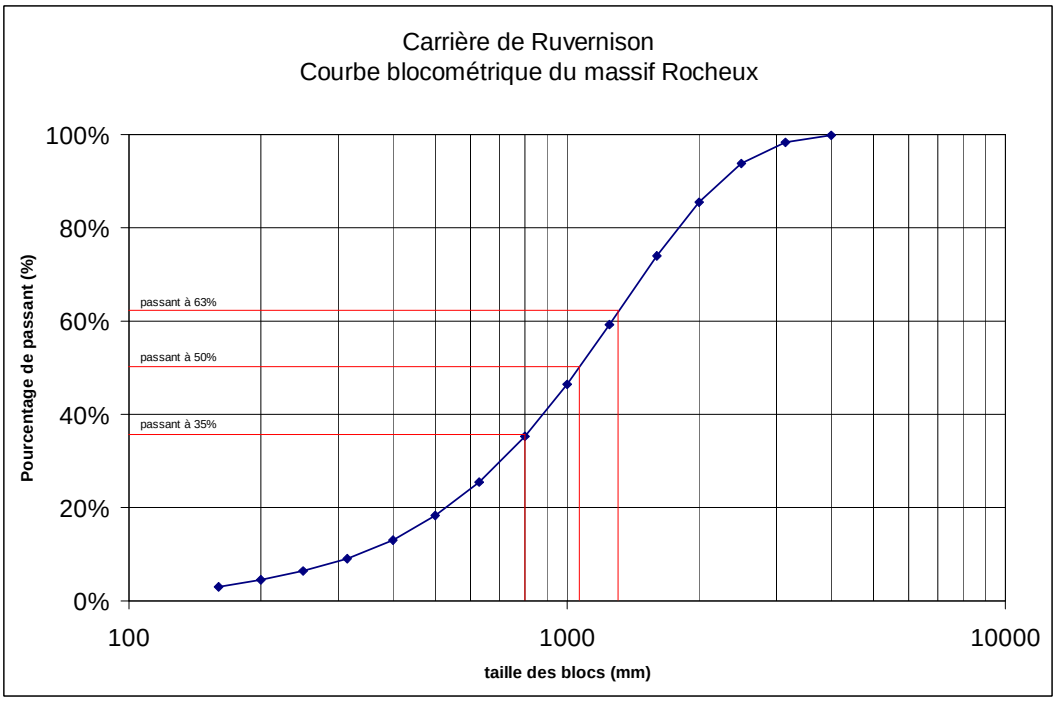


Figure 9
Courbe blocométrique du massif de Ruvernison
Source : Cely Hostos, CESECO, 2007

La taille moyenne de la distribution blocométrique (passant à 50%) est donc de 1,14 m, la taille caractéristique de la courbe est de 1,34 m.

2.2.2.3. Conclusions sur la fracturation du massif rocheux

Selon la classification proposée par J. Du Mouza et F. Hadj Hassen, 2002, les discontinuités confèrent à la roche de Ruvernison une structure massive.

La connaissance de la blocométrie in situ du massif rocheux permet de quantifier les informations géologiques de la formation. D'autre part, ceci nous permettra d'établir un plan de tir adapté au contexte local de la carrière.

Cette étude pourrait être complétée par une étude géologique structurale plus poussée pour préciser la connaissance du gisement.

Une caractérisation blocométrique palier par palier aurait également été une approche intéressante, pour déterminer par exemple l'importance de l'altération dans la blocométrie in situ. Cependant, cette approche n'a pas pu être réalisée dans le temps imparti : comme on a pu le remarquer dans le tableau 6, le nombre de données par palier est

insuffisant pour une approche statistique par paliers, et le rythme de production ne permettait pas de dégager suffisamment de nouvelles surfaces pour recueillir des données fraîches. L'approche effectuée ci-dessus présente les résultats pour l'étude du massif dans sa totalité. Au niveau de ses discontinuités, le massif semble plutôt homogène, donc traiter simultanément des données du palier 2 et du palier 3 est possible (une étude palier par palier aurait simplement apporté plus de précisions).

Partie 2 :
Analyse des pratiques d'abattage sur la carrière de Ruvernison

1. Objectifs du tir

La méthode d'abattage à l'explosif est en général utilisée dans les carrières de roches massives et dures. En effet, dans le cas de roches dures, les procédés d'extraction continus ne sont pas possibles, l'abattage à l'explosif est alors une alternative qui présente l'avantage de fragmenter des volumes de roche importants, et ce avec des moyens limités en termes d'engins (foreuse et engins de chantiers pour la reprise) et une mise en œuvre assez restreinte. De plus, l'étendue actuelle des possibilités en termes d'explosifs et les compétences qui existent aujourd'hui dans le domaine ont contribué à la banalisation de ce procédé.

A partir d'une succession d'opérations a priori simples, implantation et foration de trous, chargement et amorçage des explosifs, l'abattage à l'explosif va avoir différents objectifs :

- assurer la sécurité, c'est à dire pas de projections et pas de tirs bloqués ou pans non abattus ;
- abattre un grand volume de roche, avec :
    - une granulométrie adaptée aux installations, avec une proportion de blocs et de fines la plus réduite possible ;
    - un épanchement du tas et un foisonnement adapté aux engins de reprise du tas ;
- assurer une bonne géométrie des fronts sur la carrière avec :
    - une bonne sortie du pied ;
    - un bon alignement des fronts et de la plateforme ;
    - des effets arrières réduits.

2. Eléments théoriques sur l'opération d'abattage

2.1. Mécanisme de l'explosion

Les explosifs sont utilisés depuis des siècles pour abattre la roche. Cependant, il n'existe pas encore de théorie fondamentale dans le domaine. La manière dont la détonation d'un explosif participe à la fragmentation de la roche n'est pas encore parfaitement connue, mais a été étudiée et décrite en détail.

Le principe de l'explosion repose sur la transformation d'une énergie chimique potentielle en énergie mécanique communiquée au milieu extérieur.

Un explosif est un mélange de substances chimiques peu stables, qui, par un apport d'énergie (thermique ou mécanique par exemple) est susceptible de se décomposer rapidement. Les substances explosives, selon leur régime de décomposition, ont des comportements différents : combustion, déflagration, détonation. Les puissances dégagées vont varier en fonction du type de décomposition. La détonation est le régime de décomposition le plus rapide : la puissance transmise au moment de la détonation sera donc la plus importante. C'est le mécanisme qui va ainsi générer les effets mécaniques les plus importants, c'est donc ce qui est le plus souvent recherché dans l'utilisation des explosifs.

La détonation est une réaction chimique exothermique qui se propage dans l'explosif, couplée à une onde de choc. Ces deux phénomènes conduisent à une vitesse de détonation stable, en général de 2000 m/s à 7000 m/s pour les explosifs civils. L'énergie dégagée par la décomposition de l'explosif auto-entretient le phénomène.

Cette réaction chimique exothermique dégage des gaz, principalement du CO_2, de l'H_2O et des NO_x, libérés à des températures allant de 1000℃ à 400 0℃ et des pressions comprises entre 1000 et 25000 MPa.

Le phénomène ainsi présenté correspond au régime stable de la détonation. En pratique, les caractéristiques de l'onde de détonation sont liées aux caractéristiques de l'explosif (composition chimique, densité…) mais aussi à la géométrie et au confinement utilisés. Ainsi, en pratique, un confinement important ou un gros diamètre de cartouche va permettre de se rapprocher de la détonation idéale. Plus le diamètre et le confinement sont faibles, plus les pertes latérales vont réduire la vitesse de détonation. Il existe ainsi un diamètre minimal (diamètre critique) en dessous duquel l'énergie latérale dissipée devient trop importante : il ne reste plus suffisamment d'énergie pour que la propagation de la zone de réaction s'auto entretienne et le phénomène de détonation s'arrête.

L'énergie dégagée par un explosif au cours d'une détonation se manifeste sous deux formes :

- une énergie de choc véhiculée par une onde de choc (c'est-à-dire une onde mécanique de contrainte) et transmise dans le milieu connexe;
- une énergie de gaz qui s'exprime sous la forme d'un gaz dans des conditions de très hautes température et pression.

Dans les caractéristiques d'un explosif sont donc présentées les données d'énergie de choc, énergie de gaz et énergie totale libérée ; cette dernière varie entre 2 et 5 MJ/kg d'explosif. En réalité, il est peut-être plus parlant et plus significatif de regarder la puissance libérée, car le phénomène de détonation se produit pendant des temps très courts (de l'ordre de la milliseconde). Les puissances libérées par des explosifs civils atteignent quelques gigawatts.

2.2. Abattage de la roche

Le processus de la fracturation à l'explosif repose sur l'action combinée de l'onde de choc et des gaz d'explosion. La détonation n'est pas un phénomène instantané, mais les deux étapes qui la constituent ont des durées très différentes : le phénomène de l'onde de choc est très court par rapport à l'action des gaz. Bien que ces phénomènes ne soient pas totalement indépendants, on peut présenter leur action par deux phases successives, comme l'illustre la figure 10 :

- une phase **dynamique**, durant laquelle on peut distinguer différents phénomènes, relatifs à différentes zones du massif rocheux :
    - l'onde de choc génère, tout d'abord, dans un régime que l'on peut supposer hydrodynamique, une onde de compression, qui va engendrer des contraintes supérieures à la résistance en compression de la roche. Cet état de contrainte va donc broyer la roche en fines particules, dans une zone autour du trou désignée par « zone de broyage ». La décroissance de ces contraintes est cependant très rapide : à courte distance (3 à 5 fois le rayon de la cartouche r_c), les contraintes sont inférieures à la résistance en compression ;
    - on observe ensuite la création de fissures radiales : l'onde de choc perd en intensité, mais les contraintes tangentielles qu'elle crée sont encore suffisantes pour fracturer la roche via des contraintes tangentielles de traction. Malgré une décroissance en $1/r^3$ dans la zone de broyage et en $1/r^2$ par la suite, les contraintes demeurent supérieures à la résistance en traction de la roche, dans une zone appelée zone transitoire (entre 20 et 50 r_c). Au delà de

cette zone, aucune fissuration microscopique marquante n'apparaît : c'est la zone sismique. L'onde contribue à affaiblir le massif, sans pour autant mettre en cause sa structure globale par des pré-fissurations ;

- le dernier phénomène de la phase dynamique fait intervenir les ondes de traction: en effet, les ondes de choc initialement créées vont rencontrer des surfaces libres (typiquement, le front à abattre ou les discontinuités du massif) sur lesquelles elles vont se scinder en une onde transmise et une onde réfléchie. La répartition entre les énergies transmises et réfléchies dépend du rapport des impédances des deux milieux. Dans le cas d'une interface roche-air, cette réflexion est presque totale. L'onde de compression initiale se réfléchit en une onde de traction. Cette onde réfléchie engendre dans le massif rocheux des contraintes de traction, qui vont dépasser les caractéristiques mécaniques de la roche et provoquer une fissuration appelée écaillage, dans une zone proche de l'interface. De plus, les ondes réfléchies, en se propageant, vont réinitialiser les fissures créées par la première phase ;

- une phase **quasi statique**, qui est la dernière étape de l'abattage à l'explosif: les ondes de contraintes ont joué leur rôle, fissurant ou affaiblissant le massif, les gaz d'explosion emprisonnés vont pouvoir se détendre, poursuivant leur propagation et leur action. Ils filtrent dans les discontinuités, participant éventuellement à la fissuration, et mettant surtout l'ensemble en mouvement.

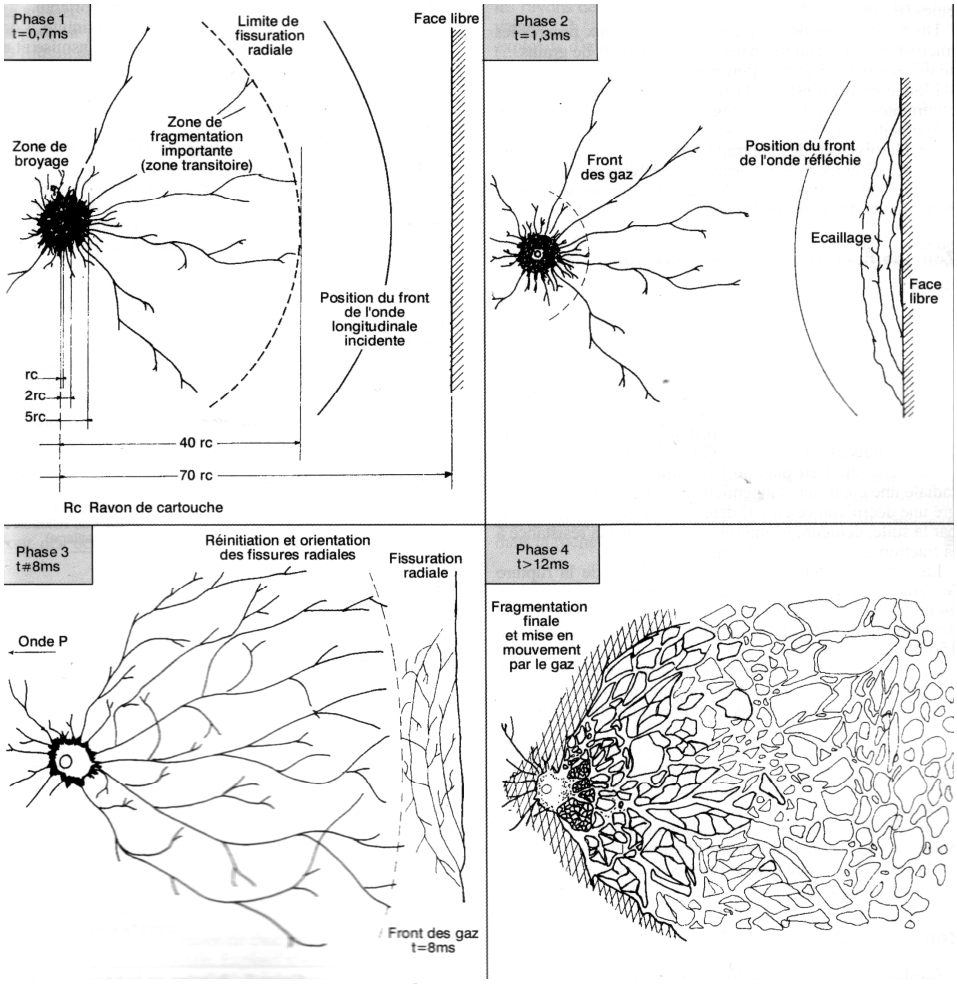


Figure 10

Développement de la fissure et de la fracturation dans l'abattage du massif rocheux

Le mécanisme d'abattage à l'explosif repose ainsi sur l'utilisation d'une énergie chimique potentielle contenue dans l'explosif, qui se développe via deux phénomènes successifs mais couplés, l'action des ondes de contraintes et la détente des gaz d'explosion. Ces deux phénomènes vont ainsi provoquer :

- la fragmentation du massif rocheux d'une part, qui est l'objectif recherché par l'abattage ;
- la création d'une onde vibratoire solide, ou onde sismique, qui se propage dans le massif. Elle est à l'origine des vibrations du sol, qui peuvent se transmettre aux structures et endommager les constructions du voisinage ;
- la création d'une onde vibratoire aérienne, ou onde sonore. La surpression aérienne qui fait « trembler les vitres » des maisons n'endommage pas les structures. Cela correspond cependant à une perte d'énergie, au même titre que l'onde sismique : ces phénomènes ondulatoires représentent ainsi des nuisances que l'on va chercher à limiter.

3. Dimensionnement d'un schéma de tir

Pour abattre un massif à l'explosif, on réalise un ensemble de trous de mines : les paramètres géométriques et les paramètres de chargement qui interviennent sont ainsi définis :

- la **plateforme**, zone sur laquelle évolue les engins, définit un plan nommé **carreau** ;
- le **front** est la surface libre qui va être abattue. Les paramètres essentiels du front sont sa hauteur (règlementairement limitée à 15 m), son inclinaison et sa régularité;
- les distances entre deux rangées (ou bien distance entre le front et la première rangée) doivent être égales ; on appelle cette distance **banquette** ;
- l'**espacement** est la distance entre deux trous d'une même rangée ;
- on désigne par **maille** le couple banquette-espacement ;
- l'**inclinaison** des trous par rapport à la verticale détermine la **longueur à forer** en fonction de la hauteur du front. La longueur de foration additionnelle par rapport au carreau est désignée par **surforation** ;
- l'explosif placé en fond de trou est désigné par **charge de pied**, la **charge de colonne** étant la charge restante. De manière plus générale, on désigne par **pied** la partie inférieure du gradin, et par **tête** ou **colonne** sa partie supérieure ;
- un bourrage est un matériau inerte, placé soit entre deux charges (« **bourrage intermédiaire** »), soit en haut de trou (« **bourrage terminal** ou **final** ») ;
- la **séquence d'amorçage** est l'ordre dans lequel détonnent les différents détonateurs placés dans les mines.

L'ensemble de ces paramètres constitue un **schéma de tir** (voir figure 11).

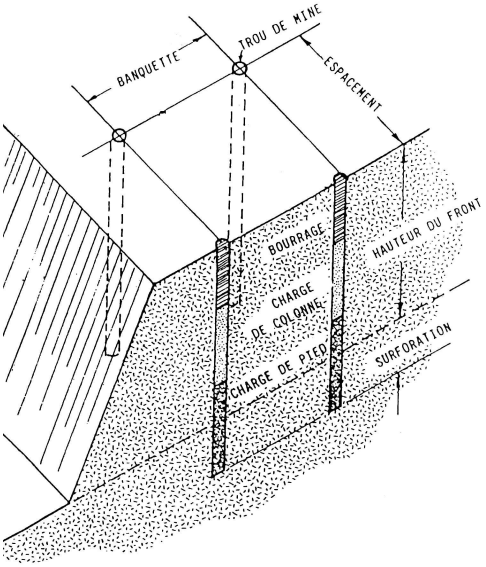


Figure 11
Une illustration des paramètres constituant un schéma de tir

3.1. Choix de l'explosif

Les explosifs utilisés pour le chargement d'un tir doivent être adaptés au massif rocheux dans lequel ils travaillent. Pour guider le choix de l'explosif, on peut s'appuyer sur une théorie expérimentale. Rappelons que l'énergie libérée lors de la détonation d'un explosif se manifeste sous deux formes : une énergie de choc, portée par une onde de contrainte, qui se transmet dans le milieu extérieur, et l'énergie des gaz d'explosion.

La première étape du processus est ainsi la transmission de l'onde de choc au massif rocheux. Dans le cas d'une onde de choc plane parallèle à la surface de discontinuité, dans les conditions de l'élasticité linéaire, le transfert d'énergie peut être donné par la formule suivante :

$$\frac{E_{tr}}{E_i} = \frac{4Z}{(1+Z)^2}$$

Équation 2, transmission d'énergie

Avec E_{tr} : énergie de l'onde transmise
E_i : énergie de l'onde incidente
Z : rapport d'impédances

$$Z = \frac{\rho_e D}{\rho_r V_r}$$

ρ_e : masse volumique de l'explosif
D : vitesse de détonation de l'explosif
ρ_r : masse volumique de la roche
V_r : vitesse du son dans la roche

Le transfert d'énergie est ainsi maximum pour Z=1 : on est alors dans le cas d'une adaptation d'impédance entre les deux milieux. Physiquement, l'onde de choc traverse alors l'interface sans avoir « l'impression » de changer de milieu.

Dans la pratique, il n'est pas possible d'avoir un rapport d'impédance parfaitement égal à 1. De plus, cette théorie présente des distorsions importantes avec l'expérience : en pratique, les ondes ne sont jamais planes, au mieux quasi-sphériques, les milieux ne sont pas parfaits, par exemple le milieu de détonation est un milieu mal défini car en cours de réaction, etc.

Cette théorie s'appuie ainsi sur une série de mesures expérimentales donnant un intervalle de valeurs intéressantes pour le rapport d'impédances Z. On indique ainsi de prendre Z entre 0,4 et 0,7 (coefficients correctifs établis expérimentalement).

$$0{,}4 < \frac{I_e}{I_r} < 0{,}7$$

Équation 3, sélection du rapport d'impédances

Avec I_e : impédance de l'explosif ; I_r : impédance de la roche

A partir des données des essais mécaniques, il est possible de calculer l'impédance du massif rocheux. Nous distinguerons les paliers 2 et 3, de caractéristiques un peu différentes.

Pour les explosifs encartouchés, type dynamite ou émulsions, le calcul de l'impédance de l'explosif doit prendre en compte la densité ρ réelle de l'explosif dans le trou, qui va dépendre du diamètre du trou $Ø_t$ et du diamètre de la cartouche $Ø_c$. On peut ainsi établir la formule suivante :

$$\rho_{REELLE} = \rho_{EXPL} * \left(\frac{Ø_c}{Ø_t} \right)^2$$

Équation 4, densité réelle d'un explosif encartouché

Le tableau 7 résume les rapports d'impédances pour différents types d'explosifs pour chaque palier, pour un trou de diamètre 102 mm.

Explosif	Dynamite			Explus		Nitram		Nitrate-fuel	Nitrate-fuel dopé
Diamètre cartouche (mm)	90	80	70	90	80	90	80	vrac	vrac
Palier 2	0,55	0,44	0,34	0,41	0,33	0,39	0,31	0,19	0,21
Palier 3	0,49	0,39	0,30	0,37	0,29	0,35	0,27	0,17	0,19

Tableau 7
Calcul du rapport d'impédance pour différents explosifs

Cette approche nous indiquerait que seuls la dynamite et certains encartouchés sont suffisamment énergétiques pour abattre la roche à Ruvernison. Il faut néanmoins nuancer ce premier résultat : l'abattage réalisé avec d'autres explosifs notamment le nitrate-fuel fonctionne en pratique (avec cependant des résultats mitigés) !

En fait, cette approche avec le rapport d'impédances est intéressante pour déterminer l'explosif à utiliser en pied : le cisaillement du pied est l'opération la plus difficile pour l'explosif, car c'est dans la partie inférieure du front qu'il existe le moins de surfaces de réflexion, et surtout le moins de surfaces de dégagement possibles. Cette approche en termes de rapports d'impédance nous permet donc de déterminer les types d'explosifs utilisables pour le cisaillement du pied à Ruvernison. En considérant ces aspects, le seul explosif a priori assez puissant est la dynamite.

En observant la faible valeur de Z pour le nitrate-fuel, on peut néanmoins se demander si cet explosif est réellement adapté au type de roche exploité à Ruvernison: selon cette approche, l'énergie développée par l'explosif ANFO serait assez mal transmise au massif rocheux. Cependant, cette étude ne prend pas entièrement en compte les pertes d'énergie dans l'espace annulaire pour les encartouchés ; le nitrate-fuel, qui se présente sous la forme de vrac, remplit entièrement le trou, ce qui pourrait expliquer sa bonne efficacité par rapport à d'autres émulsions encartouchées.

A Ruvernison, on utilise habituellement de la dynamite en explosif de pied. Le chargement de colonne est en général réalisé au nitrate-fuel (explosif moins cher, pratique et rapide à charger), sauf en présence d'eau, où on utilise des émulsions encartouchées, de

diamètre 80 ou 90 mm. Ce chargement standard apparaît satisfaisant, il est cependant toujours possible de travailler certains points.

Cette approche en termes d'impédances est parfois contestée ; l'efficacité de l'onde de choc dépend en effet de la fracturation du massif, qui va affecter la transmission de l'onde. D'autre part, cette approche ne se réfère qu'à la première phase du mécanisme de l'explosion, c'est-à-dire l'action de l'onde de choc, et ne prend pas en compte l'action des gaz d'explosion. Mais cette théorie expérimentale nous donne un premier élément, à éventuellement ajuster par des observations et des interprétations qualitatives.

3.2. Choix du diamètre de foration

Le diamètre de foration doit être adapté à la nature de la roche et à la hauteur du massif. Le mémento de Grimaud propose une relation entre le diamètre de foration et la longueur de foration L_f :

$$D = K \times \alpha \times \sqrt[3]{Lf}$$

Équation 5, calcul du diamètre de foration

Avec K=37 (coefficient standard)

Et α : coefficient de dureté de la roche :

Roche	Tendre	Peu dure	dure	Très dure
α	1	1,02	1,06	1,26

Tableau 8
Coefficient de proportionnalité α en fonction de la dureté de la roche

La réalisation des éprouvettes pour les essais mécaniques nous a donné une indication de la dureté de la roche : le granite de Ruvernison est une roche très dure, nous retiendrons donc un coefficient α de 1,26. On obtient ainsi un diamètre de foration de 115 mm, cette relation expérimentale vient confirmer un résultat intuitif : plus une roche est dure, plus il faut un diamètre de foration grand pour réaliser une foration convenable.

Cela nous laisse penser que le diamètre de 102 mm utilisé actuellement est plus adapté à la roche de Ruvernison (difficile à forer) que le diamètre de 92 mm utilisé auparavant. Il pourrait même être intéressant d'augmenter encore le diamètre de foration. Cependant, un gros diamètre de foration va demander une poussée plus importante, d'où une probabilité de dévier plus élevée (il convient donc, en particulier si on change le diamètre de foration, d'**adapter** la poussée et l'outillage de la machine -tiges de forations plus rigides, limitant la déviation, etc.-).

3.3. Calcul de la maille

Bien qu'il n'existe pas de théorie fondamentale concernant le tir à l'explosif, certaines règles existent pour établir un schéma de tir. En s'appuyant sur ces règles empiriques, on peut ainsi proposer les paramètres de tir développés dans la suite de cette partie.

3.3.1. Les règles de Langefors

Les chercheurs suédois Langefors et Kilhström ont établi une règle empirique de calcul de la banquette maximale admissible en fonction de paramètres inhérents au massif rocheux (notion de résistance de la roche), paramètres relatifs à la maille souhaitée (ratio

espacement sur banquette, diamètre de foration, inclinaison) et du type d'explosifs employés.

La règle dite de Langefors propose une relation linéaire entre la banquette maximale admissible et le diamètre de foration (*Langefors, Kihlström, 1963*) :

$$B = \frac{Ø}{34} \times \sqrt{\frac{P \times s}{f \times \bar{c} \times \frac{S}{B}}}$$

Équation 6, formule de Langefors pour la banquette maximale admissible

B : banquette maximale admissible (m)
Ø : diamètre de foration (mm)
P : densité de chargement (kg/m^3)
s : strength de l'explosif (sans dimension), pris pour l'explosif en pied (car le cisaillement du pied est le travail le plus difficile)
c : constante de roche (kg/m^3)
f : facteur de contrainte
S/B : rapport écartement sur banquette

La banquette maximale est en général réalisée en pied : c'est ainsi a priori pour la partie inférieure du chargement que l'on calcule la banquette maximale admissible.

Densité de chargement P :

La densité de chargement est la densité de l'explosif, à laquelle on peut introduire un facteur correctif dans le cas de l'utilisation de cartouches. Dans le cas d'un chargement à plusieurs types d'explosifs, on se réfèrera au chargement utilisé pour le cisaillement du pied, opération la plus difficile dans l'abattage. Dans notre cas, le chargement du pied est réalisé avec des cartouches de dynamite, de diamètre 90 mm.

La densité de chargement est donc donnée par : (d : densité de l'explosif)

$$P = d * \left(\frac{Ø_c}{Ø_t} \right)^2$$

Équation 7, densité de chargement

Dynamite encartouchée		
d (kg/m^3)	1,45	1,45
$Ø_c$ (mm)	90	80
$Ø_t$ (mm)	102	92
P (kg/m^3)	1,13	1,09

Tableau 9
Densité de chargement, dynamite

Strength de l'explosif s :

Le strength est un coefficient relatif à l'explosif, défini par :

$$s = \frac{5}{6} * \frac{Q}{Q_o} + \frac{1}{6} * \frac{V}{V_o}$$

Équation 8, calcul du strength de l'explosif

Q et **V** étant l'énergie et le volume des gaz de l'explosif employé, Q_o et V_o ceux d'un explosif de référence.

Pour un calcul à partir de la formule de Langefors, il convient de prendre comme référence d'explosif le nitrate-fuel. Nous utiliserons le strength de la dynamite, explosif en pied.

	Q (MJ/kg)	V(m^3/kg)
ANFO	3,91	0,973
Dynaroc 9	4,5	0,848
$s_{dynamite}$ =1,11		

Tableau 10
Calcul du strength de la dynamite

Constante de roche c :

La constante de roche introduit un paramètre correspondant au massif rocheux et sa géologie.

$$\bar{c} = c + 0{,}05 \text{ pour } 1{,}4m \le V \le 15m$$

Équation 9, calcul de la constante de roche

Pour un massif granitique, la constante de roche c retenue est de 0,55 ; ce qui nous donne un $\bar{c}$ de 0,6 kg/m^3.

Facteur de contrainte f :

Le facteur de contrainte introduit une correction en fonction de l'inclinaison donnée au trou. L'inclinaison du trou est un paramètre secondaire relativement indépendant. Cela peut permettre une meilleure sortie du pied, une meilleure fragmentation en tête et une diminution des effets arrières. L'inclinaison du trou est décidée selon l'allure du front et selon les possibilités de la machine de foration. L'inclinaison retenue de 9° se situe dans un intervalle dans lequel la machine dévie a priori peu.

Alpha	0	10	20	30
F	1	0,95	0,90	0,85

Tableau 11
Valeurs du facteur de contrainte f, en fonction de l'inclinaison alpha des trous

Rapport écartement sur banquette S/B :

On retient la valeur habituelle de 1,25 pour le rapport S/B.

Dans les conditions de la carrière, le calcul nous donne un coefficient de proportionnalité dans la formule de Langefors de l'ordre de 0,038. Ainsi, pour un diamètre de foration de 102 mm, il vient que la banquette maximale admissible est de 3,9 m. On conseille cependant de diminuer cette banquette d'une dizaine de centimètres ; c'est un ordre de grandeur standard pour tenir compte des éventuelles déviations de foration rencontrées sur

les carrières de roche massive. La banquette ainsi calculée est une banquette maximale admissible.

	$Ø_t$ = 102 mm	$Ø_t$ = 92 mm
P (kg/m^3)	1,13	1,09
s	1,1	1,1
c (kg/m^3)	0,6	0,6
f	0,95	0,95
E/B	1,25	1,25
K	0,039	0,038
B_{max}(m)	3,96	3,51

Tableau 12
Banquette maximale admissible selon Langefors

La banquette implantée actuellement sur la carrière est de 3,25 m, cet ordre de grandeur est donc acceptable compte tenu de la réduction en prévision des déviations de foration relativement importantes sur la carrière, point qui sera mis en évidence et développé dans la suite de ce rapport. Cependant, lors des augmentations de diamètre de foration, il ne faudrait pas oublier de considérer l'augmentation de la maille (chose omise lors de l'augmentation du diamètre de foration de 92 mm à 102 mm à Ruvernison au printemps 2007).

Les règles de Langefors/Kilhström sont des règles empiriques s'appuyant sur des paramètres expérimentaux : or ces coefficients de roches ont été établis à partir d'expériences menées en Suède sur des carrières exploitant des roches granitiques, compétentes avec une faible fracturation naturelle, ce qui peut être controversé. La formule proposée pour le calcul fait de plus appel au strength de l'explosif, grandeur moins utilisée actuellement car jugée faiblement représentative. L'expérience montre que les règles de Langefors donnent malgré tout une bonne indication (et ajoutons que nous sommes dans le cas ici d'une exploitation de granite, dont la compétence est comparable à celle des terrains dans lesquels les règles de Langefors ont été établies).

3.3.2. Rapport espacement sur banquette E/B

Les calculs proposés par Langefors et Kihlström font intervenir le rapport entre l'espacement et la banquette, rapport E/B. Ils conseillent de le prendre compris entre 1 et 1,5. Pour le calcul, la valeur de 1,25 a été choisie.

On constate expérimentalement que ce rapport influence la fragmentation obtenue : un E/B proche de 1 va avoir tendance à produire des blocs, tandis qu'un E/B de 1,5 fournira une fragmentation plus fine, la valeur de 1,25 retenue devant engendrer une fragmentation régulière.

Introduisons une part de dynamique pour tenter de justifier l'effet du ratio E/B sur la fragmentation. La distance entre les trous d'une même rangée et la distance entre deux rangées va conditionner la densité de fragmentation due à l'onde de choc, ainsi que la mise en mouvement du massif, sa facilité de dégagement et sa vitesse, comme illustré sur la figure 12. Le rapport E/B suggère en quelque sorte une zone d'influence de chaque trou, un travail judicieux sur la maille pourrait permettre d'ajuster ces paramètres.

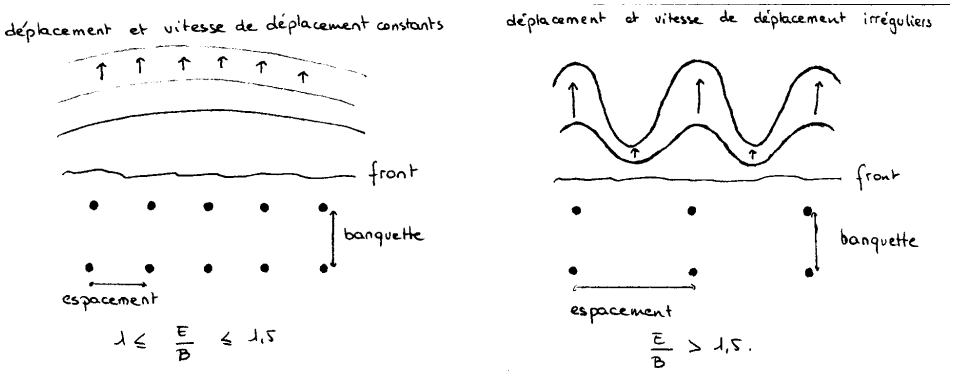


Figure 12,
Dynamique de l'abattage

Enfin, n'oublions pas que nous avons introduit ici une notion de dynamique : il faut donc a priori faire la distinction entre le rapport E/B « géométrique », implanté en surface, et le rapport E/B « dynamique », réalisé via la séquence d'amorçage. C'est ce rapport E/B dynamique qui est a priori effectif dans l'abattage.

L'approche en termes de ratio espacement sur banquette s'appuie sur des observations expérimentales. Elle est parfois critiquée et délaissée en faveur d'une approche plus fondée sur l'énergie disponible en fonction du volume à abattre par trou.

3.3.3. Consommation spécifique et énergie spécifique

Le terme de consommation spécifique désigne le grammage d'explosif que l'on charge dans un trou de mine pour abattre 1 m^3 de roche (ou 1 t de roche). La consommation spécifique est donc donnée en g/m^3 (ou en g/t respectivement).

La consommation spécifique est un paramètre à adapter au massif rocheux à abattre : la quantité d'explosif nécessaire pour abattre un volume donné de roche est en effet fonction des propriétés mécaniques et structurales de la roche en question. Ces valeurs de consommation spécifique sont mesurées au cas par cas. Cependant, il existe des bases de données en fonction des différents types de roches. Dans de telles bases de données, la consommation spécifique d'un granite compétent exploité à ciel ouvert est de l'ordre de 110 à 150 g d'explosif par tonne de roche abattue.

Un rapide calcul à partir du chargement standard 5 (figure 13) nous permet de calculer la consommation spécifique réalisée à Ruvernison :

Charge de pied: 25kg (dynamite+émulsions)
Bourrage intermédiaire: 1,5 m
Charge de colonne: 60kg
Bourrage final: 2m

Figure 13
Chargement standard

Surface de la maille : $S = BxE = 3,25x3,5 = 11,375\ m^2$
Volume de roche abattu par trou : $V = SxH = 11,375x15 \approx 170\ m^3$
Masse de roche abattue par trou : $M = Vx\rho = 170x2,7 = 459\ t$
Consommation spécifique théorique : $C_s = C_{expl}/M = 85/459.10^{-3} \approx 185\ g/t$

La consommation spécifique sur la carrière est donc de l'ordre de 185 g/t. C'est une valeur nettement plus élevée que la valeur annoncée de 150 g/t, qui est une valeur habituelle pour un granite.

Il faut cependant voir que l'approche en termes de consommation spécifique donne un premier résultat, mais que ce résultat n'est pas très rigoureux. En effet, la consommation spécifique fait intervenir le grammage d'explosifs, sans différencier les types d'explosifs. Or les explosifs ont des densités et des énergies différentes. Il est donc plus rigoureux de regarder l'énergie spécifique, énergie mise en œuvre pour abattre 1 m^3 de roche (ou 1 t de roche) : l'énergie spécifique va prendre en compte la quantité d'énergie apportée par chaque type d'explosif.

Là encore, ces énergies spécifiques sont mesurées, mais il existe des bases de données. Dans le cas de l'abattage de matériaux éruptifs compétents (les plus durs), l'énergie spécifique indiquée nécessaire est de 1,1 à 1,3 MJ/m^3. L'énergie spécifique nécessaire au cisaillement du pied est cependant supérieure, de l'ordre de 2,25 MJ/m^3 et peut atteindre 3 MJ/m^3 selon les terrains.

Calculons ces valeurs pour le cas de Ruvernison. Pour cela, nous avons besoin d'un chargement standard plus détaillé. Le chargement « classique » est détaillé ci-dessous:

- 8 cartouches de dynamite ;
- 3 cartouches d'émulsion ;
- bourrage intermédiaire de 1,5 m ;
- 1 cartouche de réamorçage à la dynamite ;
- nitrate-fuel jusqu'au bourrage final de 2m (soit 55 kg environ).

On aboutit dans ces conditions à :

- une consommation spécifique de 193 g/t ;
- une énergie spécifique de fond de 4,60 MJ/m^3 ;
- une énergie spécifique de colonne de 1,6 MJ/m^3 ;
- une énergie spécifique globale de 2,086 MJ/m^3.

Les valeurs de consommation et d'énergie spécifiques ainsi obtenues, plus élevées que celles que l'on rencontre typiquement dans l'abattage de granite, laissent donc penser que le chargement actuel n'est pas optimal.

3.4. Comparaison des méthodes d'Hélary et des résultats théoriques de l'étude

Dans cette sous partie, nous allons proposer une synthèse rapide de la comparaison des différents éléments du schéma de tir théorique calculé et du schéma de tir théorique de Ruvernison.

Paramètres géométriques :

	Théorique Ruvernison	Théorique calculé
Diamètre de foration	92 mm puis 102 mm	115 mm
Banquette	3,25 m	B_{max}=3,9 m
Rapport E/B	1,25	[1 ;1,5]
Surforation	50 cm à 1 m	0,3 * B

Tableau 13
Comparaison des paramètres géométriques

- Le diamètre foré est, selon cette approche, un peu petit par rapport à la compétence de la roche. L'augmentation de diamètre faite récemment est cependant favorable.
- L'ordre de grandeur de la banquette retenue est convenable : la banquette maximale admissible doit en effet être corrigée des déviations probables de foration.
- La surforation théorique devrait être de 0,3*B=1,1 m, la valeur retenue est donc a priori trop faible. Il vaudrait mieux retenir une valeur de surforation plus importante, car il est toujours possible de reboucher un trou, mais nettement plus difficile de venir compléter une foration. Le problème se situe ici dans la détermination de la surforation réelle, qui dépend de la longueur à forer, donc de l'inclinaison, de la hauteur du front et de la régularité de la plate-forme de foration. Cela dépend du contexte local qu'il faut mesurer. Cet aspect sera toutefois développé dans la partie suivante.

Chargement :

	Théorique Ruvernison	Théorique calculé
Choix des explosifs pour le cisaillement du pied	Dynamite	Dynamite
Hauteur de charge de pied	Environ 5 m	1,3*B
Type de chargement	Etagé	Etagé
Bourrage intermédiaire	1,5 m	2 m
Bourrage terminal	2 m	2 m
Energie spécifique en pied	4 MJ/m^3	2,1 à 3 MJ/m^3
Energie spécifique en colonne	1,6 MJ/m^3	0,7 à 1 MJ/m^3
Energie spécifique moyenne	2,1 MJ/m^3	1,1 à 1,5 MJ/m^3

Tableau 14
Comparaison des paramètres de chargement

Le choix des explosifs pour le cisaillement du pied est cohérent. Au niveau du chargement, certaines remarques peuvent cependant être faites :

- tout d'abord, pour réduire les vibrations, la méthode classique, utilisée à Ruvernison, est la séparation de la charge de colonne : on réduit ainsi la charge unitaire. Cette séparation n'est pas divisée en 2 parties égales : on cherche plutôt à réduire au minimum nécessaire la charge de pied, car c'est celle qui travaille le plus, et engendre le plus de vibrations. La hauteur de 5 m de charge de pied actuellement réalisée pourrait donc être encore réduite ;
- ensuite, afin d'éviter les auto-amorçages entre les deux étages de la colonne, on conseille de prendre un bourrage intermédiaire assez important, la valeur de 1,5 m étant souvent considérée comme trop faible. L'auto-amorçage au sein de la colonne risque de faire détonner les charges de pied et de colonne simultanément, donc on va perdre l'intérêt de la séparation des charges ;
- lorsque l'on considère l'énergie spécifique de colonne, l'énergie spécifique en pied ou l'énergie spécifique moyenne, on constate que la valeur obtenue avec le chargement standard est en général plus élevée que les valeurs constatées pour des types de roches similaires. Il ne faut cependant pas tirer de conclusions trop hâtives de cette remarque car l'énergie spécifique doit être adaptée au massif rocheux à abattre : il se peut très bien que le granite très compétent de Ruvernison nécessite un apport d'énergie plus important que les granites traditionnels pour son abattage.

Amorçage :

	Théorique Ruvernison	Théorique calculé
Type d'amorçage	Détonateurs électriques moyenne intensité	Différents types de détonateurs : - électrique - nonel - électronique
Retard	Court retard (25ms)	Court retard (25ms)
Délai entre trous	25 ms	Maximum 75 ms
Délai entre rangées	75 ms	10 à 30 ms par mètre de banquette

Tableau 15
Comparaison des paramètres d'amorçage

- Des expériences menées sur les détonateurs électroniques, notamment sur la carrière Piketty à Ecuelles, ont prouvé que le délai court retard de 25 ms était particulièrement bien adapté pour l'abattage classique à ciel ouvert. Ce sont ces courts retards qui sont utilisés chez Hélary.
- Bien qu'il n'existe pas de théorie exacte concernant la réalisation d'une séquence d'amorçage, il existe un certain nombre de règles empiriques, qui semblent en théorie suivies chez Hélary.

4. Réalisation d'un tir dans la carrière de Ruvernison

4.1. Implantation, allure du front

4.1.1. Méthode actuelle d'implantation

On désigne par implantation du tir l'opération qui consiste à tracer la maille en surface sur la plateforme à abattre, et à déterminer les paramètres d'inclinaison et de longueur de foration pour chaque trou. Cette opération est réalisée manuellement par le responsable du minage sur la carrière. L'opération est réalisée de la manière suivante :

- l'opérateur évalue la position qu'il veut donner à la première rangée au moyen d'une tige gabarit de longueur égale à la longueur de la banquette : il considère alors (ce qui est discutable) qu'il a estimé avec cette tige la banquette en pied, et place sa première rangée en fonction ;
- l'opérateur place ensuite le premier trou, puis reporte l'espacement entre les trous au moyen de son gabarit. Il place ainsi les trous suivants ;
- à partir des premiers et derniers trous d'une rangée, il reporte la banquette pour placer la seconde, puis éventuellement la troisième rangée, théoriquement parallèlement à la rangée précédente. Il place ensuite les trous sur ces rangées.

Il est clair que la mise en œuvre de cette opération manuellement va introduire des écarts par rapport à la géométrie théorique que l'on souhaite réaliser. Essayons d'évaluer la précision de chaque étape :

- alignement des trous : un décamètre tendu sur le sol donne un bon point de repère d'alignement, aux irrégularités de la plateforme près ;
- espacement entre les trous : il est reporté au moyen du gabarit, avec une précision qu'on peut évaluer à 15 cm entre deux trous consécutifs. Cependant, l'erreur commise se cumule tout au long de l'implantation de la rangée ;
- parallélisme des rangées : l'incertitude sur la détermination des deux perpendiculaires, aux extrémités de la ligne, s'évalue à 15° -une erreur de 15° sur

cette perpendiculaire engendrant une incertitude de 15 cm environ-. Cependant, entre les trous de deux rangées différentes, les écarts de banquette peuvent être plus importants : les erreurs d'espacement sur les deux rangées sont en effet indépendantes ;

- banquette de la première rangée : la position de la première rangée est évaluée et non mesurée précisément. Cette évaluation est de plus faite à partir de la tête du front : la perspective et le front irrégulier peuvent fausser la vision des choses.

C'est l'opération d'implantation de la première rangée, telle qu'elle est réalisée actuellement, qui apparaît comme la moins précise. Il existe cependant des méthodes ou des outils pour mesurer des paramètres important pour le positionnement de la première rangée, et ainsi améliorer notablement la précision de l'implantation.

4.1.2. Levés du front

Un outil pouvant guider dans l'implantation et le chargement d'un tir est disponible sur la carrière. Il s'agit d'un appareil de mesures de distances par laser, appelé Laserace. Cet outil est un distancemètre laser, comme ceux utilisés par les géomètres, couplé à un système de mesure d'angles. Il s'agit d'un outil manuel, l'opérateur doit viser différents points du front à relever et il obtient alors les informations de distance souhaitées, qui vont lui fournir des éléments de reconstitution partielle du front. Ce système peut permettre à l'opérateur de sélectionner des zones du front particulièrement sensibles, comme des sous-cavages ou des surépaisseurs importantes. Par cet outil, l'opérateur obtient de plus l'inclinaison du front, qui va lui permettre d'adapter l'inclinaison de chacun des différents trous.

Ce système est assez lourd à mettre en œuvre et demande de consacrer du temps au levé pour préparer précisément l'implantation. Si bien que l'outil n'est quasiment jamais utilisé actuellement.

4.1.3. Directions de travail

Il existe des outils et des méthodes simples à partir d'éléments actuellement disponibles qui pourraient permettre d'améliorer le procédé d'implantation actuel chez Hélary.

Il est tout d'abord étonnant de voir que l'opérateur dispose d'un outil de levé partiel du front, qu'il n'utilise pas. L'utilisation de cet appareil peut à première vue sembler être une perte de temps, mais en fait, cela permettrait de connaître la hauteur exacte du front, de positionner plus précisément la première rangée de trous et d'adapter l'inclinaison des trous à la géométrie du front à abattre.

Certains consultants préconisent l'utilisation d'un outil simple, une « canne à pêche », pour implanter précisément la première rangée par rapport à la banquette en pied. Cet outil, constitué d'un mètre extensible au bout duquel est attaché un fil à plomb, permet de déterminer nettement plus précisément la banquette en pied que le principe de l'évaluation à l'aide de la longueur gabarit, et ce, toujours à partir de la plateforme supérieure.

Enfin, une méthode, utilisée dans certaines carrières soucieuses de la précision de leur schéma de tir, propose la préparation à l'avance de la maille du tir suivant : le tir N+1 est implanté avant que le tir N ne soit tiré. L'implantation du tir N+1 se base sur la dernière rangée du tir N, en traçant la première rangée du tir N+1 à une distance correspondant à la banquette. L'intérêt de cette pré-implantation réside dans la conservation de la banquette entre chaque ligne. Ainsi, même si le haut du front est irrégulier, on va pouvoir obtenir des trous avec une banquette en pied constante. Cette méthode présente un deuxième intérêt : il est possible de préparer et forer le tir même si le front n'est pas entièrement dégagé et que la reprise est encore en cours. La réussite de cette méthode dépend cependant de la manière dont l'opération d'abattage est maîtrisée.

Notons pour finir une pratique de la carrière de Piketty, à Ecuelles : dans la grande majorité des cas, les tirs sont réalisés suivant une seule rangée. Il est en effet clairement établi que la deuxième rangée de trous de mines travaille toujours moins bien que la première, pour plusieurs raisons. D'une part, les conditions de travail de la deuxième rangée dépendent de la qualité du travail de la première, qui n'est pas prévisible. D'autre part, le travail des rangées supplémentaires est toujours moins bon : les surfaces de dégagement de la deuxième rangée et sa mise en mouvement sont gênées par la première rangée, et la sortie de pied de la rangée suivante est nettement plus difficile. De plus, la mise en œuvre de deux rangées demande une séquence d'amorçage plus travaillée et plus compliquée. A Ecuelles, le responsable du minage préfère donc s'affranchir de cette deuxième rangée. Aussi, tirer sur 2 (voire 3) rangées comme cela est fait chez Hélary apparaît comme deux fois plus délicat

Il ne faut pas perdre de vue que l'implantation est la première étape du tir, et qu'ainsi, une implantation de qualité constituera de bonnes conditions pour la suite du déroulement du tir.

4.2. Foration

4.2.1. Mise en oeuvre de la foration

Sur les carrières Hélary, la foration est réalisée au moyen d'une foreuse roto-percutante Tamrock 1100, à marteau hors-trou. La société dispose d'une seule machine pour réaliser la foration sur ses 5 carrières, entre le Finistère et les Côtes d'Armor. Une fois la foration réalisée, le minage n'intervient donc en général que le lendemain, voire plus tardivement encore. La machine est chargée et transportée par porte-char entre les carrières. Ceci demande un certain temps de manœuvre (de l'ordre d'une heure pour le chargement) et engendre un coût de transport d'environ 400 € par déplacement.

Il faut voir que la carrière de Ruvernison bénéficie au niveau de la foration d'une organisation particulière : la carrière, située dans le Finistère, étant la plus éloignée, on tente de limiter le temps et les frais de déplacement de la machine en forant en général 2 tirs par déplacement.

La foration hors-trou hydraulique repose sur les quatre bases suivantes :

- le soufflage, pour évacuer les cuttings de foration ;
- la percussion, liée à l'énergie par coup et la fréquence de frappe du marteau ;
- la poussée, dont l'objectif est de maintenir en permanence le contact entre la roche et le taillant ;
- la rotation du taillant, pour qu'à chaque coup, les boutons du taillant travaillent sur un élément sain de roche.

La foration hors-trou utilise un marteau placé à l'extrémité d'une glissière, hors du trou ; la poussée, la rotation et la percussion sont communiquées au taillant via une série de tiges de forage, également désignées par le terme d'allonge. Les diamètres de taillants utilisés pour Hélary sont de 89, 92 ou 102 mm. Le diamètre des tiges de forage est de 60 mm.

Il faut voir que, par ce système hors-trou, le taillant n'est pas directement lié au marteau, ce qui peut engendrer des incertitudes quant à son mouvement, et donc une trajectoire non rectiligne. Aussi craint-on par l'utilisation d'une foreuse hors-trou des déviations de foration.

L'entreprise Hélary donne une inclinaison aux trous dans son schéma de tir. Ce choix d'une inclinaison entraîne d'une part des risques de déviation plus importants, et d'autre part des risques d'incertitudes sur l'orientation des trous.

Pour a priori minimiser les différentes incertitudes dans la foration, la machine de forage est équipée d'un certain nombre d'outils.

4.2.2. Equipements de la machine de foration

Adaptation des paramètres de forage

La machine est équipée d'un système adaptant les paramètres de poussée, rotation et percussion en fonction de la réaction de la roche : lors du forage, des zones de roches de compétence différente peuvent être rencontrées (matériel broyé, faille, filon de quartz par exemple), le système permet donc d'adapter les paramètres de foration en fonction du milieu à forer. Le but d'un tel système est d'éviter des déviations de foration dues aux passages dans les hétérogénéités, qui peuvent engendrer et accentuer ces déviations.

Système d'alignement de la glissière

Pour forer des trous inclinés, il convient tout d'abord de définir une orientation pour ces trous (azimut du plan vertical du trou) et ensuite de s'y tenir et de reproduire cette même orientation pour chacun des trous. Pour diminuer les erreurs d'orientation commises par l'opérateur, la machine de forage est équipée d'un système d'alignement automatique de la glissière, qui doit permettre de conserver l'orientation de la glissière, donc du forage, entre chaque trou foré.

Ce système d'alignement s'appuie sur le principe suivant : l'orientation souhaitée du forage (c'est-à-dire l'orientation de la glissière) est calculée par rapport à un point de visée de référence. A chaque nouveau trou foré, cette orientation est reportée par rapport au point de référence.

Système de laser tournant

La machine est équipée d'un système prévenant les irrégularités du carreau (c'est-à-dire des fonds des trous non coplanaires). Ceci est principalement engendré par le fait que la plateforme présente des irrégularités, ainsi, ces variations d'altitudes se reproduisent en fond de trou, malgré les corrections de longueur de foration que le foreur peut apporter. Pour pallier ce problème, un système de laser garantissant l'horizontalité du plan de référence est disponible chez Hélary. Ce système de laser tournant, placé sur la plateforme, définit un plan horizontal qui sert de référence pour forer des trous de longueurs identiques par rapport à ce plan de référence. Cela réalise ainsi un carreau plan (aux incertitudes d'inclinaison près).

Il est étonnant de voir que ce système est disponible, mais pas ou rarement utilisé.

4.2.3. Mesure de la foration par Diadème

Une sonde Diadème est un outil permettant de connaître la distance entre le trou et une surface libre: ceci peut par exemple permettre de positionner, de manière relative, le trou par rapport au front d'exploitation. Cet outil de mesure électromagnétique de distance est composé d'une sonde émettrice et d'une sonde réceptrice (voir figure 14), entre lesquelles on peut acquérir la distance à travers le massif rocheux. Cet outil est en général utilisé pour le contrôle des banquettes en pied, pour assurer un bon cisaillement du pied ou prévenir des projections à ce niveau. D'utilisation simple et rapide, il donne un accès direct à l'information.

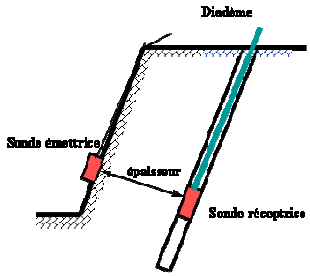


Figure 14
Principe de la mesure de la banquette par sonde Diadème

La société Hélary dispose d'un capteur Typex, type sonde Diadème. Des contrôles par ce capteur sont systématiquement effectués sur les carrières Hélary avant le tir : l'information ainsi acquise permet au mineur d'adapter le chargement en pied en fonction de la banquette réelle. Il s'agit essentiellement d'éviter les projections dues à une surconcentration d'énergie liée à une banquette trop faible.

Le caractère systématique de ces mesures chez Hélary est un point notable, indiquant le souci du mineur de garantir la sécurité de ses tirs.

4.2.4. Possibles déviations de foration

Plusieurs aspects laissent craindre des déviations lors de la réalisation de la foration à Ruvernison. En effet, les contrôles de banquette par sonde Diadème, effectués systématiquement, indiquent pour chaque tir que la banquette en pied de 3,25 m souhaitée n'est jamais réalisée de manière constante. L'irrégularité du front et les déviations de foration en sont responsables.

Les déviations de forage peuvent être dues à plusieurs éléments :

- des erreurs d'implantation et d'amorce de la foration ;
- des erreurs d'inclinaison et de direction ;
- des déviation dues au flambage des tiges ;
- des déviations dues aux structures présentes dans le massif rocheux ;
- des erreurs de profondeur.

Les erreurs d'orientation et d'inclinaison sont a priori prévenues par le système d'alignement de la machine. Cependant, ce système d'alignement automatique de la glissière, dimensionné pour de plus grandes carrières, introduit systématiquement une erreur de parallaxe (voir figure 15) lors de la prise d'un point de visée à courte distance (c'est souvent le cas à Ruvernison, où la carrière est de petite taille). Pour limiter cette erreur, il faudrait soit corriger systématiquement manuellement le biais introduit (ce biais peut être calculé par la formule de l'équation 10), soit prendre un point de visée de référence perpendiculaire à la direction d'abattage, soit réinitialiser la machine à chaque trou à forer, en utilisant le nord magnétique comme référence absolue.

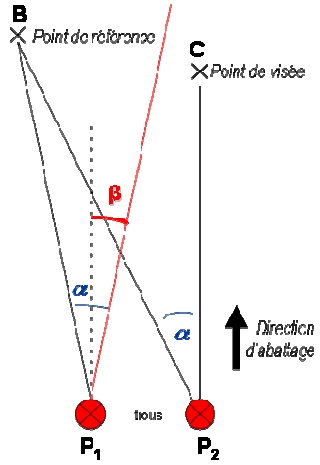


Figure 15

β: Erreur de parallaxe introduite par le système d'alignement de la glissière

$$\beta = \alpha - Arc\sin\left(\frac{P_1P_2}{BP_2}\sin(90-\alpha)\right)$$

Équation 10, erreur angulaire due à la parallaxe

Les erreurs de longueur à forer sont corrigeables par l'utilisation du système de laser tournant, à ceci près que la hauteur de front doit être connue pour déterminer la longueur exacte à forer. Les irrégularités quant aux longueurs à forer peuvent être dues à une négligence de l'opérateur d'une part, ou au rebouchage des trous (par chute de petits éléments) d'autre part. A ce titre, le tubage des parties supérieures des trous engendre certes des coûts supplémentaires, mais garantit une bonne tenue du forage. Dans le cas de Ruvernison, où les tirs peuvent être effectués jusqu'à quelques jours après la foration, ce tubage des trous permettrait un gain notable : conservation de la qualité du forage, diminution du risque de perdre un trou (élément coincé en travers du trou, chargement de gravillons de bourrage sur le trou…).

D'autre part, les systèmes de foration hors-trou sont en général plus sensibles aux déviations que les engins fond de trou. Il convient donc particulièrement de prendre des précautions pour réduire voire éviter ces déviations :

- tout d'abord, choisir le couple taillant-tiges de forage de diamètre le plus adapté, du point de vue de la poussée et de la percussion. Dans notre cas, il s'agit des couples (89, 51) et (102,60) (respectivement diamètre de taillant et diamètre des tiges d'allonge, en mm). De plus, le flambage est d'autant plus réduit que le diamètre de l'allonge est important ;
- choisir le type de taillant le moins influencé par les discontinuités et s'assurer de la bonne symétrie du taillant lors de son affûtage;
- réduire le flambage des tiges en trouvant l'optimum de poussée. Ceci risque d'engendrer une diminution de la vitesse de foration : cet aspect peut poser problème quand on considère des aspects économiques et des aspects de productivité, mais la qualité de la foration et donc de l'abattage en dépend ;
- l'utilisation d'un tube guide permet de réduire significativement les déviations.

L'argument économique souvent avancé lorsque l'on considère la foration doit cependant être nuancé : des moyens tels que les tubes guides ou la diminution de la vitesse de foration engendrent certes des coûts supplémentaires, mais permettent une géométrie de foration correcte. Les conséquences d'un schéma de foration réel non conforme au schéma théorique ne sont pas chiffrables directement, mais représentent des pertes importantes.

Certains éléments, comme la détermination des déviations réelles, ou de la longueur forée par rapport à la géométrie du front, ne sont pas déterminables avec les systèmes de mesure disponibles chez Hélary : il faut donc introduire d'autres outils pour mesurer plus précisément. Aussi les mesures effectuées sur les tirs instrumentés apportent des éléments quantitatifs à cette analyse.

Nous n'insisterons jamais assez sur le fait que la foration est l'opération clé dans le passage à la pratique, et que les écarts entre le schéma de tir théorique et la foration effectivement réalisée sont autant de sources de dégradation de la qualité de l'abattage, voire de risques au niveau sécurité.

4.3. Chargement et amorçage

4.3.1. Méthode de chargement

La mise en œuvre du chargement est réalisée par le responsable du minage : il dispose d'un plan de chargement théorique, celui présenté dans la deuxième partie de ce rapport. Il effectue ensuite des adaptations autour de ce chargement théorique, en fonction du contexte. Cette adaptation consiste essentiellement en deux points :

- choisir le type d'explosifs en fonction de l'état du trou. Typiquement, le nitrate-fuel se décompose en présence d'eau, aussi un trou plein d'eau va-t-il être chargé avec des émulsions encartouchées ;
- limiter la charge de pied lorsque la banquette mesurée en pied par la sonde Diadème est insuffisante, pour garantir la sécurité du tir. La limitation de la charge repose sur le choix d'un diamètre de cartouches inférieur.

Ce dernier point nécessite quelques remarques : diminuer le diamètre des cartouches pour limiter la charge est peut-être discutable. Il faut en effet voir que les pertes d'énergie dans l'espace annulaire sont considérables, et réduisent d'autant plus l'efficacité d'un explosif encartouché. L'utilisation de cartouches de diamètre 70 mm dans un trou de 102 semble peu cohérente. Sur la carrière de Piketty à Ecuelles, le responsable du minage fait parfois ce choix. Mais ceci est justifié par la nature du terrain : le banc de calcaire exploité contient certains niveaux plus marneux, le trou est donc globalement irrégulier et flue, ce qui gène à la descente de la cartouche. D'où l'emploi de plus faibles diamètres pour éviter que la cartouche ne se coince lors de sa chute. Cependant, à Ruvernison où la roche est très compétente, on ne peut pas avancer cet argument (hormis éventuellement si il y a présence d'eau, qui gêne le déplacement des cartouches). Le principe de l'adaptation de la charge peut donc être quelque peu revu.

4.3.2. Méthode d'amorçage

La séquence de détonation du plan de tir est faite suivant la surface de dégagement et l'évolution de l'abattage souhaitées. Rappelons que l'amorçage est un amorçage fond de trou avec des détonateurs électriques à court-retard, et que la détonation se fait sur deux étages, le premier étage (supérieur) partant en premier, le deuxième étage suivant 12 ms plus tard. La séquence d'amorçage utilise un exploseur séquentiel à pas variable et à pas indépendant entre les lignes.

La séquence d'amorçage dessinée réalise un amorçage en diagonale, ceci pour donner un mouvement au front d'onde et au dégagement des matériaux. Cependant, cet amorçage en diagonale ne respecte plus le rapport espacement sur banquette dessiné en surface : pour calculer le rapport E/B effectivement réalisé, on va prendre en compte la dynamique du tir, et considérer non pas la banquette et l'espacement géométriques, dessinés en surface, mais ces paramètres tels qu'ils sont dessinés par la séquence d'amorçage, entre deux trous détonant consécutivement.

Le rapport E/B statique, calculé à partir des paramètres géométriques de surface, est de 1,25. Mais ce qui est à prendre en compte est le rapport E/B dynamique de $E/B + B/E$, soit 2,05. La figure 16 illustre cette constatation. Ce rapport est nettement plus élevé que les valeurs de 1 ou 1,5 indiquées généralement, peut engendrer des inhomogénéités de fragmentation.

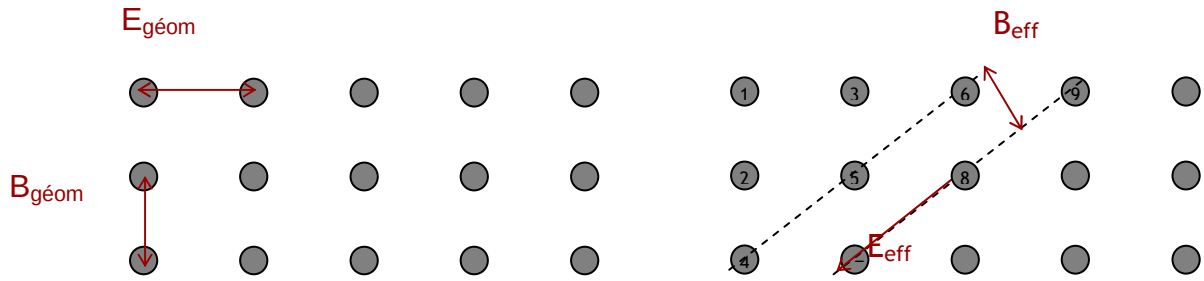


Figure 16

Maille géométrique — **Maille effectivement réalisée par la séquence d'amorçage**

4.3.3. Directions de travail

Quelques remarques peuvent venir compléter les remarques faites dans les paragraphes précédents, notamment au niveau de la séquence d'amorçage.

L'amorçage en diagonale n'est pas à exclure, malgré la remarque ci-dessus : il convient seulement de réadapter la maille, si l'amorçage en diagonale est retenu. On peut par exemple réaliser une maille en quinconce, en respectant le rapport E/B qui sera réalisé dans la séquence d'amorçage.

Concernant l'exploseur séquentiel, il existe d'autres possibilités d'utilisation du séquentiel, qui respectent le paramètre de sécurité d'initiation : le principal avantage de l'exploseur séquentiel est effectivement de créer une multitude de nouveaux délais de départ à partir des 20 numéros existants. Il faut néanmoins veiller à ce que tous les détonateurs aient été initiés avant la première détonation. L'utilisation de lignes supplémentaires sur le séquentiel permet cependant de ne pas se limiter uniquement à la création de délais inférieurs.

Il faut enfin mentionner que les amorçages à l'électronique ou au Nonel n'obligent pas à limiter à 20 le nombre possible de trous à miner.

Partie 3 :
Mises en œuvre, analyses et résultats

Dans la partie précédente, des réflexions théoriques sur le dimensionnement d'un schéma de tir ont été proposées, suivies d'une analyse de la mise en pratique de ces éléments standards : cette étude laisse entrevoir qu'il existe des écarts entre le schéma de tir théorique et sa mise en pratique, ne serait-ce que parce que les conditions dans lesquelles on travaille ne sont pas parfaites. Pour évaluer et quantifier la manière dont le schéma de tir est mis en pratique, il va être important de faire un certain nombre de mesures : on ne voit rien tant qu'on ne mesure pas.

1. Outils de mesure d'un tir

Nous avons détaillé dans la partie précédente les méthodes de travail chez Hélary, ainsi que les outils de mesure disponibles. Cependant, tous ces outils (Diadème, LaserAce…) ne fournissent pas ou peu d'informations concernant la géométrie du massif à abattre. Il faut donc utiliser d'autres outils, les outils de profilage de front et de mesures de déviations de foration, si l'on veut déterminer précisément la géométrie d'un tir. Ces outils sont présentés dans la suite de cette partie. Ils ont servi aux mesures complètes de 3 tirs effectués à Ruvernison.

1.1. Mesures de l'allure de la foration

1.1.1. Mesures d'inclinaisons des trous

Le Diadème, en tant qu'outil de mesure de distance, ne fournit qu'une information restreinte, information néanmoins précieuse car portant sur l'une des zones critiques du tir : la banquette en pied. Pour obtenir des informations sur la géométrie réelle des trous, il faut faire des mesures d'inclinaison via d'autres appareils.

Les outils Boretrak permettent de mesurer les inclinaisons des trous à différentes profondeurs et donc d'accéder à une information plus précise sur la géométrie des trous.

Le Boretrak à tiges est constitué d'un train de tiges rigides munis d'inclinomètres que l'on descend dans le trou, cela permet ainsi une reconstitution complète et directe du trou et de ses déviations.

Le Boretrak à câble, de même que son homologue à tiges, permet également de mesurer l'inclinaison du trou. Constituée d'une boussole et d'un inclinomètre, la sonde que l'on descend dans le trou enregistre en différents points du trou le pendage et l'inclinaison. A partir de ces mesures ponctuelles, un traitement des données permet de reconstituer la géométrie du trou. Par rapport au Boretrak à tiges, le Boretrak à câble est plus facile à mettre en œuvre, cependant, il est sensible aux perturbations magnétiques du massif (dans notre massif granitique, cela ne pose pas de problème particulier).

1.1.2. Calcul de la géométrie réelle des trous

Sur la carrière de Ruvernison, un contrôle de la géométrie de la foration a été réalisé à l'aide d'un Boretrak à câble. La base de données obtenue est donc constituée, pour chaque trou, de mesures de l'azimut et du pendage du trou en différents points de mesure pris à des intervalles réguliers. Ces données d'orientation et d'inclinaison du trou ne donnent pas sa position absolue, l'information est indirecte et il est nécessaire de traiter les données.

1.1.2.1. Méthodes d'extrapolation

Les mesures d'orientation et de pendage définissent une série de vecteurs qui correspondent au vecteur directeur du trou en chaque point de mesure.

L'approche la plus simple, celle a priori utilisée par Nitro Bickford dans ses levés, est la méthode tangentielle. Cette approche considère une extrapolation linéaire du vecteur mesuré au point N+1 entre les points de mesure N et N+1(*Applied Drilling Engineering, 1991)*. Les données mesurées au point N ne sont pas prises en compte dans le calcul de la géométrie du trou entre les points N et N+1.

$$\Delta Z = \Delta L * \cos(i_{N+1})$$
$$\Delta D = \Delta L * \sin(i_{N+1})$$
$$\Delta Y = \Delta D * \cos(A_{N+1})$$
$$\Delta X = \Delta D * \sin(A_{N+1})$$

Équations 11, méthode de la tangente

(on note respectivement A_N et i_N l'azimut et l'inclinaison mesurés au point N)

D'autres approches ont été développées, par les pétroliers notamment, qui utilisent le même système de mesure, sur des longueurs de foration et sur des déviations de forage beaucoup plus importantes. Ces méthodes se veulent minimiser les écarts entre la géométrie calculée et la géométrie réelle. Il en existe plus de 18.

Une autre approche, la méthode de l'angle moyen, propose toujours une extrapolation linéaire entre les points N et N+1, à partir cette fois de la moyenne des vecteurs aux points N et N+1. Cette méthode considère ainsi une variation plus progressive au cours des points de mesure que la méthode tangentielle.

$$\Delta Z = \Delta L * \cos\left(\frac{i_N + i_{N+1}}{2}\right)$$
$$\Delta D = \Delta L * \sin(\frac{i_N + i_{N+1}}{2})$$
$$\Delta Y = \Delta D * \cos(\frac{A_N + A_{N+1}}{2})$$
$$\Delta X = \Delta D * \sin(\frac{A_N + A_{N+1}}{2})$$

Équations 12, méthode de l'angle moyen

D'autres méthodes proposent des approximations curvilignes de la trajectoire du puits, au lieu des extrapolations linéaires appliquées dans les méthodes précédentes. La géométrie du trou résulte en effet de la trajectoire suivie par le taillant, qui s'approche plus

d'une courbe que d'une succession de segments ; ainsi ces approximations curvilignes reflètent a priori plus fidèlement la géométrie du trou.

La méthode du minimum de courbure *(Taylor, H.L. and Mason C.M., 1972)* utilise les vecteurs mesurés aux points N et N+1 et suppose que la trajectoire entre ces deux points est un arc de cercle tangent aux vecteurs N et N+1.

$$DL = \mathrm{Arc}\cos\left[\cos(i_N)\cos(i_{N+1}) + \sin(i_N)\sin(i_{N+1})\cos(A_{N+1} - A_N)\right]$$

$$K = \frac{\Delta L}{DL}\tan\left(\frac{DL}{2}\right)$$

$$\Delta Z = K * \left(\cos(i_N) + \cos(i_{N+1})\right)$$

$$\Delta D = K * \left(\sin(i_N) + \sin(i_{N+1})\right)$$

$$\Delta Y = K * \left(\sin(i_N)\cos(A_N) + \sin(i_{N+1})\cos(A_{N+1})\right)$$

$$\Delta X = K * \left(\sin(i_N)\sin(A_N) + \sin(i_{N+1})\sin(A_{N+1})\right)$$

Équations 13, méthode du minimum de courbure

1.1.2.2. Comparaison de la méthode tangentielle et de la méthode du minimum de courbure

Plusieurs méthodes d'extrapolation et de calcul de géométrie de trous étant envisageables, j'ai cherché à faire une comparaison de ces différentes méthodes, afin de voir quels écarts sont obtenus entre les différents résultats.

Les comparaisons que j'ai effectuées sont de deux types :

- tout d'abord, comparaison entre deux pas d'échantillonnage différents pour une même méthode de calcul ;
- ensuite, comparaison des différentes méthodes d'extrapolation entre elles.

Sensibilité au pas d'échantillonnage pour une même méthode de calcul

Le pas d'échantillonnage standard réalisé lors des mesures est de 3 m, c'est-à-dire que les relevés d'inclinaison et d'orientation du trou sont réalisés lorsque la sonde a été déplacée de 3 m dans le trou. Or, sur un trou de 16 m de long, avec les déviations importantes constatées, ce pas d'échantillonnage semble un peu élevé. C'est pourquoi il a été conseillé de réduire ce pas d'échantillonnage à 2 m, voire 1 m pour les études de comparaison réalisées ci-dessous.

Cette analyse s'appuie sur les levés des trous 1, 2 et 3 du tir N°3 (voir partie 3), pour lesquels les intervalles de mesures étaient de 1 m. Pour chacune des méthodes d'extrapolation, j'ai calculé tout d'abord l'allure du trou avec les valeurs mesurées tous les mètres, puis une deuxième allure de ce même trou, en sélectionnant 1 mesure sur 3 (cela revient à recréer un pas d'échantillonnage de 3 m). J'ai alors pu comparer les deux allures de trous ainsi calculées. Les figures 17 représentent pour le trou N°1, les allures des trous calculées par la méthode de la tangente, allures projetées dans le repère cartésien Oxyz :

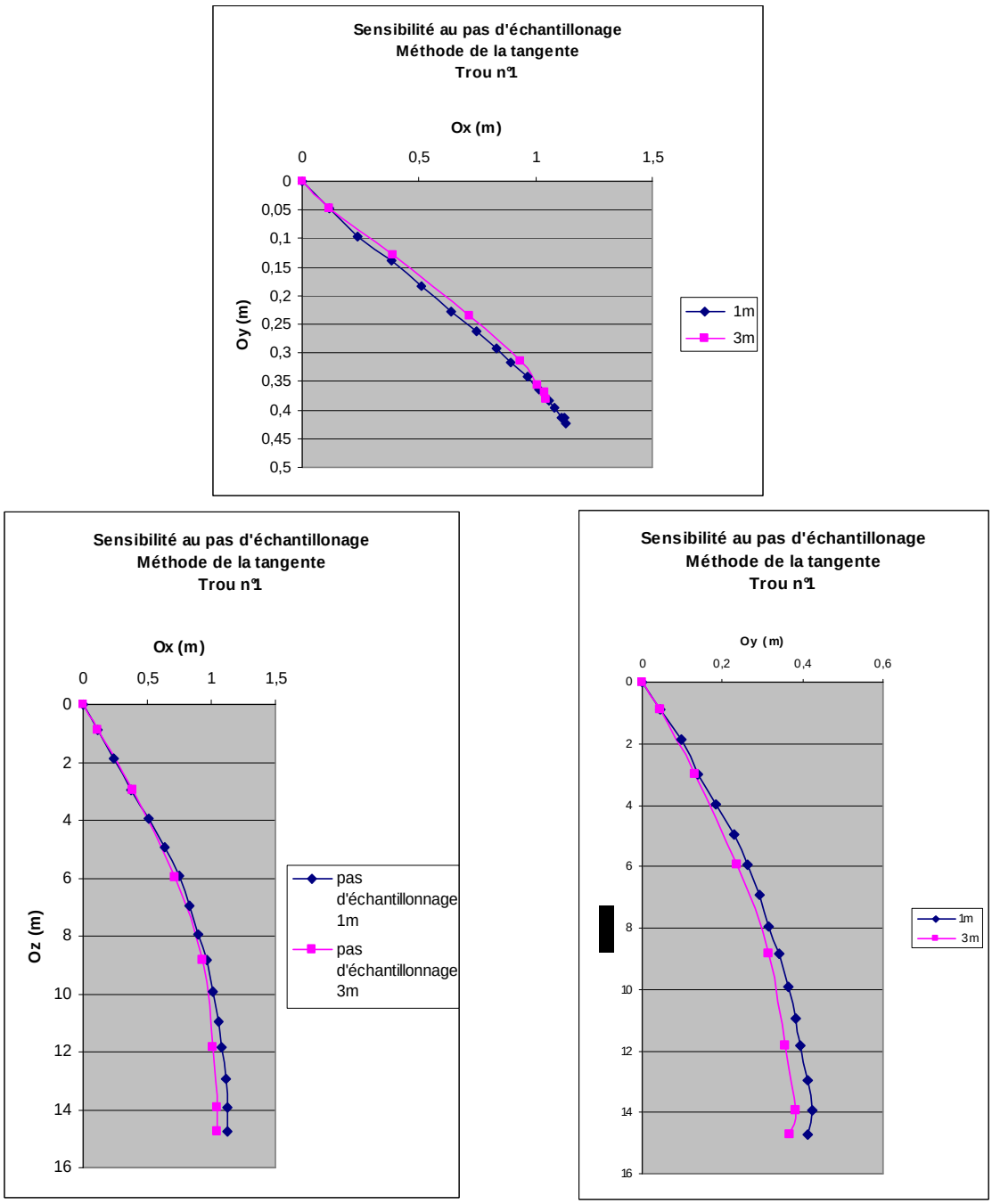


Figure 17
Sensibilité au pas d'échantillonnage

Ces sensibilités ont été réalisées pour chacun des 3 trous étudiés, et pour chacune des méthodes de calcul. Les résultats sont présentés dans le tableau suivant, qui rassemble les distances suivant chaque coordonnée cartésienne entre le modèle échantillonné finement et le modèle échantillonné plus grossièrement.

	Méthode de la tangente			Méthode de l'angle moyen			Méthode du minimum de courbure		
Trou N°	DZ (cm)	DY (cm)	DX (cm)	DZ (cm)	DY (cm)	DX (cm)	DZ (cm)	DY (cm)	DX (cm)
1	0,688	4,295	8,525	0,075	0,417	1,964	0,115	1,071	2,186
2	0,175	3,242	2,198	0,107	2,555	0,461	0,100	2,228	0,382
3	2,624	14,963	9,652	3,347	10,793	17,294	3,272	10,181	17,244

Tableau 16
Sensibilité au pas d'échantillonnage

On constate ainsi des écarts maximums de 20 cm entre les 2 pas d'échantillonnage. Ces écarts sont nettement plus faibles, inférieurs à 10 cm pour les 2 premiers trous. Le troisième donne, quelle que soit la méthode, des incertitudes plus importantes : la trajectoire du troisième puits est en effet nettement plus chahutée, ce qui est vraisemblablement la cause de ces écarts.

En mettant de côté ce troisième puits irrégulier, on peut remarquer que la méthode qui est la plus sensible au pas d'échantillonnage est la méthode de la tangente.

Nous verrons dans la suite comment interpréter ces écarts.

Sensibilité à la méthode d'extrapolation

Comme présenté au début de cette partie, il existe différentes méthodes de calcul de l'allure d'un trou à partir d'une série de données d'azimut et de pendage. Certaines méthodes sont plus représentatives au niveau physique ou au niveau comportemental.

J'ai donc regardé si ces différentes méthodes d'extrapolation introduisaient des écarts dans l'allure des trous calculée.

Le graphe suivant (figure 18) présente, pour chaque trou du tir N°3, les distances cartésiennes entre les extrémités inférieures des trous calculés par les 3 méthodes.

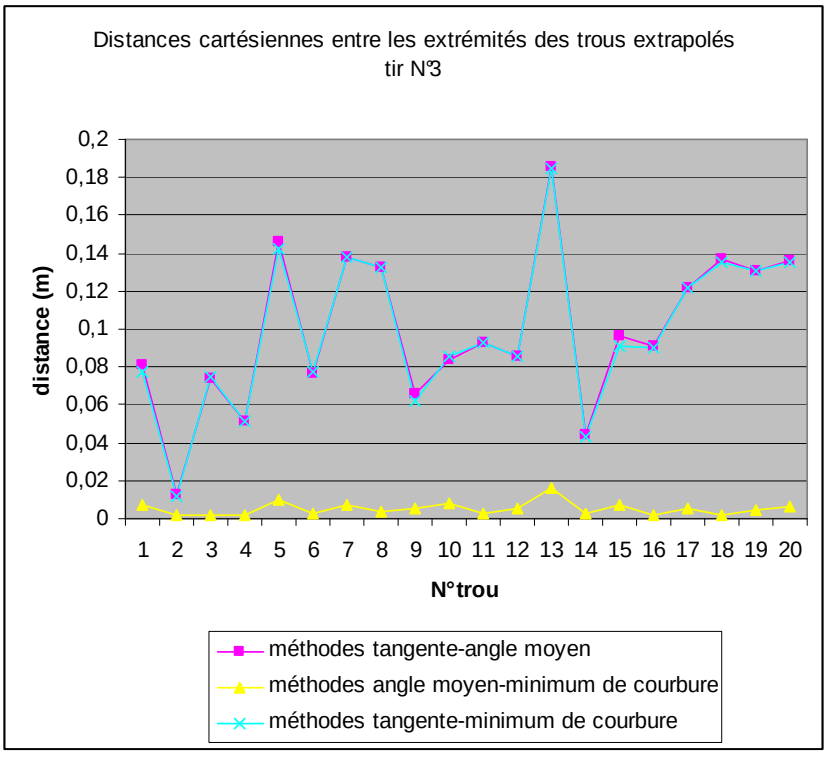


Figure 18
Sensibilité à la méthode de calcul

Ce graphe indique donc que les méthodes du minimum de courbure et de l'angle moyen donnent les mêmes positions pour les trous, à 2 cm près. Par contre, la méthode de la tangente donne des positions différentes des deux autres méthodes, avec des écarts variables de presque 20 cm.

Cette analyse nous permet donc de conclure quant à la fiabilité des trois méthodes : les méthodes de l'angle moyen et du minimum de courbure semblent équivalentes, et la méthode de la tangente plus incertaine, ce qui confirme nos présomptions.

La méthode du minimum de courbure étant la plus représentative physiquement, les extrapolations les plus précises sont a priori obtenues avec cette méthode.

Conclusions

Rappelons que le diamètre de foration est de 102 mm. Ainsi, des incertitudes dans les méthodes de calcul de 10 cm restent encore acceptables. De plus, il ne faut pas perdre de vue que ces extrapolations sont fondées sur des mesures obtenues par une boussole et un inclinomètre, qui possèdent tous deux une certaine précision. Les boussoles sont en général précises à 1-1,5°, les inclinomètres ont une précis ion de 0,2°. Les incertitudes sur les levés de distances sont de 10 cm environ (précision de la sonde utilisée par Nitro Bickford). Ces incertitudes sont indépendantes pour chaque mesure, mais se cumulent lors de l'extrapolation, et entretiennent la dispersion des résultats.

Cette analyse nous permet donc de prendre du recul par rapport aux données fournies par NitroBickford pour le profil des trous : ces profils sont a priori donnés au décimètre significatif, avec cependant des méthodes d'extrapolation (méthode de la tangente) et des outils de mesure dont la précision est du même ordre de grandeur : la précision des profils de trous fournis est donc plutôt de quelques dizaines de centimètres.

Enfin, d'un point de vue pratique, si l'on cherche à représenter fidèlement l'allure d'un trou, on proscrira ainsi les extrapolations à partir de la méthode de la tangente, et on choisira un pas d'échantillonnage de 2 m maximum, afin de ne pas ajouter aux incertitudes des outils de mesure des incertitudes de calculs importantes.

1.2. Systèmes de levés du front

Utilisés seuls, les systèmes de contrôle de la géométrie de la foration ne fournissent pas ou peu d'information quant à la géométrie du massif à abattre. Il est ainsi important de compléter l'information obtenue par contrôle de la géométrie du forage par un levé du front de taille et de la position des trous : ces levés permettent ainsi de modéliser le massif rocheux et les trous y ayant été forés.

1.2.1. Théodolite laser

L'outil classiquement utilisé pour le profilage d'un front est le théodolite laser : c'est typiquement le LaserAce dont dispose Hélary. Le but de cet outil est de relever topographiquement les coordonnées de points du front, qui permettront d'obtenir une géométrie en trois dimensions du front à abattre (voir figure 19). Le théodolite laser mesure trois paramètres : la déclinaison (angle vertical), l'azimut (angle horizontal) et la distance, c'est-à-dire les coordonnées sphériques des points du front.

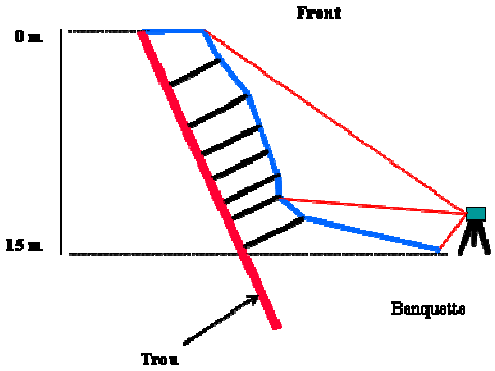


Figure 19
Système de levé du front par Laser

Un système motorisé autour de cet outil permet d'obtenir un levé automatique des points, à l'intérieur d'une zone, suivant des intervalles réguliers choisis. Un tel levé automatique nécessite des réglages (calibrage, points de repères…), mais permet de lever un front entier en 1h environ.

Ce système de levé a été utilisé par la société NitroBickford, lors des mesures de déviations de trous. Le pas d'échantillonnage permet d'obtenir un maillage de l'ordre de 50 – 75 cm.

1.2.2. Système Blast Metrix

J'ai eu l'opportunité d'utiliser sur la carrière de Ruvernison un système de levé de front peu connu en France, développé par des chercheurs de l'université autrichienne de Leoben et une entreprise autrichienne. Ce système, appelé Blast Metrix System, repose sur le principe de la reconstitution du front par stéréo photogrammétrie : deux prises de vues numériques du front sont traitées simultanément pour recréer le front en 3 dimensions (voir figure 20).

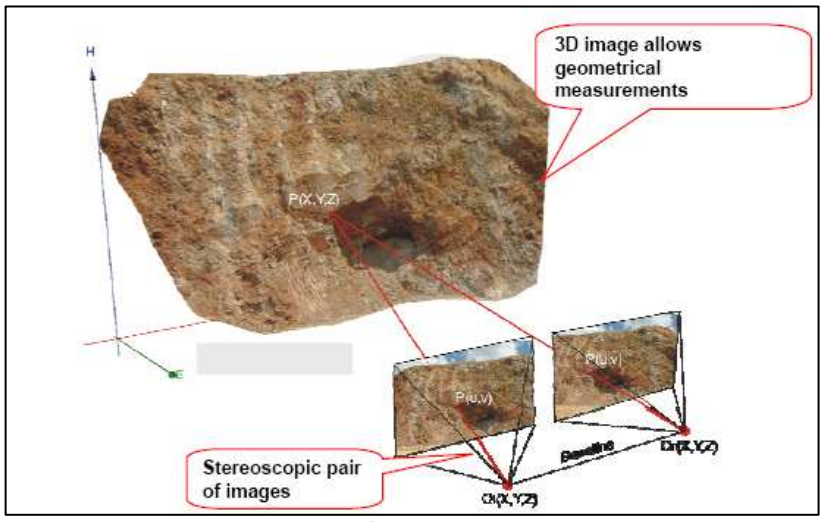


Figure 20
Principe de reconstitution du front par traitement d'images
Source : société 3G software&measurement

La société autrichienne, 3G software&measurement, m'a gracieusement mis à disposition le logiciel pendant la durée de mon stage.

Les données nécessaires pour ce type de traitement sont deux photos prises face au front, à quelques mètres de distance. Sur ces photos doivent être placées des mires, au niveau du haut du front et du carreau, mires qui servent d'échelle dans la reconstitution 3D.

Ces mires sont en principes vendues en même temps que le logiciel. N'ayant pu m'en procurer, j'ai fait réaliser des mires similaires « artisanales » qui n'ont pas posé de problème lors du traitement.

Les prises de vues doivent normalement être effectuées par un appareil photo numérique Reflex dont les lentilles ont été au préalable calibrées. Je ne disposais cependant pas de ce matériel, mais d'un appareil numérique classique, à résolution suffisante, mais sans calibrage de la lentille. Aussi les reconstitutions de front obtenues à partir de mes images numériques sont peut être légèrement faussées.

Ainsi, les fronts levés par théodolite laser par NitroBickford ont également été levés par mon test de stéréo photogrammétrie.

1.2.3. Comparaison des systèmes de levés du front

Une comparaison des résultats obtenus avec les deux systèmes de levé du front a été réalisée, afin de déterminer la précision relative de chacun des systèmes et de déterminer le biais éventuel introduit par le non calibrage de la lentille de l'appareil photo. J'ai ainsi effectué cette comparaison pour les levés du front du tir N°2 (voir III 3.)

Cette comparaison a été réalisée au moyen du géo modeleur GOCAD. Avec ce logiciel de modélisation en 3D, j'ai pu visualiser les 2 maillages correspondant aux deux fronts relevés.

Quelques remarques préliminaires concernant ces maillages :

- les coordonnées de chacun des points n'étant pas des coordonnées absolues, mais des coordonnées relatives (par rapport au point de prise de vues), les deux maillages ne se trouvent pas à la même position et il faut les caler ;
- les deux maillages n'ont pas la même taille de maille : le maillage du front par levé laser possède des mailles dont les nœuds correspondent à chaque point de levé, c'est-à-dire une taille de maille de l'ordre de 50 cm à 1 m. Le maillage par reconstitution 3D est nettement plus fin : la limite de résolution de la stéréo photogrammétrie est en effet nettement plus basse (j'ai sélectionné un maillage de résolution moyenne par ce système, maillage de 10 000 points, le maillage du front levé par laser en comprenant 1700).

L'étape suivante du processus a donc été de repositionner les maillages par des translations et des rotations successives, pour ajuster la position des deux fronts. Au vu des possibilités de GOCAD et des hétérogénéités des surfaces des deux fronts, je n'ai pas réussi à obtenir un calage « parfait » : ceci demande une étude nettement plus longue et plus poussée.

La figure 21 présente les représentations spatiales des deux maillages (en violet, le maillage grossier du front par levé Laser, et en blanc, le maillage du front par reconstitution 3D).

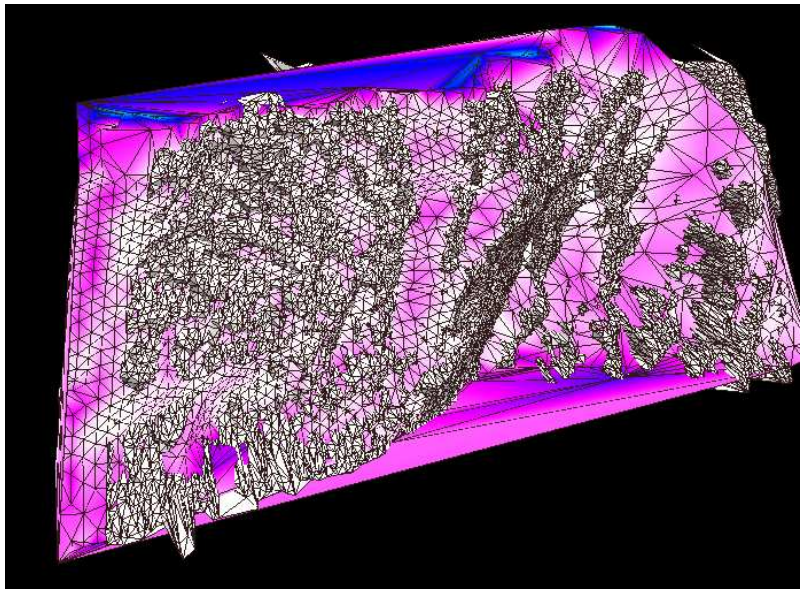


Figure 21
Visualisation des fronts obtenus par les deux systèmes de levé de front

On constate à première vue que les deux fronts coïncident globalement : les hauteurs de front sont les mêmes, les zones de discontinuités ou de cavages correspondent.

On peut maintenant passer à l'étape de comparaison des distances entre les deux modèles. Pour cela, GOCAD calcule non pas la distance cartésienne entre chaque nœud, mais la distance entre les projetés de deux nœuds suivant une direction, la verticale. La figure 22 représente la cartographie de ces distances entre les deux surfaces.

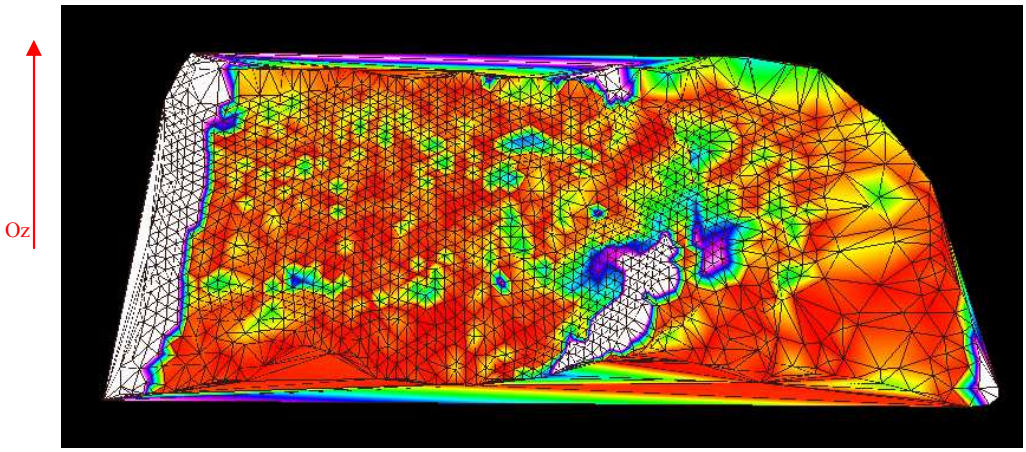


Figure 22
Distance entre les deux fronts obtenus par les deux systèmes de levé de front

Légende : 

On constate ainsi ce qu'on pouvait intuiter en observant la superposition des deux maillages : les deux systèmes de reconstitution du front s'accordent. On constate que la majeure partie de la carte (près de 80%) correspond à des distances inférieures à 50 cm.

De plus, les zones qui correspondent à des distances importantes (zones blanches) ne sont pas forcément significatives : comme indiqué précédemment, le calcul de distance se fait via des projections selon l'axe Oz (vertical) ; ainsi, dans la zone blanche, qui

représente une faille, où le gradient selon z est fort, les distances sont biaisées par la projection (voir figure 23).

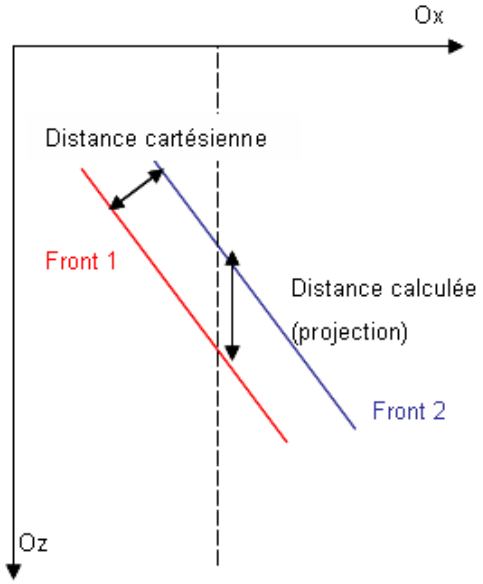


Figure 23
Illustration du calcul de la distance sous Gocad

Rappelons de plus que les deux maillages ne sont pas superposables : pour faire une comparaison rigoureuse des distances entre les modèles, il aurait fallu faire un upscaling du maillage fin sur le maillage grossier et calculer les distances cartésiennes entre les surfaces obtenues.

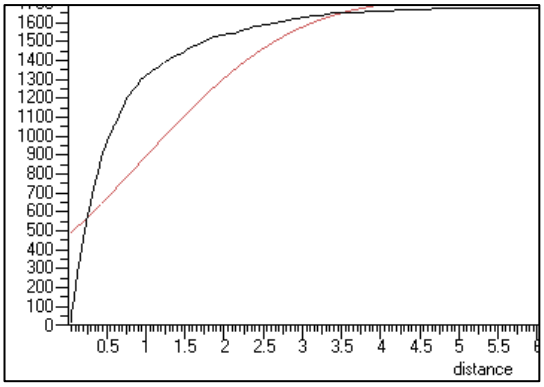


Figure 24
Nombre cumulé de mailles en fonction de la distance

Le graphe présenté en figure 24 nous donne la distribution du nombre de mailles en fonction des distances, les grandes distances pouvant être dues à la présence de la faille ou aux effets de bord.

Malgré ces approximations de traitement, on peut tout de même tirer des conclusions de cette comparaison : les deux fronts correspondent globalement, les biais introduits par le non-calibrage de la lentille de l'appareil photo ne sont pas supérieurs à la précision du système de levé laser et ne distordent pas la reconstitution.

D'autre part, cette analyse nous renseigne sur la précision de chacun des deux systèmes : le système de levé Laser apparaissait a priori comme le plus fiable, mais c'est en fait à nuancer, car le front d'exploitation n'est pas très rectiligne et plutôt chahuté, donc le maillage grossier que l'on obtient peut passer « à côté » de certains détails. Ensuite, la reconstitution numérique 3D a été validée, ou du moins n'a pas été écartée à cause de biais possibles par manque de calibrage (ou utilisation de mires « artisanales »). C'est finalement

ce système Blast Metrix qui semble le plus fiable et le plus adapté pour un front non régulier, car il apporte une précision adéquate.

Notons de plus que le système est simple d'utilisation, rapide, et ne demande que peu de manipulations (donc peu d'incertitudes introduites par l'utilisateur dans sa manipulation).

1.2.4. Utilité de la connaissance de la géométrie du front

Tout profilage du front s'accompagne d'un levé de la position des trous déjà forés. Ces mesures permettent de relier la géométrie du front aux informations de déviation de foration. On peut alors obtenir la géométrie tridimensionnelle du front à abattre, et déterminer précisément le volume à abattre, et le profil de chaque trou. En intégrant les données de chargement à ces volumes, on va pouvoir connaître les conditions géométriques et énergétiques précises du tir.

Ainsi, l'utilisation qui a été faite de ces outils est une utilisation a posteriori. On peut cependant imaginer une utilisation avant la réalisation du tir, pour déterminer l'implantation idéale du schéma de tir d'une part, et pour adapter le chargement aux conditions géométriques d'autre part. Ces aspects seront développés dans la dernière partie du rapport.

1.3. Mesure des résultats des tirs

Pour évaluer les résultats d'un tir, considérons les phénomènes qu'engendre un tir d'abattage dans son environnement :

- la fragmentation du massif rocheux tout d'abord, qui est le but recherché de l'opération ;
- l'onde vibratoire solide, qui se propage dans le massif rocheux ;
- l'onde vibratoire aérienne, ou onde sonore, qui se propage dans l'air.

Ces deux derniers phénomènes ne participent pas à la réalisation du but recherché, à savoir la fragmentation du massif rocheux. On considère donc ces ondes comme des pertes d'énergie ou des nuisances, mais ces aspects font tout de même partie intégrante d'un tir d'abattage.

Pour déterminer les résultats d'un tir, il va donc falloir évaluer le déroulement du tir d'une part, puis regarder dans quelle mesure l'abattage atteint le but recherché et limite les pertes annexes.

1.3.1. Evaluation granulométrique du tas abattu

Le but recherché par les carriers via l'opération d'abattage est de fragmenter le massif rocheux. Le matériel abattu est destiné à passer dans des installations de concassage criblage pour être fragmenté plus finement et trié, c'est donc par rapport à cet objectif que vont être regardés certains paramètres qui évaluent le résultat direct du tir. A ce titre, nous allons considérer les éléments qui influent directement sur le rendement des opérations en aval, c'est-à-dire le chargement et le transport, et le concassage primaire. Les éléments principaux qui interviennent sont donc :

- la granulométrie : elle est l'information principale qui caractérise le tas abattu. Dans l'information granulométrique, les éléments importants sont d'une part les proportions des tailles extrêmes de la distribution (gros blocs et fines), et d'autre part la répartition des classes granulométriques moyennes. C'est une information assez difficilement accessible. Différentes appréciations qualitatives ou indirectes peuvent cependant en être faites ;

- la forme du tas abattu : en fonction de sa forme, et essentiellement de son étalement, le tas abattu va être plus ou moins facile à charger par les engins de chantier. Un tas très étalé par exemple va être plus adapté à une reprise par chargeuse, un tas assez concentré va quant à lui plutôt nécessiter l'emploi de pelles hydrauliques ou pelles à câbles. L'étalement du tas peut être évalué en mesurant des paramètres géométriques de forme du tas, ou par reconstitution par analyse d'images.

Dans le travail d'option, nous n'avons pas cherché à évaluer l'étalement du tas, mais nous nous sommes concentrés sur la mise en place d'outils permettant d'évaluer la distribution granulométrique du matériel abattu.

1.3.1.1. Evaluation qualitative

Tout d'abord, une appréciation qualitative de la granulométrie du tas peut être donnée par le chauffeur de pelle. Celui-ci connaît en effet les limites de son concasseur primaire, et sélectionne les blocs chargés en conséquence. S'il se trouve obligé de trier et mettre de côté une quantité importante de gros blocs, nous pouvons estimer que la granulométrie obtenue est peu satisfaisante. Cela nous donne ainsi un indicateur qualitatif de la granulométrie du tas abattu.

Une autre appréciation, plus indirecte, de la granulométrie du tas abattu peut être faite à partir des temps de fonctionnement et temps d'arrêt du concasseur primaire : ils nous renseignent en effet sur la facilité de passage des produits de l'abattage dans le concasseur, qui indique si la fragmentation obtenue en sortie de tir est adaptée aux installations de concassage primaire (typiquement, les blocs de taille trop importante, qui sont chargés malgré le tri effectué par le chauffeur de pelle, peuvent bloquer dans les mâchoires du concasseur).

Ces deux indicateurs sont cependant relatifs et incomplets, car ils se concentrent surtout sur les blocs dont la taille est trop importante, et ne renseignent pas sur la quantité de fines du tas, ou sur les classes granulométriques moyennes. C'est pourquoi il nous a paru utile de mettre en place un indicateur quantitatif de la granulométrie du tas abattu.

1.3.1.2. Evaluation quantitative via l'outil FRAGSCAN

Plusieurs méthodes sont à ce titre possibles. La méthode la plus ancienne est la méthode dite « de la ficelle ». Elle consiste à mesurer les petites et grandes longueurs des éléments intersectés par une ficelle tendue sur la peau du tas. Un traitement statistique de cette base de données permet alors d'évaluer la granulométrie observée.

Cette méthode est cependant assez fastidieuse à mettre en œuvre, d'autant plus qu'il existe d'autres outils plus récents et plus pratiques. Un logiciel de granulométrie par analyse d'image, FRAGSCAN, a été développé par le centre de Géosciences de l'Ecole des Mines de Paris. Ce système a ainsi été mis en place sur la carrière de Ruvernison, selon la procédure décrite dans la suite.

1.3.1.2.1. Prises de vues du tas abattu

Plusieurs possibilités s'offraient pour les prises de vues d'échantillons du tas abattu : la méthode la plus simple et la moins perturbatrice est vraisemblablement de photographier la benne du dumper à chaque passage au concasseur primaire. Cependant, cela nécessite de placer une caméra ou un appareil photo en hauteur (sur un mât par exemple), l'installation n'est donc pas des plus faciles.

Autre solution : l'installation d'une caméra sur la trémie du concasseur primaire, qui ne perturbe pas le processus industriel ; cependant, les vibrations du concasseur dégradent considérablement la qualité des images. Ces deux méthodes présentent de plus l'inconvénient de prélever un échantillon ségrégué par les vibrations (transport,

alimentateur) : les fines auront ainsi tendance s'accumuler dans le fond, et l'échantillon sera biaisé.

Nous avons ainsi finalement choisi de prendre des images directement sur le tas abattu, au fur et à mesure de l'avancée de la reprise par la pelle (figure 25). Cela nous donne donc un ensemble d'échantillons du tas abattu. Il est clair que ces prises de vues ne concernent que la peau du tas, on peut néanmoins supposer que faire les prises de vues au cours de la reprise nous donne un aperçu du tas intact, et qu'ainsi les différentes classes granulométriques sont visibles.

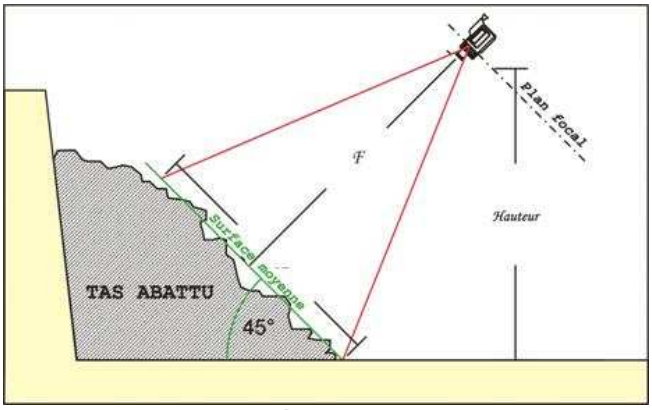


Figure 25
Prise de vues du tas abattu

Les prises de vues du tas abattu sont soigneusement réalisées, en plaçant tout d'abord un objet-gabarit de taille connue sur la zone photographiée, puis en se plaçant perpendiculairement au tas de façon à éviter les distorsions d'échelle dues à la parallaxe et enfin en choisissant la distance de prise de vue adaptée à la résolution de l'appareil numérique utilisé.

1.3.1.2.2. Traitement par FRAGSCAN

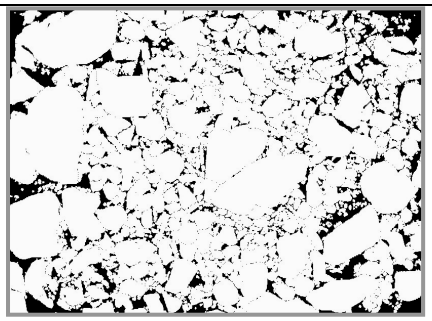
FRAGSCAN traite des images converties en niveaux de gris, par seuillage. Il est donc important de limiter les contrastes trop importants (typiquement, les ombres ou les prises de vues par trop forte luminosité).

Le seuillage effectué par FRAGSCAN définit, à partir de l'image initiale, une image binaire : zones foncées (contours des blocs) en noir, zones claires (roche) en bleu. Ce seuillage détermine ainsi les contours partiels des blocs (voir illustration figure 26). Il est possible (et souvent nécessaire) de retravailler un peu l'image binaire, le traitement initial n'étant jamais parfait (manque de contours, création de contours qui n'existent pas sur l'image initiale…).

A partir de ces contours partiels, le logiciel détermine la petite longueur du bloc. Cette information de longueur est transformée en volume, en prenant pour le calcul le volume de la sphère équivalente au bloc. Cela nous permet ainsi d'obtenir un premier tamisage du tas.



Prise de vue du tas abattu
Image brute



Prise de vue du tas abattu
Image traitée par FRAGSCAN : définition des contours partiels.

Figure 26
Traitement d'images par FRAGSCAN

1.3.1.2.3. Correction et ajustement Rosin Rammler des données brutes

Il faut cependant apporter quelques corrections à ces résultats bruts. Des biais sont effectivement introduits d'une part lors du traitement de l'image 2D, et d'autre part lors du passage 2D/3D. L'image 2D ne nous donne en effet qu'une appréciation de la surface de l'échantillon. La petite longueur obtenue peut être inexacte à cause de la position du bloc par rapport à la prise de vue. D'autre part, l'appréciation surfacique introduit statistiquement un biais : les gros blocs vont prendre plus de place sur l'image que les fines, et vont masquer les petits blocs… Enfin, le passage 2D/3D utilise la méthode des sphères équivalentes, qui ne prend pas en compte le facteur de forme de chaque bloc. Il est ainsi nécessaire de corriger les données brutes (sur la figure 27, les données brutes sont en rouge).

Cette correction est réalisée en introduisant des coefficients correctifs pour chaque tamis, qui vont par exemple augmenter l'importance relative des fines. Pour déterminer précisément ces coefficients, on peut effectuer un tamisage du tas abattu entier (pour un tir, en conservant les paramètres ainsi obtenus pour les tirs suivants), ou au moins prendre un point de calage de la courbe. Le tamisage du tas est une opération fastidieuse et difficilement envisageable à Ruvernison, et nous n'avons pas pu obtenir de point de calage (absence de bascule sur le concasseur primaire). Les coefficients de correction ont ainsi été déterminés à partir des expériences menées sur d'autres carrières ayant mis en place FRAGSCAN. Après correction, la courbe obtenue est donc a priori plus représentative du tas dans sa globalité (courbe vert clair de la figure 27 en illustration).

Reste cependant à traiter le problème des fines : il existe en effet une limite inférieure de résolution, en dessous de laquelle FRAGSCAN ne peut évaluer de petite longueur : le pixel reste un élément surfacique et fixe ainsi la limite inférieure de résolution. Pour apprécier les fines qui n'ont pu être estimées par le traitement via FRAGSCAN, nous effectuons ainsi un traitement statistique et un lissage : on estime ainsi la part des très petites classes granulométriques et on ajuste la courbe obtenue à une courbe de Rosin-Rammler (voir équation 1).

La courbe obtenue par FRAGSCAN et la suite du traitement nous donne donc un indicateur de la granulométrie du tas. Il ne s'agit pas de la courbe granulométrique exacte du tas abattu, courbe qui ne peut a priori être obtenue que par tamisage du tas. Le principal usage que l'on peut faire de l'indicateur granulométrique obtenu est de faire des comparaisons entre les granulométries de différents tirs, et d'apprécier ainsi l'influence sur la fragmentation de divers paramètres du tir.

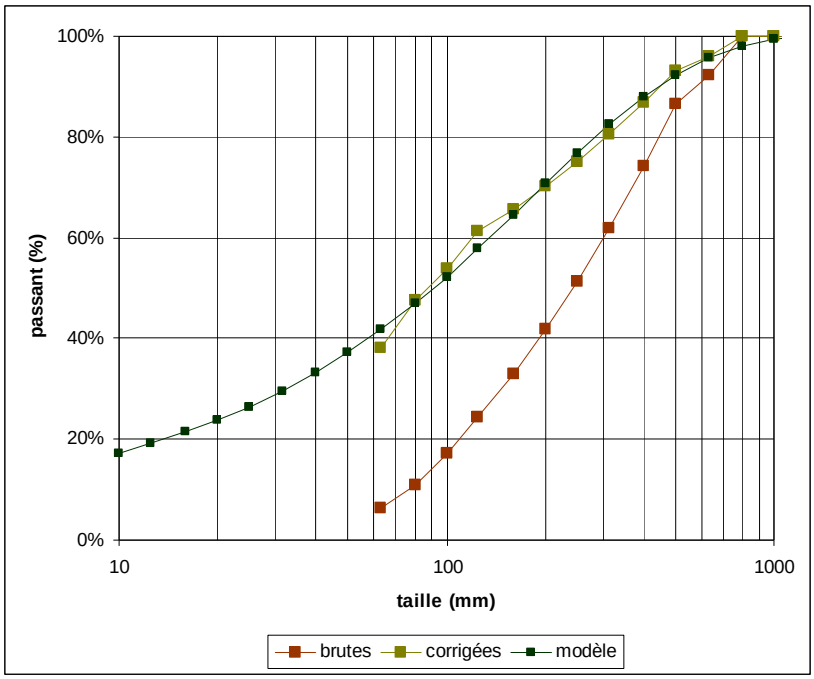


Figure 27
Etapes d'obtention des indicateurs de granulométrie sous Fragscan (tir N°2)

Une estimation quantitative de l'efficacité du tir peut être faite à partir du calcul de l'indice de fragmentation F_c, rapport entre les tailles caractéristiques du massif rocheux X_{cr} et celle de tas abattu X_{cm}.

$$Fc = \left[\left(\frac{Xcr}{Xcm} \right) \right]$$

Équation 14, indice de fragmentation

Ainsi, un indice de fragmentation très proche de 1 indiquerait que la fragmentation par le tir n'a été pas efficace, par contre un indice de 2 pourrait indiquer une fragmentation d'environ 50% par rapport à la taille initiale. Afin de tenir compte la forme des courbes granulométriques dans ce type d'analyse, on peut introduire un indice de qualité de fragmentation (FQF) basé sur le rapport entre les indices de forme des ajustements de Rosin-Ramler n_r et n_m (massif rocheux et tas abattu respectivement)

$$FQF = \left[\left(\frac{n_r}{n_m} \right) \right]$$

Équation 15, indice de qualité de fragmentation

Un FQF égal à 1 indique que la fragmentation est uniforme sur toutes les tailles de distribution, un indice inférieur à 1 signifie qu'il existe une meilleure efficacité de fragmentation des gros blocs et une moins bonne efficacité de fragmentation pour les plus petites tailles; de la même façon, on peut faire le raisonnement inverse pour un indice supérieur à 1.

Ces paramètres quantitatifs peuvent permettre de synthétiser les informations granulométriques sur l'efficacité du tir. La courbe indicatrice de granulométrie reste cependant plus parlante.

1.3.2. Effets arrières

On désigne par effets arrières l'endommagement subi par la partie résiduelle (qui sera abattue ultérieurement) d'un massif rocheux soumis à un tir de mines. Ils sont dus à l'action de l'explosif et se manifestent à différentes échelles : à l'échelle microscopique, la matrice rocheuse est micro fissurée sous l'effet du passage de l'onde de choc et à plus grande échelle, la détente des gaz d'explosion a également tendance à ouvrir les discontinuités existantes dans le massif ; l'abattage peut également contribuer à déstructurer les matériaux peu cohérents dans le massif rocheux (matériaux altérés, niveau moins compétents, remplissage des discontinuités…).

Ces effets arrières contribuent à affaiblir le massif. Ils peuvent alors avoir des conséquences et des manifestations plus visibles : typiquement, des instabilités de parois ou des instabilités du massif rocheux (fracturation, foisonnement du massif en arrière des fronts d'exploitation…), voire des modifications des propriétés intrinsèques du matériau (accélération du vieillissement du talus, plus faible résistance au gel…).

Ces effets arrières sont difficilement mesurables, car accessibles uniquement indirectement, par leurs manifestations visibles. On peut les évaluer par comparaison entre le massif « initial » et le massif « après tir », mais on pressent que l'information sera incomplète et la tâche difficile. Les effets arrières sont ainsi difficiles à prévoir, mais font partie intégrante des « résultats », des conséquences d'un tir d'abattage.

1.3.3. Vibrations

Parmi l'énergie libérée lors de l'abattage à l'explosif, une partie est consacrée à la fragmentation de la roche, et une autre est dissipée sous forme d'onde sismique qui se propage dans le massif et d'onde sonore qui se propage dans l'air. La part de ces ondes qui ne participe pas à la fragmentation peut donc être considérée comme perte d'énergie, c'est-à-dire comme nuisance. On va donc chercher à les limiter.

Les ondes sismiques peuvent être à l'origine d'effets arrières du tir, mais également à l'origine de vibrations qui peuvent endommager les structures. C'est cet aspect qui va être développé dans la suite de cette partie.

1.3.3.1. Généralités

Une vibration peut être définie comme un mouvement oscillatoire d'une particule ou d'un corps autour de sa position d'équilibre. L'interface entre les particules au repos et les particules en mouvement s'appelle un front d'onde et se déplace à des vitesses comprises entre 1000 et 6000 m/s. Cette vitesse de propagation du front d'ondes est également appelée célérité de l'onde.

Lors d'un tir, une partie de l'énergie est communiquée à la roche sous forme de vibrations. L'amplitude de l'impulsion initialement produite décroît avec la distance, en raison de la perte d'énergie par le travail nécessaire pour la fragmentation, des déformations non élastiques, ou de la diffusion volumique due à l'expansion (l'énergie se conserve mais le volume croît).

Lors d'un tir de mines, le signal initial est émis sur une durée égale au temps de détonation. Transmis au massif, ce signal prend la forme d'un train d'ondes qui correspond à la superposition de plusieurs ondes ayant des phases et des amplitudes différentes. Ce train d'ondes résulte :

- d'une part des différents délais de détonation réalisés lors du tir, qui vont créer des ondes à des instants différents ;
- d'autre part des différentes ondes réfléchies et réfractées créées par les discontinuités du massif rocheux.

La vibration qui se propage dans le sol comporte des types d'ondes physiquement différentes :

- d'une part, les ondes de volume, qui se propagent dans le massif rocheux. On peut distinguer deux types d'ondes de volume :
    - o les ondes de compression, ou ondes P, qui consistent en la succession de compressions/tractions dans le massif rocheux. Elles se propagent à la vitesse V_p et sont les plus rapides ;
    - o les ondes de cisaillement, ou ondes S, qui correspondent à une communication latérale du mouvement dans le massif rocheux. Elles se propagent à la vitesse V_s, qui vaut en général la moitié de la célérité des ondes P ;
- d'autre part les ondes de surface, qui se propagent dans la partie supérieure du sol et aux interfaces. Assez énergétiques, de fréquences basses, elles ont une vitesse de propagation inférieure à la célérité des ondes de cisaillement (de l'ordre de 1000 m/s), mais se propagent plus loin.

L'étude d'une vibration nécessite l'enregistrement du signal sismique dans trois directions perpendiculaires (radiale, transversale et verticale). On travaille en général sur les données de vitesses, plusieurs grandeurs peuvent alors être considérées :

- la vitesse maximale sur chacune des voies ;
- la vitesse résultante, $V_{res} = \sqrt{{V_{x_{MAX}}}^2 + {V_{y_{MAX}}}^2 + {V_{z_{MAX}}}^2}$, vitesse par excès car les trois voies ne sont en général pas maximales en même temps ;
- la vitesse résultante vraie : $V_{res_{VRAIE}} = MAX(V_{VRAIE})$.

Le contenu fréquentiel du signal est également important, les grandeurs communément utilisées sont :

- la pseudo-fréquence, calculée à partir du temps de montée du pic maximal de vitesse. Cette grandeur est cependant physiquement peu représentative, car elle n'est pas corrélée au contenu spectral du signal ;
- la fréquence dominante dans le spectre de Fourier, avec laquelle il est préférable de travailler.

Le contenu fréquentiel du signal initial peut cependant être affecté par la géologie du massif, et par la transmission à la structure (simple ébranlement, ou résonance à une fréquence propre de la structure).

1.3.3.2. Acquisition de données vibratoires

L'acquisition de données vibratoires passe par un enregistrement via un capteur sismique. Le principe de mesure repose sur la transformation du mouvement mécanique transmis par le sol en un signal électrique. C'est ce signal qui est enregistré et qui peut être traité.

La position du capteur et sa liaison avec le sol jouent un rôle important : la liaison entre le capteur et le sol (scellement ou simple pose) peut avoir un impact sur l'allure du signal mesuré (amplification du mouvement vibratoire par une mauvaise liaison…).

L'intérêt de la mesure des vibrations réside dans la possibilité d'opposer les mesures à la réglementation en vigueur. Or la réglementation s'oriente essentiellement vers la réponse des structures face aux vibrations, c'est pourquoi il est conseillé, dans le cas de telles mesures, d'orienter le capteur dans les directions principales de la structure étudiée, et de placer de préférence le capteur à proximité des structures porteuses. On enregistre alors un signal qui va se rapprocher de celui auquel est soumis la structure.

1.3.3.3. Base de données disponibles

Lors d'un tir dans une carrière Hélary, des enregistrements sismiques sont systématiquement réalisés au moyen d'un capteur Miniseis, et conservés dans une base de données avec la position du capteur, sa distance par rapport au tir, la charge unitaire maximale, la localisation du tir. La base de données rassemble les mesures pour les tirs de 2002 à 2007, avec quelques lacunes en 2005 (dues à des pannes informatiques, absences du foreur/mineur).

Il est cependant nécessaire de faire quelques remarques au sujet de cette base de données.

1.3.3.3.1. Remarques sur les distances

La distance renseignée dans la base de données est une distance évaluée par le personnel de la carrière lors de la mise en œuvre du tir, et non mesurée précisément (au moyen d'un GPS par exemple). Pour le tir n°3 par exemple, l'analyse des coordonnées GPS nous donne une distance précise de 430 m entre le capteur et le tir, alors que cette distance était évaluée à 300 m, ce qui confirme notre intuition quant à la sous-estimation des distances en général.

Nous pouvons cependant proposer une méthode pour remonter à distance réelle entre le capteur et la zone de tir.

Nous disposons en effet de l'enregistrement sismique sur une voie et de l'enregistrement acoustique sur une autre. Considérant comme connues les vitesses des ondes sonores dans l'air et des ondes sismiques dans la roche, la distance capteur-zone de tir peut ainsi être calculée à partir du délai entre l'arrivée des ondes sonores (t_{air}) et sismiques (t_{roche}) :

$$D = \frac{1}{\frac{1}{v_{air}} - \frac{1}{v_{roche}}} * \left(t_{air} - t_{roche}\right) \qquad (V_{air} = 340 \text{ m/s})$$

Équation 16, calcul de la distance à partir des données vibratoires

Rappelons que les mesures de vitesses du son en laboratoire sur les prélèvements de roche ont donné 5500 m/s pour le palier 3 et 4900 m/s pour le palier 2. Dans une première approche, nous prendrons ainsi pour le calcul ces valeurs mesurées. Cependant, il est probable que les vitesses mesurées en laboratoire surestiment quelque peu la vitesse réelle dans massif rocheux : un train d'ondes P émis dans le palier 3 est réceptionné par le capteur en surface, il aura ainsi traversé des zones de roches plus altérées (palier 2 etc.) pour lesquelles la vitesse de propagation est moindre. La fracturation à grande échelle joue également un rôle, facilitant la transmission des ondes sismiques et augmentant donc la vitesse de transmission résultante.

Evaluons les incertitudes introduites par cette méthode :

- la formule de base utilisée est : $D=v*t$
  - D : distance ;
  - v : vitesse ;
  - t : délai d'arrivée ;
- elle introduit des incertitudes de :
  $dD=v*dt+t*dv$;
- or l'incertitude sur les temps dt est de l'ordre de 0,005 s (précision des mesures depuis le logiciel de traitement de signal sismique, et échantillonage du signal) ;
- ceci nous donnera donc, pour des vitesses de l'ordre de 5000 m/s, une incertitude sur le calcul de distance d'au moins $dD=5000*0,005=25$ m ;

La différence observée entre la distance donnée par le GPS (430 m) et la distance calculée (455 m) se situe donc dans la zone de dispersion des résultats.

Dans la suite, nous nous baserons donc sur les distances calculées à partir de l'équation 12 pour le traitement des données.

1.3.3.3.2. Remarques sur les vitesses

Les vitesses notées dans la base de données sont les vitesses maximales enregistrées sur chacune trois voies : radiale, verticale et transversale. Parmi les valeurs disponibles, certaines vitesses avaient été pondérées en suivant la pondération fréquentielle proposée par la législation. Une telle approche permet de donner plus d'importance aux signaux à contenu fréquentiel bas associés à des déplacements importants, donc plus dangereux pour les structures. Cependant, pour l'analyse des vibrations, il est préférable de travailler avec les vitesses brutes. Dans la suite, le traitement a été réalisé en calculant la vitesse vraie, définie par :

$$V(t) = \sqrt{V_x{}^2 + V_y{}^2 + V_z{}^2}$$

(quelle que soit la voie, la vitesse vraie est ainsi inférieure à la vitesse enregistrée)

On travaillera ainsi avec la vitesse résultante vraie, valeur maximale de la vraie vitesse.

Les fréquences analysées sont les fréquences principales dans le spectre de Fourier.

1.3.3.3.3. Remarques sur le scellement

Les enregistrements sismiques ont été effectués avec un capteur non scellé. Certains signaux présentent des amplifications dues vraisemblablement à un mauvais couplage entre le capteur et la structure. Ces conditions d'enregistrement ne sont pas idéales, mais permettent tout de même une première approche.

1.3.3.4. Prévision des vibrations générées par un tir

1.3.3.4.1. Généralités

Des théories empiriques ont été établies pour prévoir le niveau de vibrations créées par un tir. Sont en général retenues les lois, dites *de Chapot*, de la forme :

$$\mathrm{V_r} = \mathrm{K} \times D^{-\alpha} \times Q^{\beta}$$

Équation 17, équation de Chapot

V_r désigne la vitesse résultante, obtenue par la somme vectorielle des enregistrements des vitesses sur les trois voies du capteur sismique
D désigne la distance entre le tir et le capteur
Q représente la charge unitaire maximale (on considère en général que deux détonations espacées de 8 ms génèrent des vibrations qui ne se superposent pas.) La charge unitaire est ainsi la charge qui détonne à un instant, compte tenu de ce seuil.
K est un coefficient qui prend en compte tous les paramètres autres que D et Q. Il traduit à la fois la qualité du tir et la transmission des vibrations au sein du massif rocheux.
α et **β** sont des coefficient positifs déterminés empiriquement par régression linéaire, qui dépendent des conditions locales du tir.

A partir de nombreuses expériences en différents sites, Chapot a proposé un couple de valeurs pour α et β. C'est aujourd'hui la loi que l'on utilise le plus fréquemment :

$$\mathrm{V_r} = \mathrm{K} \times \left(\frac{D}{\sqrt{Q}} \right)^{-1,8}$$

Équation 18, loi de Chapot

Avec K= 1500 pour un très bon tir
K= 2500 pour un tir moyen
K= 6000 pour un très mauvais tir

Les coefficients α et β peuvent cependant prendre, en fonction des sites, différentes valeurs, souvent proches de celles de la loi de Chapot. On observe ainsi parfois des lois du type :

$$V_r = K_s \times \left(\frac{D}{\sqrt[3]{Q}} \right)^{-1,2}$$

Équation 19, loi des ondes de surface

Ce sont les lois d'amortissement d'ondes de surfaces, nettement plus défavorables.

1.3.3.4.2. Cas de Ruvernison

1.3.3.4.2.1. Traitement général

Nous avons tout d'abord cherché à voir si les vitesses enregistrées sur Ruvernison vérifiaient une loi du type Chapot. Le palier 1 de découverte étant un gradin d'exploitation un peu à part (peu de tirs, sans étagement de charge, et à nombre de trous importants), seuls les 3 gradins de roche saine ont été analysés dans cette étude :

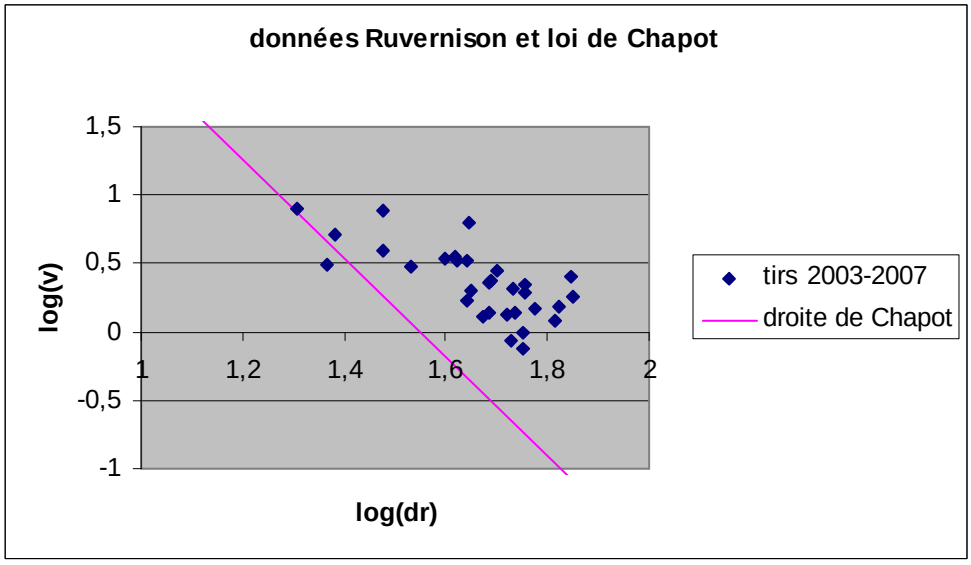


Figure 28
Données vibratoires de Ruvernison, tirs entre 2003 et 2007

Le nuage de points semble assez mal positionné par rapport à la droite de Chapot, de pente -1,8.

Ceci se confirme dans la régression linéaire, qui donne :

Régression linéaire : Log (v) = -1,34*log (D/√Q) + 2,58
Coefficient de corrélation : R^2= 0,5083

Le coefficient -1,34 assez faible laisse ainsi craindre l'existence d'ondes de surfaces.

La régression à partir de la distance réduite des ondes de surface, en $D/\sqrt[3]{Q}$, est en effet un peu meilleure :

Régression linéaire : Log(v) = -1,35* log ($D/\sqrt[3]{Q}$) + 2,9886
Coefficient de corrélation : R^2 = 0,5372

C'est dont a priori la loi des ondes de surfaces qu'il faudrait appliquer pour prévoir les vibrations engendrées par un tir à Ruvernison.

Ceci donne une première approche, nous avons cependant cherché à affiner l'étude en travaillant par zones dans la carrière.

1.3.3.4.2.2. Traitement par palier

Le même traitement a ainsi été effectué pour chaque palier de la carrière. Les résultats des régressions linéaires sont donnés ci-dessous :

Palier 2 :
Régression linéaire : Log(v) = -1,199* log (D/$\sqrt[3]{Q}$) + 2,59
Coefficient de corrélation : R^2 = 0,6362

Palier 3 :
Régression linéaire : Log(v) = -1,146* log (D/$\sqrt[3]{Q}$) + 2,66
Coefficient de corrélation : R^2 = 0,5368

Palier 4 : (échantillon statistique assez faible)
Régression linéaire : Log(v) = -1,684* log (D/$\sqrt[3]{Q}$) + 3,63
Coefficient de corrélation : R^2 = 0,5711

On constate en fait que la charge unitaire joue un rôle assez faible. Ceci est peut-être dû au fait que la charge unitaire a déjà été réduite par un étagement des charges de colonne, donc qu'il est difficile de voir la faible influence d'un paramètre qui varie peu.

Les valeurs du coefficient α obtenues pour chaque palier sont ainsi proches de -1,2 ; la constatation faite au paragraphe précédent se confirme donc pour chaque palier pris indépendamment: c'est la loi des ondes de surface qui semble s'appliquer, avec la distance réduite $D_r = D/\sqrt[3]{Q}$.

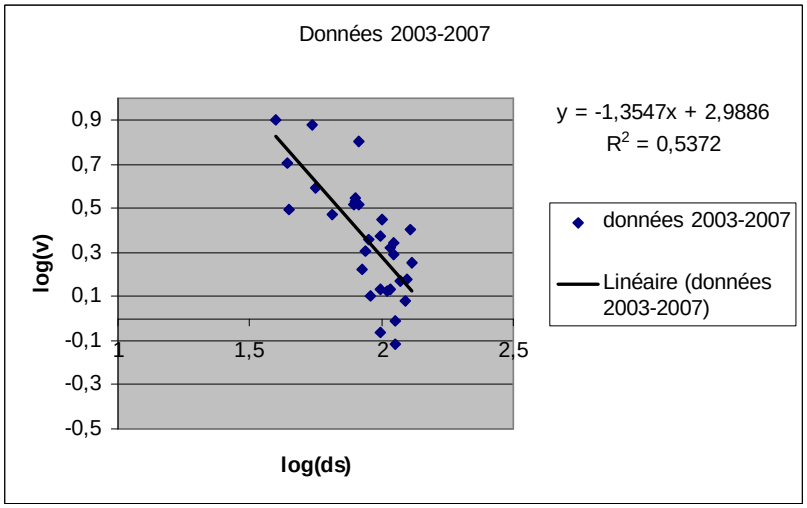


Figure 29
Loi des ondes de surface à Ruvernison

1.3.3.4.3. Conclusions

Les études par palier indiquent donc que l'on peut adopter une loi du type amortissement des ondes de surfaces.

La vitesse résultante vraie reste toujours inférieure à

$$K_{MAX}\left(\frac{D}{\sqrt[3]{Q}}\right)^{-1,2}$$

La moyenne des coefficients K étant de 425.

1.3.4. Vidéos

Les effets arrières et la granulométrie sont des indicateurs de résultats du tir, mais ne nous donnent pas d'information concernant le déroulement réel de l'abattage. Les vibrations, à ce titre, s'en approchent un peu plus.

Les durées d'abattage étant très courtes, inférieures à la seconde (20 détonateurs espacés de 25 ms), il est très difficile d'avoir une information directe de la réalisation effective de l'abattage.

Nous avons cependant tenté d'en faire une approche, en prenant des vidéos des tirs. Deux buts principaux étaient visés. Les vidéos pouvaient d'une part nous renseigner sur l'origine des gros blocs que l'on peut rencontrer dans le tas abattu : en détaillant image par image la mise en mouvement du massif, on aurait éventuellement pu déterminer la cause de la mauvaise fragmentation de ces blocs : bourrage terminal, bourrage intermédiaire, trou sous-chargé… Cependant, les qualités moyennes des prises de vues (pixels, flou de l'image dû à l'ébranlement du support par l'onde sismique due au tir) et l'opacité des fumées d'explosion empêchent cette étude détaillée. Cet objectif a donc échoué.

La deuxième utilisation envisagée pour ces films était, là encore, une étude image par image de la couleur des fumées cette fois. En effet, les fumées d'explosion sont a priori un indicateur de la qualité du tir : les gaz d'explosion sont en général blancs. Ainsi, des fumées plus noires peuvent indiquer une mauvaise combustion ou une combustion incomplète de l'explosif. Des fumées plus noires peuvent également être dues à la présence de matériaux de bourrage partis avec les gaz d'explosion. Cependant, le nombre de tirs filmés et étudiés est un peu maigre pour tirer des conclusions quant aux couleurs des fumées d'explosion.

Les vidéos des tirs permettent cependant d'observer le bon départ (ou non) de chaque trou, notamment d'identifier quel trou peut être responsable d'un débourrage (éjection des matériaux de bourrage vers le haut). La carrière de La Clarté du groupe Charier a à ce titre fait une constatation précise et intéressante quant à l'importance de la hauteur du bourrage terminal : le bourrage terminal théorique a été optimisé au fur et à mesure des tirs, et une réduction de seulement 20 cm de ce bourrage entraîne systématiquement des éjections verticales. Ceci suggère donc qu'une valeur optimale de bourrage terminal, adaptée au contexte de la carrière, doit être déterminée par tâtonnements autour de la valeur conseillée.

2. Les tirs mesurés

Les outils décrits et analysés précédemment ont été utilisés pour instrumenter différents tirs, effectués sur la carrière de Ruvernison entre avril 2007 et juin 2007. Les contraintes de production ont restreint le nombre de tirs mesurés pour la base de données à 3 seulement. En effet, le rythme de production est d'environ 8 jours de travail pour un tir de l'ordre de 8000 t. Cela représente 2 à 3 tirs par mois, chiffre qui peut être diminué suivant la difficulté de reprise des tirs (importance du travail de débitage secondaire, blocages du concasseur primaire…) et selon les contraintes de production (maintenance, réparations, jours fériés du mois de mai etc.) qui peuvent interrompre la production.

Trois tirs ont donc été mesurés entièrement. Ces tirs seront désignés par ordre chronologique, ils ont été effectués sur les gradins 2 et 3, dans la zone sud-ouest de la carrière. Les trois tirs se situent dans le même secteur géographique, donc sont a priori comparables au niveau des caractéristiques du massif à abattre (homogénéité de la roche, discontinuités principales, hydrologie…)

Les deux premiers tirs ont été mesurés en détail, sans intervention globale de ma part dans le schéma de tir. Cette remarque est à nuancer : des points difficilement acceptables ont été mis en évidence sur le tir n°1, ces points ont par conséquent été corrigés sur le tir n°2, de façon à garantir un résultat tout de même convenable.

Le troisième tir a été foré puis mesuré comme les deux précédents. Cependant, à partir de cette situation initiale, j'ai eu l'opportunité de faire quelques suggestions et proposer quelques modifications sur ce tir, pour tester de nouveaux paramètres qui peuvent participer à améliorer les résultats du tir. C'est en quelque sorte un tir d'essai.

Le suivi de ces 3 tirs comprend les mesures suivantes :

- levé du front par système laser ;
- levé du front par stéréo photogrammétrie ;
- mesures de déviation de foration ;
- vidéos des tirs ;
- enregistrement des vibrations ;
- évaluation de la granulométrie par FRAGSCAN ;
- levé des amplitudes de fonctionnement du concasseur primaire.

La suite de cette partie va s'attacher à décrire les caractéristiques de chacun de ces tirs.

2.1. Le tir n°1

2.1.1. Généralités

Le tir n°1 est situé sur le 3 ème palier, au sud-ouest de la carrière. Les figures 30 et 31 représentent une vue de dessus du tir (l'allure des trous est projetée). Il faut noter que sur ce tir, seule la première rangée a pu être mesurée.

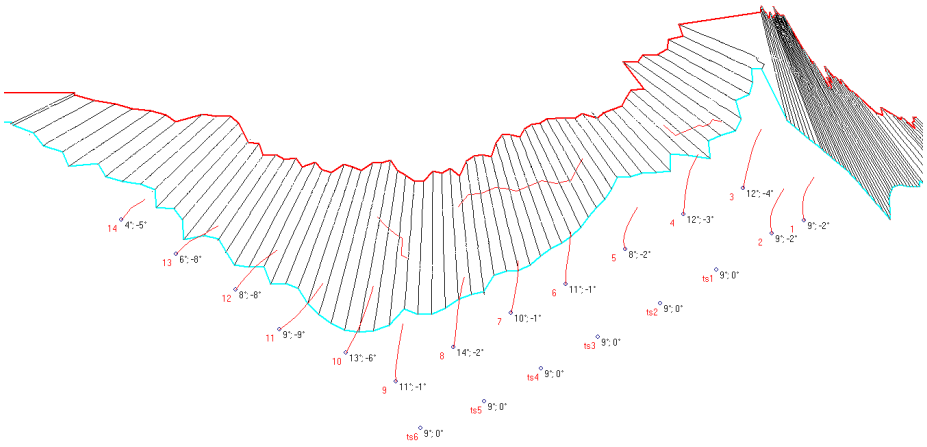


Figure 30
Vue de dessus du front, tir N°1

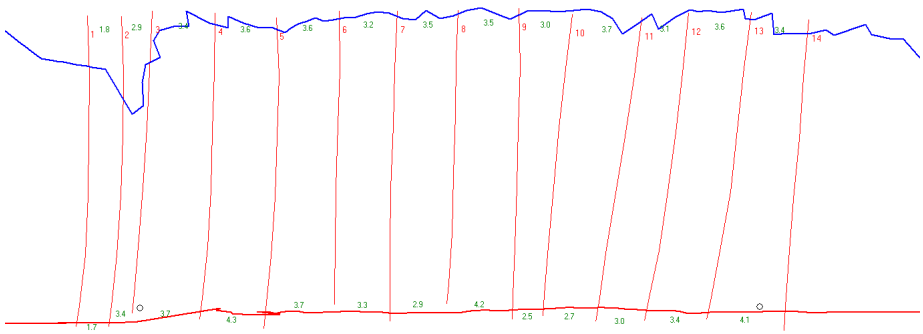


Figure 31
Vue de face du front, tir N°1

Une première appréciation qualitative du front et de la foration nous permet de faire les remarques suivantes :

- l'implantation des trous en surface semble à première vue assez régulière, la maille réalisée en surface semble respecter la maille théorique de 3,25 par 3,5m ;
- la configuration en L du tir est spéciale et peu conventionnelle : on réalise généralement des tirs avec des fronts rectilignes, ceci pour plusieurs raisons. Tout d'abord, une configuration en L du tir nécessite a priori de prendre 2 directions d'abattage. D'autre part, la configuration en L risque de détériorer le déroulement du tir, les matériaux pouvant se gêner mutuellement lors de leur dégagement ;
- l'alignement des trous ne semble pas convenable : pour que chaque trou abatte un volume le plus constant possible, il faut que la foration réalise des trous parallèles au front d'exploitation, et dont le plan vertical est orienté perpendiculairement au front ;
- les trous forés ne sont ensuite pas rectilignes ; les mesures effectuées mettent en évidence une déviation de la sonde dans le trou et une allure en S ou en C des trous ;
- la surforation réalisée n'est pas régulière.

Les mesures de géométrie effectuées permettent de calculer des paramètres quantitatifs pour les tirs. En corrélant ces paramètres avec le chargement effectué, on obtient les paramètres énergétiques du tir.

2.1.2. Paramètres géométriques

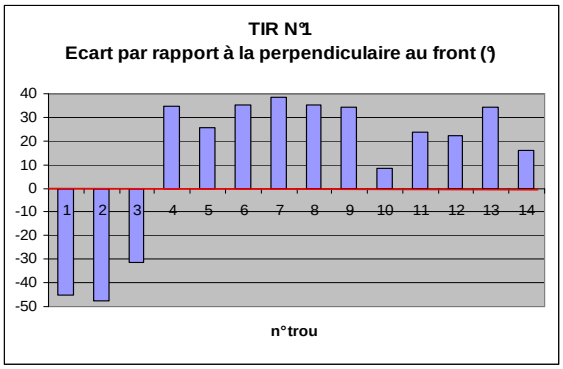


Figure 32
Ecart par rapport à la perpendiculaire au front, tir N°1

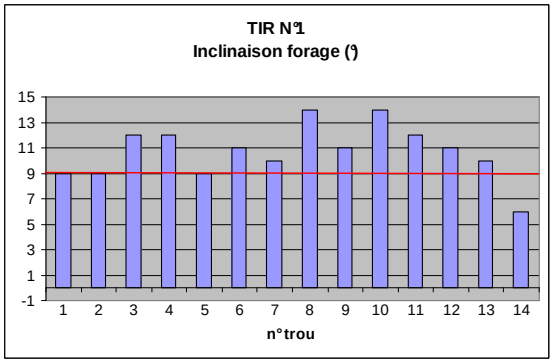


Figure 33
Inclinaison forage, tir N°1

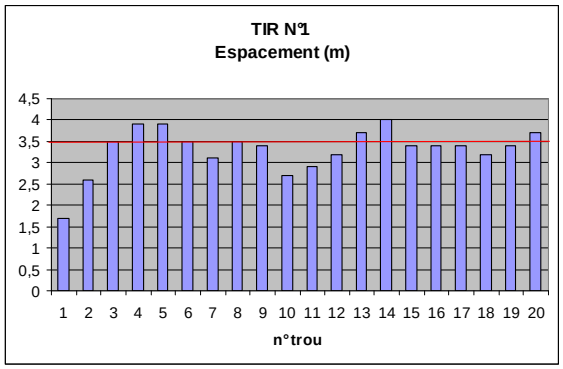


Figure 34
Espacement, tir N°1

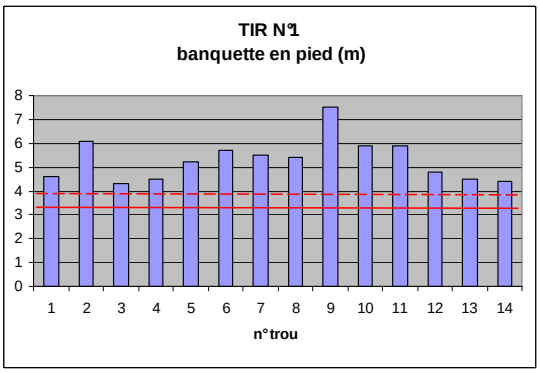


Figure 35
Banquette en pied, tir N°1

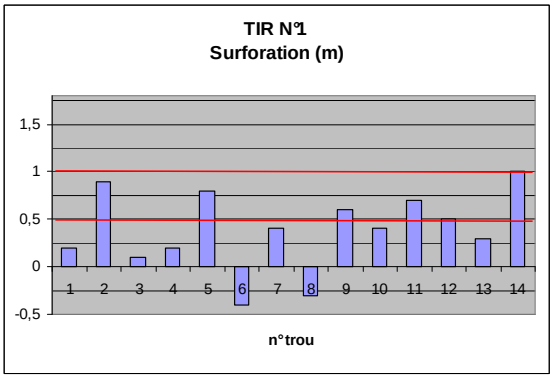


Figure 36
Surforation, tir N°1

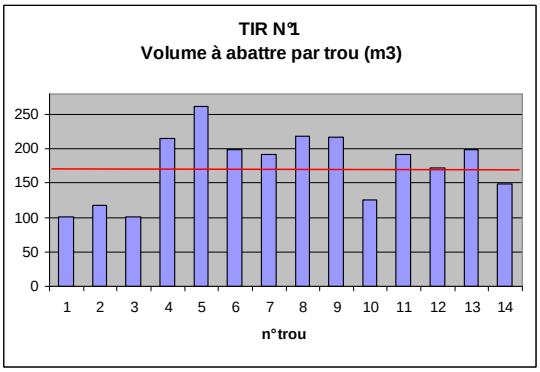


Figure 37
Volume à abattre par trou, tir N°1

Les figures 32 à 37 présentent les paramètres géométriques mesurés sur les différents tirs. De manière générale, on peut d'emblée remarquer qu'il existe une variation importante de ces paramètres entre les différents trous.

Parmi les distances caractéristiques d'un schéma de tir, l'espacement des trous en surface est un paramètre qui ne dépend que de la qualité de l'implantation de la maille en surface et la qualité de l'implantation du début du forage. Or on constate déjà sur ce paramètre des écarts importants par rapport à la valeur théorique de 3,5 m. Cela confirme et quantifie les doutes que l'on pouvait avoir vis-à-vis de la méthode d'implantation du tir, décrite précédemment dans ce rapport.

Un trou incliné doit théoriquement être orienté perpendiculairement au front. La figure 32 représente ainsi l'écart d'orientation du trou par rapport à la perpendiculaire au front, cet écart devant théoriquement être nul : on constate tout d'abord une orientation non constante, qui varie de 9° à près de 40°! On considèrera qu'à part pour les trous à l'extrémité du L, assez peu conventionnels, cet écart n'est pas admissible, et est dû au choix d'une mauvaise orientation pour la foration. Il sera donc porté une attention particulière au choix de l'orientation dans les tirs suivants.

L'inclinaison qui est présentée sur ce graphe correspond à l'inclinaison moyenne des trous, extrapolés linéairement entre leur sommet et leur base. Elle traduit directement les déviations de foration. L'inclinaison moyenne des trous (extrapolation rectiligne entre sommet et fond du trou) varie entre 5° et 14°, ce q ui donne des écarts de près de 1,3 m en pied par rapport à la maille théorique, soit un écart de presque 40% par rapport à la maille d'origine. On peut noter que les trous où l'inclinaison est nettement plus importante (trous 3, 4, 8, 10, 11) ne correspondent pas aux trous où la banquette est la plus faible : ceci est une manifestation directe de l'irrégularité du front et notamment de l'irrégularité du pied.

La banquette en pied réalisée n'est pas constante. Elle est largement supérieure à la valeur maximale admissible calculée à partir de la formule de Langefors, qu'elle dépasse presque systématiquement, de près d'1 mètre parfois. Même les trous à peu près inclinés convenablement (trous N°1, 2, 5 et 7) dépassent lar gement (de près de 2 m) la banquette de 3,25 m souhaitée : ceci est dû en amont, à une mauvaise implantation par rapport au pied : la première rangée a clairement été positionnée trop loin par rapport à la banquette que l'on voulait réaliser.

La surforation, représentée dans le graphe 36, est, là encore irrégulière : elle n'atteint que dans 5 trous sur 14 la valeur minimum de 50 cm fixée, qui, on l'a vu, est déjà insuffisante… Certains trous sont même en sous-foration de 40 cm. Il est clair que dans ces cas, les pieds du front vont avoir beaucoup de difficultés à être cisaillés correctement.

Il faut bien remarquer que la surforation est un paramètre de longueur à forer, qui dépend directement de la hauteur et la géométrie du front : sans mesurer des paramètres de géométrie du front, on ne peut pas se rendre compte que certains trous travaillent en sous-foration par exemple… Or la surforation joue un rôle essentiel dans le bon cisaillement du pied, on voit donc directement l'intérêt de mesurer ne serait-ce que les hauteurs exactes de front pour déterminer et adapter le schéma de tir.

A partir de ces données géométriques, on peut calculer le profil de chaque trou et notamment le volume à abattre par trou. Celui-ci doit théoriquement être de 170 m^3, c'est une valeur qui est presque systématiquement dépassée. Remarquons bien que le volume à abattre n'est pas constant entre les trous.

2.1.3. Paramètres énergétiques

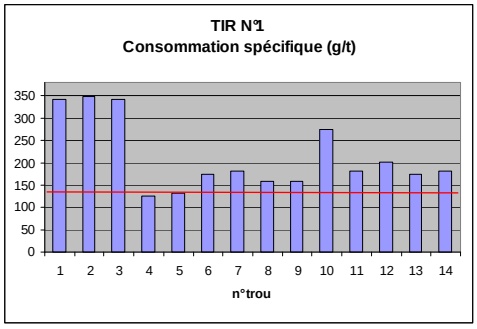


Figure 38
Consommation spécifique, tir N°1

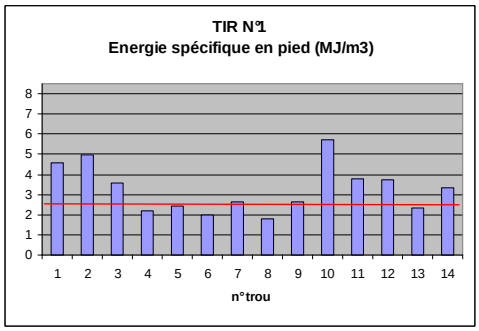


Figure 39
Energie spécifique en pied, tir N°1

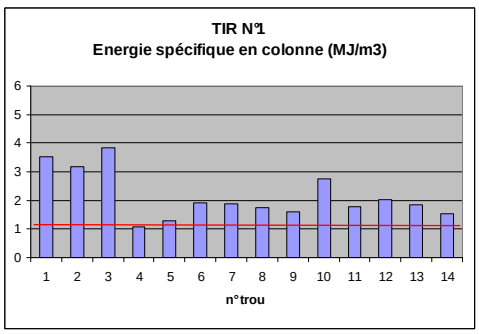


Figure 40
Energie spécifique en colonne, tir N°1

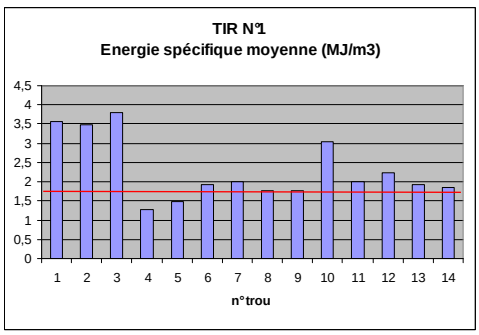


Figure 41
Energie spécifique moyenne, tir N°1

La première chose que l'on constate est, là encore la présence de variations importantes entre trous et par rapport à la valeur théorique de chaque paramètre. Les trous à faible volume n'ont pas été chargés en conséquence et on observe pour ces trous des surconcentrations d'énergie, avec les risques que cela engendre au niveau des projections. Les trous N°4 et 5 sont plutôt sous chargés, on a dans ce cas des risques de mauvais départs de trous (tir bloqué, masses rocheuses non parties, vibrations importantes…).

Ces remarques se retrouvent dans les énergies spécifiques effectives, qui représentent parfois le double de l'énergie spécifique nécessaire !

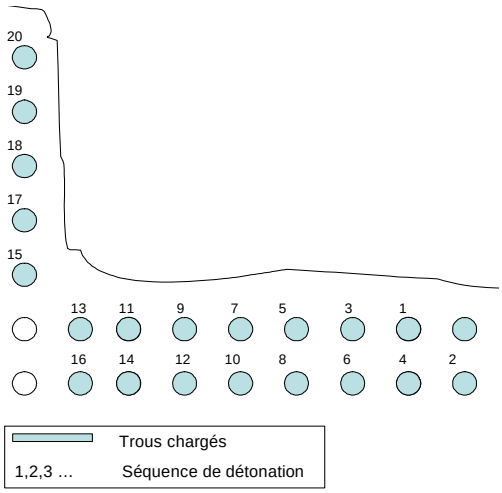


Figure 42
Séquence d'amorçage du tir N°1

Comme exposé dans le début de cette partie, la séquence d'amorçage réalise donc un rapport E/B différent de celui implanté en surface. Cette séquence d'amorçage est cependant bien adaptée à la configuration en L du tir : elle apporte un dégagement convenable au trou « imbriqué », situé dans le coin du L, qui n'est pas dans une situation favorable. La séquence d'amorçage choisie est ainsi un bon compromis par rapport à la configuration en L du tir, mais réalise un rapport E/B différent du rapport E/B géométrique implanté en surface.

2.1.4. Premiers résultats

Les premiers résultats de ce tir sont donnés synthétiquement ici.

Les vidéos du tir ont montré le débourrage vers le haut de plusieurs trous : l'analyse rétrospective de ces débourrages nous indique qu'il s'agit vraisemblablement des trous n°1, 2, 3 et 10, trous largement sur chargés, avec une énergie de colonne plus de 2 fois supérieure à l'énergie a priori nécessaire, et pour lesquels le bourrage final était insuffisant.

L'enregistrement vibratoire est donné en annexe. La vibration résultante enregistrée chez M. Querre à 410 m du tir est de 2,35 mm/s, ce qui est moyen. Les fréquences qui se dégagent dans le spectre de Fourier sont de 18 Hz et 37 Hz, la fréquence de 18 Hz est a priori une fréquence propre du massif rocheux, 37 Hz étant son premier harmonique, qui a été amplifié par la structure. Ceci est bien visible sur l'enregistrement. Le signal peu net indique une réaction de la structure et un mauvais couplage capteur-sol.

L'analyse granulométrique par FRAGSCAN donne une taille caractéristique X_c de 228 mm pour le tas abattu, et une pente de 0,76 pour la distribution granulométrique.

Enfin, lors de la reprise du tir, de nombreux blocages du concasseur ont été constatés, dus à la présence de blocs de taille importante. Suivant l'estimation du chauffeur de pelle, le travail de tri à faire est conséquent : le tir a été réalisé avec une surcharge en explosifs, qui n'a pas donné de bons résultats.

2.2. Le tir n°2

2.2.1. Généralités, paramètres géométriques et énergétiques

Le tir n°2 est situé sur le 3ème palier, au sud-ouest de la carrière. Des graphes du même type que ceux du premier tir sont disponibles en annexe, nous donnerons ici uniquement les principaux résultats.

Sur le tir N°2, l'orientation choisie pour l'abattage était, contrairement au tir N°1, perpendiculaire au front d'exploitation. On constate cependant toujours des écarts entre la direction du trou et la perpendiculaire au front, mais ces écarts se répartissent autour de 0, ce qui prouve que la correction mentionnée ci-dessus a bien été faite. Les écarts sont maintenant dus essentiellement à la déviation de foration.

Il est intéressant de rappeler que, lorsque l'on a présenté la machine de forage, on craignait des déviations de foration dues à l'erreur de parallaxe introduite par le système d'alignement de la machine. La mesure des déviations réelle nous indique qu'en fait, les déviations d'origine autre prédominent largement sur ces écarts de parallaxe. Avant de s'attacher à corriger ces erreurs angulaires de la glissière, il faut corriger les déviations dues au flambage des tiges, nettement plus importantes.

De même que le tir N°1, le tir N°2 présente des variations dans les espacements entre trous (parfois 2,9 ou 4,1 m au lieu de 3,5 m) bien trop importantes pour la toute première opération de la réalisation du schéma de tir. La foration introduit ensuite des déviations dans les inclinaisons. La banquette en pied est, pour le tir N°2, en général plus faible (de plus d'un mètre !) que la valeur recherchée de 3,25 m, avec les risques de projection que cela engendre. Des banquettes en pied allant jusqu'à 6,7 m, soit plus du double de la valeur théorique, sont tout de même constatées. Là encore, l'implantation peut être tenue pour responsable de la situation, plutôt que la déviation de foration.

Les surforations, même si un peu meilleures que sur le tir N°1, ne sont pas encore acceptables : on rencontre encore des cas de sous-forations. Comme précédemment, et comme conséquence de toutes ces irrégularités importantes, les volumes à abattre pour chaque trou ne sont pas réguliers.

Dans les paramètres énergétiques du tir, la première chose que l'on constate est, là encore, la présence de variations importantes entre les énergies des trous et la valeur théorique de chaque paramètre. Bien que les paramètres géométriques soient irréguliers, la variation des paramètres énergétiques n'est pas une fatalité : le chargement devrait être adapté précisément à la géométrie rencontrée.

Le chargement a en réalité été quelque peu adapté à partir des mesures effectuées : les trous de trop faible banquette ou de banquette trop importante ont été chargés en fonction. Cependant, les consommations spécifiques s'échelonnent du simple au double ! L'adaptation du chargement n'est donc pas encore optimale.

Notons que le trou N°13 n'a pas été chargé, car bouché par les gravillons de bourrage avant le chargement. Un tubage du sommet des trous après la foration aurait permis d'éviter cet imprévu.

L'amorçage pour ce tir est également réalisé en diagonale (le rapport E/B réalisé est donc là encore différent du E/B géométrique).

2.2.2. Premiers résultats

Les premiers résultats de ce tir N°2 sont donnés synthétiquement ici.

Les vidéos du tir n'ont pas montré de débourrage particulier, même pour le trou N°20, pour lequel la consommation spécifique était élevée, mais le bourrage terminal apparemment suffisant.

L'enregistrement vibratoire est donné en annexe. La vibration résultante enregistrée chez M. Querre à 430 m du tir est de 2,09 mm/s, ce qui est moyen. Les fréquences qui se dégagent dans le spectre de Fourier sont de 5, 15 et 30 Hz, ce qui correspond plutôt à des fréquences propres de structures : la structure a donc amplifié le signal propagé dans le massif. Cette hypothèse se confirme dans l'analyse du signal vibratoire par l'amortissement progressif des oscillations. On peut lire de plus dans l'enregistrement les différents types d'ondes, ondes de volume en premier, qui s'amortissent, puis au bout de 300 ms, arrivée des ondes de surface (réaugmentation de l'amplitude).

L'analyse granulométrique par FRAGSCAN donne une taille caractéristique X_c de 131 mm pour le tas abattu, et une pente de 0,77 pour la distribution granulométrique.

Enfin, lors de la reprise du tir, quelques blocages du concasseur ont été constatés. Le chauffeur de pelle estime que le tiers supérieur du tas est fin, le reste contenant des gros blocs.

2.3. Le tir n°3

2.3.1. Généralités, paramètres géométriques initiaux

Le tir n°3 est situé sur le 2ème palier, au sud-ouest de la carrière. La figure 43 représente une vue de dessus du tir (l'allure des trous est projetée).

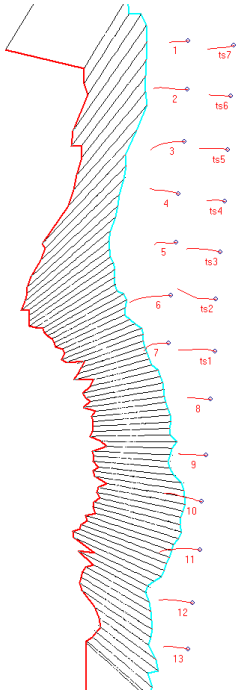


Figure 43
Vue de dessus du tir N°3

Des graphes du même type que ceux du premier tir sont disponibles en annexe, nous donnerons ici uniquement les résultats sur lesquels nous voulons insister.

La banquette en pied est là encore plus importante que la banquette maximale admissible. C'est d'autant plus dommage que le front était, pour ce tir, relativement régulier : une faille découpée par une infiltration constituait près de la moitié du front, faille sur laquelle il aurait fallu caler la première rangée pour profiter d'un front rectiligne.

2.3.2. Suggestions et modifications

A partir des mesures effectuées et des déviations de foration constatées, j'ai eu la possibilité de faire quelques suggestions pour améliorer le déroulement et le résultat de ce tir.

2.3.2.1. Surforation

Un point demeurait encore améliorable dans le schéma de tir initialement foré : la surforation. Une surforation convenable a donc été rajoutée dans un deuxième temps, ce qui nous amène finalement à des valeurs de surforation au moins égales au tiers de banquette recherché. Ceci va faciliter la sortie du pied. Le trou N°2, à surforation trop importante, a pu être rebouché de quelques dizaines de centimètres lors de son chargement, pour garantir la valeur de 1,3 m.

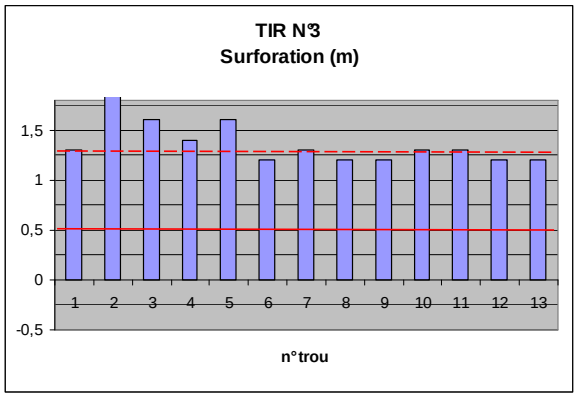


Figure 44
Surforation complétée sur le tir N°3

Ensuite, les suggestions émises ont porté sur le chargement et sur la séquence d'amorçage.

2.3.2.2. Chargement et amorçage

Pour le chargement, afin d'éviter les pertes d'énergies dans l'espace annulaire, la ligne de conduite a été de préférer le nitrate-fuel et les cartouches de diamètre important (90 mm, pour un diamètre de trou de 102 mm). L'absence d'eau dans les parties supérieures des trous a permis d'employer majoritairement du nitrate fuel.

Afin d'éviter d'éventuels auto-amorçages intra colonne, le bourrage intermédiaire a été augmenté à 1,8 m : les 2 m proposés ont été jugés trop importants par le responsable du minage, qui craignait une sous-fragmentation qui engendrerait des blocs dans ce niveau.

Le chargement n'a cependant pas été adapté précisément suivant le volume à abattre de chaque trou par manque de données initiales et d'outils de traitement pour ce travail. On observe ainsi toujours des variations importantes dans les paramètres énergétiques entre les trous.

J'ai également proposé une nouvelle séquence d'amorçage : celle-ci s'appuie sur la possibilité de créer de délais avec l'exploseur séquentiel. Le délai entre rangées a été augmenté à 100 ms (en vertu des 30 ms par mètre de banquette conseillés). Les délais habituels de 12 ms entre deux charges d'un même trou ont été augmentés à 37 ms. Le détail de cette séquence d'amorçage est donné en annexe. Le schéma de la figure 45 illustre le mouvement réalisé pour le front d'ondes : il est orienté à 45°. Ceci peut a priori faciliter le dégagement du pied et améliorer la fragmentation par la création d'un maximum de surfaces libres. D'autre part, la géologie locale est favorable à cette séquence : les grandes structures à pendage 30° que l'on observe vont travailler à fa ciliter le dégagement des matériaux.

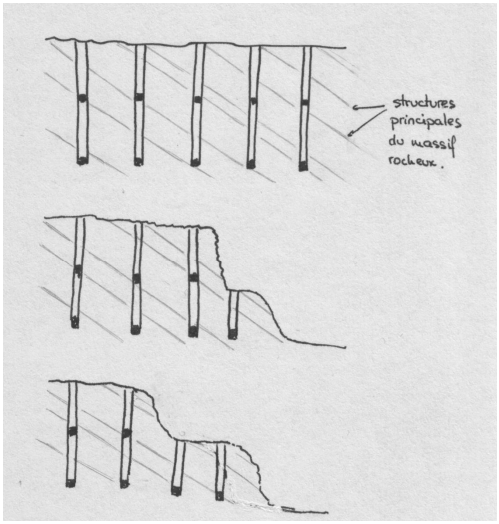


Figure 45
Vue de face de la progression de l'amorçage par rapport aux structures du massif rocheux

2.3.3. Premiers résultats

Les premiers résultats de ce tir N°3 sont donnés sy nthétiquement ici.

Les vidéos du tir n'ont pas montré de débourrage particulier, même si certaines charges de colonne sont importantes, ceci signifiant que les bourrages terminaux sont apparemment suffisants.

L'enregistrement vibratoire est donné en annexe. La vibration résultante enregistrée chez M. Querre à 450 m du tir est de 0,98 mm/s ; à 320 m du tir, au bureau de la carrière, elle est de 3,39 mm/s, ce qui est bon pour la première, moyen pour la seconde. Ces deux mesures différentes laissent penser que le milieu de propagation entre les deux directions n'est pas homogène (on peut déjà remarquer que le bureau de la carrière ne se situe plus sur la formation de granite, mais sur les mylonites). Une étude approfondie à partir de plusieurs capteurs placés à des distances différentes et dans des directions différentes pourrait permettre de mieux comprendre l'hétérogénéité du massif pour la propagation des vibrations. Une fréquence de 10 Hz se dégage dans le spectre de Fourier des deux signaux. Cette fréquence est caractéristique des réactions des structures. Ainsi, le signal transmis par le massif a tendance à affecter les structures : à ce titre, l'utilisation de détonateurs électroniques permettrait de modifier le contenu fréquentiel du signal créé par le tir : avec l'amorçage électronique, il est possible de faire des tirs « rapides » ou « très rapides », avec 10 ms de délai entre trous. Ces techniques ont été testées et validées chez Piketty à Ecuelles, ou chez Charier à La Clarté. L'amorçage « très court » à l'électronique permet ainsi de supprimer ou limiter les fréquences basses, nocives pour les structures.

L'analyse granulométrique par FRAGSCAN donne une taille caractéristique X_c de 100 mm pour le tas abattu, et une pente de 0,84 pour la distribution granulométrique.

Enfin, la reprise du tir s'est bien déroulée, sans blocage du concasseur, ni travail de triage important par le chauffeur de pelle : le tir était globalement fin.

2.4. Analyse comparative des résultats des trois tirs

Les indicateurs granulométriques obtenus par FRAGSCAN pour les trois tirs sont donnés dans la figure 46.

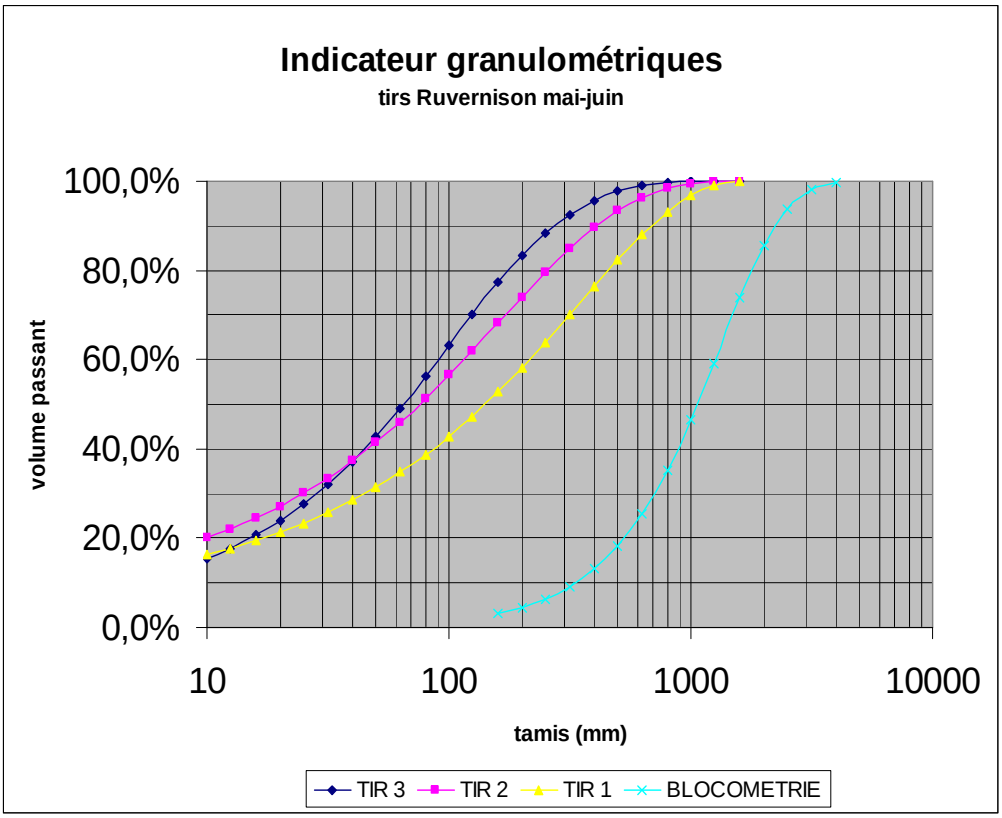


Figure 46
Indicateurs granulométriques des 3 tirs mesurés

Les courbes d'indication de granulométrie ci-dessus sont des moyennes effectuées entre les différents échantillons traités de chaque tir. Elles montrent clairement une différence de granulométrie entre les trois tirs.

Observons ces courbes en 3 points :

- tout d'abord, à l'abscisse 10 mm (taille de tamis de 10 mm) : pour le tir N°1, 16 % du matériel est passé à travers le tamis, 20 % pour le tir N°2, et 15 % pour le tir N°3 ;
- ensuite, à une abscisse moyenne de 100 mm, 43 % du tir N°1 est passé, 57 % pour le tir N°2 et 63 % du tir N°3 ;
- enfin, à l'abscisse 800 mm (taille de 80 cm, qui risque de bloquer dans le concasseur primaire), il reste encore 7 % du volume du tir N°1 à tamiser, 2 % du tir N°2 et 0,3 % du tir N°3.

Ces observations nous conduisent à l'analyse suivante :

- le tir N°1 présente une taille caractéristique de fragmentation de 228 mm, mais la pente de l'ajustement de Rosin-Rammler, de 0,76, nous indique surtout une forte proportion de matériel abattu de dimensions importantes ;
- le tir N°2 est globalement plus fin que le tir N°1 : la courbe d'indication de granulométrie du tir N°2 a globalement été translat ée vers les tailles plus petites par rapport à celle du tir N°1. Cela signifie une taill e caractéristique d'environ 90 mm plus faible, mais une répartition entre petits et gros du même type, car la pente de la courbe est identique. Par ce tir, on a en fait globalement fragmenté plus, en créant également plus de fines ;
- le tir N°3 voit, quant à lui, à la fois sa taille caractéristique diminuée et sa pente modifiée : par rapport aux tirs N°1 et 2, le tir N° 3 a fragmenté plus finement, mais également modifié la répartition entre petites et grandes tailles. La courbe plus pentue signifie que l'on a à la fois créé moins de blocs de taille importante et moins de fines : on a favorisé les classes granulométriques moyennes. C'est intéressant, car ce sont typiquement ces classes granulométriques moyennes qui sont

recherchées lors de l'abattage (bon passage dans le concasseur, avec peu de fines difficilement valorisables, et peu de blocs qui perturbent la production).

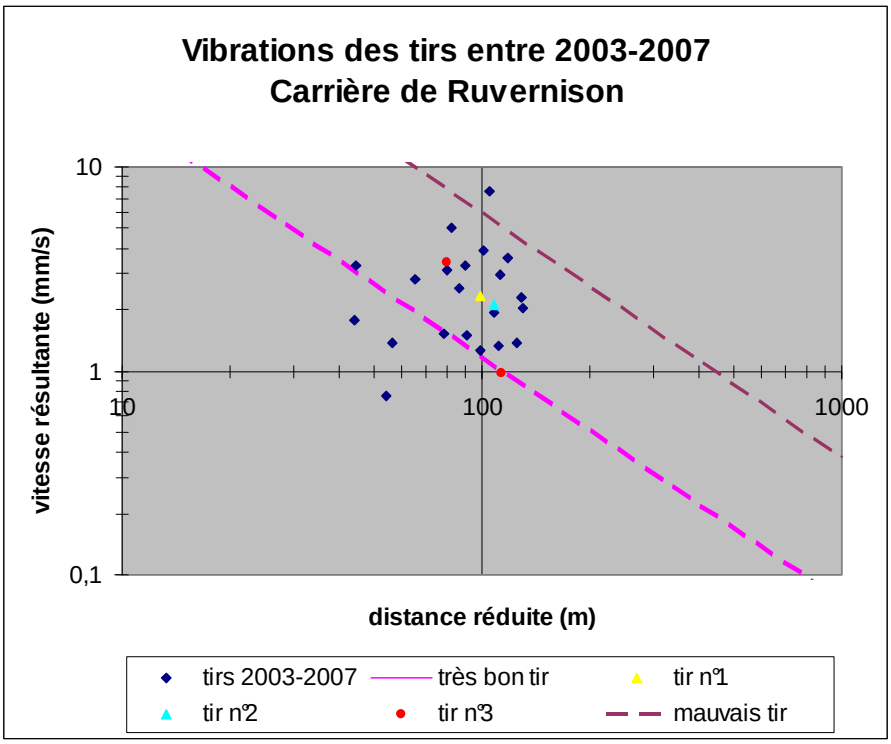


Figure 47
Vitesses résultantes enregistrées des trois tirs mesurés

Analysons à présent rapidement les vibrations engendrées par les différents tirs (voir figure 47) : elles se situent dans la dispersion des valeurs habituelles enregistrées à Ruvernison, l'un des enregistrements du tir N°3 est même meilleur : le tir d'essai N°3 n'a donc a priori pas engendré plus de vibrations qu'en temps normal. La différence entre les deux valeurs dépend vraisemblablement de la géologie et de l'orientation du tir : les conditions de propagation des ondes sismiques ne sont vraisemblablement pas identiques dans tout le massif rocheux, et l'orientation de la volée conditionne le signal sismique émis. Il pourrait être à présent intéressant de placer des capteurs sismiques dans des directions radicalement différentes, afin de déterminer l'influence de ces paramètres et d'obtenir avec les enregistrements sismiques un indicateur plus précis de la qualité du tir.

La progression entre les 3 tirs, et notamment la différence entre les tirs N°1 et 2 et le tir N°3 est intéressante et positive : elle traduit la diminution du nombre de gros blocs, gênants pour la suite du déroulement du processus industriel. Ceci est parfaitement illustré par le rapport détaillé des amplitudes de fonctionnement du concasseur primaire, que l'on peut trouver en annexe.

Entre les deux premiers tirs et le 3ème, on a également créé en proportion moins de fines, souvent difficilement valorisables pour l'exploitant : ceci est a priori un gain notable.

2.5. Conclusion sur ces 3 tirs

Il faut tout de même voir que ces 3 tirs sont des cas particuliers et ne permettent pas de tirer des conclusions statistiques. Un suivi d'un plus grand nombre de tirs permettrait de dégager une tendance. On peut néanmoins faire la remarque suivante : le tir N°3 apparaît

par comparaison comme sensiblement meilleur que les 2 précédents, au niveau des vibrations engendrées chez M. Querre d'une part, et au niveau de la granulométrie (indicateurs granulométriques et rendements du poste de concassage primaire) d'autre part. Sur ce tir, une application particulière a été apportée à la surforation, à l'amorçage et au chargement. Ceci a conduit à un meilleur travail de cisaillement du pied. Le tir N°3 fait donc la preuve que le simple fait d'attacher un souci particulier dans mesure et la réalisation peut améliorer le déroulement du tir, et avoir des conséquences positives visibles sur l'opération d'abattage en général.

Partie 4 :
Directions de travail

Dans ce travail d'option, une étude détaillée de la situation actuelle de l'abattage à Ruvernison a été effectuée. Compte tenu du rythme des tirs sur la carrière, il n'a pas été possible dans la durée du travail d'option de mesurer un nombre important de tirs pour constituer une base de données conséquente, et mener entièrement l'étude d'optimisation de l'abattage.

Cette étude a cependant permis de mettre en évidence certains points critiques et de mettre en place certains outils qui devront être pris en considération à l'issue du travail d'option.

Cela nous permet de dégager deux grandes directions de travail :

- la première direction de travail repose sur la qualité de la mise en pratique. Comme cela a pu être établi au cours de ce rapport, le potentiel de progression est important : il y a beaucoup à faire pour limiter les écarts entre la théorie et la mise en pratique ;
- la deuxième direction de travail est l'optimisation de l'abattage en lui-même. Cette étude repose cependant sur la qualité de la mise en pratique, donc ne pourra être menée qu'une fois l'étape précédente validée et les incertitudes dues à la mise en pratique acceptables.

1. Gestion des tirs

1.1. Outils disponibles

A la suite de ce travail d'option, des mesures devraient être prises pour améliorer la mise en pratique et la rendre plus fidèle au schéma de tir souhaité.

Ceci doit se dérouler à différents niveaux :

- lors de l'implantation de la maille puis du forage, les écarts d'espacements de 50 cm mesurés ne sont pas acceptables : cette opération peut facilement gagner en précision, avec le remplacement du gabarit de longueur par un décamètre par exemple, ou encore avec des GPS ;
- l'implantation de la première rangée par rapport à la banquette en pied peut être nettement améliorée, par des méthodes ou des outils développés ci-dessous ;
- la foration peut gagner en qualité, au niveau de la précision de la longueur à forer et de la déviation de la machine ;
- l'amélioration du chargement est une seconde étape, qui relève essentiellement de l'étude d'optimisation de l'abattage.

Revenons plus en détails sur les trois derniers points. Certains outils décrits au fur et à mesure de ce rapport sont en fait très adaptés à l'amélioration de la mise en pratique. Nous ferons ici une synthèse des pratiques possibles.

L'implantation correcte de la première rangée passe par une bonne connaissance de l'allure du front, notamment dans la zone critique qu'est le pied. Pour cela, l'utilisation d'une « canne à pêche » permettra de placer cette première rangée plus précisément. Mais les outils de profilage du front décrits dans la troisième partie peuvent également être utilisés

pour faciliter et améliorer l'implantation. A ce titre, il peut être intéressant de considérer plus précisément l'outil de stéréo photogrammétrie et le logiciel qui l'accompagne.

A partir d'un appareil photo et de 4 mires, placées en haut et en bas du front, le logiciel Blast Metrix reconstitue en trois dimensions le front. Ce même logiciel permet ensuite de placer la première rangée de trous en fonction de la banquette en pied souhaitée : il fournit un schéma de tir, comme celui de la figure 48, accompagné du profil de chaque trou (exemple pour 1 trou figure 49). Les mires servent de point de repère sur le logiciel et dans la réalité, ce qui simplifie l'implantation du tir par la suite : il suffit d'implanter la maille par rapport aux mires (dont la position a été notée en surface au préalable). En fonction de la position et de l'inclinaison de chaque trou calculées par le logiciel, Blast Metrix fournit une visualisation 3D du front réel et de la foration prévue, et détermine les zones de sur- et sous-cavages (voir figure 49).

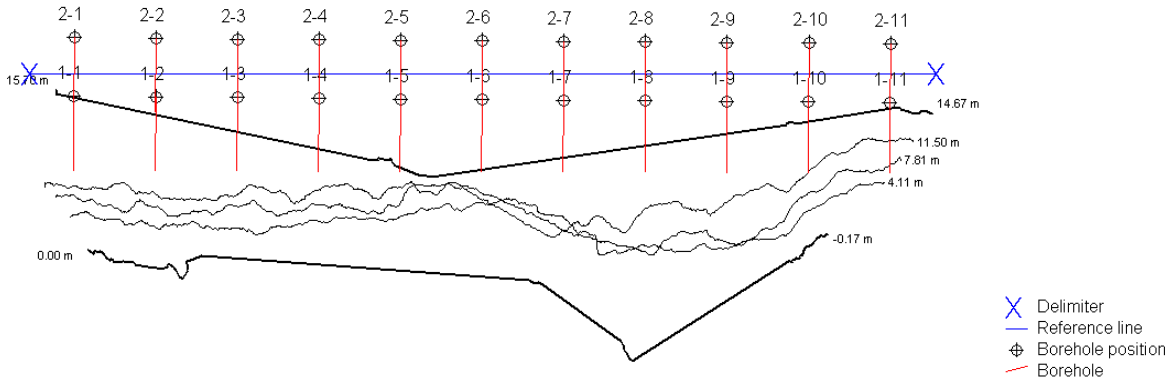
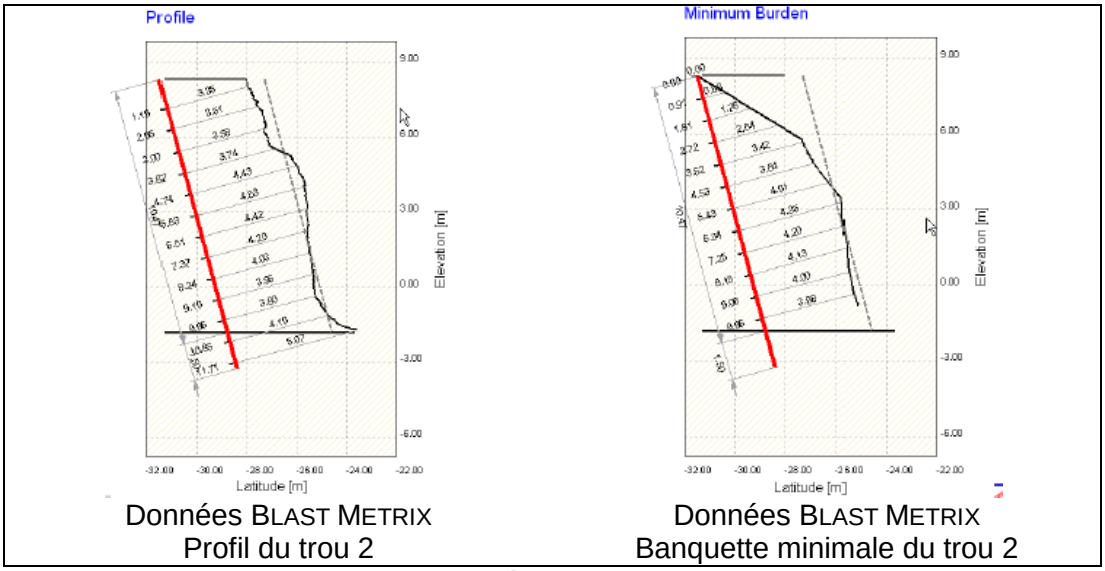


Figure 48
Implantation d'un schéma de tir par rapport au front à l'aide du logiciel BLAST METRIX



Données BLAST METRIX
Profil du trou 2

Données BLAST METRIX
Banquette minimale du trou 2

Figure 49
Exemple de profils prévisionnels de trou par BLAST METRIX

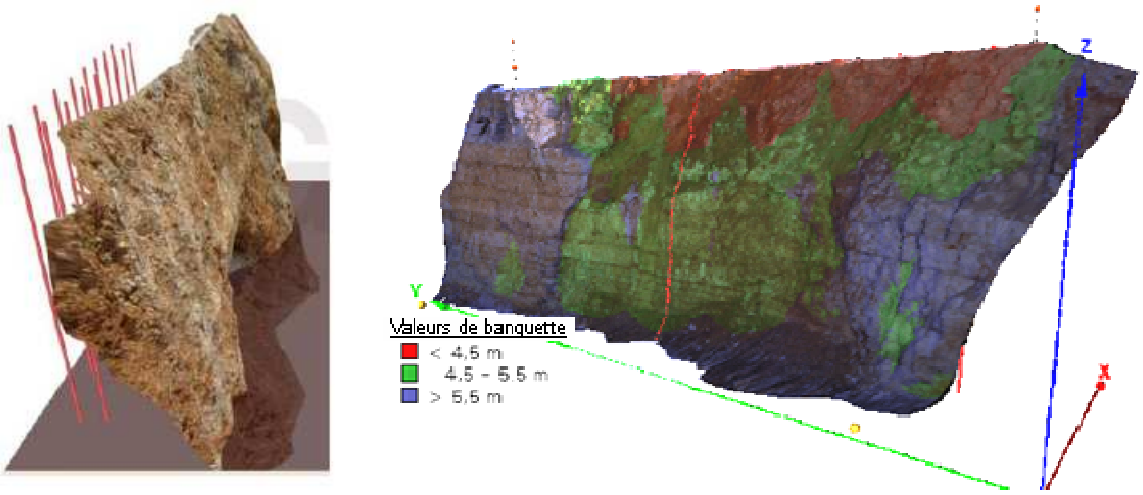


Figure 50
Visualisation 3D du front
Prévision des zones potentiellement à risque

Le système Blast Metrix présente l'avantage de lever un front entier de manière très simple et rapide : deux prises de vues suffisent. Pour indication, il m'a fallu, seule, une heure et demie environ pour obtenir un levé complet du front avec un profil et une implantation de chaque trou, c'est-à-dire 90 minutes pour un « diagnostic pré-implantatoire » complet. Avec un deuxième opérateur positionnant les mires sur le front supérieur, l'opération serait encore plus rapide.

Ce système simple et rapide peut susciter l'intérêt d'un opérateur qui délaisse les outils laser, trop lourds à mettre en œuvre. De plus, comparé aux outils de levé laser (LaserAce manuel ou automatisé), le système Blast Metrix est très précis, il balaye entièrement un front ce qui permet de ne pas « oublier » des zones voisines, sous ou sur cavés, comme cela peut être le cas lors d'un levé linéaire par LaserAce le long d'un trou.

Au niveau de la foration, un travail important reste à faire. L'opération de foration doit en effet gagner en précision, à commencer par ce qui concerne les longueurs à forer et la surforation. Il est important de prendre conscience que les longueurs à forer sont directement liées à la hauteur du front d'exploitation, donc qu'une foration correcte implique la connaissance précise du front. L'utilisation de systèmes de levés du front est indispensable sur ce point.

Les déviations de foration mises en évidence lors des mesures par Boretrak sont très importantes. Pour les réduire, deux solutions sont envisageables. La première serait l'investissement dans une nouvelle machine pour laquelle les déviations sont moins importantes. La deuxième, qui pourrait être mise en place dès aujourd'hui, s'appuie sur une étude des performances de la machine actuelle : en utilisant le couple train de tige-taillant adapté, en s'assurant de la bonne symétrie des taillants et en choisissant les taillants adaptés au massif rocheux, et enfin en réduisant la poussée et la percussion, il est possible de limiter le flambage des tiges et les déviations de la machine.

Ruvernison est la seule des 5 carrières où le diamètre de foration est plus important : il ne serait pas aberrant d'acquérir, pour cette carrière, un jeu de tiges de forages de diamètre adapté au diamètre de 102 mm.

Ensuite, des outils d'affûtage automatique existent : ils permettent d'améliorer la précision d'un affûtage manuel et de conserver la symétrie des taillants tout au long de leur utilisation. Ceci apparaît comme essentiel pour le travail dans une roche extrêmement abrasive comme le granite de Ruvernison.

Enfin, des paramètres de forage (poussée, percussion, rotation) inadaptés sont vraisemblablement la source principale des déviations. Diminuer la poussée, donc réduire la vitesse de pénétration, améliorera la situation actuelle. Pour exemple, les vitesses de foration (durée de réalisation d'un trou) chez Charier à La Clarté sont de l'ordre de 30-35

mètres forés par heure. A Ruvernison, elles sont d'environ 35-40 m/h, dans une roche pourtant plus dure et plus compétente, qui devrait être forée plus lentement.

La réduction des déviations de foration sur la machine actuelle doit donc faire rapidement l'objet d'une étude s'appuyant sur la modification de l'outillage et des paramètres de forage d'une part, et la mesure des déviations de chaque trou d'autre part. Les mesures systématiques de déviation, bien que lourdes à mettre en œuvre, sont essentielles pour évaluer les effets des modifications mises en œuvre et pour sentir les progrès réalisés : sans mesurer, on ne peut rien voir. Cette démarche doit être suivie jusqu'à l'obtention d'un résultat satisfaisant.

Le travail sur le chargement répond a priori d'une étude plus approfondie. On peut néanmoins faire allusion à des pratiques d'autres carrières, chez Piketty à Ecuelles ou chez Charier à La Clarté. Le minage sur ces carrières est en effet suivi par 2 personnes différentes : à partir du plan de foration, une première personne établit un plan de tir théorique et passe la commande d'explosifs. Intervient ensuite un autre opérateur qui met en œuvre le plan de chargement en l'adaptant au contexte local. Cette organisation en deux temps apporte les visions de deux personnes différentes sur le plan de tir. Aussi une démarche similaire pourrait-elle être appliquée chez Hélary, de façon à apporter l'esprit critique de deux personnes différentes et améliorer la précision et la prévision du chargement.

Nous pouvons enfin évoquer une des possibilités du logiciel Blast Metrix : à partir des données du front et des positions des trous, le logiciel permet de reconstituer les profils de trous, et de donner un type de chargement adapté. Ceci constitue une aide au chargement et permet d'établir un plan de chargement théorique adapté à chaque tir.

1.2. Traçabilité des tirs

Afin de préparer convenablement l'étude d'optimisation de l'abattage, il est important de réaliser un suivi correct des tirs effectués.

Un suivi des tirs est déjà actuellement mis en place. Pour chaque tir, on dispose en effet d'un plan de foration, d'un schéma de tir, d'une copie de la facture d'explosifs et des enregistrements de vibrations. Cette base de données doit néanmoins être améliorée en vue de la poursuite d'une étude.

Nous avons en effet déjà fait remarquer que la base de données de vibrations regroupait des données imprécises ou non comparables. Il est important d'attacher un souci particulier à la représentativité des données de suivi de tirs.

Aussi, le suivi des tirs peut-il s'appuyer sur la base de données existante, complétée par différents éléments, et s'organiser suivant les suggestions faites précédemment. La base de données du suivi des tirs pourrait donc être constituée des éléments présentés dans le tableau 17.

Etape	Opération	Réalisation	Objectif
Implantation	Schéma du tir	Localisation du tir sur le plan de la carrière	Analyse des vibration/règlementation
		Direction de foration (boussole)	Liaison foreur-mineur
		Variations hauteur front	
		Inclinaisons foration	
Foration	Compte rendu de foration	Longueur forée	Liaison foreur-mineur
		Présence de failles	
		Présence d'eau	
		Mesure banquettes en pied	
Préparation du tir	Plan de chargement théorique	Plan de chargement théorique	Liaison mineur
		Séquence d'amorçage adaptée aux conditions locales	
	Commande d'explosifs		Suivi du tir
Compte-rendu du tir	Plan de chargement effectif		Suivi du tir
	Granulométrie	Indicateur granulométrique	Analyse du tir
		Amplitudes de fonctionnement du concasseur primaire	
		Débitage secondaire par BRH	
	Qualité du tir	Enregistrement vibratoire	Réglementation
		Analyse du signal sismique (fréquences, niveau de vibrations)	Analyse du tir

Eléments de suivi du minage
Tableau 17

On peut remarquer sur cette proposition de procédure qu'un outil de profilage de front et de dimensionnement de chargement tel que les logiciels Blast Metrix, ou Geolaser de NitroBickford pourrait servir de support à différentes étapes : dans l'implantation du schéma de tir tout d'abord, puis dans la détermination d'un plan de chargement théorique, et enfin dans l'analyse a posteriori du tir.

2. Méthodologie d'optimisation de l'abattage sur une carrière

L'analyse des méthodes de tir effectuée sur la carrière de Ruvernison s'appuie sur des mesures et des outils spécifiques. De la manière dont cette analyse a été conduite peut être déduite une démarche plus générale : la méthodologie appliquée à Ruvernison suggère ainsi un schéma reproductible sur les autres carrières exploitées par Hélary.

Deux carrières, même très proches géographiquement, ne feront jamais face à des conditions d'abattage similaires : la géologie du gisement varie (on observe même parfois des hétérogénéités importantes au sein d'un même gisement, suivant les paliers ou les zones d'exploitation), la géométrie de l'exploitation joue un rôle important (autorisations d'exploitation, directions d'extensions, position des rampes…), de même que les installations disponibles (dumpers, concasseurs…).

Il faut donc prendre conscience du fait que les paramètres d'abattage doivent être adaptés et optimisés pour chaque carrière :

- en amont, au massif rocheux et à l'exploitation ;

- en aval, aux paramètres sur lesquels le résultat du tir influe (dimensions du concasseur, riverains et réglementation concernant les vibrations par exemple).

Une démarche possible à suivre pour analyser et optimiser ces paramètres abattage est résumée dans les points suivants :

- une caractérisation du massif rocheux ;
- une étude théorique des paramètres du tir ;
- une observation qualitative et quantitative du passage à la pratique ;
- une évaluation des résultats du tir.

L'étude d'optimisation repose alors sur la détermination d'un schéma de tir théorique adapté aux caractéristiques du massif rocheux. A partir de ce schéma de tir, des tirs d'essais et d'ajustement peuvent être effectués : en jouant sur l'un et l'autre des paramètres, et en mesurant les répercussions de ces variations, on optimise le résultat de l'abattage aux contextes amont et aval du tir.

Il faut tout de même voir que cette opération d'optimisation est une démarche pas à pas, par tâtonnements parfois. C'est un travail à faire sur chaque tir, qui ne donnera pas de résultats immédiats, mais s'inscrit dans une perspective à moyen terme.

Conclusion

Le travail d'option initialement proposé par Colas portait sur la réduction des nuisances dues au tir d'abattage, c'est-à-dire essentiellement dues aux vibrations : cela supposait une étude autour des données vibratoires disponibles, et la proposition de méthodes pour limiter ces vibrations. Le sujet a finalement été élargi à l'optimisation de l'abattage en général.

Cet élargissement a essentiellement permis de prendre conscience de la réalité des pratiques d'abattage, et notamment de l'écart qu'il peut y avoir entre ce qu'on pense faire et ce qu'on fait effectivement.

Finalement, l'ouverture du sujet vers une analyse plus générale a été une chose positive : un travail sur la réduction des vibrations dans les circonstances actuelles de mise en pratique n'aurait pas pu aboutir, à cause des trop nombreuses incertitudes.

Les directions sur lesquelles il faut à présent travailler s'appuient sur la maîtrise de chaque étape du tir, implantation, foration, chargement. Au moyen d'outils adaptés, on peut ainsi arriver à une maîtrise de l'abattage global. Il apparaît aujourd'hui essentiel de mettre en place des procédures afin de travailler correctement. Ceci doit s'appuyer sur un suivi régulier et détaillé des pratiques de tir, puis sur la mise en place de certains nouveaux éléments et la correction des incertitudes détectées, en vue d'une amélioration continue dans la maîtrise de l'abattage. D'un point de vue matériel, cela nécessite des investissements financiers modérés, de l'ordre de 30 000 €, pour les outils de mesure de déviations de trous et de levé du front. Le niveau humain est également concerné : le foreur et le mineur sont impliqués dans leur travail quotidien. D'autre part, l'analyse et l'amélioration des tirs demande un investissement humain supplémentaire, de l'ordre d'un demi temps ingénieur. Sa mission consistera en un aller-retour entre des aspects théoriques et pratiques, avec d'un côté la rédaction et l'installation de procédures de collecte d'information, d'un autre côté l'analyse de ces informations puis la mise en place des éléments correctifs ou nouveaux, et enfin leur suivi. Le contrôle de cette procédure d'amélioration continue de l'abattage pourra être basé sur des indicateurs tels que des données de production du poste primaire et des données de résultats d'abattage. On pourra alors mesurer les améliorations ponctuellement, tir par tir, ou plus globalement.

Cette démarche, vers la mise en œuvre d'un travail « propre », conduira d'une part à un meilleur déroulement et un meilleur résultat de l'abattage. D'autre part, une mise en pratique fidèle et précise d'un schéma de tir constitue le point de départ d'autres études, aux enjeux différents. Ce n'est qu'une bonne connaissance et une bonne maîtrise des causes qui permettra d'optimiser les effets : en sachant et en maîtrisant ce qu'on fait, on pourra alors envisager des études intéressantes à des niveaux différents, économique, opérationnel, environnemental, social,

règlementaire, la réduction des vibrations par exemple, ou l'optimisation de la chaîne de production globale d'une exploitation.

Enfin, il apparaît indispensable de prendre conscience que l'abattage à l'explosif ne consiste pas simplement à placer et faire détoner des explosifs dans un massif rocheux. C'est une opération qui doit bénéficier d'une approche plus fine : tout d'abord, elle doit systématiquement être adaptée au contexte local de l'exploitation et du tir. Enfin, elle doit être en permanence remise en question par rapport aux avancées techniques et technologiques, pour s'inscrire dans une démarche de progression permanente.

Bibliographie

Mines et Carrières, Revue de l'industrie minérale – Janvier 2003 – 148è année – volume 85 – ISSN 0994-2556

Les techniques de l'industrie minérale n°13, *TIRS : théories et technologies* – Mars 2002 ISSN 1296-9281

Les techniques de l'industrie minérale n°1, *TIRS : applications et implications* - Mars 2002 ISSN 1296-9281

Thèse présentée à l'ENSMP par Nejla BOUDEN ROMDHANE
Contribution à l'étude de la fragmentation des massifs rocheux à l'explosif, février 1987

Taylor, H.L and Mason, C.M. : *A systematic approach to well surveying calculations*, Soc. Pet. Eng. J. (Dec 1972) 474-88

Gabolde Gilles, Nguyen Jean-Paul : *Drilling data handbook*, editions Technip, 1999

Adam T. Bourgoyne Jr, Martin E. Chenevert, Keith K. Millheim, F.S. Young Jr : *Applied Drilling Engineering*, Society of petroleum engineers, 1991

Thèse présentée à l'ENSMP par Julia KAPLAN
Modélisation tridimensionnelle du comportement directionnel du système de forage rotary, 2003

Luz-Deinny CELY-HOSTOS, *Optimisation des tirs à l'explosif et de la chaîne de production dans les carrières de granulats, application à la carrière Hélary de Ruvernison (Morlaix, France)*, ENSMP-CGI, CESECO 2006

Langefors U, Kihlstrom B, *the modern technics of rock blasting,* John Wiley, New York, 1963

J.ALER, J. DU MOUZA, M. ARNOULD, *Measurement of the Fragmentation Efficiency of Rock Mass Blasting and its Mining Applications*, 1995

J-A FLEURISSON, *Structures géologiques et stabilité des pentes dans les massifs rocheux: description, analyse et modélisation*, Revue française de géotechnique n°95/96, 2001

Annexes

Notices descriptives des explosifs :

Annexe 1 : Notice descriptive du Dynaroc-NitroBickford (dynamite)

Annexe 2 : Notice descriptive de l'Explus-NitroBickford (émulsion)

Annexe 3 : Notice descriptive du Nitram-NitroBickford (émulsion)

Annexe 4 : Notice descriptive du Nitrate fuel -NitroBickford (ANFO)

Caractérisation du massif rocheux :

Annexe 5 : Familles de discontinuités

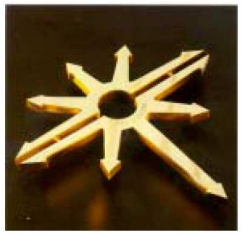
Données des tirs de référence

Annexe 6 : Localisation des tirs de référence

Annexe 7 : Plan de chargement du tir N°1
Enregistrement sismique du tir N°1

Annexe 8 : Données du tir N°2
Plan de chargement du tir N°2
Enregistrement sismique du tir N°2

Annexe 9 : Données du tir N°3
Plan de chargement du tir N°3
Séquence d'amorçage du tir N°3
Enregistrements sismiques du tir N°3



DYNAROC 6A et 9A

NITRO-BICKFORD offre aux utilisateurs deux formules de dynamite, qui répondent d'une façon industrielle aux impératifs de rationalisation, d'économie et à l'évolution des marchés concernés. Notre large expérience nous permet également d'offrir d'autres qualités dans le cadre des agréments existants. Nous consulter.

NITRO-BICKFORD supplies two dynamite formulations, which mee the economic need of the relevant developing market. Our extensiv experience enables us to offer other products within the framewo of existing manufacturing agreement. For further informatio please contact us.

1 Présentation / 1 Presentation

		DYNAROC 9 A	DYNAROC 6 A
• Cartouches	◆ *Cartridges*	Nous consulter pour les différents calibres disponibles	*Please contact us for available sizes*
• Couleur de la pâte	◆ *Color of the composition*	Rouge ocre	Rose saumon
• Domaines d'utilisation	◆ *Use*	Pour les carrières et travaux publics, en galerie fonçage en roche dure et très dure, même en présence d'eau et d'humidité. *For use in quarries, civil works, underground and open pit mines as well as in tunnelling applications in the hardest rocks and in wet conditions.*	Pour les carrières et travaux publics, en galerie fonçage en roche dure et très dure, même en présence d'eau et d'humidité. *For use in quarries, civil works, underground and open pit mines as well as in tunnelling applications in the hardest rocks and in wet conditions.*

2 Caractéristiques techniques mesurées* / 2 Technical specifications (as mesured)*

		DYNAROC 9 A	DYNAROC 6 A
• Densité	◆ *Density*	1.45	1.42
• Coeff. d'auto-excitation sans confinement (Ø 30 mm)	◆ *Self-excitation factor (unconfined) (Ø 30 mm)*	10 cm	10 cm
• Vitesse de détonation en tube acier (ø 80 mm confiné)	◆ *Velocity of detonation (confined) (Ø 80 mm)*	6500 m/s (±200)	6200 m/s (±200)
• Indice de sensibilité à l'impact	◆ *Impact sensitivity*	5 J	12 J
• Indice de sensibilité à la friction	◆ *Friction sensitivity*	73% à 353 N	10% à 353 N
• Energie de détonation – de choc ±0.2 – de gaz ±0.2 – Totale ±0.2	◆ *Energy liberation* – *Shock* ±0.2 – *Gas* ±0.2 – *Total* ±0.2	Mj/kg 2.4 2.1 4.5	Mj/kg 2.1 1.9 4

*Ces valeurs sont données à titre indicatif et peuvent être sujettes à modifications. These values are indicative and may be subject to modification.

NITRO-BICKFORD
21 rue Vernet - 75008 PARIS
Tel : 01 40 69 80 60 - Fax : 01 40 69 80 99

3 Limites d'utilisation / 3 Limits of use

		DYNAROC 9 A	DYNAROC 6 A
• Diamètre critique	◆ *Critical diameter*	< 25 mm	< 25 mm
• Amorçage – Détonateur – Cordeau détonant	◆ *Initiation sensitivity* – Detonator – Detonating cord	 ≥ 0.6 g PETN ≥ 10 g / m PETN	 ≥ 0.6 g PETN ≥ 10 g / m PETN
• Pression statique limite	◆ *Limit static pressure*	80 bars	80 bars
• Température d'utilisation limite	◆ *Temperature limits*	- 25°C / 50°C	- 25°C / 50°C
• Résistance à l'eau	◆ *Water resistance*	Très bonne / *Very good*	Très bonne / *Very good*
• Durée de vie recommandée Dans des conditions normales de stockage (à l'abri de l'humidité et d'exposition prolongée à la chaleur ou à des cycles thermiques importants).	◆ *Recommended shelflife* Under normal conditions (protected from moisture and long exposure to excessive temperature fluctuations).	2 ans / *2 years*	2 ans / *2 years*

4 Caractéristiques théoriques calculées / 4 Calculated theorical characteristics

		DYNAROC 9 A	DYNAROC 6 A
• Volume de gaz (0°C/1At)	◆ *Gas volume (0°C/1At)*	848 L/kg	893 L/kg
• Energie totale massique	◆ *Total mass energy*	4.9 Mj/kg	4.5 Mj/kg
• Energie totale volumique	◆ *Total volume energy*	7.1 Mj/L	6.4 Mj/L
• Pression de détonation (ø 80 mm confiné)	◆ *Detonation pressure (confined) (Ø 80 mm)*	15.3 GPa	13.6 GPa

5 Autorisations et classements / 5 Authorisation and classification

		DYNAROC 9 A	DYNAROC 6 A
• Agrément CE	◆ *CE Certification*	0080.Exp.97.0146	0080.Exp.97.0145
• Agrément technique (France)	◆ *Technical certification (France)*	XG 400 F du 12.07.89	XG 465 F du 12.12.97
• Chargement par gravité	◆ *Gravity loading*	DE n°16 du 31/07/89	EXP 97-19 du 12/12/97
• Explosif rocher	◆ *Rock explosive*	ME 3/89 du 09.08.1989	EXP 97-19 DU 12/12/97
• Classement transport	◆ *Transport classification*	Type A 0081 1.1.D 4°	Type A 0081 1.1.D 4°
• Nomenclature douanes	◆ *Customs reference*	360200000009G	360200000009G

6 Responsabilité

Les indications et recommandations contenues dans ce document sont fondées sur les recherches et tests conduits par le fabricant à ce jour. Le fabricant ne peut envisager toutes les applications possibles pour ses produits. En conséquence, les produits décrits ci-après sont vendus sous la seule garantie de leur conformité aux spécifications figurant dans le présent document et aux arrêtés du Ministère Français de l'Industrie qui établissent leur agrément technique et en autorisent l'utilisation.

6 Liability

The information and recommendations contained in this document are based on manufacturer's research and tests to this date. The manufacturer cannot anticipate all of the possible applications for its products. Therefore, the products described in this document are sold under the only warranty to be in conformity with the specifications stated in this document and to be in compliance with the certifications granted by the French Ministry of Industry.

EPC GROUPE
NITRO-BICKFORD
21 rue Vernet - F 75008 PARIS
www.nitrobickford.fr

DTCNC-2/05.06



EXPLUS®

Dernière en date des créations de NITROCHIMIE, certifié AFAQ ISO 9001, cet émulgel offre aux utilisateurs une énergie accrue, une vitesse de détonation élevée, associées à une grande sécurité d'emploi.

The most recent creation of Nitrochimie, certified AFAQ ISO 9001 is an « EMULGEL » which offers a high energy, a high detonation velocity together with a high security of use.

1 Présentation — 1 Presentation

		EXPLUS®
• Cartouches	◆ *Cartridges*	Nous consulter pour les standard *Please consult us for standard products*
• Couleur de la pâte	◆ *Color of the composition*	Gris *Grey*
• Domaine d'utilisation	◆ *Use*	Pour les carrières et travaux publics, en galerie fonçage en roche dure, même en présence d'eau ou d'humidité. Très peu sensible au choc *For use in quarries, mines and construction tunnels in hard rock and in wet conditions. Only slightly sensitive to shock.*

2 Caractéristiques techniques mesurées * — 2 Technical specifications (as measured) *

		EXPLUS®
• Densité	◆ *Density*	1,28 (± 0,08)
• Coefficient d'auto-excitation sans confinement (∅ 30 mm)	◆ *Self-excitation factor (unconfined)* (∅ 30 mm)	5,5 cm (± 2)
• Vitesse de détonation sous confinement acier (∅ 50 mm)	◆ *Velocity of detonation (steel confined in ∅ 50 mm)*	5.500 m/s
• Indice de sensibilité à l'impact	◆ *Impact sensitivity*	> 1200 J
• Indice de sensibilité à la friction	◆ *Friction sensitivity*	> 353 N
• Energie de détonation * de choc * de gaz * totale	◆ *Energy liberation* * *shock* * *gas* * *total*	Mj/Kg 2,4 (± 0,2) 2,4 (± 0,2) 4,8 (± 0,2)

* Ces valeurs sont données à titre indicatif et peuvent être sujettes à modifications. * These values are indicative and may be subject to modifications.

NITRO-BICKFORD
21 rue Vernet - 75008 PARIS
Tel : 01 40 69 80 60 - Fax : 01 40 69 80 99

3 Limites d'utilisation — 3 Limits of use

		EXPLUS®
• Diamètre	◆ *Diameter*	≥ 24 mm
• Amorçage ◊ Détonateur ◊ Cordeau détonant **Pour une optimisation du rendement, nous recommandons l'amorçage fond de trou par booster ou cartouche amorce, ou latéral par cordeau 20 g/m**	◆ *Initiation sensivity* ◊ *Detonator* ◊ *Detonating cord* ***For the highest efficiency, downhole initiation by booster or primer cartridge is recommanded of failing that, side initiation by 20 g/m detonating cord.***	≥ 0,6 g PETN ≥ 20 g/m PETN
• Pression statique	◆ *Static pressure*	≤ 2,5 bars
• Température	◆ *Temperature limits*	- 10°C à 60°C *- 10°C up to 60°C*
• Résistance à l'eau	◆ *Water resistance*	Très bonne *Very good*
• Durée de vie **Dans des conditions normales de stockage (à l'abri de l'humidité et d'exposition prolongée à la chaleur ou à des cycles thermiques importants).**	◆ *Shelflife* ***Under normal storage conditions (protected from moisture and long exposure to excessive heat or from excessive temperature fluctuations).***	18 mois *18 months*

4 Caractéristiques théoriques calculées — 4 Calculated theoretical specifications

		EXPLUS®
• Température de détonation	◆ *Detonation temperature*	2800 °C
• Volume de gaz (0°C/1At)	◆ *Gas volume (0°C/1At)*	750 L/kg
• Energie totale massique	◆ *Total mass energy*	5,2 Mj/kg
• Energie totale volumique	◆ *Total volume energy*	6,7 Mj/L
• Vitesse de détonation	◆ *Velocity of detonation*	6350 m/s
• Pression de détonation	◆ *Detonation pressure*	14 GPa

5 Autorisations et classements — 5 Authorisation and classification

		EXPLUS®
• Agrément technique (France)	◆ *Technical certification (France)*	XN 471 F– 29/07/99
• Agrément CE	◆ *CE certification*	0080 EXP 99 0028
• Chargement par gravité	◆ *Gravity loading*	29/07/99
• Classement transport	◆ *Transport classification*	1.1.D UN 0241
• Nomenclature douanes	◆ *Customs reference*	360200000009G

6 Responsabilité

Les indications et recommandations contenues dans ce document sont fondées sur les recherches et tests conduits par le fabricant à ce jour. Le fabricant ne peut envisager toutes les applications possibles pour ses produits. En conséquence, les produits décrits ci-après sont vendus sous la seule garantie de leur conformité aux spécifications figurant dans le présent document et aux arrêtés du Ministère Français de l'Industrie qui établissent leur agrément technique et en autorisent l'utilisation.

6 Liability

The information and recommendations contained in this document are based on manufacturer's research and tests to this date. The manufacturer cannot anticipate all of the possible applications for its products. Therefore, the products described in this document are sold under the only warranty to be in conformity with the specifications stated in this document and to be in compliance with the certifications granted by the French Ministry of Industry.

EPC GROUPE DEPUIS 1893
NITRO-BICKFORD
Tel : 33.1.40.69.80.60.
Fax : 33.1.40.69.80.99.
21 rue Vernet - F 75008 PARIS
www.nitrobickford.fr

DTCNC-4/05.06



NITRAM®

La famille des émulsions NITRAM fabriquées en France par NITROCHIMIE depuis 1991 constitue un élément essentiel de notre gamme d'explosifs encartouchés.
NITROCHIMIE est certifié AFAQ ISO 9001.

NITRAM emulsion are manufactured in France by NITROCHIMIE since 1991 and are a key part of our range of cartridged explosive.
NITROCHIMIE is certified AFAQ ISO 9001.

1 Présentation — 1 Presentation

		NITRAM 9®	NITRAM 5®
• Cartouches	◆ *Cartridges*	Nous consulter pour les standard *Please consult us for standard products*	
• Couleur de la pâte	◆ *Color of the composition*	Gris *Grey*	
• Domaine d'utilisation	◆ *Use*	Pour les carrières et travaux publics, en galerie fonçage en roche dure, même en présence d'eau ou d'humidité. Très peu sensible au choc *For use in quarries, mines and construction tunnels in hard rock and in wet conditions. Only slightly sensitive to shock.*	

2 Caractéristiques techniques mesurées* — 2 Technical specifications (as measured)*

		NITRAM 9®	NITRAM 5®
• Densité	◆ *Density*	1,20 (± 0,08)	1,20
• Coefficient d'auto-excitation sans confinement (∅ 27 mm)	◆ *Self-excitation factor (unconfined)* (∅ 27 mm)	4 cm (± 2)	4 cm (± 2)
• Vitesse de détonation sous confinement acier (∅ 50 mm)	◆ *Velocity of detonation (steel confined in ∅ 50 mm)*	5.500 m/s (± 2)	5.500 m/s (± 2)
• Indice de sensibilité à l'impact	◆ *Impact sensitivity*	> 1200 J	> 1200 J
• Indice de sensibilité à la friction	◆ *Friction sensitivity*	> 353 N	> 353 N
• Energie de détonation * de choc * de gaz * totale	◆ *Energy liberation* * *shock* * *gas* * *total*	Mj/Kg 1,7 (± 0,2) 2,1 (± 0,2) 3,8 (± 0,2)	Mj/Kg 1,7 (± 0,2) 1,8 (± 0,2) 3,5 (± 0,2)

* Ces valeurs sont données à titre indicatif et peuvent être sujettes à modifications. * These values are indicative and may be subject to modifications.

NITRO-BICKFORD
21 rue Vernet - 75008 PARIS
Tel : 01 40 69 80 60 - Fax : 01 40 69 80 99

3 Limites d'utilisation — 3 Limits of use

		NITRAM 9®	NITRAM 5®
• Diamètre	◆ *Diameter*	= 25 mm	= 25 mm
• Amorçage ◊ Détonateur ◊ Cordeau détonant Pour une optimisation du rendement, nous recommandons l'amorçage fond de trou par booster ou cartouche amorce.	◆ *Initiation sensivity* ◊ *Detonator* ◊ *Detonating cord* *For the highest efficiency, downhole initiation by booster or primer cartridge is recommanded.*	≥ 0,6 g PETN ≥ 20 g/m PETN	≥ 0,6 g PETN ≥ 20 g/m PETN
• Pression statique	◆ *Static pressure*	≤ 3 bars	≤ 3 bars
• Température	◆ *Temperature limits*	- 10°C à 60°C *- 10°C up to 60°C*	- 10°C à 60°C *- 10°C up to 60°C*
• Résistance à l'eau	◆ *Water resistance*	Très bonne/*Very good*	Très bonne/*Very good*
• Durée de vie Dans des conditions normales de stockage (à l'abri de l'humidité et d'exposition prolongée à la chaleur ou à des cycles thermiques importants).	◆ *Shelflife* *Under normal storage conditions (protected from moisture and long exposure to excessive heat or from excessive temperature fluctuations).*	18 mois *18 months*	18 mois *18 months*
• Ne pas utiliser en présence de grisou ou de poussière explosive.	◆ *Never use in case of firedamp or permissible atmosphere.*		

4 Caractéristiques théoriques calculées — 4 Calculated theoretical specifications

		NITRAM 9®	NITRAM 5®
• Température de détonation	◆ *Detonation temperature*	2227°C	1896°C
• Volume de gaz (0°C/1At)	◆ *Gas volume (0°C/1At)*	857 L/kg	900 L/kg
• Energie totale massique	◆ *Total mass energy*	4,2 Mj/kg	3,6 Mj/kg
• Energie totale volumique	◆ *Total volume energy*	5 Mj/L	4,3 Mj/L
• Vitesse de détonation	◆ *Velocity of detonation*	6200 m/s	6300 m/s
• Pression de détonation	◆ *Detonation pressure*	13,5 GPa	13 GPa

5 Autorisations et classements — 5 Authorisation and classification

		NITRAM 9®	NITRAM 5®
• Agrément CE	◆ *CE certification*	0080 EXP 97 0007	0080.EXP.97.0006
• Chargement par gravité	◆ *Gravity loading*	01/02/96	01/02/96
• Classement transport	◆ *Transport classification*	1.1.D UN 0241	0.1.D UN 0241
• Nomenclature douanes	◆ *Customs reference*	360200000009G	360200000009G

6 Responsabilité

Les indications et recommandations contenues dans ce document sont fondées sur les recherches et tests conduits par le fabricant à ce jour. Le fabricant ne peut envisager toutes les applications possibles pour ses produits. En conséquence, les produits décrits ci-après sont vendus sous la seule garantie de leur conformité aux spécifications figurant dans le présent document et aux arrêtés du Ministère Français de l'Industrie qui établissent leur agrément technique et en autorisent l'utilisation.

6 Liability

The information and recommendations contained in this document are based on manufacturer's research and tests to this date. The manufacturer cannot anticipate all of the possible applications for its products. Therefore, the products described in this document are sold under the only warranty to be in conformity with the specifications stated in this document and to be in compliance with the certifications granted by the French Ministry of Industry.

EPC GROUPE
NITRO-BICKFORD
Tel : 33.1.40.69.80.60
Fax : 33.1.40.69.80.99
21 rue Vernet - F 75008 PARIS
www.nitrobickford.fr

DTCNC-3/05.06



NITRATE FUEL (ANFO)

Fabriqués par NITROCHIMIE certifié AFAQ (ISO 9001)

Manufactured by NITROCHIMIE certified AFAQ (ISO 9001)

1 Présentation — 1 Presentation

		NITRAL	NITRO D8
• Aspect	◆ *Consistency*	Granulé *Granulated*	Granulé *Granulated*
• Couleur	◆ *Color*	Gris *Grey*	Rose *Pink*
• Conditionnement	◆ *Packaging*	Sacs papier de 25 kg *25 Kg paper bags*	Sac papier de 25 kg *25 Kg paper bags*

2 Caractéristiques techniques mesurées * — 2 Technical specifications (as measured) *

		NITRAL	NITRO D8
• Densité gravimétrique	◆ *Gravimetric density*	0,81 (± 0,02)	0,80 (± 0,02)
• Densité tassement	◆ *Compression density*	0,90 (± 0,02)	0,90 (± 0,02)
• Vitesse de détonation sous confinement acier (∅ 50 mm)	◆ *Velocity of detonation (steel confined in ∅ 50 mm)*	3400 m/s (± 200)	3200 m/s (± 200)
• Indice de sensibilité à l'impact	◆ *Impact sensitivity*	> 50 J	> 50 J
• Indice de sensibilité à la friction	◆ *Friction sensitivity*	> 353 N	> 353 N

* Ces valeurs sont données à titre indicatif et peuvent être sujettes à modifications. * These values are indicative and may be subject to modifications.

3 Caractéristiques théoriques calculées — 3 Calculated theoretical specifications

		NITRAL	NITRO D8
• Température de détonation	◆ *Detonation temperature*	2830 °C	2260 °C
• Volume de gaz (0°C/1At)	◆ *Gas volume (0°C/1At)*	898 L/kg	975 L/kg
• Energie totale massique	◆ *Total mass energy*	4,6 Mj/kg	3,8 Mj/kg
• Energie totale volumique	◆ *Total volume energy*	3,7 Mj/L	3 Mj/L
• Vitesse de détonation	◆ *Velocity of detonation*	5200 m/s	5100 m/s
• Pression de détonation	◆ *Detonation pressure*	6,9 GPa	5 GPa

NITRO-BICKFORD
21 rue Vernet - 75008 PARIS
Tel : 01 40 69 80 60 - Fax : 01 40 69 80 99

4 Limites d'utilisation — 4 Limits of use

		NITRAL	NITRO D8
• Diamètre critique à l'air libre	◆ *Critical diameter without confinement*	40 mm	70 mm
• Amorçage ◊ Booster ◊ Cordeau détonant Pour une optimisation du rendement, nous recommandons l'amorçage fond de trou par booster ou cartouche amorce, ou latéral par cordeau 20 g/m	◆ *Priming* ◊ *Booster* ◊ *Detonating cord* *For the highest efficiency, downhole initiation by booster or primer cartridge is recommanded of failing that, side initiation by 20 g/m detonating cord.*	Oui/ *Yes* ≥ 10 g/m PETN	Oui/ *Yes* ≥ 10 g/m PETN
• Pression hydrostatique	◆ *Hydrostatic pressure*	Sans objet *Not applicable*	Sans objet *Not applicable*
• Température	◆ *Temperature*	0°C à 50°C *0°C up to 50°C*	0°C à 50°C *0°C up to 50°C*
• Résistance à l'eau	◆ *Water resistance*	Aucune *None*	Aucune *None*
• Durée de vie Dans des conditions normales de stockage (à l'abri de l'humidité et d'exposition prolongée à la chaleur ou à des cycles thermiques importants).	◆ *Shelflife* *Under normal storage conditions (protected from moisture and long exposure to excessive heat or from excessive temperature fluctuations).*	1 année *1 year*	1 année *1 year*

5 Autorisations et classements — 5 Authorisation and classification

		NITRAL	NITRO D8
• Agrément technique (France)	◆ *Technical certification (France)*	XN 358 F-10/03/81	XN 435 F-18/11/93
• Agrément CE	◆ *CE certification*	0080 EXP 97 0008	0080 EXP 97 0009
• Chargement par gravité	◆ *Gravity loading*	DM/STSS 179-22/04/81	EXP 93-14-18/11/93
• Chargement pneumatique	◆ *Pneumatic loading*	-	EXP 9510-21/06/95
• Classement transport France Belgique	◆ *Transport classification* *France* *Belgium*	1.1.D UN 0082 1.5 D UN 0331	1.1.D UN 0082 1.5 D UN 0331
Nomenclature douanes	*Customs reference*	360200000009G	360200000009G

6 Responsabilité

Les indications et recommandations contenues dans ce document sont fondées sur les recherches et tests conduits par le fabricant à ce jour. Le fabricant ne peut envisager toutes les applications possibles pour ses produits. En conséquence, les produits décrits ci-après sont vendus sous la seule garantie de leur conformité aux spécifications figurant dans le présent document et aux arrêtés du Ministère Français de l'Industrie qui établissent leur agrément technique et en autorisent l'utilisation.

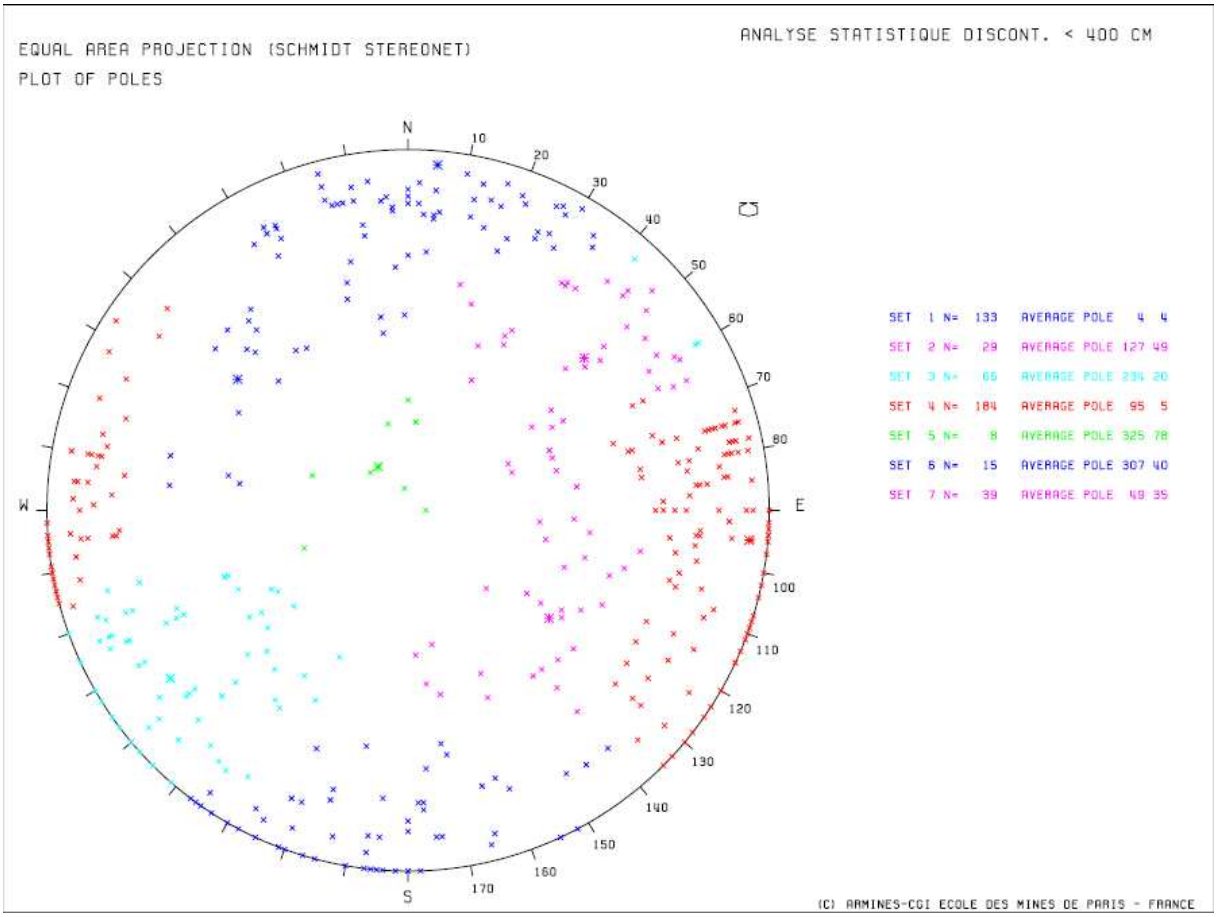
6 Liability

The information and recommendations contained in this document are based on manufacturer's research and tests to this date. The manufacturer cannot anticipate all of the possible applications for its products. Therefore, the products described in this document are sold under the only warranty to be in conformity with the specifications stated in this document and to be in compliance with the certifications granted by the French Ministry of Industry.

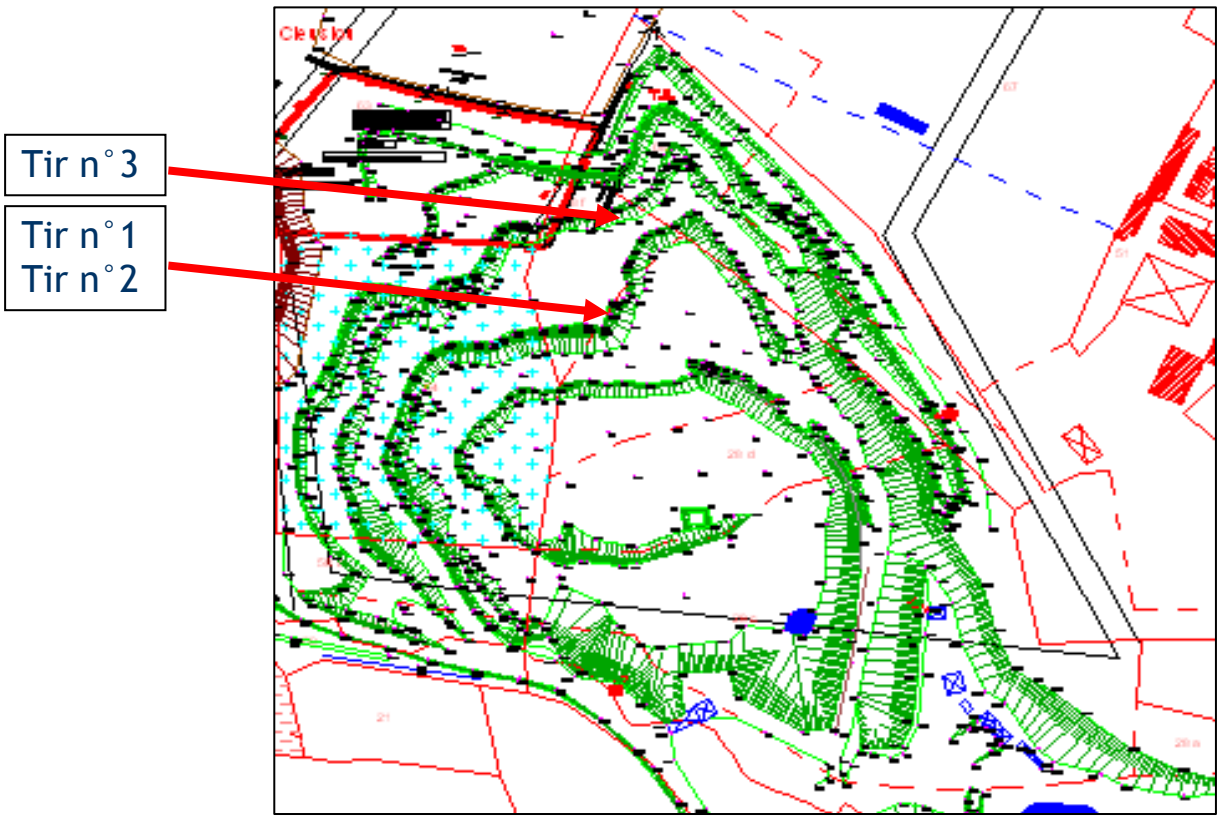
EPC GROUPE (DEPUIS 1893)
NITRO-BICKFORD
Tel : 33 1 40 69 80 60
Fax : 33 1 40 69 80 99
21 rue Vernet - F 75008 PARIS
www.nitrobickford.fr

DTCNC-5/05.06

Familles de discontinuités :

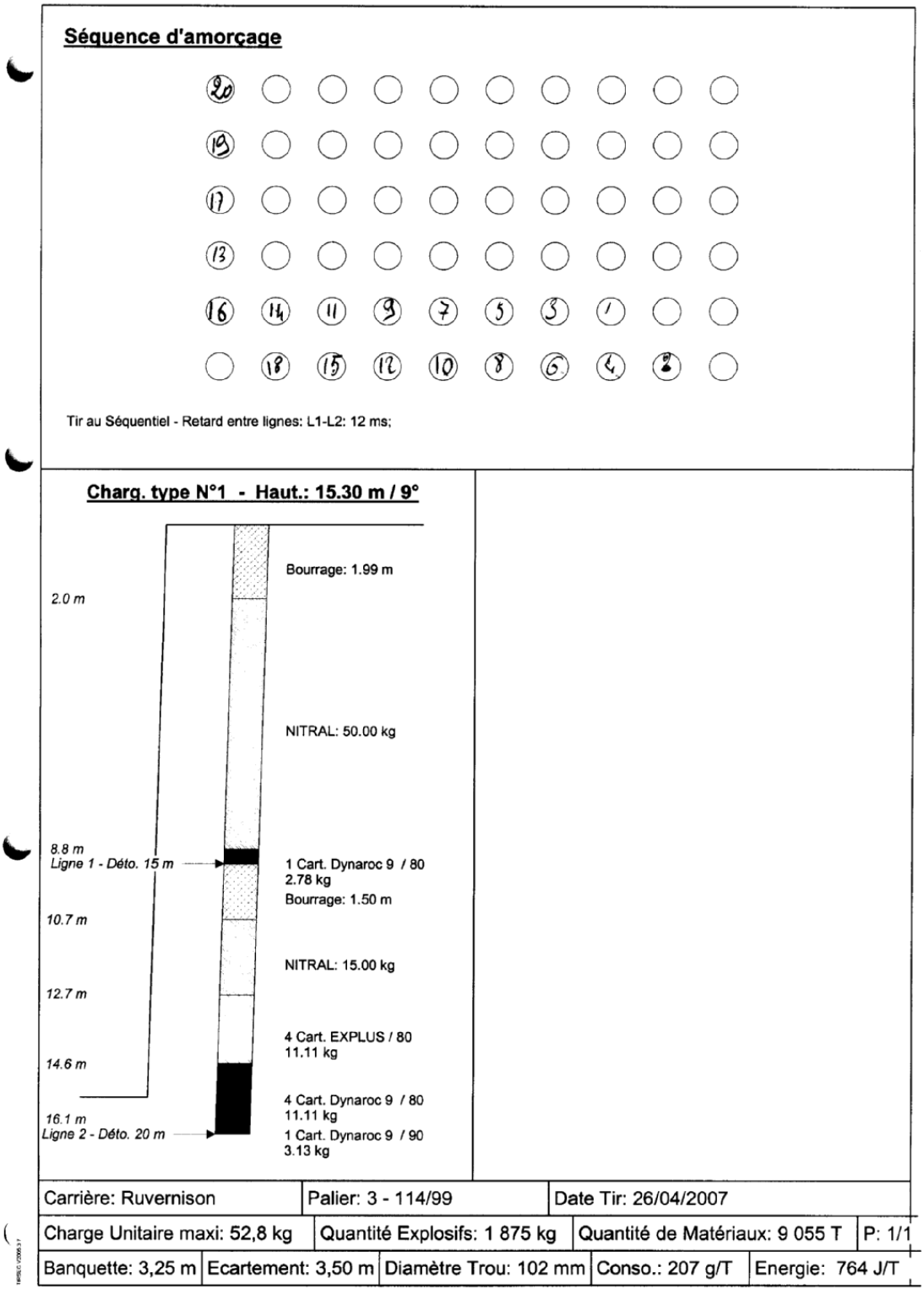


Situation des tirs de référence :



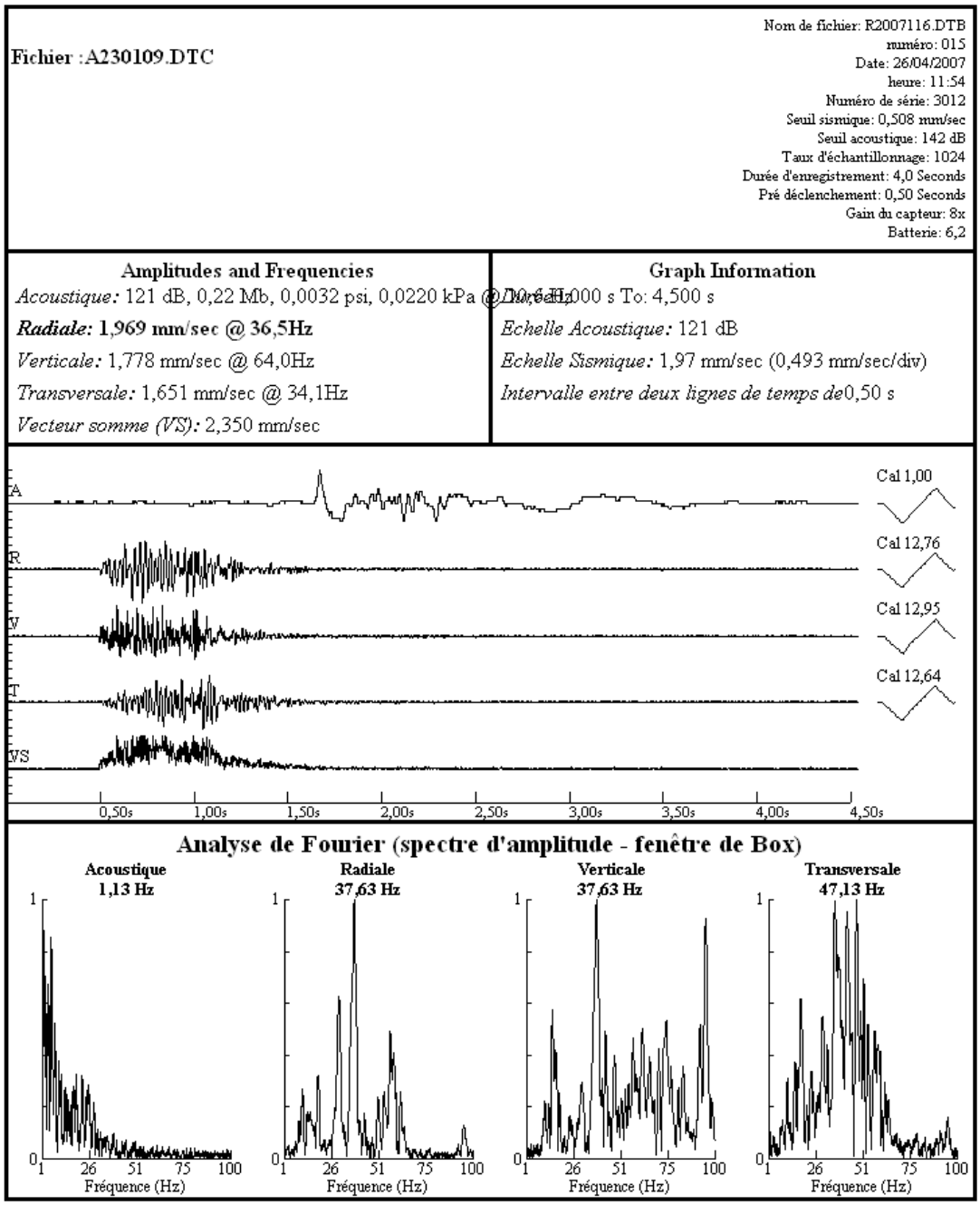
Plan topographique de la carrière de Ruvernison

Plan de chargement du tir N°1 :



A noter : ce document correspond au document de suivi des tirs en interne. Il est complété par le mineur à l'issue de chaque tir. La géométrie du tir et la séquence d'amorçage sont complétés manuellement : on donne au mineur une grille de base, ainsi les cercles vides doivent être considérés comme inexistants, seuls les cercles annotés d'un numéro correspondent à un trou effectivement chargé, et la suite des numéros donne la séquence d'amorçage.

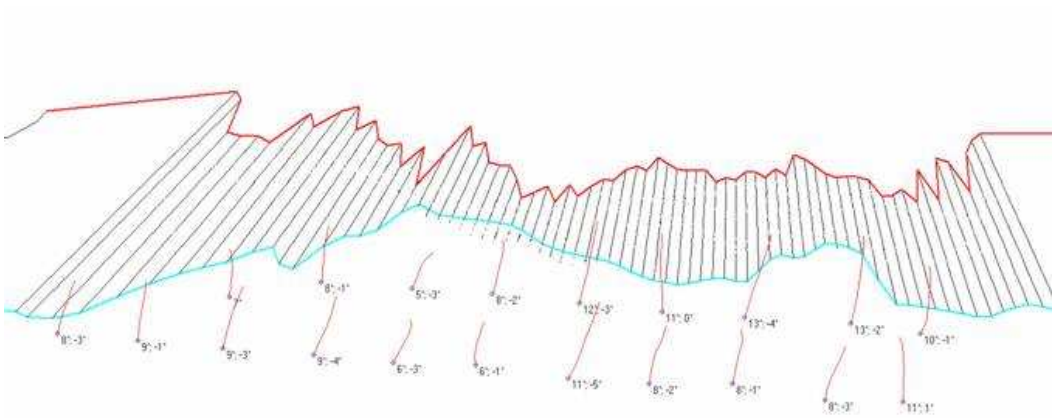
Enregistrement vibratoire du tir N°1 – 26/04/2007
Capteur Miniseis placé chez M. Querre, 410 m du tir.



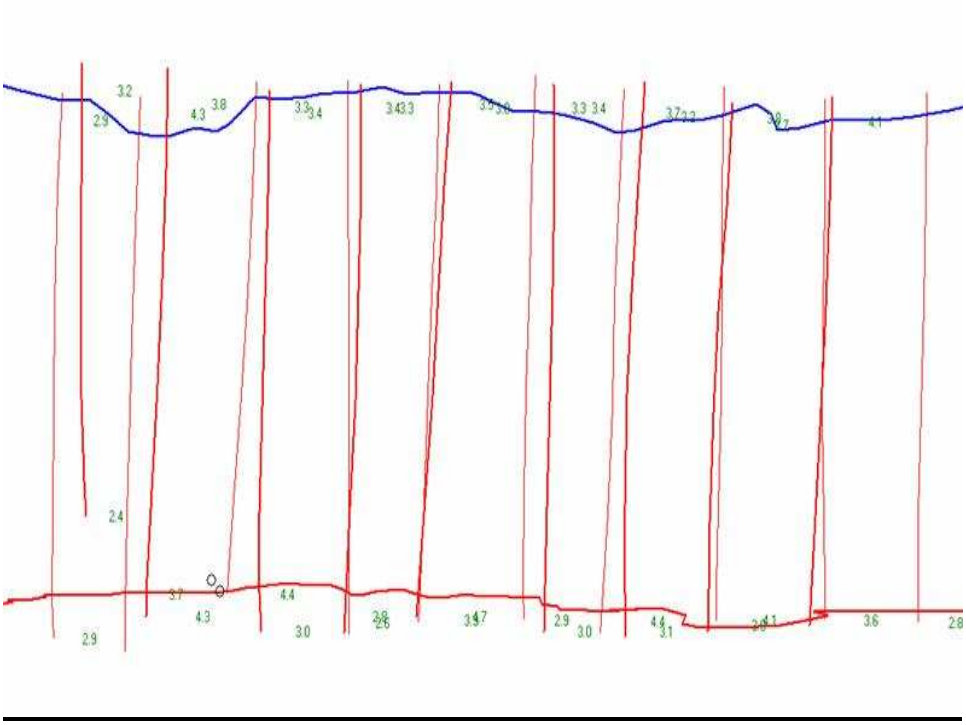
Tir N°1 :
Amplitudes de fonctionnement du concasseur primaire :

	Début	arrêt 1	reprise	Arrêt	temps d'interruption (h)	nb tours dumpers	production primaire
24/05/07	7:30			17:30	1:00	40	1200
23/05/07	7:30			17:30	0:30	56	1680
22/05/07	7:30	12:00	13:30	17:30	2:15	37	1110
21/05/07	7:30	13:30	15:00	16:45	1:00	36	1080
11/05/07	7:45			11:00		16	480
10/05/07	7:45			17:00	2:00	32	960
09/05/07	7:45			17:00	1:00	28	840
03/05/07	7:45			17:00	2:00	37	1110
02/05/07	7:45			17:00	1:30	37	1110

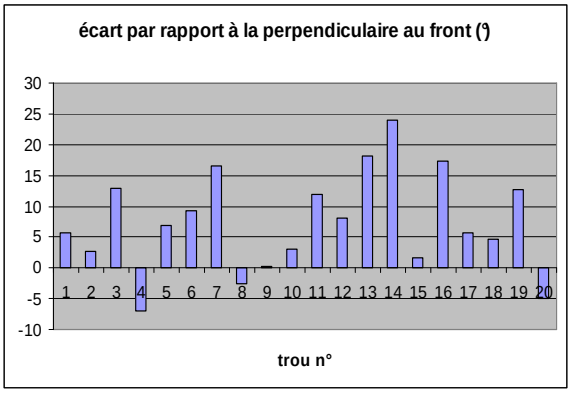
Données du tir N°2

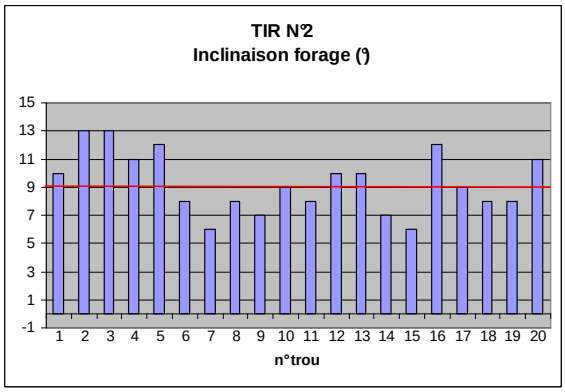


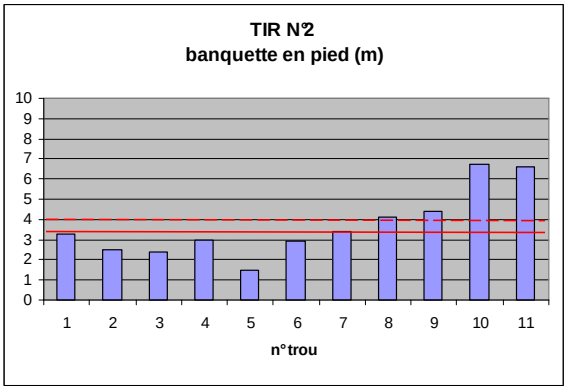
Vue de dessus du tir N°2

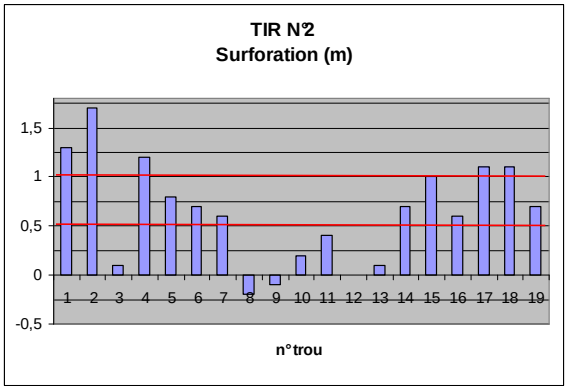


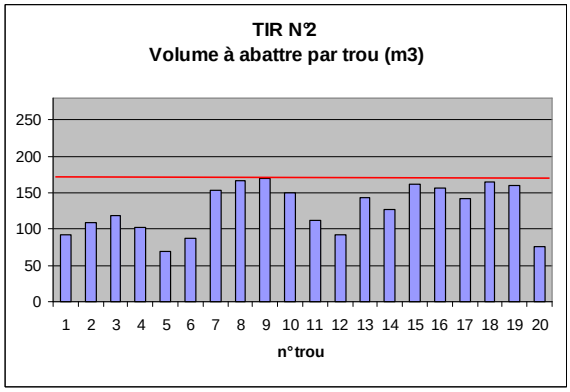
Vue de face du tir N°2

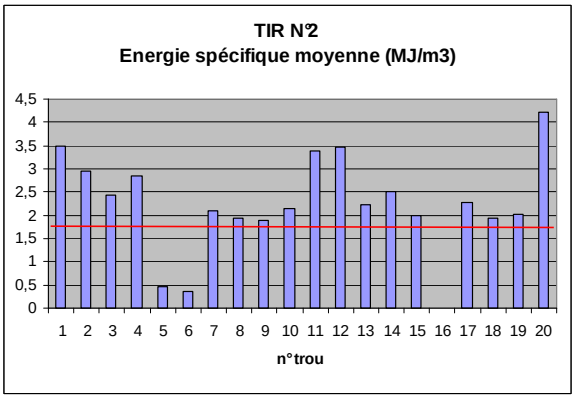

écart par rapport à la perpendiculaire au front (°)
30
25
20
15
10
5
0
-5
-10
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20
trou n°

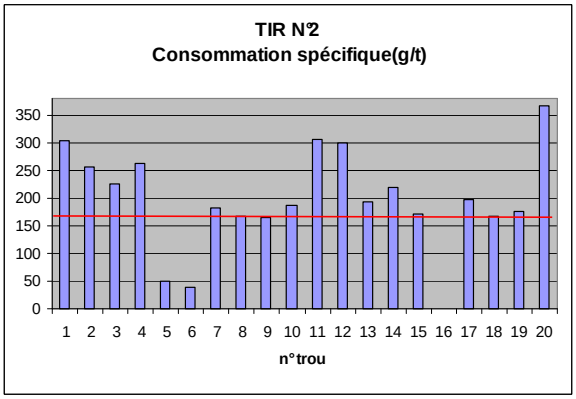

TIR N°2
Inclinaison forage (°)
15
13
11
9
7
5
3
1
-1
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20
n°trou


TIR N°2
banquette en pied (m)
10
9
8
7
6
5
4
3
2
1
0
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11
n°trou

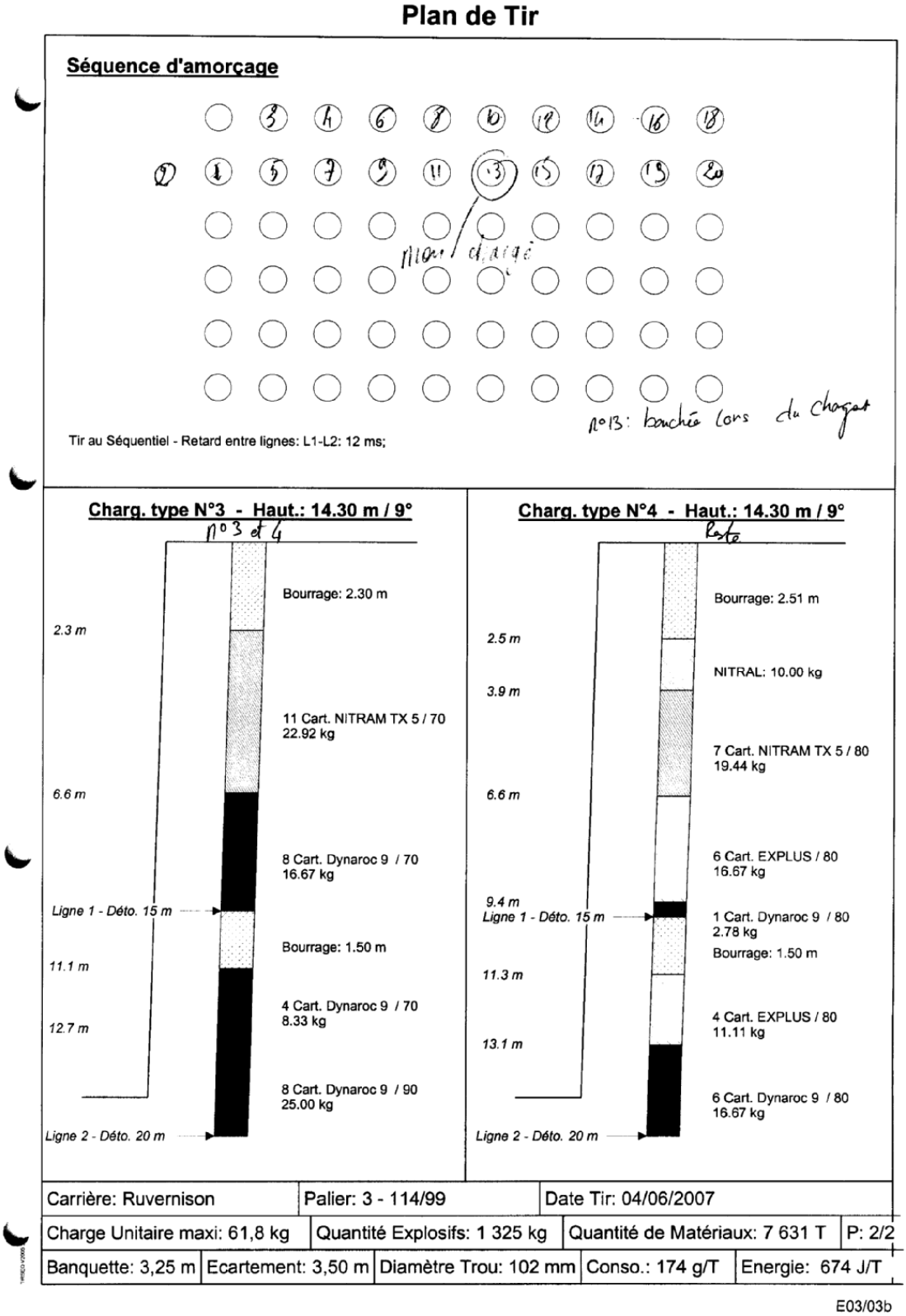

TIR N°2
Surforation (m)
1,5
1
0,5
0
-0,5
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19
n°trou


TIR N°2
Volume à abattre par trou (m3)
250
200
150
100
50
0
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20
n°trou


TIR N°2
Energie spécifique moyenne (MJ/m3)
4,5
4
3,5
3
2,5
2
1,5
1
0,5
0
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20
n°trou

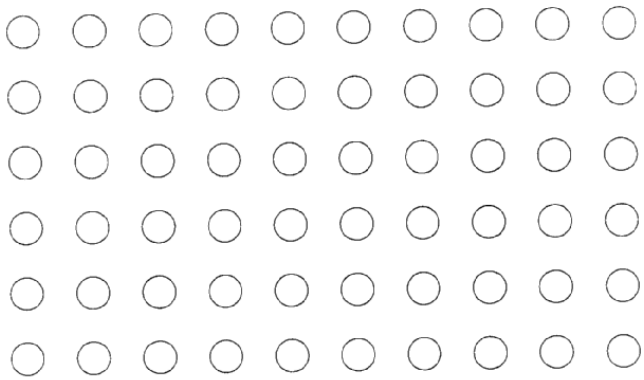

TIR N°2
Consommation spécifique(g/t)
350
300
250
200
150
100
50
0
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20
n°trou

Plan de chargement du tir N°2 :



Plan de Tir

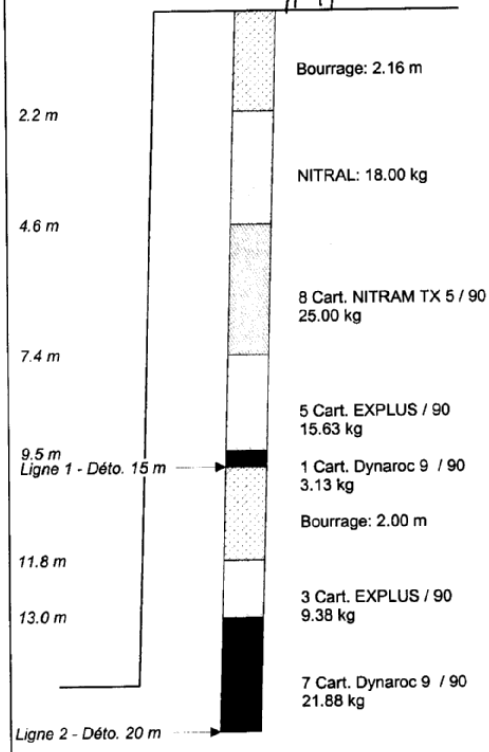
Séquence d'amorçage



Tir au Séquentiel - Retard entre lignes: L1-L2: 12 ms;

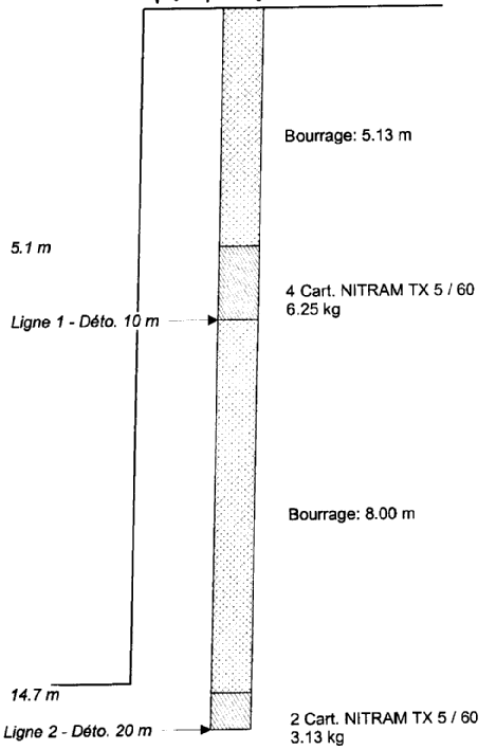
Charg. type N°1 - Haut.: 14.30 m / 9°

n°11



Charg. type N°2 - Haut.: 14.30 m / 9°

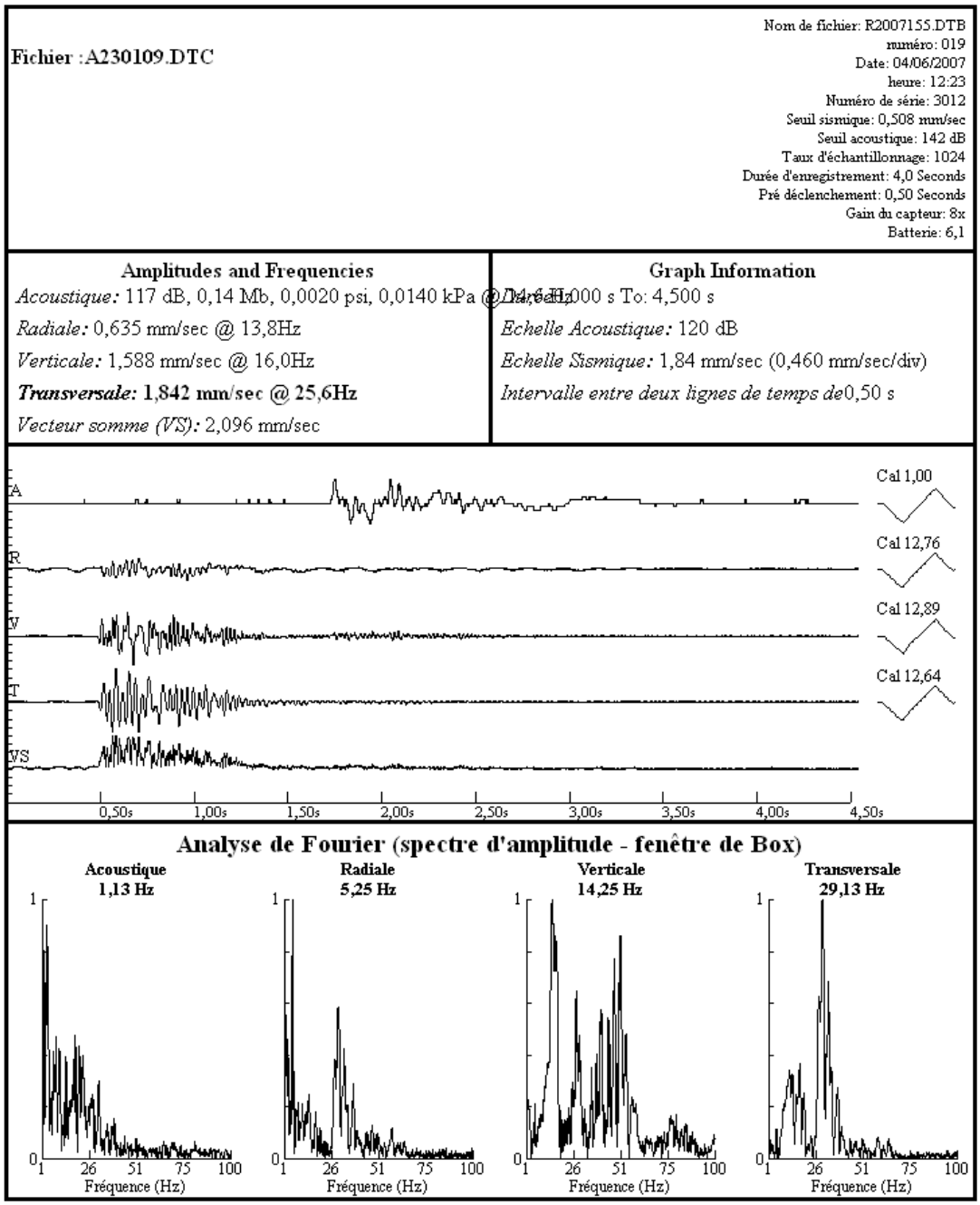
Trou n°5 et 6



Carrière: Ruvernison	Palier: 3 - 114/99	Date Tir: 04/06/2007	
Charge Unitaire maxi: 61,8 kg	Quantité Explosifs: 1 325 kg	Quantité de Matériaux: 7 631 T	P: 1/2
Banquette: 3,25 m	Ecartement: 3,50 m	Diamètre Trou: 102 mm	Conso.: 174 g/T	Energie: 674 J/T

E03/03b

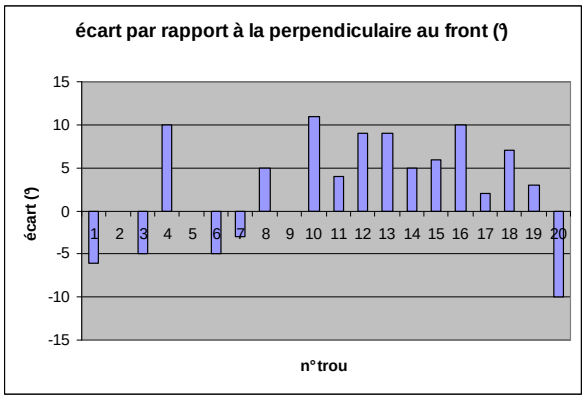
Enregistrement vibratoire du tir N°2 – 04/06/2007
Capteur Miniseis placé chez M. Querre, 430 m du tir

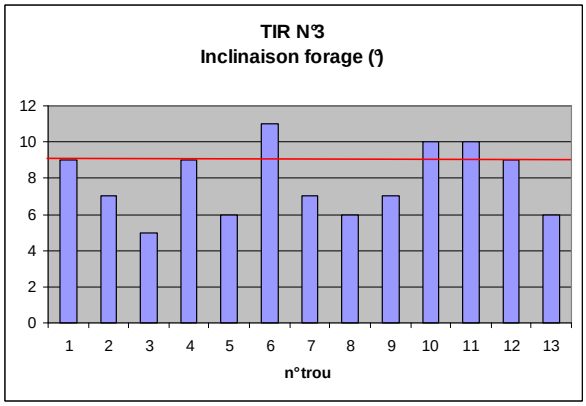


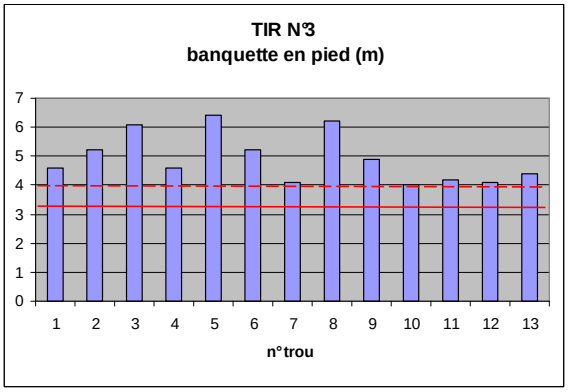
Amplitudes de fonctionnement du concasseur primaire :
Tir N°2

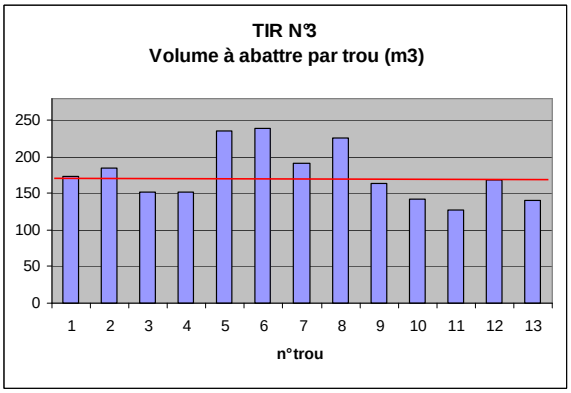
	Démarrage	arrêt	reprise	Arrêt	temps d'interruption	nb tours dumpers	production primaire
04/06/07	7:30	12:00	13:30	17:30	0:30	33	1260
05/06/07	8:00	13:30	15:00	17:30	0:30	45	1350
06/06/07	7:30	12:00	13:30	17:30	0:30	42	1260
12/06/07	7:30			17:00		69	2070
13/06/07	7:45			11:00		16	480
14/06/07	7:45			17:00	2:00	32	960
15/06/07	7:45			17:00	1:00	28	840
18/06/07	7:45			17:00	2:00	37	1110
19/06/07	7:45			17:00	1:30	37	1110

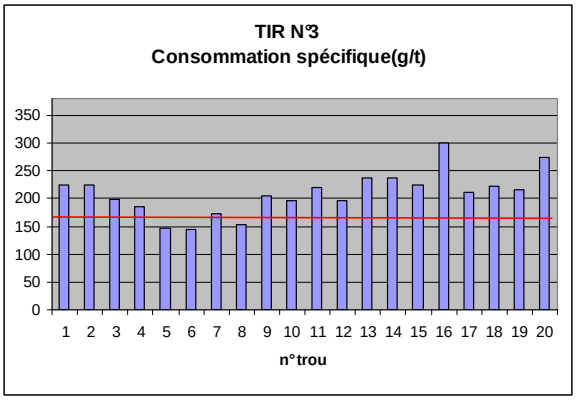
Données du tir N°3 :

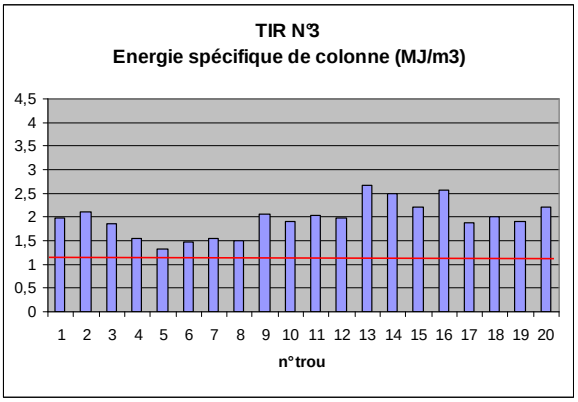


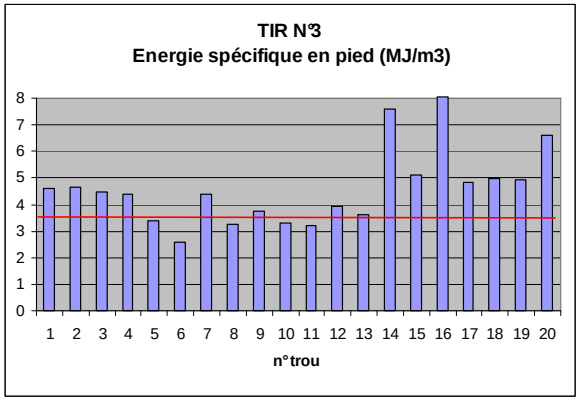


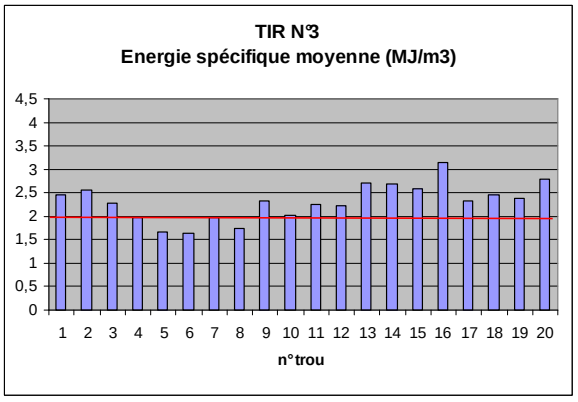




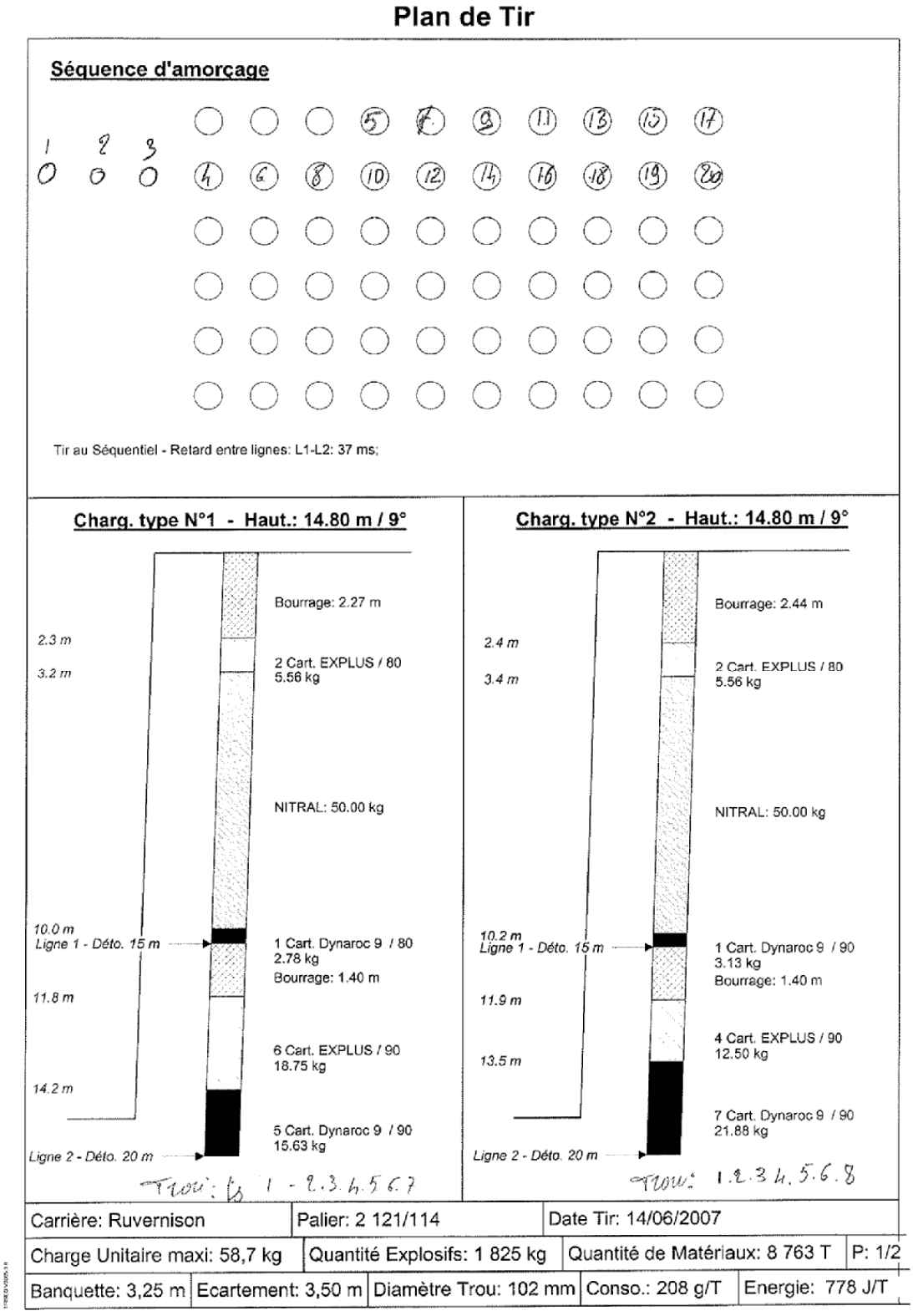






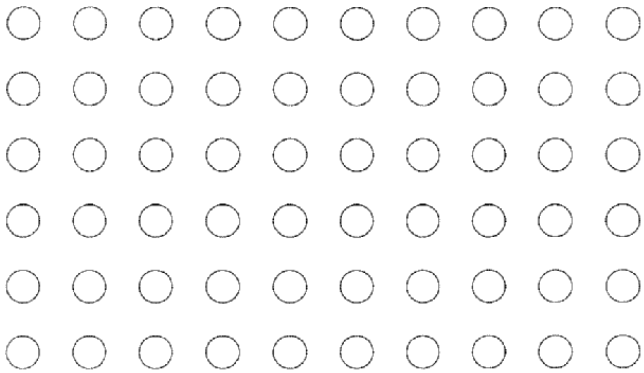


Plan de chargement du tir N°3 :



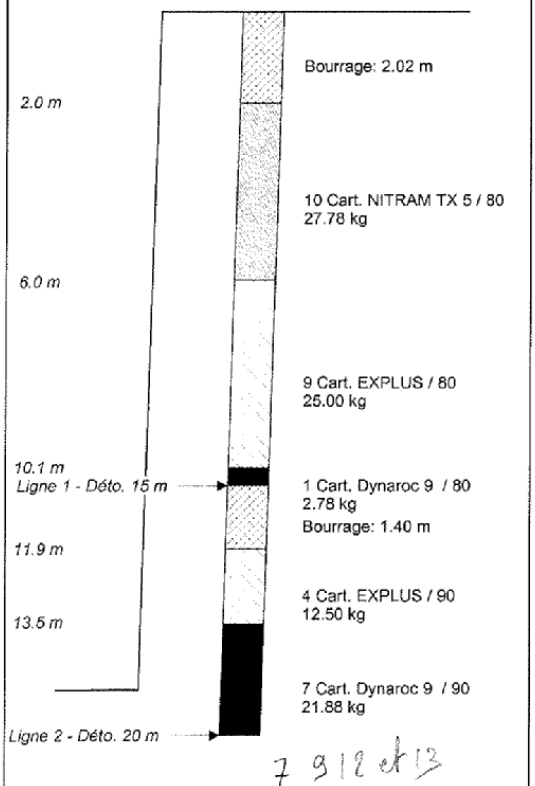
Plan de Tir

Séquence d'amorçage

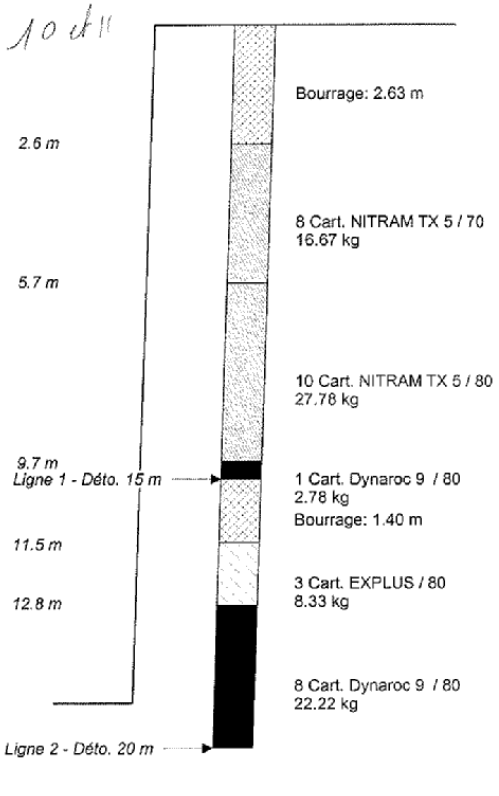


Tir au Séquentiel - Retard entre lignes: L1-L2: 37 ms;

Charg. type N°3 - Haut.: 14.80 m / 9°



Charg. type N°4 - Haut.: 14.80 m / 9°



Carrière: Ruvernison	Palier: 2 121/114	Date Tir: 14/06/2007	
Charge Unitaire maxi: 58,7 kg	Quantité Explosifs: 1 825 kg	Quantité de Matériaux: 8 763 T	P: 2/2
Banquette: 3,25 m	Ecartement: 3,50 m	Diamètre Trou: 102 mm	Conso.: 208 g/T	Energie: 778 J/T

E03/03b

Type de chargement en fonction du numéro de détonateur :

Numéro de détonateur	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Type de chargement	3	3	4	4	3	3	2	2	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	1	1

Séquence d'amorçage réalisée pour le tir N°3 :

CARRIERE DE RUVERNISON - TIR DU 14/6/2007

Instant d'amorçage étage supérieure

Rangée A

Instant	500	475	450	400	350	300	250	200	150	100	75	50	37
N° Déto	*20*	*19*	*18*	*16*	*14*	*12*	*10*	*8*	*6*	*4*	*3*	*2*	*0*
Ligne Raccordement	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2

Rangée B

Instant	425	375	325	275	225	175	125
N° Déto	*17*	*15*	*13*	*11*	*9*	*7*	*5*
Ligne Raccordement	1	1	1	1	1	1	1

FRONT

Instant d'amorçage étage inférieure

Rangée A

Instant	537	512	487	437	387	337	287	237	187	137	112	87	62
N° Déto	*20*	*19*	*18*	*16*	*14*	*12*	*10*	*8*	*6*	*4*	*3*	*2*	*1*
Ligne Raccordement	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2

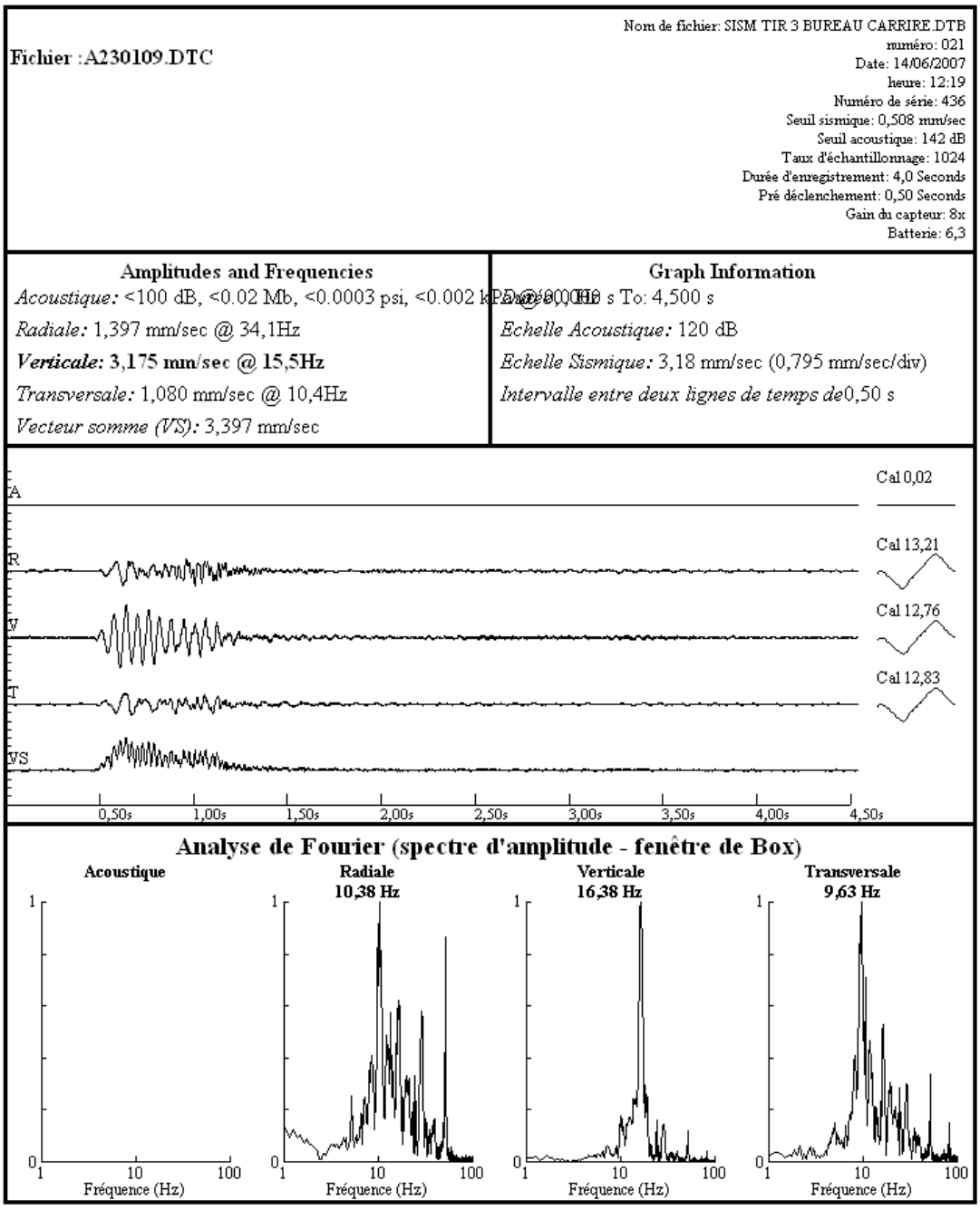
Rangée B

Instant	462	412	362	312	262	212	162
N° Déto	*17*	*15*	*13*	*11*	*9*	*7*	*5*
Ligne Raccordement	2	2	2	2	2	2	2

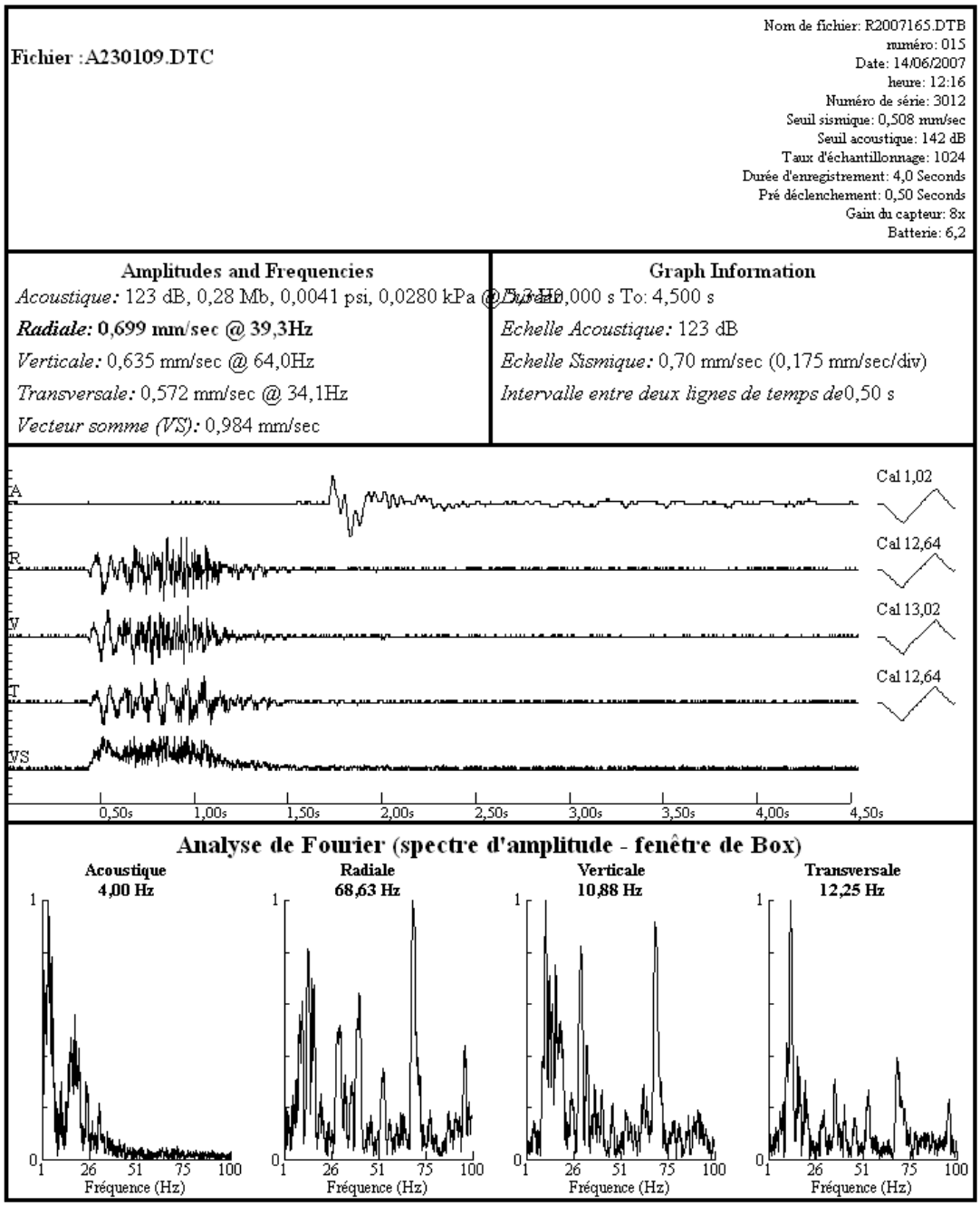
FRONT

Ecart Ligne 1-2: 37 ms

Enregistrement vibratoire du tir N°3 – 14/06/2007
Capteur Miniseis placé au bureau de la carrière, 320 m du tir



Enregistrement vibratoire du tir N°3 – 14/06/2007
Capteur Miniseis placé chez M. Querre, 450 m du tir



Amplitudes de fonctionnement du concasseur primaire pour le tir N°3

date		démarrage	arrêt	interruption	nombre de tours de dumper	tonnage repris (tonnes)
18-juin		8h	17h	#	63	2079
19-juin		7h45	17h	#	81	2673
20-juin		7h45	15h30	#	67	2211
21-juin		8h	18h30	#	77	2541
22-juin		8h	13h	#	30	990

Tableau 18

Sommaire

Résumé 2
Remerciements 3
Introduction 4
Généralités 6
1. Présentation de l'entreprise et ses carrières 6
Le Sullé 10
Tréglamus 10
La Croix Gibat 10
Mantallot 10
Ruvernison 10
2. Présentation du problème et du travail d'option 11
Partie 1 : 13
la carrière de Ruvernison 13
1. Contexte général 13
1.1. Situation 13
1.2. Exploitation 14
2. Caractérisation du massif rocheux 15
2.1. Caractérisation à petite échelle : caractérisation de la roche 15
2.1.1. Caractérisation de l'anisotropie 16
2.1.2. Effets de l'altération 16
2.1.3. Essais d'abrasivité 17
2.1.4. Résumé des caractéristiques mécaniques et des mesures physiques 17
2.2. Caractérisation à grande échelle : caractérisation du massif rocheux 18
2.2.1. Hétérogénéité du massif 18
2.2.2. Discontinuités du massif 18
2.2.2.1. Levés de discontinuités 18
2.2.2.2. Analyse des données. 20
2.2.2.3. Conclusions sur la fracturation du massif rocheux 23
Partie 2 : 25
Analyse des pratiques d'abattage 25
sur la carrière de Ruvernison 25
1. Objectifs du tir 25
2. Eléments théoriques sur l'opération d'abattage 25
2.1. Mécanisme de l'explosion 25
2.2. Abattage de la roche 26
3. Dimensionnement d'un schéma de tir 28
3.1. Choix de l'explosif 29
3.2. Choix du diamètre de foration 31
3.3. Calcul de la maille 31
3.3.1. Les règles de Langefors 31

3.3.2. Rapport espacement sur banquette E/B 34
3.3.3. Consommation spécifique et énergie spécifique 35
3.4. Comparaison des méthodes d'Hélary et des résultats théoriques de l'étude 36
4. Réalisation d'un tir dans la carrière de Ruvernison 38
4.1. Implantation, allure du front 38
4.1.1. Méthode actuelle d'implantation 38
4.1.2. Levés du front 39
4.1.3. Directions de travail 39
4.2. Foration 40
4.2.1. Mise en oeuvre de la foration 40
4.2.2. Equipements de la machine de foration 41
4.2.3. Mesure de la foration par Diadème 41
4.2.4. Possibles déviations de foration 42
4.3. Chargement et amorçage 44
4.3.1. Méthode de chargement 44
4.3.2. Méthode d'amorçage 44
4.3.3. Directions de travail 45
Partie 3 : 46
Mises en œuvre, analyses et résultats 46
1. Outils de mesure d'un tir 46
1.1. Mesures de l'allure de la foration 46
1.1.1. Mesures d'inclinaisons des trous 46
1.1.2. Calcul de la géométrie réelle des trous 47
1.1.2.1. Méthodes d'extrapolation 47
1.1.2.2. Comparaison de la méthode tangentielle et de la méthode du minimum de courbure 48
1.2. Systèmes de levés du front 51
1.2.1. Théodolite laser 51
1.2.2. Système Blast Metrix 52
1.2.3. Comparaison des systèmes de levés du front 53
1.3. Mesure des résultats des tirs 56
1.3.1. Evaluation granulométrique du tas abattu 56
1.3.1.1. Evaluation qualitative 57
1.3.1.2. Evaluation quantitative via l'outil FRAGSCAN 57
1.3.2. Effets arrières 61
1.3.3. Vibrations 61
1.3.3.1. Généralités 61
1.3.3.2. Acquisition de données vibratoires 62
1.3.3.3. Base de données disponibles 63
1.3.3.4. Prévision des vibrations générées par un tir 64
1.3.4. Vidéos 67
2. Les tirs mesurés 67
2.1. Le tir n°1 68
2.1.1. Généralités 68
2.1.2. Paramètres géométriques 69
2.1.3. Paramètres énergétiques 71
2.1.4. Premiers résultats 72

2.2. Le tir n°2 ... 73
2.2.1. Généralités, paramètres géométriques et énergétiques ... 73
2.2.2. Premiers résultats ... 73
2.3. Le tir n°3 ... 74
2.3.1. Généralités, paramètres géométriques initiaux ... 74
2.3.2. Suggestions et modifications ... 75
2.3.2.1. Surforation ... 75
2.3.2.2. Chargement et amorçage ... 75
2.3.3. Premiers résultats ... 76
2.4. Analyse comparative des résultats des trois tirs ... 76
2.5. Conclusion sur ces 3 tirs ... 78
Partie 4 : ... 80
Directions de travail ... 80
1. Gestion des tirs ... 80
1.1. Outils disponibles ... 80
1.2. Traçabilité des tirs ... 83
2. Méthodologie d'optimisation de l'abattage sur une carrière ... 84
Conclusion ... 86
Bibliographie ... 88
Annexes ... 89
Sommaire ... 112