

Utilisation des explosifs dans le génie civil

par **Alain BLANCHIER**

Ingénieur de l'École Centrale Lyonnaise

Docteur Ingénieur en Géotechnique

Ingénieur à la Société Explo-Tech

et **Anne Charline SAUVAGE**

Docteur en Géologie de l'École des Mines de Paris

Ingénieur à Explo-Tech

1. Généralités	C 5 420 - 2
1.1 Caractéristiques principales.....	— 2
1.1.1 Grandes familles.....	— 2
1.1.2 Fabrication sur site.....	— 4
1.1.3 Caractéristiques pratiques.....	— 4
1.2 Artifices de mise à feu et amorçage.....	— 4
1.2.1 Cordeaux détonants.....	— 4
1.2.2 Détonateurs pyrotechniques et électroniques.....	— 4
1.3 Fonctionnement.....	— 7
2. Conception des plans de tir	— 7
2.1 Technique générale de foration.....	— 8
2.2 Techniques d'amorçage.....	— 9
2.2.1 Mise en détonation de l'explosif.....	— 10
2.2.2 Transmission de l'ordre de détonation.....	— 10
2.2.3 Retards.....	— 11
2.2.4 Sécurité. Fiabilité.....	— 12
2.3 Technique particulière par type de chantier.....	— 12
2.3.1 Tirs en gradins.....	— 12
2.3.2 Tirs de masse.....	— 14
2.3.3 Tirs de tranchées.....	— 14
2.3.4 Tirs souterrains.....	— 15
2.3.5 Tirs de découpage.....	— 17
2.3.6 Tirs sous l'eau.....	— 18
2.3.7 Tirs de démolition.....	— 18
2.3.8 Tirs spéciaux.....	— 19
3. Problèmes de sécurité de l'environnement	— 20
3.1 Réglementation.....	— 20
3.1.1 Acquisition.....	— 20
3.1.2 Transport en circulation.....	— 20
3.1.3 Stockage.....	— 20
3.1.4 Utilisation.....	— 20
3.1.5 Sécurité.....	— 20
3.2 Nuisances.....	— 21
4. Aspect économique	— 22
Pour en savoir plus	Doc. C 5 420

Le fonctionnement d'un produit explosif est une **réaction chimique déclenchée par une « mise à feu »**, tributaire des conditions dans laquelle elle se produit. Une part importante du travail de mise en œuvre consiste à adapter les produits (et leurs limites de fonctionnement) aux prévisions des conditions de l'utilisation : choix de l'amorçage, détermination d'une quantité suffisante d'énergie explosive, définition de la nature et de l'état des matériaux. Que ce soit en démolition ou en déroctage, la réussite d'un tir (efficacité et sécurité) est liée aux **interactions du couple « produits explosifs-matériaux »**.

Le terme « produits explosifs » recouvre l'ensemble des produits et des dispositifs d'amorçage. Un explosif est une substance ou un mélange de substances qui se décompose en entraînant la libération brutale d'une grande quantité d'énergie pendant un temps très court. Le mode de décomposition est fonction de la nature du produit, mais aussi de la nature et de la puissance de l'amorçage de la réaction. Un produit peut avoir plusieurs modes de décomposition (combustion, déflagration, détonation) et, dans certaines conditions, il peut passer d'un mode à l'autre.

La **détonation** est le régime de décomposition le plus rapide : elle génère une très haute température, une onde de choc et le dégagement d'un important volume de gaz, c'est-à-dire les effets mécaniques les plus importants sur le milieu environnant. L'énergie totale de l'explosif, l'énergie de choc et l'énergie de gaz dégagées, ainsi que la vitesse de détonation constituent donc des paramètres théoriques caractéristiques des différents explosifs. Leurs variations constituent les éléments discriminants des gammes de produits explosifs.

1. Généralités

1.1 Caractéristiques principales

1.1.1 Grandes familles

Six grands types d'explosifs sont disponibles sur le marché français. Ceux-ci sont présentés dans l'ordre chronologique de leur apparition en France et leur composition est donnée succinctement dans le tableau 1. Certains produits sont encartouchés, d'autres sont distribués en vrac, soit conditionnés en sacs en usine, soit fabriqués sur site dans des unités de fabrication mobile UMF. Dans ce dernier cas, la préparation s'effectue à bord d'un camion, amené sur la plate-forme de tir, assurant en continu la fabrication de l'explosif et son chargement dans le trou de mine.

■ **Les dynamites** contiennent de 10 à 90 % de nitroglycéroglycol (NGL), mélange de nitroglycérine et de dinitroglycol. C'est la proportion de dinitroglycol qui assure la qualité antigel d'une dynamite. Les autres composants sont des combustibles (tourbe, farine de bois, aluminium, etc.) et des comburants (nitrate d'ammonium). Selon le taux de nitroglycéroglycol, on distingue :

- les **dynamites plastiques** ou **dynamites gommées**, contenant plus de 20 % en masse de NGL gélatinisé par du coton azotique ;
- les **dynamites pulvérulentes**, contenant moins de 10 à 20 % de NGL et qui se présentent sous forme de matière pulvérulente ; ces dernières tendent à disparaître du marché français.

Les dynamites sont commercialisées en cartouches de diamètres compris entre 25 et 90 mm en standard disponible. Leur masse varie entre 50 g et 5 kg. Les étuis sont généralement en papier pour les petits diamètres et en matière plastique pour les autres diamètres.

■ **Les explosifs nitrates** sont à base de nitrate d'ammonium (80 % environ en masse) et d'un explosif pur (trinitrotoluène seul ou mélangé avec de la pentrite). Ils sont présentés sous la même forme que les dynamites. Ils ont pratiquement disparu du marché français.

■ **Les nitrates-fiouls** sont constitués de nitrate d'ammonium et d'huiles minérales, en général du fioul domestique, dans une proportion voisine de 94 % de nitrate d'ammonium, 6 % de fioul par exemple.

La qualité du nitrate, et en particulier sa porosité, joue un rôle important sur les performances du nitrate-fioul. Dans certains cas, les nitrates-fiouls peuvent contenir de la poudre d'aluminium, ce qui les rend plus énergétiques. Ils sont conditionnés, uniquement en vrac, en sacs de papier multicouches de 25 kg.

■ **Les gels ou les bouillies** sont constitués d'un mélange de sels « comburants », généralement des nitrates minéraux dissous dans l'eau, et d'une phase combustible parfois soluble dans l'eau (sucre – glycol – aluminium).

L'ensemble est épaissi par un agent gélifiant qui donne au produit l'aspect voulu (bouillie fluide pompable en vrac, ou explosifs pâteux en cartouches) et maintient les produits non solubles en suspension. Les mélanges sont rendus réellement explosifs par la présence d'un agent sensibilisant. Ces produits, en voie de disparition, sont remplacés par les émulsions.

■ **Les émulsions** sont des mélanges intimes de nitrates minéraux en solution aqueuse dispersés en gouttelettes très fines (de taille inférieure au micromètre) dans une phase combustible liquide. Ces émulsions sont sensibilisées par la présence de bulles gazeuses bien dispersées ; ces bulles peuvent être produites par un agent chimique ou introduites sous forme de microbilles creuses.

Ces produits peuvent être encartouchés en usine. Ils peuvent être également fabriqués en vrac, sur site, à l'aide d'unités mobiles de fabrications ou UMF.

Tableau 1 – Composition type des principaux explosifs industriels

Types d'explosifs		Composition type	Pourcentage
Dynamites	plastiques ou gommes	Nitroglycéroglycol	20 à 90
		Nitrate d'ammonium	10 à 60
		Coton azotique	1 à 5
		Farine de bois	2 à 6
		Dinitrotoluène	0 à 7
		Aluminium	0 à 8
	pulvérulentes	Nitroglycéroglycol	10 à 15
		Nitrate d'ammonium	30 à 80
		Coton azotique	≈ 1
		Farine de bois	2 à 10
		Sel	0 à 50
		Tourbe	0 à 5
Explosifs nitratés		Trinitrotoluène	10 à 15
		Nitrate d'ammonium	65 à 85
		Farine de bois	0 à 5
		Stéarate de calcium	≈ 1
		Sel	0 à 20
Nitrates-fiouls	ordinaires	Nitrate d'ammonium	≈ 94
		Fioul	≈ 6
	à l'aluminium	Nitrate d'ammonium	88 à 92
		Fioul	3 à 5
		Aluminium	5 à 10
Bouillies. Gels		Eau	8 à 15
		Nitrate d'ammonium, de sodium ou de calcium	35 à 60
		Sensibilisant (explosif aluminium, nitrate de monométhylamine, billes de verre)	5 à 40
		Divers (gélifiant, allégeant, réticulant, mouillant, fioul)	2 à 5
Émulsions. Nitrates-fiouls alourdis		Eau	8 à 15
		Nitrates minéraux	70 à 80
		Huiles diverses	4 à 10
		Sensibilisant (chimique ou billes de verre)	0,2 à 5

Les émulsions de base présentent une énergie voisine de celle du nitrate fioul. L'adjonction d'aluminium et la diminution du taux d'eau permettent d'atteindre des énergies importantes comparables voire supérieures à celles des dynamites standards.

Des grains de nitrate d'ammonium peuvent être ajoutés au produit en faible proportion (< 20 %) en particulier dans le cas de fabrications sur site.

Les émulsions sont les produits les plus récents, qui permettent de couvrir toute la gamme usuelle des produits encartouchés du marché.

■ Les **nitrates-fiouls alourdis** sont les explosifs de la génération la plus récente. Ils sont constitués par du nitrate-fioul (25 à 75 %) enrobé dans une matrice d'explosif d'émulsion (25 à 75 %), dont le rôle est d'améliorer les performances et la résistance à l'eau du nitrate-fioul.

Les nitrates-fiouls alourdis sont surtout utilisés en vrac. Ils se présentent sous la forme :

– de produits granulaires plus ou moins collants lorsque la proportion de nitrate-fioul est supérieure à 40 % ; dans ce cas, leur chargement en vrac s'effectue par gravité ;

– de pâtes plus ou moins visqueuses contenant des granulés épars de nitrate-fioul lorsque la proportion de nitrate-fioul est inférieure à 40 % ; dans ce cas, leur chargement en vrac s'effectue par pompage.

Ces produits, généralement assimilés à la catégorie des émulsions, sont préparés sur les lieux d'utilisation à partir des constituants de base : nitrate d'ammonium, fioul domestique, émulsion, et éventuellement sensibilisant.

■ La présentation des explosifs, pour être complète, doit mentionner trois **explosifs spéciaux** particulièrement utilisés sur les chantiers de travaux publics :

– une émulsion allégée présentée sous forme de chapelet de cartouches de diamètre 25 mm (en boudins, avec cordeau latéral) comme la **Cisalite** ; elle est utilisée pour les travaux de découpage ou de prédécoupage ;



Figure 1 – Unité de fabrication mobile d'explosifs

– le **Cisalex**, explosif nitraté allégé présenté sous forme de cartouches rigides diamètre 13 ou 17 mm emboîtables avec centreurs et espaceurs ; cet explosif est utile pour les travaux de découpage en galerie et la démolition ;

– les **bousteurs**, comme le *Boostex 65*, relais d'amorçage de 350 g en explosif coulé dont le pouvoir d'amorçage et la facilité d'emploi sont appréciés dans les travaux de minage.

1.1.2 Fabrication sur site

La fabrication sur site (figure 1) consiste à mélanger sur le lieu du tir les différents ingrédients nécessaires à la composition du produit explosif.

Le mélange et le chargement est réalisé par vis horizontale pour les produits granulaires (nitrate fioul, nitrate fioul alourdi). Pour les produits liquides et semi-liquides (émulsions), le mélange est réalisé par un mélangeur statique ou dynamique et le chargement par pompage.

Ces deux processus de fabrication et chargement peuvent être installés sur la même unité et utilisés successivement.

Ces équipements ont l'avantage d'être adaptés aux nécessités et objectifs des opérations à réaliser. Par exemple, la capacité de fabrication d'une UMF de souterrain est inférieure à celle d'une UMF utilisée sur les chantiers publics.

1.1.3 Caractéristiques pratiques

Les performances des explosifs sont regroupées dans les tableaux 2 et 3 de présentation de chaque catégorie d'explosif. La signification de chaque caractéristique peut être résumée succinctement ainsi :

– les résultats du tir au mortier balistique TMB, test ancien fournissant une indication approximative de l'énergie, ne sont pas significatifs pour les explosifs récents ; par ailleurs, les résultats sont fluctuants (des valeurs moyennes sont données dans les tableaux 2 et 3) ;

– l'énergie théorique massique de détonation est issue d'un calcul thermodynamique de l'énergie théorique dégagée lors de l'explosion ; elle surestime les explosifs qui contiennent de l'aluminium, la réaction de ce dernier n'étant pas totale ;

– l'énergie massique mesurée provient d'un test d'explosion réalisé sous l'eau dans une piscine ; ce dernier fournit une estimation convenable de l'énergie réelle disponible d'un explosif, prenant en compte son rendement ;

– la mesure de la vitesse de détonation, assez précise, est effectuée sur des échantillons non confinés de diamètre 30 mm pour les explosifs encartouchés, et sur des échantillons de diamètre 36 mm confinés dans un tube d'acier ; il faut signaler que la vitesse de détonation augmente avec le diamètre pour la plupart des explosifs (de 10 à 50 % dans le cas extrême) ;

– le coefficient de self-excitation CSE émane d'un test de mesure de la distance moyenne de transmission de la détonation entre de petites cartouches de diamètre 30 mm à travers un vide d'air ;

– la résistance à l'eau est un critère fondamental dans le choix de l'explosif ; la présence d'eau dans les trous de mines réduit la sensibilité et l'énergie réelle des explosifs et, dans les cas extrêmes, entraîne des ratés des explosifs.

Les caractéristiques précédentes sont soit déterminées par le laboratoire officiel de la Commission des substances explosives, soit extraites de fiches commerciales, soit issues de tests spécifiques réalisés par certains laboratoires de fabricant. Dans les tableaux 2 et 3, les explosifs sont classés dans l'ordre : catégorie, fabricant et énergie croissante. En l'absence de valeur précise, nous avons dû, dans de nombreux cas, indiquer la fourchette de performances pour chaque catégorie d'explosif. Toutefois, cette information est suffisante pour permettre à l'utilisateur d'effectuer un choix.

1.2 Artifices de mise à feu et amorçage

Les accessoires du tir sont fondamentaux dans la réussite d'un tir puisque ce sont eux qui apportent l'énergie au démarrage de la réaction chimique des produits explosifs.

1.2.1 Cordeaux détonants

Les cordeaux détonants sont destinés à l'amorçage latéral, tout le long du trou de mine, des explosifs. Ils sont commercialisés aujourd'hui sous 4 formes :

– cordeau à 6,5 g/m de pentrite, uniquement pour l'amorçage de dynamites et pour le raccord entre trous de détonateurs non électriques (à la place de raccords *GT* instantanés) ;

– cordeau à 10 g/m de pentrite, recommandé pour l'amorçage des explosifs nitrates, des gels et des dynamites, et parfois des nitrates-fiouls les plus sensibles ;

– cordeau à 20 g/m de pentrite, recommandé pour l'amorçage des gels et émulsions et de la plupart des nitrates-fiouls ;

– cordeaux à 40 g/m et 70 g/m de pentrite, surtout destinés aux travaux de découpage en travaux publics.

1.2.2 Détonateurs pyrotechniques et électroniques

Les détonateurs initient une détonation dans les explosifs contigus à l'aide d'une charge amorçante de **0,6 g de pentrite**, elle-même activée par un explosif primaire très sensible (capable de passer d'une combustion ordinaire à une détonation).

Les détonateurs permettent d'effectuer un amorçage ponctuel des explosifs ; ceux-ci pourront être mis en fond de trou de chantiers souterrains ou dans certains chantiers à ciel ouvert. L'amorçage ponctuel permet d'obtenir généralement un meilleur rendement des explosifs.

■ Détonateurs pyrotechniques

Tous les détonateurs comportent une poudre retardatrice, dont la durée de combustion s'échelonne :

– pour les courts retards, de 0 à 2 000 ms par pas de :

- 25 ms pour les détonateurs n^{os} 1 à 20,
- 100 ms pour les détonateurs n^{os} 24 à 40,
- 200 ms pour les détonateurs n^{os} 48 à 80 ;

– pour les détonateurs à retard, par pas de 500 ms du n^o 1 au n^o 12.

Tableau 2 – Performance des explosifs encartouchés

Type d'explosifs (1)	Masse volumique (g/cm ³)	Énergie mesurée (MJ/kg)	Vitesse de détonation (m/s)	TMB (2)	Énergie calculée (MJ/kg)	CSE (3) (cm)	Résistance à l'eau	
Dynamites								
NEF	<i>Eurodyn 2000</i> <i>F16</i> <i>F19</i>	≈ 1,45	4 à 4,6	3 000 à 6 300	126 à 133	4,65 à 5	8 à 10	excellente
NB	<i>Dynaroc 5</i>							
Tit	<i>Titadyn 25</i> <i>Titadyn 30</i> <i>Titadyn 50</i>							
Excia	<i>Goma 2E-C</i>							
Nitrates								
NEF	<i>Sécurex 80</i> <i>Sécurex 90</i>	≈ 1,1	3,5 à 4,3	4 700 à 4 800		2 à 5	faible à nulle	
Gels								
Excia	<i>Riogel 2</i>	1,20	NC	NC	NC	NC	excellente	
Émulsions								
NEF	<i>Iremite 1000</i> <i>Iremite 2500</i> <i>Iremite 4000</i> <i>Emulstar 5000</i> <i>Emulstar 8000</i>	≈ 1,20 à 1,30	3 à 5	4 800 à 5 700		2 à 5	excellente	
NB	<i>Nitram 5</i> <i>Nitram 9</i>							
Tit	<i>Titamax 4000</i> <i>Titamax 5000</i>							
Orica	<i>Powergel E 80</i> <i>Powergel E 700</i> <i>Powergel E 800</i>							
Excia	<i>Riomex E 20</i>							
(1) NEF Nobel Explosif France NB Nitro Bickford Tit Titanite (2) TMB tir au mortier balistique (cf. § 1.1.3) (3) CSE coefficient de self-excitation (cf. § 1.1.3) NC non communiqué								

■ Détonateurs électriques

L'énergie thermique nécessaire pour leur initiation est fournie par une perle d'allumage échauffée par un courant électrique (figure 2 a).

Les appareils conçus pour alimenter électriquement les circuits de tir sont des explosifs. Ils sont, aujourd'hui, tous à condensateurs. Pour multiplier les possibilités de « départ » des trous, ou séries de trous de mines, des explosifs « séquentiels » sont disponibles. Ils

sont particulièrement utilisés dans les grands chantiers et la démolition. Citons :

– l'explosif *BM-20F-10-ST* qui permet de disposer de 10 délais de départ réglables de 1 à 199 ms. Le « pas » est alors fixé entre chaque séquence ;

– l'explosif *BM-20F-10-PT* qui permet de disposer de 10 délais de départ réglables de 1 à 999 ms. Le pas est, de plus, réglable, donc variable entre chaque séquence.

Tableau 3 – Performance des explosifs en vrac

Type d'explosifs (1)		Masse volumique (g/cm ³)	Énergie mesurée (MJ/kg)	Vitesse de détonation (m/s)	TMB (2)	Énergie calculée (MJ/kg)	CSE (3) (cm)	Résistance à l'eau
Nitrate fioul								
NEF	<i>D7 fioul</i>	≈ 0,8	≈ 2,7	2 500 à 3 200	95 à 115	3,85	0	nulle
	<i>NR20</i>							
NB	<i>Nitro D8</i>							
Tit	<i>Anfotite T</i>							
	<i>Ferrolite</i>							
Excia	<i>Nagolita</i>							
Nitrate fioul aluminisé								
NEF	<i>N135</i>	≈ 0,95	3,4	3 400	120	≈ 4,7	0	nulle
NB	<i>Nitral</i>							
Tit	<i>Anfotite 3</i>							
Émulsions déversables								
NEF	<i>Gemulsite 60</i>	≈ 0,95 à 1,15	3 à 3,5	3 400 à 5 000			0	faible à nulle
NB	<i>Blendex 30</i>							
Orica	<i>Emultex 200</i>							
	<i>Emultex 300</i>							
Émulsions pompables								
NEF	<i>Gemulsite 80</i>	≈ 1,25	2,6 à 3,5	4 700 à 5 300			0 à 3,5	excellente
	<i>Gemulsite 100</i>							
NB	<i>Blendex 70 A</i>							
Orica	<i>Emultex 100</i>							
	<i>Power gel Gold 750</i>							
(1) NEF Nobel Explosif France NB Nitro Bickford Tit Titanite (2) TMB tir au mortier balistique (cf. § 1.1.3) (3) CSE coefficient de self-excitation (cf. § 1.1.3)								

■ Détonateurs non électriques

L'énergie thermique nécessaire pour leur initiation est fournie par la détonation d'un explosif confiné dans un guide d'onde de choc.

Le système d'amorçage non électrique est composé :

- d'un détonateur pyrotechnique à retard ou microretard ;
- et d'un tube en matière plastique souple, contenant une pellicule de produit explosif (tube conducteur d'onde de choc TCOC).

Les détonateurs non électriques peuvent être reliés entre les trous par des **raccords de surface** (dits raccords GT), dont les retards actuels sont de 25 ou 50 ms et vont passer à 17 ; 25 ou 42 ms. De tels retards de surface peuvent permettre alors de mettre en place un seul détonateur non électrique en fond de trou, par exemple 500 ms.

Dans tous les schémas de tirs, il y a lieu de tenir compte de la durée de transmission du signal dans le tube qui se transmet à une vitesse de 2 000 m/s.

Un système non électrique dual est apparu plus récemment, constitué :

- d'un tube en matière plastique souple, contenant une pellicule de produit explosif (TCOC) ;

– ayant à une extrémité, un détonateur pyrotechnique à retard ou micro-retard ;

– et à l'autre extrémité, un raccord (un crochet distributeur contenant un détonateur pyrotechnique à microretard, et pouvant recevoir jusqu'à 6 tubes non électriques.

■ Détonateurs électroniques

Les détonateurs électroniques (figure 2 b) diffèrent essentiellement des détonateurs pyrotechniques par le retard qui est généré et contrôlé par un circuit électronique.

En pratique, chaque détonateur comporte, outre le générateur de retard, un condensateur qui permet d'initier l'élément amorçant identique à celui d'un détonateur électrique instantané.

Le composant électronique contenu dans ce type de détonateurs permet une communication bidirectionnelle dans la plupart des cas avec la console de tir. Ce dialogue permet de contrôler :

- la reconnaissance de la console de tir ;
- la présence d'un ou de plusieurs détonateurs ;
- les éléments fonctionnels du dispositif ;
- les retards ;
- le déclenchement du ou des détonateurs.

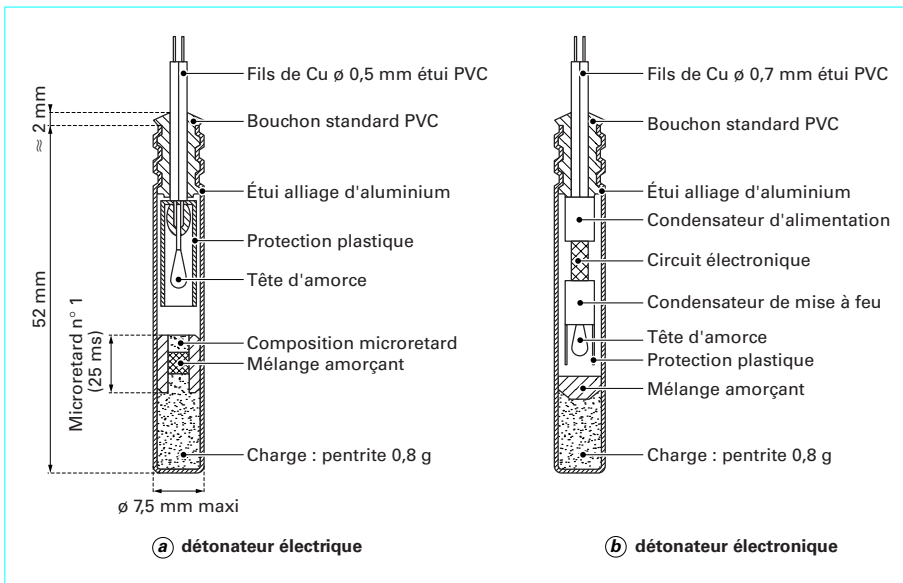


Figure 2 – Détonateurs

Alimentés en basse tension et connectés en parallèle à une ligne bus, les détonateurs électroniques sont très peu sensibles aux courants électriques vagabonds. Ils demeurent toutefois sensibles aux courants électromagnétiques susceptibles de perturber la communication avec la console de tir.

1.3 Fonctionnement

L'action de l'explosif se caractérise par la succession, voire la superposition, de plusieurs phénomènes (figure 3). Lors de la détonation, une **onde de choc** (onde de contrainte) se développe dans l'explosif et se propage, associée à la production d'une très grande quantité de **gaz** à très hautes température et pression.

■ Le transfert de l'**énergie de choc** de l'explosif vers le milieu connexe est d'autant plus efficace que le matériau est peu déformable (module d'Young ou vitesse de propagation des ondes sismiques élevés). L'onde émise est, pour l'essentielle, une onde de compression radiale à la source (cas d'une onde sphérique correspondant à une source ponctuelle). Cette onde directe peut excéder la résistance mécanique du matériau, notamment au niveau de zones de moindre résistance (points d'initiation des fissures). L'onde de compression s'accompagne d'une onde transversale en traction : la résistance en traction des matériaux étant très inférieure à celle en compression, l'onde transversale crée une fissuration radiale souvent importante. Lorsque l'onde de compression directe rencontre une surface de réflexion, par exemple une interface roche-air, elle se réfléchit en une onde de traction. Cette dernière peut également créer une fissuration si la contrainte est suffisante. L'ensemble des discontinuités du matériau réfléchissent partiellement l'onde et accroissent son absorption, donc limitent l'efficacité de cette « préfracturation ». La répartition de la fracturation par onde de choc est alors modifiée, localisée entre la charge et les discontinuités « barrières ».

La fracturation générée par les ondes de choc correspond principalement à une rupture du matériau, créant des fissures d'extension limitée, non connectées, sans déplacement. Elle est donc généralement très insuffisante pour rompre totalement les matériaux, mais elle est fondamentale dans les matériaux peu fracturés.

■ Lorsque l'explosif est confiné au moment de la détonation, les gaz produits par la réaction à très haute température créent des gradients de pression considérables au sein du milieu connexe, qui développent des contraintes suffisamment importantes pour continuer la fissuration. La fracturation de l'ensemble des matériaux est d'autant plus efficace que l'**énergie de gaz** est importante, entraînant par la suite leur déplacement.

■ Dans un **massif rocheux**, toutes les **discontinuités internes** vont donc jouer un rôle dans le fonctionnement des produits explosifs, de sorte que l'effet réel des explosifs corresponde aux interactions entre un massif donné et les produits mis en œuvre. Si les caractéristiques de la roche, comme sa texture, sa densité ou le type de sa porosité, impliquent un comportement mécanique particulier, les discontinuités du massif rocheux ont un rôle primordial dans le couple « massif-explosifs » : les structures sédimentaires, les altérations chimiques plus ou moins développées, les fractures, leur remplissage variable, leur orientation et leur pendage par rapport au tir sont susceptibles d'avoir des influences très contrastées sur le fonctionnement des tirs.

2. Conception des plans de tir

La conception d'un plan de tir, correspond à la définition de la géométrie de foration, du chargement des mines et des dates d'initiation. Fondamentalement, elle consiste à assurer :

- ① **le fonctionnement normal des charges** pour leur offrir une surface libre et un volume de dégagement adaptés : il s'agit de la maîtrise du fonctionnement du tir, mine par mine : à ce principe correspondent des règles dites d'efficacité. Les processus de fragmentation (propagation des ondes de chocs et des gaz) et de déplacement de la roche (gonflement du massif) doivent avoir le temps de se réaliser ;
- ② **le fonctionnement correct des produits** en évitant les problèmes de désensibilisation de l'explosif (incapacité à s'amorcer) ;
- ③ **la sécurité de fonctionnement de la totalité du tir** : le fonctionnement théorique des produits explosifs et de chaque charge, dans les conditions d'amorçage données, ne garantit pas le fonctionnement de la totalité du tir mis en œuvre. D'autres facteurs peuvent être à l'origine d'anomalies ou de dysfonctionnements graves

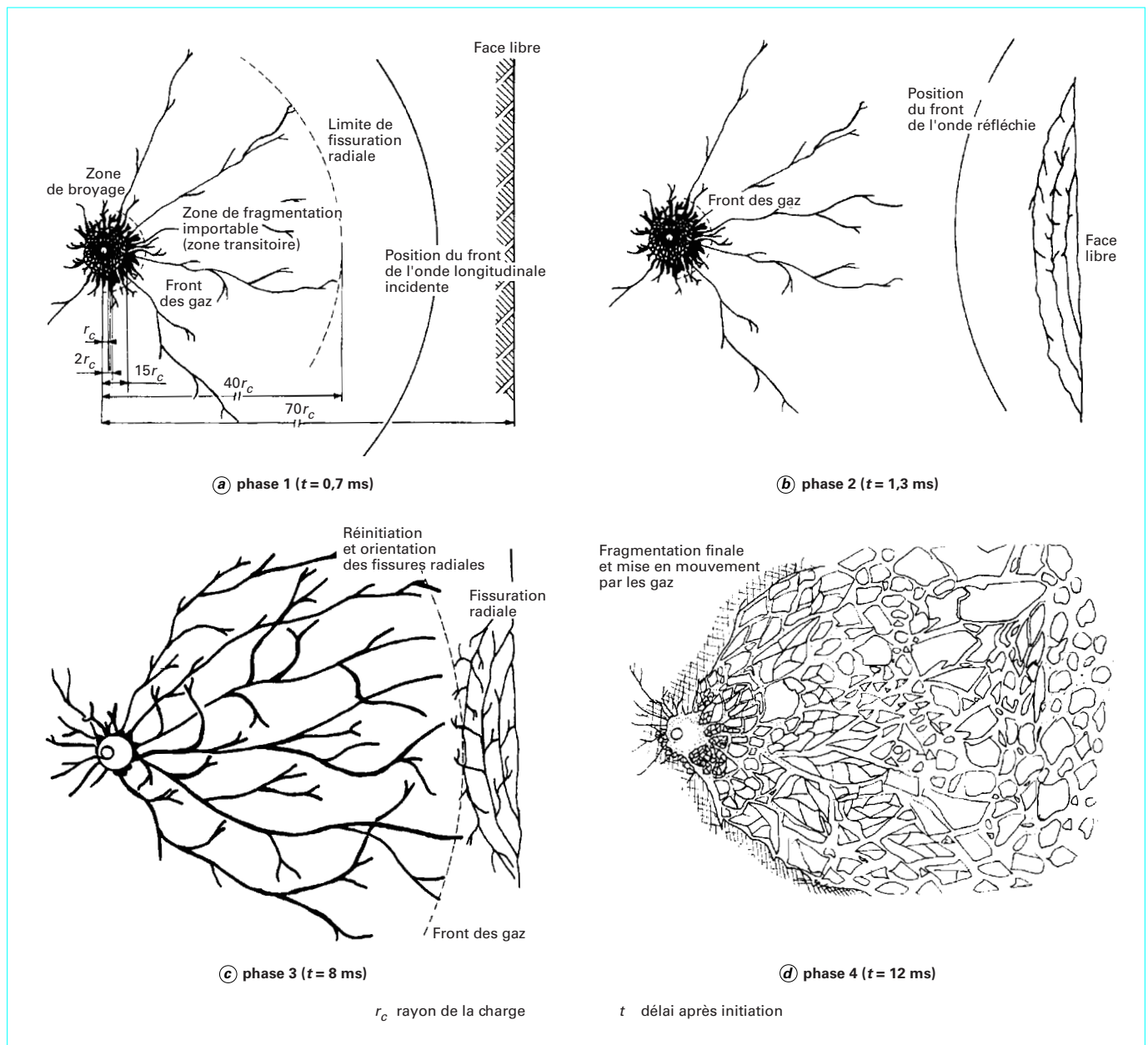


Figure 3 – Action de l'explosif dans un massif rocheux

des tirs. Ces risques sont plus difficiles à appréhender et correspondent en général à des arrachements de charges, des projections, ou la coupure du réseau d'amorçage de surface avant l'initiation de tout le tir.

À ces trois principes fondamentaux s'ajoute désormais fréquemment la gestion des impacts sur l'environnement : il faut notamment **minimiser les vibrations et la surpression aérienne** ④. Pour des raisons de productivité, les chantiers de travaux publics ou les carrières sont amenés à mettre en place des tirs comportant de nombreuses rangées. Le respect des règles de fonctionnement des charges et des tirs et le contrôle des effets dans l'environnement impose une adaptation des plans de tir.

En plus du bon rendement du tir (déterminé par les contraintes d'exploitation ou de maîtrise d'œuvre), la conception veille donc à s'affranchir des risques spécifiques aux produits et aux aléas du massif.

2.1 Technique générale de foration

La répartition des explosifs à l'intérieur du massif et le respect des distances aux surfaces libres facilitent le transfert de l'énergie vers

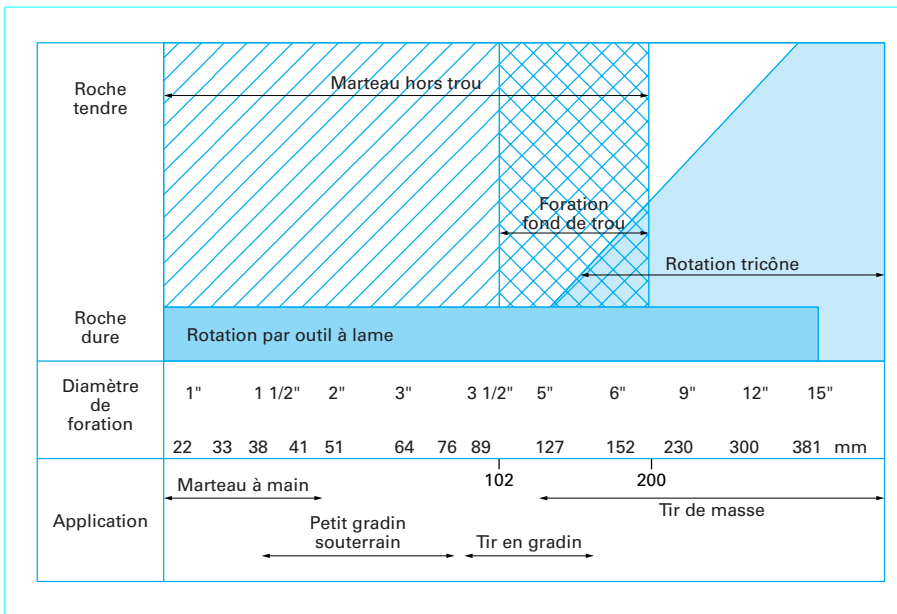


Figure 4 – Technique de foration

le rocher. La mise en place des charges étant réalisée dans des trous de mines, la foration intervient donc directement sur les résultats de tir.

La foration s'appuie sur deux principes :

- la rotation ;
- la rotopercussion.

La **foration par rotation pure** s'apparente à l'usinage sur machine-outil. Selon le diamètre de foration, elle est réalisée avec un outil à lame ($\varnothing < 150$ mm) ou avec un outil tricône ($\varnothing > 150$ mm). Les efforts sont transmis à l'outil par l'intermédiaire d'un train de tiges de diamètre important qui transmet la rotation et la poussée sur l'outil. La foration rotative avec tricône est utilisable quel que soit le type de roche. Par contre, avec outil à lame, elle est limitée aux roches à faible résistance en compression (< 100 MPa) et surtout faible abrasivité (figure 4).

La **foration par rotopercussion** allie la percussion d'un marteau (pour broyer la roche) à la rotation de l'outil pour dégager les débris. Le marteau peut être en *hors trou* : la percussion est alors transmise par l'intermédiaire du train de tiges. Ce dernier, soumis à des efforts importants, est sujet au flambement, d'où une qualité médiocre de la foration. Lorsque le marteau est placé dans le trou (foration de fond de trou), le train de tiges n'intervient que pour retenir et ultérieurement remonter le marteau. Par contre, l'encombrement du marteau interdit son utilisation en deçà du diamètre de foration de 102 mm.

Un dispositif plus récent, le **système COPROD**, allie les deux principes précédents. La rotation de l'outil est assurée par un train de tige creux dans lequel est logée une série de barres permettant de transmettre la frappe. Ce dispositif permet d'utiliser la puissance des marteaux hydrauliques aériens en évitant les risques de flambement du train de tiges.

Dans tous les cas, les débris de foration sont évacués par entraînement par un **fluide foreur**, généralement de l'air, amené par le train de tiges.

Le **massif rocheux** influe sur la qualité et le coût de la foration, et donc sur les choix possibles.

Le coût de la foration est lié à la vitesse d'avancement de la foration et à l'usure des pièces.

La vitesse d'avancement diminue lorsque la résistance en compression augmente. Elle diminue également lorsque le taux de fracturation est trop élevé : des débris tombent et bloquent le taillant, obligeant à *ramoner* le trou de mine.

L'usure des taillants et des tiges augmente avec l'abrasivité (teneur en silice) de la roche. L'usure des tiges varie également avec les efforts transmis.

La qualité de la foration dépend :

- du choix technique de foration ;
- de la précision d'implantation ;
- de la structure du massif.

Pour respecter les distances favorables au bon travail de l'explosif, la règle première est d'implanter correctement la foration (positionnement en tête, orientation et valeur de l'inclinaison).

Traditionnellement, l'**implantation** est déterminée par deux processus :

- le décalage par rapport aux forations précédentes ;
- le plombage du front au fil à plomb.

Compte tenu de la géométrie irrégulière du front liée aux réactions variables du massif à l'explosif, ces deux méthodes ne permettent qu'une détermination souvent approximative de la position des trous.

Des logiciels spécialisés sont apparus, utilisant les résultats de mesures au théodolite qui permettent de réaliser une implantation soignée des trous.

Le second facteur dégradant la qualité de la foration est l'existence de déviations possibles. Elles sont d'autant plus importantes :

- que le rapport diamètre de tige/diamètre de taillant est élevé ;
- que la poussée sur le train de tiges est importante ;
- que les discontinuités du massif sont ouvertes et inclinées sur l'axe de foration.

2.2 Techniques d'amorçage

L'amorçage a deux fonctions essentielles :

- la mise en détonation correcte des charges ;
- la séparation des détonations des charges dans le temps.

Pour ce faire, le système d’amorçage est composé de divers éléments ayant chacun un ou plusieurs rôles précis :

- initiation ;
- retard ;
- transmission ;
- amorçage à proprement parler.

La chaîne d’amorçage ainsi constituée peut être parfois complexe.

2.2.1 Mise en détonation de l’explosif

Elle peut être réalisée par du cordeau détonant (il s’agit alors d’un amorçage latéral), ou par un détonateur éventuellement accompagné d’un bousteur ou d’une cartouche (amorçage ponctuel).

Tous les explosifs présentent des comportements différents selon l’énergie de l’amorçage qui leur est adjoint. On peut distinguer trois domaines pour des énergies croissantes du dispositif d’amorçage :

- insensibilité sans perturbation ;
- insensibilité avec perturbation (désensibilisation partielle) ;
- sensibilité.

Il n’y a pas de frontière marquée entre ces domaines. Ainsi passe-t-on continûment, lorsque l’énergie d’amorçage croît, d’une perturbation de l’explosif à une détonation incomplète, puis à un régime faible de détonation pour atteindre un régime optimal.

Si les dynamites ou les explosifs nitrates atteignent leur régime optimal (dans des conditions normales d’utilisation) avec un amorçage latéral au cordeau 12 g/m, il n’en va pas de même pour les produits plus récents, plus sûrs, mais souvent moins sensibles.

La plupart des explosifs présentent des modifications de sensibilité en fonction des conditions extérieures :

- les gels, les nitrates et les dynamites sont sensibles à la pression statique. Ils ne détonent plus, voire ont un régime faible, pour des pressions comprises entre 2 et 4 bar sous l’eau. Ils sont alors déconseillés comme cartouches amorces. L’utilisation d’un bousteur permet d’éviter cette difficulté ;
- certains explosifs, comme les gels, perdent partiellement leur sensibilité pour des températures inférieures à 0 °C. Il est alors nécessaire d’utiliser un amorçage plus puissant.

Dans le cas d’un amorçage ponctuel, l’explosif ou les explosifs, après la première initiation, doivent s’amorcer par eux-mêmes. Cela impose deux conditions :

- absence d’arrêt de la détonation (continuité de la charge) : un explosif peu sensible ne peut être amorcé que par un produit ayant une pression de détonation, donc une vitesse de détonation, voisine ;
- compatibilité des explosifs entre eux.

2.2.2 Transmission de l’ordre de détonation

Elle se fait en surface et, pour le cas de l’amorçage ponctuel, dans le trou. Cette dernière ne doit pas être perturbée par les détonations de charges voisines.

L’amorçage ponctuel utilisant un détonateur électrique ou *Nonel* et un bousteur est universel et permet d’obtenir le meilleur rendement de chaque explosif.

En effet, au cours d’un tir, avec un amorçage latéral, l’onde de choc se propage perpendiculairement à l’axe du trou de mine. La distance de parcours de l’onde dans l’explosif est faible, aussi, le plus souvent, la détonation n’atteint-elle pas son régime stable. Cette diminution du rendement de l’explosif est confirmée par les mesures. L’onde de choc remontant vers le bourrage est faible, ce qui signifie que la fragmentation y est, *a priori*, insuffisante.

Enfin, dans le cas de l’amorçage latéral (comme dans le cas de l’amorçage ponctuel en tête), les gaz sont formés d’abord en tête de colonne. L’expulsion du bourrage est rapide (risques de projection) et, en conséquence, le déplacement du pied et de l’ensemble des fragments de roche du massif est plus faible.

On peut donc attendre de l’amorçage latéral :

- un rendement parfois plus faible de l’explosif ;
- une fragmentation moins poussée du massif ;
- des projections éventuelles ;
- un déplacement du pied insuffisant ;
- des blocs au niveau du bourrage.

Dans le cas de l’amorçage ponctuel au pied, l’onde qui descend dans le massif sous-jacent est faible, alors que celle qui remonte dans la zone de bourrage et qui se réfléchit à la surface est puissante. De plus, les gaz formés d’abord au pied sont mieux confinés ; ainsi, le pied est-il bien dégagé. Le bourrage est soumis à une pression des gaz moins importante et plus tardive, d’où les résultats suivants :

- bon déplacement du pied ;
- bonne fragmentation générale et plus particulièrement dans la zone du bourrage ;
- diminution des projections ;
- protection du massif sous-jacent.

L’amorçage ponctuel en fond de trou est une pratique relativement courante dans le cas des mines de moins de 6 m. Grâce à la réglementation nouvelle (octobre 1987), cette technique est autorisée pour l’ensemble des mines et en particulier les mines profondes verticales. Contrairement à l’amorçage latéral, l’amorçage en fond de trou (amorçage ponctuel) impose une **continuité parfaite de la charge explosive**. Dès qu’un doute apparaît sur cette continuité, il est nécessaire de mettre en œuvre des amorçages complémentaires de sécurité.

Les principales sources de discontinuités (involontaires) sont indiquées dans le tableau 4 et les dispositifs de sécurité recommandés correspondants sont représentés sur la figure 5.

Tableau 4 – Principales sources de discontinuités de la charge explosive

Cause d’incident	Circonstances	Solution
Coincement de cartouche	∅ faible Grande hauteur de front Massif difficile	Cordeau de sécurité remontant (figure 5 d)
Striction de la charge	Gainage de nitrate-fioul en présence d’eau Explosif en vrac peu sensible en petit diamètre	Amorçage ponctuel en tête de sécurité (figure 5 c)
Déplacement du massif Sectionnement du trou	Massif présentant un plan de discontinuités instable (sectionnant les trous)	Amorçage en tête de sécurité (figure 5 c)

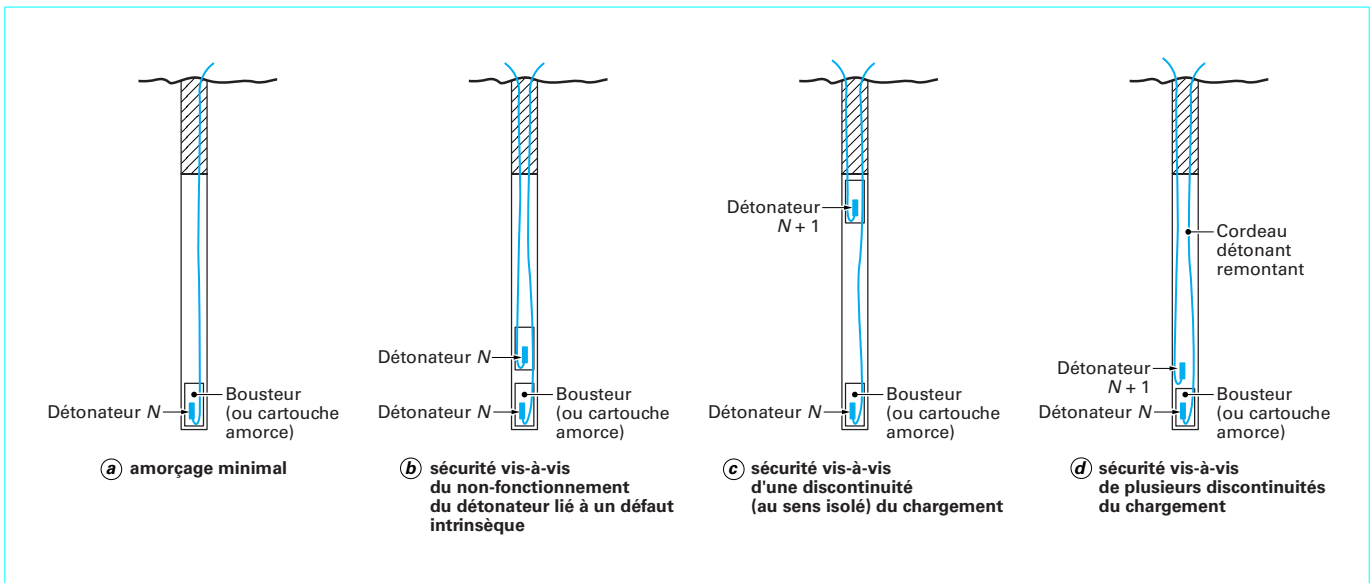


Figure 5 - Différents dispositifs de foration

Enfin, l'amorçage en fond de trou permet de séparer, dans le temps, les détonations de charges d'un même trou, ce qui diminue les nuisances. Par ailleurs, cette technique améliore dans certains cas le foisonnement du pied et donc le rendement du chargement du tas.

Pour chaque charge individuelle, on doit respecter les mêmes règles que pour l'amorçage en fond de trou d'une charge unique. La sécurité par cordeau remontant est inutilisable, sauf dans le cas de la charge supérieure.

Les bourrages entre les charges doivent empêcher la transmission de la détonation d'une charge à l'autre ou la désensibilisation. Ils devront être dimensionnés en fonction de la présence d'eau et du diamètre de foration. Ils sont compris entre 6 et 15 fois le diamètre de foration.

Les matériaux de bourrage doivent être d'une granulométrie suffisante pour éviter qu'ils ne s'écoulent dans le vide annulaire entre les cartouches et la paroi du trou et pour éviter la formation de bouchons ou la striction de la charge. Du gravillon 6/10 est d'une taille généralement suffisante, à cet égard.

2.2.3 Retards

Ils sont soit en surface (relais, raccords, détonateurs sur cordeau, explosif séquentiel), soit dans le trou (détonateurs), soit les deux.

La combinaison de retards de surface et de retards de fond de trou permet une simplification de la mise en place, plus répétitive, et une plus grande souplesse d'utilisation.

Par ailleurs, seule la combinaison de retards de surface et dans le trou autorise la réalisation des tirs séquentiels, tirs avec un choix de retards qui permet :

- le contrôle des projections ;
- le contrôle des vibrations ;
- une meilleure fragmentation.

Dans un tir séquentiel, chaque trou doit faire son « travail » et uniquement son « travail ». Dans le cas contraire, on assiste le plus souvent à une fissuration d'un plus grand volume du massif qui conduit à une granulométrie plus grossière.

Il faut donc laisser au processus de fragmentation de chaque trou le temps de s'achever, soit 3 à 10 ms par mètre de banquette. Cela concerne :

- la propagation de l'onde de choc générée par la charge du trou jusqu'à la surface libre ;
- puis, la propagation réfléchie jusqu'au trou pour affaiblir le massif ;
- enfin, la propagation du front de gaz jusqu'à la surface libre pour parachever la fragmentation.

Par ailleurs, dans le cas d'un tir à plusieurs rangées, il faut laisser le temps au massif de « gonfler ». Dans le cas contraire, on assiste à des projections verticales et à un blocage du pied.

Inversement, si l'intervalle de temps entre deux rangées est trop long, le pied est bloqué par le tas déjà formé dû aux rangées précédentes.

Compte tenu des vitesses de déplacement du massif rocheux, il faut laisser un intervalle de 10 à 30 ms par mètre de banquette entre deux rangées.

Enfin, les retards entre rangées doivent être de 3 à 5 fois les retards entre trous pour provoquer un détachement du massif en « dents de scie », favorable à la fragmentation, augmentant les surfaces libres.

Bien évidemment, pour des raisons d'efficacité, mais également pour des raisons de faisabilité et de fiabilité, le tir séquentiel est associé à l'amorçage en fond de trou. En effet, si les règles précédentes étaient appliquées à des tirs amorçés au cordeau détonant en tête, le risque de coupure de ces lignes « descendantes » de cordons serait élevé dans de nombreux massifs rocheux.

Pour éviter une superposition des signaux de vibrations ou plus exactement des premiers pics de deux signaux de vibrations émis par deux trous, l'intervalle de temps entre deux détonations de deux trous quelconques doit excéder un intervalle de temps minimal.

On constate expérimentalement et statistiquement qu'une valeur de 8 ms suffit généralement à réaliser cette séparation. Selon les massifs, et pour des détonateurs donnés, cette valeur peut varier entre 6 et 10 ms.

Pour deux trous contigus, on adopte une règle plus sévère, avec un minimum de 17 ms. Cette règle supplémentaire a également un rôle sur l'efficacité du tir.

Cette dernière règle s'applique aussi aux retards entre charges d'un même trou séparées par des bourrages intermédiaires afin de diminuer la charge unitaire du tir. Ces bourrages devront, par contre, respecter certaines règles de bon fonctionnement.

Par ailleurs, l'utilisation de retards faibles conduit à la création de signaux vibratoires de fréquence élevée. Ces derniers, qui conduisent à des déplacements plus faibles, sont moins nuisibles pour l'environnement.

2.2.4 Sécurité. Fiabilité

En matière de sécurité et de fiabilité, pour tous les dispositifs d'amorçage existants, on doit distinguer le réseau de surface et les retards dans le trou.

Le réseau de surface est constitué de lignes électriques « déclenchées » à des temps différents dans le cas de l'utilisation d'un exploseur séquentiel, de détonateurs ou de raccords (ou relais) de surface.

Les principaux risques de ratés sont dus à des coupures du réseau de surface provoquées par les effets de la détonation des charges explosives précédemment amorcées. Ces ruptures sont liées à des projections intempestives, mais également à des déplacements de terrain dus à l'infiltration des gaz dans les failles.

Pour éviter de tels phénomènes, il faut laisser la plus grande distance possible entre la position de l'initiation du réseau de surface et la charge qui détone.

La sécurité totale est atteinte lorsque la totalité du réseau de surface est initiée au moment où le premier trou détone.

Dans la pratique, la sécurité totale ne peut que rarement être réalisée ; on obtient généralement une sécurité partielle. La distance minimale de sécurité est de trois intervalles entre trous entre le réseau de surface et les détonations, pour obtenir un niveau de sécurité satisfaisant. Cette sécurité s'obtient en choisissant des retards adaptés en fond de trou (donc avec un numéro relativement élevé). Cette règle est inapplicable en souterrain où la sécurité doit être totale.

Si les retards et les branchements en surface peuvent être contrôlés, vérifiés, voire modifiés jusqu'au dernier moment avant le tir, il n'en est pas de même pour les retards en fond de trou. Cela conduit à une règle de sécurité liée à la mise en place : réduire au maximum le nombre de retards en fond de trou.

2.3 Technique particulière par type de chantier

L'utilisation des explosifs dans le génie civil est diversifiée : ils sont destinés au terrassement rocheux de voies de communication à ciel ouvert ou en souterrain (routes, voies fluviales, chemin de fer), au creusement de fondations d'ouvrages d'art ou à la démolition.

Dans le cadre de ces réalisations, l'explosif est utilisé pour :

- excaver et fragmenter ;
- découper ;
- déplacer ;
- compacter.

L'utilisation la plus fréquente consiste en la réalisation d'excavations. Dans ce cas, les techniques particulières de mise en œuvre dépendent principalement de la géométrie du volume de matériaux à extraire.

2.3.1 Tirs en gradins

2.3.1.1 Principes

La technique du tir en gradins consiste en la réalisation d'une « falaise » artificielle appelée **front de taille**. Les explosifs sont mis en œuvre sous la forme de charges cylindriques allongées, sensiblement parallèles à la paroi quasi verticale du front, seule face libre active du tir.

Les volumes dégagés par chaque charge, de forme prismatique, ont une section droite de dimension très inférieure à la hauteur du front. Lorsque les matériaux qui les constituent sont désorganisés par le tir, ces volumes, du fait de leur géométrie, deviennent instables. Ils nécessitent donc peu d'énergie pour être extraits.

Une part importante de l'énergie requise est utilisée pour arracher la partie inférieure du front (communément appelée le « pied »), correspondant à la zone la plus bloquée. Cette part est d'autant plus grande que le tas de roche entrave davantage la sortie du pied. Pour accroître l'étalement du tas abattu, et donc faciliter le dégagement de ce dernier, la charge de la colonne, partie médiane du front, excède parfois fortement la charge limite pour désorganiser la roche.

2.3.1.2 Détermination des charges

Les relations les plus courantes permettant de déterminer la charge en explosif ont été développées empiriquement par Langefors (in *The modern technique of rock blasting*, 1979. AWC/GEBERS. Stockholm).

Les **règles de Langefors** définissent de manière précise les éléments de la géométrie du tir, qui sont déterminés en fonction de la banquette B : épaisseur de la tranche de massif abattue par une mine (figure 6).

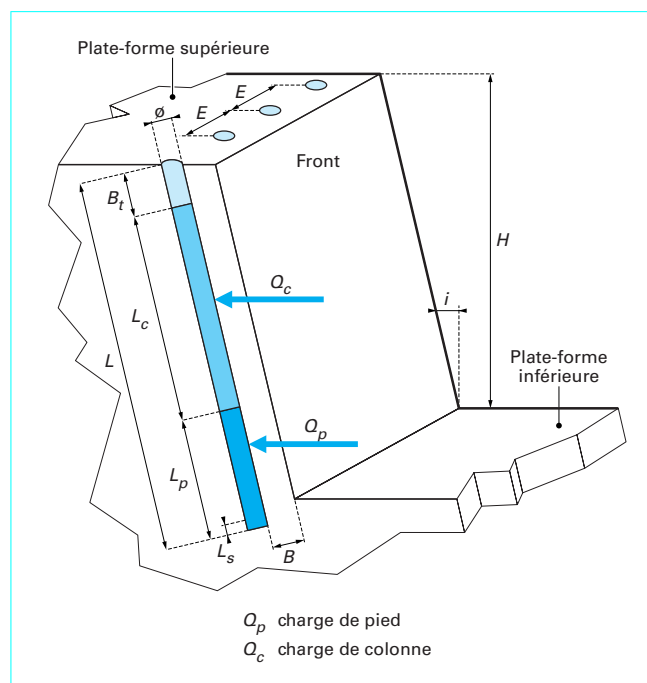


Figure 6 – Géométrie du tir

Les relations suivantes ne sont applicables qu'à des fronts élevés, de hauteur supérieure au double de la banquette. En deçà, l'énergie explosive contenue dans le trou de mine est approximativement proportionnelle au volume abattu par cette mine.

La foration présente une surprofondeur L_s par rapport à la plateforme inférieure définie par la relation :

$$L_s = 0,3B \quad (1)$$

Le bourrage terminal B_t , qui permet de confiner la charge à l'intérieur du trou de mine, est défini par la relation :

$$B_t = B \quad (2)$$

Il peut être réduit jusqu'à $0,5B$ dans le cas d'amorçage en fond de trou. Il doit être réalisé, dans la mesure du possible, avec des matériaux concassés (en général du 4/6 mm) qui créent un confinement suffisant pour le bon fonctionnement des produits explosifs.

La charge explosive, elle-même, peut être décomposée en deux parties, la charge de pied de longueur L_p – partie inférieure de la charge explosive – et la charge de colonne. La longueur de la charge de pied est déterminée par :

$$L_p = 1,3B \quad (3)$$

La longueur de la charge de colonne L_c se déduit alors de la longueur totale de la foration L par la relation :

$$L_c = L - 2,3B \quad (4)$$

La **banquette (épaisseur de roche à abattre) maximale** peut être évaluée à partir des caractéristiques du massif à abattre, des paramètres géométriques du gradin et de la foration, des performances de l'explosif de pied utilisé, par la formule suivante :

$$B_{\max} = K \varnothing \left[\frac{s_p \rho_p}{s_0 \rho_0} \right]^{1/2} \frac{\varnothing_c}{\varnothing} \quad (5)$$

avec	K	coefficient constant dépendant de la référence utilisée et du massif rocheux,
	\varnothing (mm)	diamètre de foration,
	\varnothing_c (mm)	diamètre de la charge explosive de pied,
	s_p (MJ/kg)	énergie pondérale de l'explosif de pied utilisé,
	ρ_p (kg/m ³)	masse volumique de l'explosif de pied utilisé,
	s_0 (MJ/kg)	énergie pondérale de l'explosif de référence,
	ρ_0 (kg/m ³)	masse volumique de l'explosif de référence.

Cette relation permet de ramener l'explosif de pied utilisé à un explosif de référence, en utilisant d'autres caractéristiques énergétiques que la « strength », plus représentatives, comme les énergies mesurées dans les tests en piscine (encore appelés tests de la bulle).

Si l'on utilise comme référence le *Dynamex* suédois ou un explosif analogue (dynamite *F16*, dynamite *NC1*), compte tenu du rapport courant entre le diamètre des cartouches et celui du trou de foration, le coefficient K vaut :

$$K = 38 \quad (6)$$

La relation (5) correspond à un écartement entre trous E tel que :

$$E = 1,25B \quad (7)$$

Cette valeur correspond à un compromis entre une bonne granulométrie résultante du tir et une géométrie finale satisfaisante.

Toute variation de l'espacement E s'accompagne d'une variation conjointe de B , la maille, produit de E par B , restant approximativement constante.

La banquette maximale doit être corrigée, en tenant compte des déviations de la foration, pour obtenir une banquette réalisable. En prenant une foration de qualité moyenne et une hauteur de front courante de 15 m, la relation (6) devient alors :

$$K = 32 \quad (8)$$

La **charge de colonne minimale** correspondante se déduit de la charge de pied par la relation :

$$s_c \rho_{\ell c} = 0,5 s_p \rho_{\ell p} \quad (9)$$

avec	s_c (MJ/kg)	énergie pondérale de la charge de colonne,
	$\rho_{\ell c}$ (kg/m)	masse linéique de la charge de colonne,
	s_p (MJ/kg)	énergie pondérale de la charge de pied,
	$\rho_{\ell p}$ (kg/m)	masse linéique de la charge de pied.

La diminution de la charge de colonne peut être réalisée en insérant des bourrages intermédiaires constitués de matériaux inertes. Toutefois, il est souvent préférable pour des considérations économiques, d'utiliser en colonne un explosif moins énergétique qu'en pied, chargé en continu.

Dans la plupart des terrassements rocheux, les matériaux extraits sont réutilisés pour la construction de remblais. Pour des raisons de stabilité et de déformabilité de ces ouvrages, les matériaux utilisables doivent entrer dans un fuseau granulométrique limité. Les blocs de dimensions importantes doivent être éliminés (le déficit en matériaux est alors comblé par des apports provenant d'une carrière ou d'une zone d'emprunt) ou retraités par l'intermédiaire d'une installation de concassage. Le plus souvent, une hausse de la consommation d'explosif en colonne permet d'adapter la granularité des matériaux aux besoins, de façon plus économique.

2.3.1.3 Conception et calcul informatique des tirs

La conception d'un tir fait intervenir de nombreux paramètres (géométrie des forages et du front, choix et répartition des explosifs) dans le respect des contraintes du site (matériel de foration et d'extraction utilisé, destination et traitements ultérieurs des matériaux extraits, contraintes d'environnement).

Les règles de calcul présentées précédemment (§ 2.3.1.2) permettent une première estimation du dimensionnement d'un tir. Elles ne prennent toutefois pas en compte le processus réel de l'abattage et sont incapables de prédire les résultats détaillés d'un tir, comme la courbe granulométrique des matériaux abattus, l'aspect du front final, l'étalement du tas formé et son foisonnement.

Compte tenu de ces insuffisances, les concepteurs de tirs ont été amenés à développer des programmes informatiques de calcul, seule possibilité existante de prendre en compte la multiplicité des paramètres et des solutions.

Dans ce domaine, il y a lieu de distinguer les logiciels simples fondés sur les règles précédentes ou des règles analogues, et les logiciels complets prenant en compte une modélisation fine de chaque processus intervenant dans l'abattage.

Les premiers, utilisables sur calculateurs de poche ou micro-ordinateurs, n'apportent aucun élément de réponse supplémentaire satisfaisant sur la conception des plans de tir.

Les seconds sont apparus depuis le début des années 1980. Ils permettent des évaluations précises de la **géométrie de foration**, du **chargement des explosifs** et des **résultats complets du tir à la fois techniques et économiques**.

Ils s'appuient sur des équations théoriques, modélisant les phénomènes du processus de l'abattage, pour lesquelles des hypothèses empiriques simplificatrices ont permis de trouver des relations analytiques. Ils utilisent des banques de données importantes et nécessitent des moyens informatiques allant d'un micro-ordinateur à des ordinateurs très puissants selon le cas.

Citons les programmes **BLASPA** de R. Favreau, **THP-BLAST** de SNPE ou **EXPLO-TECH** en France, **SABREX** de ICI. Ces logiciels sont utilisés sur de nombreux sites où ils ont été validés.

Par exemple, le logiciel français **THP-BLAST** fournit les informations quantitatives suivantes :

- la limite de fracturation par l'onde de choc, qui permet d'appréhender les risques de blocage du pied de mine, les effets arrière et les risques d'instabilité du front définitif ;
- la fragmentation du tas abattu, permettant une adaptation précise aux objectifs granulométriques ;
- le déplacement du front et la longueur du tas (qui permet d'appréhender le foisonnement et donc la facilité de chargement du tas abattu) ;
- les coûts totaux de l'abatage.

2.3.1.4 Limite des tirs en gradins

La principale difficulté des tirs en gradins réside dans la réalisation de trous de foration de bonne qualité géométrique (rectitude et parallélisme). Les imperfections des trous forés induisent des surconsommations en explosifs et/ou en foration pour contre-carrer la résistance des surépaisseurs de matériau.

Les risques de projections intempestives deviennent très importants dès lors que le front s'élève. Cela conduit à réduire les charges du tir, ce qui est souvent incompatible avec une fragmentation du massif rocheux adaptée aux impératifs de réemploi des matériaux.

Enfin, le tir en gradin n'est réalisable que lorsque l'épaisseur du volume à excaver est importante.

2.3.2 Tirs de masse

Les tirs de masse consistent en la mise en œuvre de charges peu profondes réparties sur une grande surface.

Initialement, cette technique s'appuyait sur le principe des **tirs en cratère** : chaque charge explosive, agissant vers la seule surface libre disponible (la surface horizontale du volume à excaver) dégage un cratère de matériaux.

Tous les éléments du tir sont indépendants les uns des autres. La répartition des retards n'a alors pour seul intérêt que de diminuer les nuisances et, en particulier, les vibrations émises dans l'environnement (§ 3.2).

Compte tenu des faibles surfaces libres disponibles, le rendement de ce type de tir de masse est faible : l'onde de choc émise par l'explosif travaille mal, les gaz fragmentent peu et génèrent surtout des déplacements importants des éléments de roche extraits, d'où des projections verticales fréquentes.

Aussi les tirs de masse apparaissent-ils souvent sous la forme de **tirs d'ébranlement** : les charges explosives sont réduites au minimum dans le seul but de désorganiser les matériaux en place. Cette réduction de la charge permet de limiter les projections. Le plus souvent, les déplacements sont très faibles. Cette solution technique impose toutefois de reprendre les matériaux ébranlés avec des engins mécaniques (rippeurs) avant de les charger. Le coût d'extraction de la roche est généralement élevé.

Sous cet aspect, le tir de masse n'était utilisé que dans le cas de couches de matériaux à extraire peu épaisses.

L'amélioration de la compréhension des phénomènes physiques intervenant dans l'abatage ainsi que l'évolution des produits et des techniques d'amorçage ont permis de transformer les tirs de masse en une **extension des tirs en gradins**.

Grâce à un choix judicieux de retards (figure 7), il est possible de créer des **surfaces libres intermédiaires** qui définissent des éléments de massif dont la forme est approximativement une portion de sphère au centre de laquelle se trouve une charge explosive, également quasi sphérique, prête à détoner. Ces surfaces libres intermédiaires se forment pendant le tir peu de temps avant d'être utilisées.

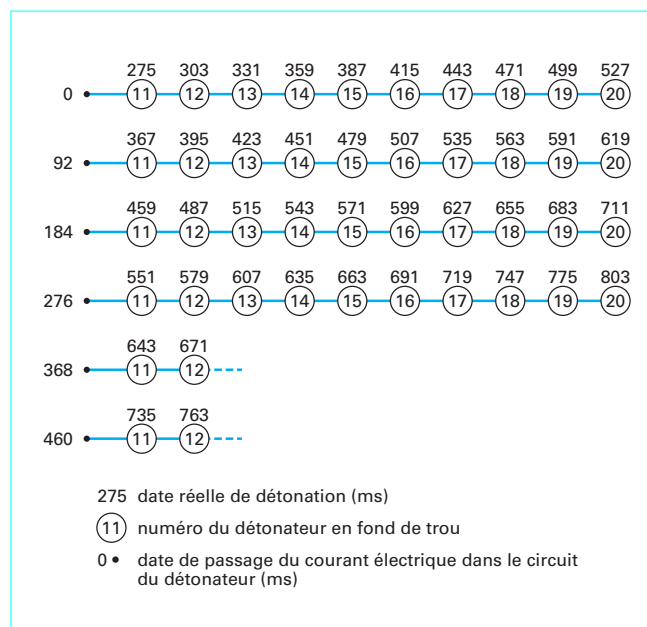


Figure 7 – Tir séquentiel

Compte tenu de l'importance des surfaces libres offertes à chaque charge, l'action de l'onde de choc et, par suite, celle des gaz des explosifs sont importantes en matière de fragmentation. Les déplacements sont relativement faibles du fait de la faible énergie des gaz après l'action de fragmentation. La courbe granulométrique, le foisonnement des matériaux extraits, ainsi que la faible hauteur du tas formé (du fait de la faible profondeur d'extraction) permettent des rendements importants des engins de chargement. Par ailleurs, la grande étendue au sol de la zone de tir et les faibles déplacements des matériaux facilitent la rationalisation de la production :

- chaque poste (foration, chargement des explosifs, chargement de la roche abattue) dispose d'une surface de manœuvre importante qui autorise la simultanéité des tâches ;
- la spécificité et l'importance de chaque tâche et les faibles déplacements permettent d'envisager l'automatisation de certains postes (chargement mécanique des explosifs) et d'obtenir des rendements très élevés.

Les tirs de masse sont utilisés d'une manière très large dans les travaux publics dès que la dimension du projet le permet et même pour des profondeurs d'excavation importantes (à condition de réaliser des approfondissements successifs).

En l'absence de front de dégagement, une ouverture généralement centrale est réalisée. La technique utilisée pour ce faire s'apparente à celle utilisée en souterrain dans le cas du bouchon (§ 2.3.4). On parle alors de **tirs de fonçage**.

Une méthode consiste à accroître, dans la zone d'ouverture, la densité de charge (§ 2.3.4 : bouchon canadien) ; toutefois, cela conduit à des projections verticales importantes. La technique la plus courante consiste à incliner les trous dans la zone d'ouverture (§ 2.3.4 : bouchons à mines inclinées et figure 8).

Une fois l'ouverture réalisée, le reste du tir est analogue aux tirs de masse précédents.

2.3.3 Tirs de tranchées

Les tirs de tranchées ont pour objectif de réaliser des excavations de faible section et de grande longueur.

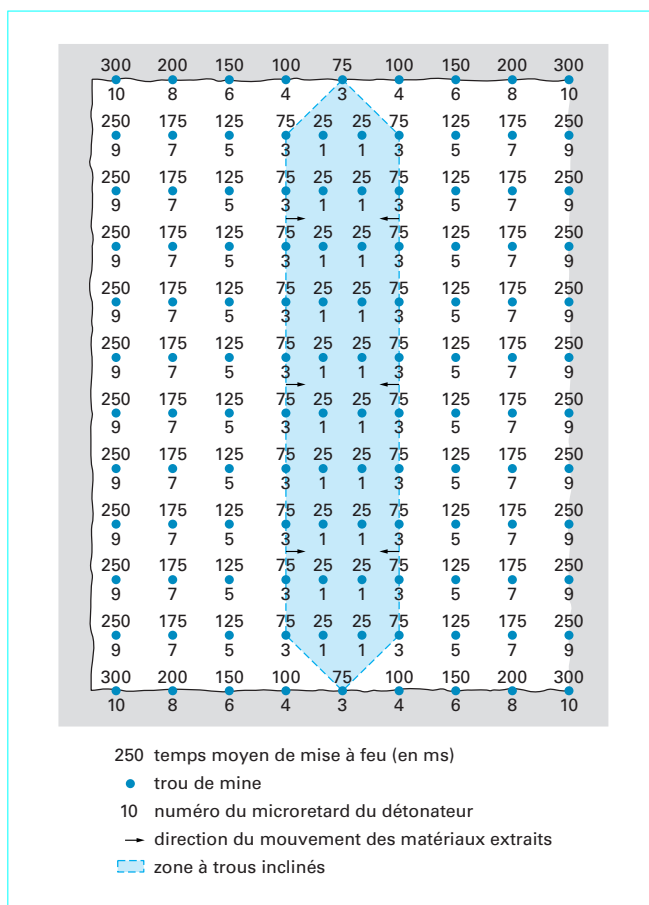


Figure 8 - Tir de fonçage

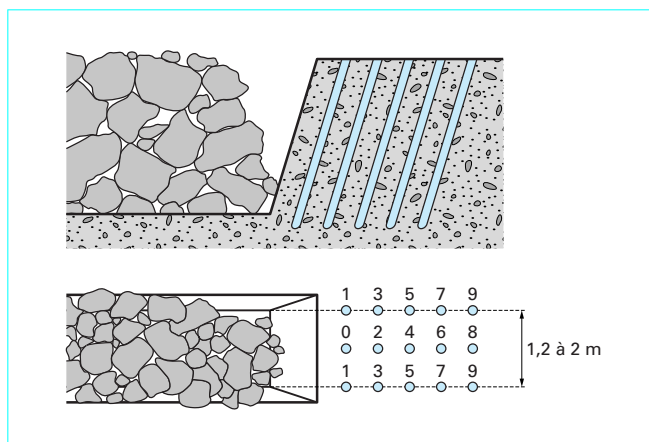


Figure 9 - Tir de tranchée

Les charges explosives permettent à la fois d'assurer le foisonnement et la fragmentation des matériaux et de respecter la géométrie définitive de la tranchée.

Les trous de mine extérieurs sont parallèles à la paroi définitive à 30 cm environ de cette dernière (figure 9).

Dans le cas de fouilles de faible largeur, les trous de mine sont disposés en zig-zag.

Afin de limiter les vibrations engendrées par le tir dans l'environnement, les détonations des charges sont échelonnées dans le temps : un minimum de 50 ms est alors nécessaire entre les rangées.

Pour obtenir un foisonnement suffisant de la roche (soit une augmentation de volume de 25 % environ) facilitant son chargement, la quantité d'explosifs doit être augmentée par rapport aux règles précédentes (§ 2.3.1.2) pour contrebalancer le confinement particulièrement élevé des matériaux. La consommation en explosifs varie entre 0,6 et 0,9 kg/m³ contre 0,3 à 0,6 kg/m³, soit une augmentation de 50 à 100 %.

Cette technique est particulièrement adaptée à la **pose de pipelines**. Des réalisations récentes ont ainsi permis le doublement de pipelines existants (en Arabie Saoudite, par exemple, avec des contraintes d'environnement très sévères : limitation des vibrations à 50 mm/s voire 25 mm/s sur les équipements existants en fonctionnement situés à 15 m des tirs).

Une méthode utilisée dans les zones quasi désertiques et en l'absence de toute contrainte de nuisance consiste à utiliser une charge cylindrique posée sur le sol le long de l'axe de la tranchée. La détonation de l'explosif crée un cratère sur toute la longueur de la charge.

2.3.4 Tirs souterrains

La construction de voies de communication dans des sites montagneux, les aménagements de barrages, la réalisation de cavités souterraines de stockage conduisent à utiliser l'explosif, avec des contraintes drastiques de préservation des parois. Dans ce cas, toute opération commence par la construction d'une galerie ou d'un puits, excavations sub-horizontale et sub-verticale respectivement.

Lors du creusement d'une galerie, l'explosif ne dispose initialement que d'une surface libre, le front de galerie. L'objectif des premières charges, constituant le bouchon, est de créer une nouvelle surface libre active orthogonale au fond de la galerie et un volume de dégagement pour les charges ultérieures de la volée (figure 10).

La technique la plus ancienne, **bouchons à mines non parallèles**, consiste à passer progressivement d'une foration peu inclinée sur le front à une foration orthogonale à ce dernier. L'avancement réalisable dépend alors essentiellement de la largeur de la galerie en raison de l'encombrement des glissières des engins de foration (figure 11).

Les **bouchons canadiens** formés de trous chargés très proches, éventuellement accompagnés de trous vides de décompression de même diamètre, pulvérisent localement la roche. Très sensibles à la nature du terrain, ils sont difficiles à mettre au point. Par ailleurs, ils génèrent des vibrations et des projections importantes (figure 12).

Les **bouchons à gros trou** utilisent un trou foré comme première surface libre et volume de dégagement. La distance d'un trou à tirer par rapport au trou vide existant augmente avec le volume du trou vide. Les trous sont donc répartis selon une (ou plusieurs) spirale. L'avancement est limité par la précision de la foration, et plus particulièrement son parallélisme, et par le diamètre de foration du gros trou (figure 13).

Les mines suivantes de la volée, dites de dégraissage, respectent les mêmes règles que celles des tirs à ciel ouvert. La consommation en explosif varie entre 1 et 1,4 kg/m³. Pour les mines de la partie inférieure de la volée (sole et piedroits), elle augmente de 10 % environ pour tenir compte du confinement défavorable.

Le schéma de tir se termine par un découpage, le plus souvent un post-découpage, afin de respecter les cotes initiales du projet et préserver l'intégrité du massif.

Dans le cas de massifs caractérisés par des venues d'eau importantes, les terrains sont éventuellement congelés avant le tir. Cette

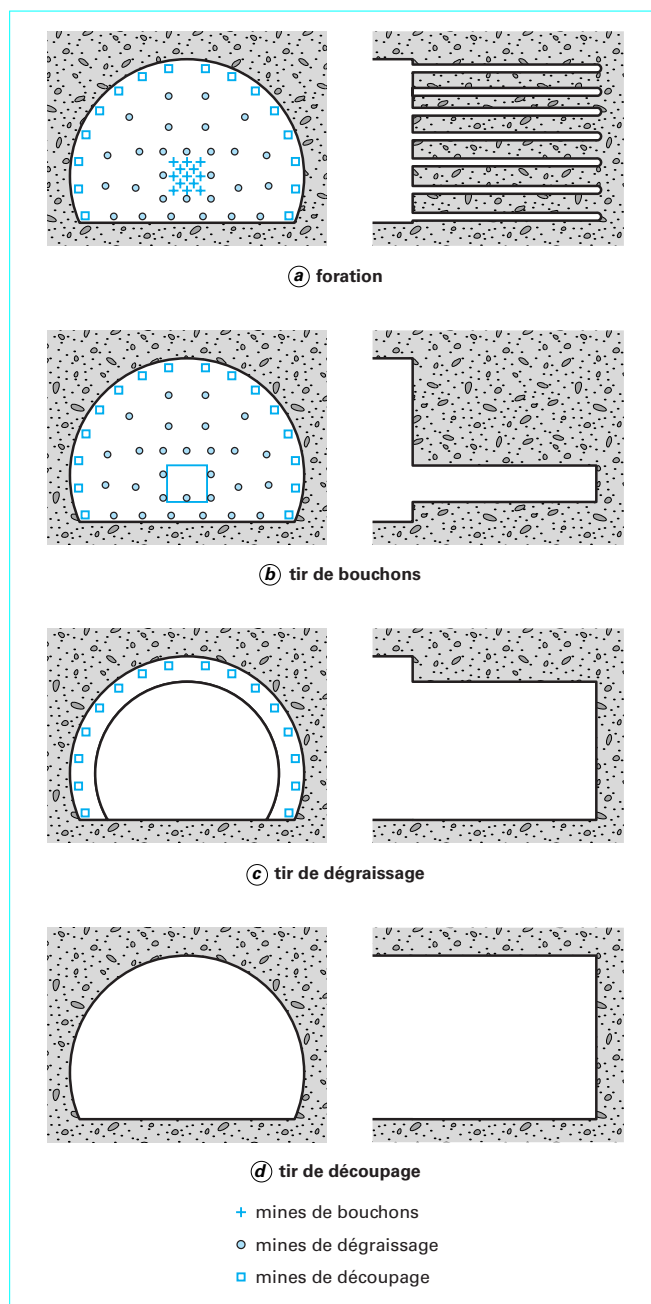


Figure 10 – Phases successives du tir d'une volée en galerie

technique assure, en outre, une meilleure stabilité de la galerie à court terme.

Le **fonçage des puits** utilise les mêmes techniques de bouchons que le percement des galeries (figure 14).

Une difficulté de cette technique est l'élimination des eaux susceptibles de s'écouler dans le puits. La technique la plus courante reste encore un schéma en demi-éventail.

Le fonçage de puits est essentiellement utilisé pour la réalisation de conduits d'aération pour les tunnels routiers, de conduites

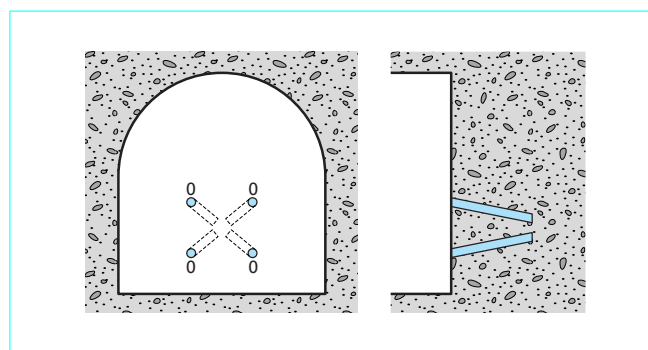


Figure 11 – Bouchon à mines non parallèles

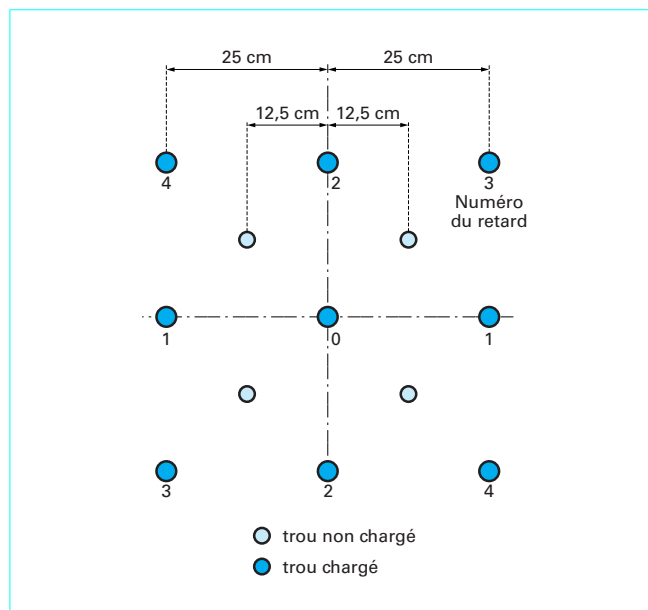


Figure 12 – Bouchon canadien

forcées pour les barrages « de pointe » et de fondations spéciales, en particulier pour les viaducs autoroutiers.

Outre l'élargissement des galeries souterraines, on peut réaliser de **grandes cavités souterraines** pour, par exemple, l'installation des unités de ventilation dans les tunnels routiers ou le stockage en souterrain.

Dans tous les cas, une galerie est préalablement creusée (celle-ci sert souvent de galerie de reconnaissance). Elle est le plus généralement située à la partie haute de réalisation définitive (figure 15).

L'extension de la cavité est alors accomplie par des mines horizontales pour les zones latérales ou supérieures et, pour la partie sous-jacente, par une succession de tirs en gradins ou de tirs de masse selon la géométrie du projet et les choix matériels de l'entreprise.

En souterrains, les parois des galeries sont généralement bétonnées afin d'améliorer la stabilité à long terme et, éventuellement, l'état de surface dans le cas de conduits d'écoulement. Tout hors-profil de la galerie brute de tir conduit à une surconsommation importante de béton, préjudiciable au coût de l'ouvrage, ou à un déficit préjudiciable à sa stabilité à long terme.

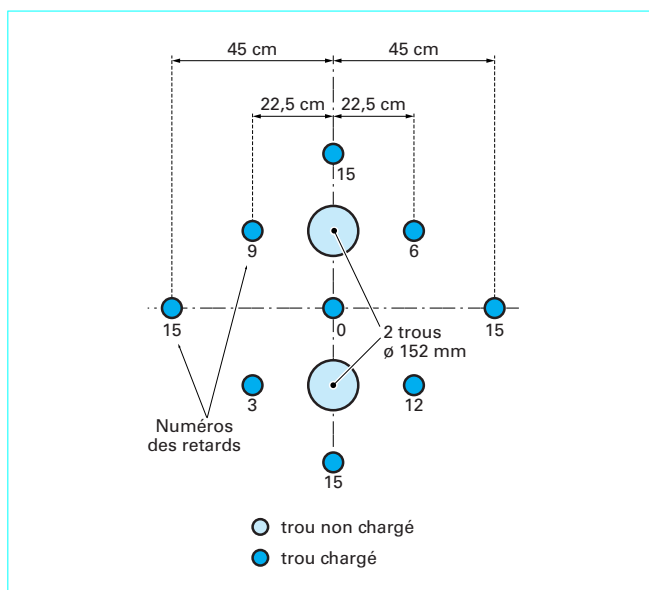


Figure 13 – Bouchon à double gros trou central

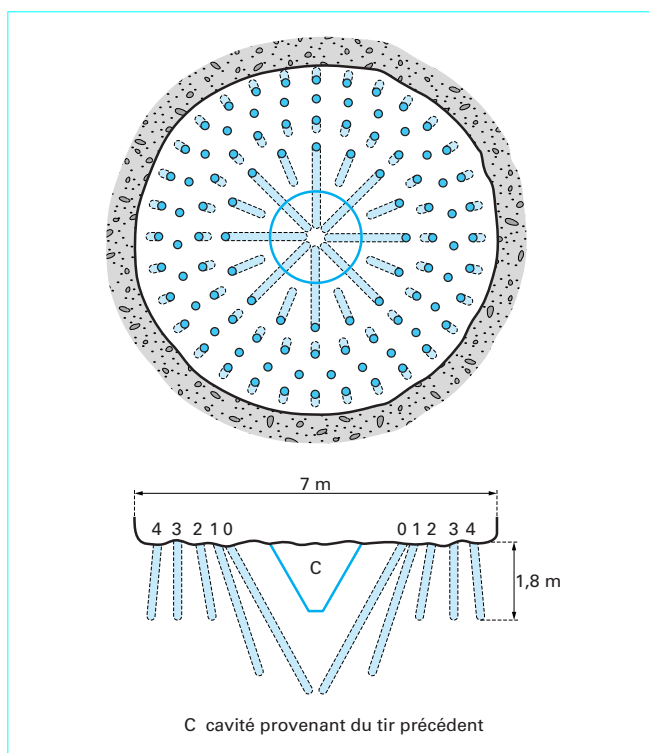


Figure 14 – Fonçage des puits

2.3.5 Tirs de découpage

La plupart des terrassements rocheux à l'explosif, en souterrains et à ciel ouvert, doivent respecter des cotes définitives très strictes.

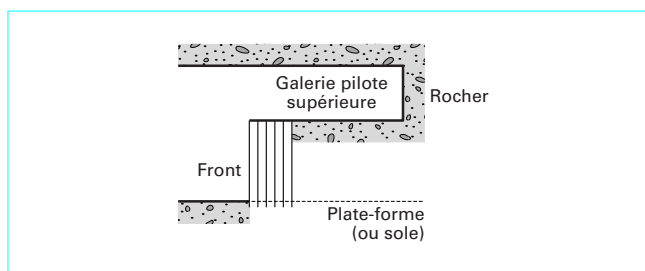


Figure 15 – Creusement de galerie

Les techniques de découpage permettent d'améliorer l'état final des excavations à l'explosif. Elles consistent à forer des trous coplanaires à faible distance les uns des autres et à les faire détoner simultanément ou par petits groupes. Une fissure se propage alors dans le plan de foration des trous.

L'onde de choc générée par le produit explosif, créant une fissuration anarchique à l'intérieur du massif, doit être réduite au minimum. Pour ce faire, l'explosif est découpé, c'est-à-dire séparé de la roche par un vide d'air annulaire.

Le seul intérêt de l'onde de choc est éventuellement de créer une amorce de fissure au voisinage immédiat du trou de mine.

La pression des gaz après détonation à l'intérieur du trou de mine, dite **pression de paroi**, est approximativement égale à :

$$P = \frac{1}{8} \rho V^2 \left[\frac{\varnothing_c}{\varnothing} \right]^{2,6} \quad (10)$$

avec P (Pa) pression de paroi,
 \varnothing_c (m) diamètre de la charge explosive,
 \varnothing (m) diamètre du trou de mine,
 V (m/s) vitesse de détonation de l'explosif,
 ρ (kg/m³) masse volumique de l'explosif.

La pression de paroi doit être inférieure à la résistance en compression de la roche de manière à éviter son broyage. Par ailleurs, la pression développée par les gaz doit excéder la résistance du massif pour ouvrir une fissure entre les trous. Elle suit donc la relation :

$$P \varnothing = (R_t + \sigma_i)(E - \varnothing) \quad (11)$$

avec P (Pa) pression de paroi,
 \varnothing (m) diamètre du trou de mine,
 R_t (Pa) résistance à la traction de la roche,
 σ_i (Pa) contrainte interne du massif,
 E (m) espacement entre les trous.

La pression de paroi devra être la plus élevée possible sans excéder la résistance à la compression de la roche. Sachant que le rapport entre la résistance en compression et la résistance en traction des roches est généralement compris entre 10 et 15, l'écartement maximal réalisable entre les trous de découpage sera voisin de 10 à 15 fois le diamètre des forages pour des contraintes internes du massif faibles.

Des variantes apparaissent selon la date de tir des trous de découpage par rapport à celle des tirs de production voisins.

Le **prédecoupage** est réalisé avant les tirs de production, qu'il soit tiré indépendamment ou à l'intérieur du tir de production (figure 16).

La fissure créée, si elle est suffisamment ouverte, permet de réfléchir partiellement les ondes générées par les tirs de masse. Elle permet ainsi de préserver le massif en place lorsque le tir de production n'est pas trop brutal.

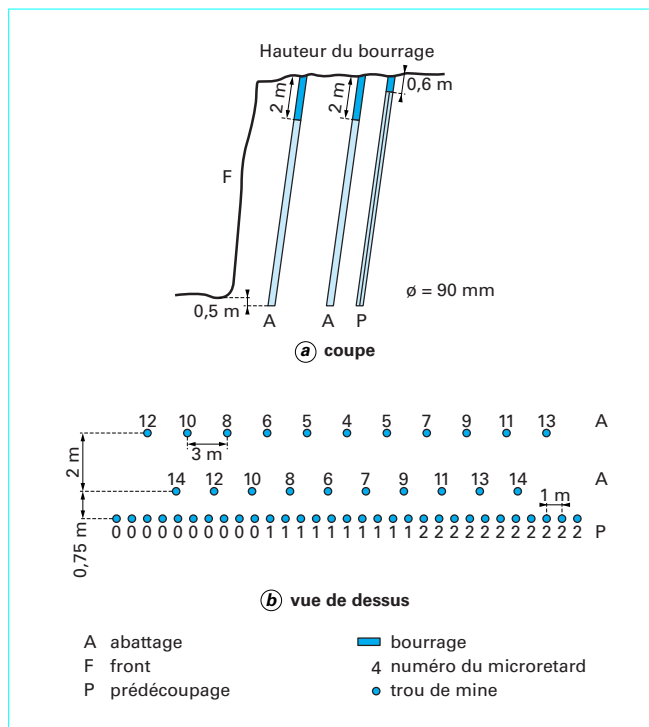


Figure 16 – Prédécoupage et tir ménagé en production

Au moment du tir, les contraintes internes du massif ne sont pas relâchées, ce qui conduit à une consommation en explosifs plus élevée.

Le chargement de trous de découpage était souvent réalisé en fixant à intervalle régulier des cartouches sur du cordeau détonant 12 g/m. Cette opération est longue et donc onéreuse, l'utilisation de cordeau détonant de fort grammage (40 g/m) ou de dispositifs spéciaux (*Cisalite* ou *Cisalex*) lui est substituée.

Les règles de base sont les suivantes :

- l'écartement entre trous vaut environ dix fois le diamètre de foration ;
- la limitation de la pression dans les trous conduit à l'utilisation de *Cisalite 25* dans des trous de diamètre 89 à 105 mm, de cordeau 40 g/m dans des trous de 64 à 89 mm, de *Cisalex 17* dans des trous de 51 mm ;
- un bourrage terminal de 0,6 à 0,9 m est réalisé avec un gravier grossier, le vide annulaire autour de la charge peut également être rempli de gravier analogue.

Le **post-découpage** est réalisé après les tirs de production, qu'il soit tiré indépendamment ou à l'intérieur du tir de production.

Au moment du tir de production, les contraintes internes du massif se sont libérées, ce qui conduit à une consommation en explosifs plus faible.

Pour un chargement identique à celui du prédécoupage, l'écartement entre trous vaut environ quinze fois le diamètre de foration, ce qui réduit fortement le coût du découpage.

Afin de protéger le massif, le **découpage** (prédécoupage ou post-découpage) s'accompagne d'un **tir ménagé** : la rangée de trous proche du découpage a une maille réduite et une charge réduite proportionnellement (environ 25 % des valeurs du tir de production). Ce tir ménagé peut comporter deux rangées de charge réduite.

Si le découpage est réalisé après le tir des charges de production (post-découpage), une attention particulière devra être accordée au tir ménagé afin de préserver le massif.

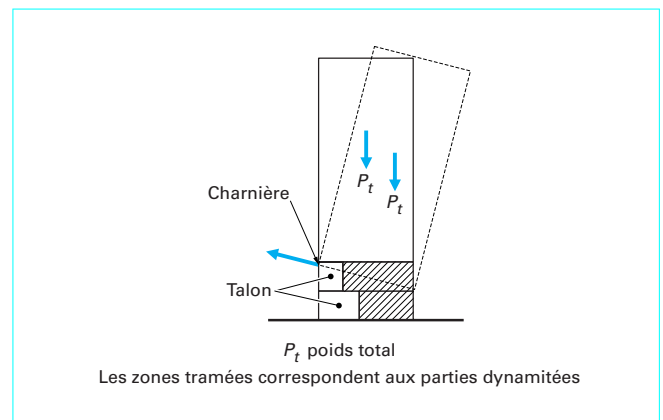


Figure 17 – Semi-foudroyant

2.3.6 Tirs sous l'eau

Ces tirs sont pratiqués lors de la réalisation d'installations portuaires, d'aménagements fluviaux ou de piles de ponts, à partir de forages réalisés par des engins embarqués sur des pontons ou des barges.

L'interface roche-eau constitue une surface de réflexion peu efficace pour les ondes de choc. Cela a pour conséquences un rendement faible de l'onde de choc en matière de fissuration et une transmission importante des vibrations dans les milieux connexes. Aussi les charges sont-elles deux à trois fois supérieures à celles d'un tir équivalent à l'air libre.

Pour améliorer le rendement de l'onde de choc, on établit un rideau de bulles d'air le long de la paroi du front. De la même manière, pour diminuer le niveau des vibrations transmises, on interpose un rideau de bulles entre le tir et la partie à protéger.

Notons que les tirs sous eau peuvent parfois être évités en asséschant la fouille derrière un rideau de palplanches ou un gabion.

2.3.7 Tirs de démolition

La démolition à l'explosif s'adapte parfaitement aux ouvrages de grande hauteur (bâtiments, etc.) ou très résistants (blockhaus, etc.) pour des raisons économiques et de sécurité.

Pour les édifices de grande hauteur, deux méthodes sont utilisées :

- le semi-foudroyage qui conduit à un basculement de l'ouvrage ;
- le foudroyage, appelé abusivement implosion, dans lequel la construction s'effondre sur elle-même.

Ces deux méthodes peuvent être associées dans certaines démolitions.

Le **semi-foudroyage** consiste à affaiblir de manière dissymétrique la base de la construction, de sorte que son centre de gravité soit en dehors de la zone intacte. Si le moment résistant de la zone intacte de la base, appelée **talon**, est suffisamment faible, l'ensemble de l'édifice bascule (figure 17).

Le talon tend à être projeté dans la direction inverse au basculement. Il doit donc souvent être renforcé.

Le semi-foudroyage est utilisé lorsque :

- on dispose de la place suffisante pour que les matériaux de la construction puissent s'étaler ;
- la faible section de la base, en regard de sa hauteur, rend aléatoire la verticalité de sa chute.

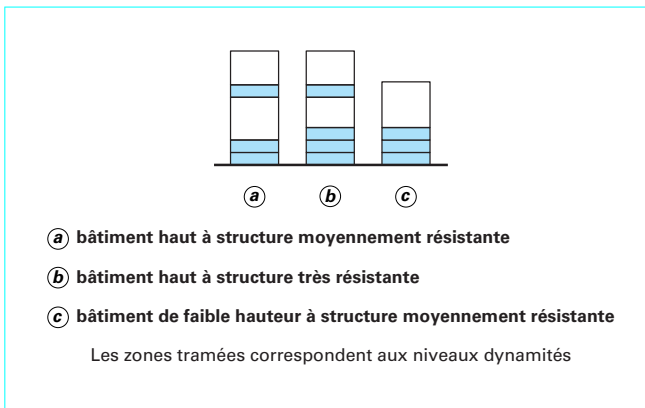


Figure 18 – Foudroyage intégral

On rencontre donc cette méthode dans les démolitions de cheminées d'usine, de châteaux d'eau, etc.

La difficulté essentielle réside dans le contrôle de la direction de chute pour ces constructions de base à section circulaire. Cela nécessite une symétrie parfaite du chargement et des détonations par rapport à la direction de chute.

Le **foudroyage intégral** consiste à faire s'effondrer l'édifice sur lui-même. Il est généralement inutile de dynamiter la totalité de la construction si elle est de grande hauteur (figure 18). Les zones intactes, correspondant à des niveaux complets et délimitées par les zones dynamitées, se brisent lors de l'impact avec les autres éléments de structure. La hauteur de chute de ces zones, et donc leur énergie cinétique, est déterminée en fonction de leur résistance mécanique.

La méthode américaine des frères Loizeau utilise des blocs (zones intactes) importants séparés par des retards longs. La méthode française développée par Cemerex est basée sur des petits blocs.

Dans tous les cas, dans les zones dynamitées (figure 19) :

- tous les éléments non porteurs sont enlevés (ou affaiblis pour les cloisons intérieures en étage) ;
- les éléments porteurs (murs ou piliers) sont affaiblis en tenant compte de la descente de charge et des surcharges climatiques (vent, etc.) ;
- tous les éléments résistants se prolongeant selon la hauteur de la structure (cages d'escaliers et escaliers, cages d'ascenseurs, gaines de ventilation, etc.) sont détruits ou affaiblis ;
- tous les éléments de conduits extérieurs sont retirés pour éviter les risques de projection liés aux surpressions (cheminées, etc.).

Lors du tir, les charges explosives détruisent soit les piliers restants (il s'agit alors d'un tir avec une importante face libre analogue à une charge de tir de masse), soit sectionnent les cloisons (il s'agit alors d'un tir de découpage). Dans le cas de blockhaus, la destruction des murs ne peut pas être réalisée en une seule fois, mais par approfondissements successifs.

Dans les démolitions par foudroyage intégral, les explosifs utilisés en rez-de-chaussée sont la dynamite NC2 en petit diamètre ou le *Cisalex 17*, en étage le *Cisalex 13* ou du cordeau 70 g/m. Les consommations en explosif varient selon le taux de ferrailage des éléments considérés. Elles dépassent le plus souvent 350 g/m³.

Compte tenu du nombre de retards différents nécessaires et de la précision sur les dates de détonation, les tirs sont généralement réalisés avec un explosif séquentiel. Une attention particulière est apportée à la vérification de toute la chaîne d'amorçage.

Compte tenu de la proximité immédiate d'autres habitations lors des démolitions en site urbain, une attention particulière doit être portée aux nuisances.

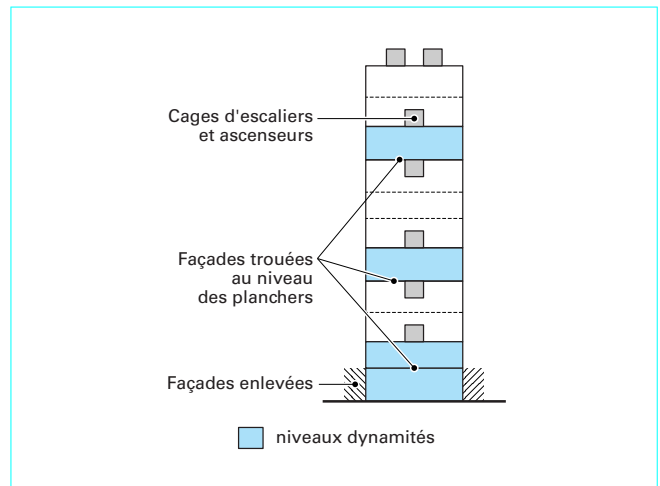


Figure 19 – Détails d'un foudroyage intégral

Les poussières déferlant après le tir ne concernent significativement qu'un périmètre de 200 m autour de l'édifice. Il est recommandé que les fenêtres des maisons riveraines soient fermées.

La surpression aérienne, onde de choc dans l'air, conditionne le niveau de la charge unitaire explosive (plus forte charge par retard). Elle reste généralement faible au-delà de 30 m.

Le bruit est le plus souvent mal ressenti. Il est fortement recommandé de prévenir la population du moment du tir, éventuellement par haut-parleur. Le bruit est généralement acceptable au-delà de 300 m.

Les risques de projections conduisent à installer des protections parfois onéreuses :

- grillages, plaques et toiles renforcées (*Dynastat*) en étage ;
- paille et grillage autour des piliers ;
- etc.

Les vibrations sont de trois ordres :

- celles liées à l'explosion des charges sont très faibles ;
- celles liées à la mise en résonance des bâtiments voisins sous l'effet de la surpression aérienne sont de forte amplitude et de haute fréquence ;
- celles dues à la chute du bâtiment sont de très forte amplitude et de faible fréquence.

2.3.8 Tirs spéciaux

L'explosif est également utilisé dans certains travaux spéciaux comme les trous à poteaux, le découpage de tuyaux. Ces derniers sont réalisés en enroulant du cordeau détonant autour du tuyau à ciel ouvert ou par des charges (quelques dizaines de mètres de hauteur) recouvrant la ou les veines de charbon, sont projetés par les charges explosives vers un tas de stériles ou « spoil » situé à une centaine de mètres. Une grande partie des matériaux de découverte, jusqu'à 60 %, se retrouvent sur le tas de stériles, le reste s'étend jusqu'à la zone d'extraction. Le déblaiement et le transport des

Des techniques de déplacement de matériaux (utilisant essentiellement l'impulsion de l'explosif) ont été développées dans le cadre de la réalisation de canaux ou de tranchées. Elles permettent de déblayer en partie la tranchée et de remblayer les rives. Ces techniques connues sous le nom de « **casting** » aux États-Unis, sont très utilisées dans le cadre des exploitations de charbon à ciel ouvert. Les matériaux de découvertes (quelques dizaines de mètres de hauteur) recouvrant la ou les veines de charbon, sont projetés par les charges explosives vers un tas de stériles ou « spoil » situé à une centaine de mètres. Une grande partie des matériaux de découverte, jusqu'à 60 %, se retrouvent sur le tas de stériles, le reste s'étend jusqu'à la zone d'extraction. Le déblaiement et le transport des

matériaux qui restent sur la veine de charbon sont réalisés par des moyens conventionnels.

Enfin, des essais fructueux de compactage dynamique à l'explosif ont été réalisés.

Ces utilisations spéciales, parfois prometteuses pour l'avenir, demeurent très marginales.

3. Problèmes de sécurité de l'environnement

3.1 Réglementation

L'acquisition, le transport, le stockage et l'utilisation des explosifs sont réglementés par un grand nombre de lois, décrets, arrêtés émanant de différents ministères [Doc. C 5 420].

Malgré une refonte et une clarification des textes, cette réglementation reste complexe.

3.1.1 Acquisition

Pour pouvoir obtenir des explosifs auprès d'un distributeur ou d'un fabricant, il faut détenir :

— soit un **certificat d'acquisition** délivré par l'autorité préfectorale aux titulaires :

- d'une autorisation préfectorale d'exploiter un dépôt fixe ou mobile,
- d'un justificatif assurant que le détenteur peut utiliser le dépôt d'un tiers agréé par l'administration,
- d'une autorisation préfectorale à utiliser des produits explosifs en quantité supérieure à 25 kg ;

— soit un **bon de commande rédigé par le demandeur**, visé par les autorités de police ou de gendarmerie du lieu d'emploi. Ce bon est valable 3 mois et sert de bon d'accompagnement pour le transport des explosifs. Une personne physique ne peut obtenir que 2 bons de commande par an.

3.1.2 Transport en circulation

Toute personne qui transporte des explosifs doit avoir obtenu auparavant une autorisation de transport du Préfet de son domicile ou du siège social. Les détenteurs d'un certificat d'acquisition ou d'un bon de commande sont dispensés de cette autorisation pour le transport des explosifs correspondant à leur certificat d'acquisition ou bon de commande.

Tout transport d'explosifs nécessite un document identifiant parfaitement les produits :

- un titre d'accompagnement en 3 exemplaires indique la nature, le numéro d'agrément, les types d'emballage, la masse unitaire, la quantité et le numéro d'identification des produits (un des exemplaires est destiné au Préfet qui a établi le titre d'acquisition, le deuxième au transporteur et le troisième à l'expéditeur) ;
- une inscription sur le registre d'accompagnement du véhicule.

Les véhicules doivent être spécialement équipés, et le chauffeur, assisté d'un convoyeur, doit justifier d'une formation adaptée.

3.1.3 Stockage

Toute personne qui stocke des explosifs en vue de les utiliser doit y avoir été autorisée par arrêté préfectoral. Elle doit donc justifier

d'une autorisation d'exploiter un dépôt permanent (de 1^{re}, 2^e ou 3^e catégorie) ou un dépôt mobile (véhicule spécialement adapté).

Des mesures d'ordre général, concernant plus particulièrement la surveillance contre le vol, doivent être appliquées, ces dernières étant très contraignantes dans certaines régions.

3.1.4 Utilisation

Tout utilisateur doit détenir un registre de réception et de consommation d'explosifs précisant les numéros d'identification des produits. En cas d'utilisation à réception, tous les produits livrés doivent être consommés dans la période journalière d'activité ou repris par le fournisseur.

La personne physique responsable de la garde ou de la mise en œuvre des explosifs doit être habilitée par la préfecture. Par ailleurs, la personne physique qui met en œuvre les explosifs doit justifier d'une formation spécifique et être titulaire du certificat de préposé au tir.

Dans le cas d'un vol, il faut prévenir les services de police ou la gendarmerie dans les 24 h sous peine d'amende et d'emprisonnement.

3.1.5 Sécurité

Un effort important a été réalisé pour rendre la réglementation des travaux publics cohérente avec les évolutions techniques et la réglementation des carrières.

Dans les entreprises qui utilisent l'explosif, le chef d'établissement, ou son préposé doit :

- fournir à son personnel des produits explosifs et du matériel agréé ;
- faire une déclaration d'ouverture de chantier auprès de l'Organisme Professionnel de Prévention du Bâtiment et des Travaux Publics (OPPBT), en informer le Comité d'Hygiène, de Sécurité et des Conditions de Travail (CHSCT) ou à défaut les délégués du personnel ;
- rédiger des fiches de prescriptions, distribuées et commentées au personnel intéressé, concernant le transport, le stockage, la distribution des produits explosifs, le chargement et l'amorçage des trous de mine, les mesures à prendre avant le tir, le retour au chantier et le traitement des ratés, etc. ;
- établir les plans de tir ;
- délivrer les permis de tirs aux détenteurs d'un certificat de préposé au tir, d'une habilitation du Commissaire de la République, d'une pratique suffisante sous l'autorité d'un chef mineur confirmé.

L'utilisation d'explosifs peut être réalisée sans problèmes particuliers de sécurité si un certain nombre de règles élémentaires et simples sont appliquées et portées systématiquement à la connaissance des personnels sur des consignes de sécurité énoncées ci-après.

- Il faut prendre toutes les dispositions pour éviter d'exposer les produits explosifs aux chocs, à la chaleur et à la friction ; cela est particulièrement vrai pour les dynamites et les détonateurs.
- Il est interdit de fumer dans les dépôts, lors du transport ou de la manipulation d'explosifs.
- Sur les chantiers, le transport du personnel et des produits explosifs doit être fait dans des véhicules séparés : le véhicule transportant les explosifs doit être facilement identifiable et être équipé d'extincteurs.
- Un plan de tir précis, indiquant la position et la longueur des forages, la nature et la quantité d'explosifs à y introduire ainsi que la nature et la position des systèmes d'amorçage, doit être réalisé par écrit et transmis au personnel qui met en œuvre le tir.

■ Dans le cas d'un tir en gradin, une observation préalable de la morphologie du front d'abattage doit être conduite pour adapter le chargement des explosifs aux variations possibles de l'épaisseur de roche à abattre.

■ Lorsque l'on utilise des détonateurs électriques, il faut s'assurer qu'ils ne peuvent pas être amorcés d'une façon intempestive par la présence de courants vagabonds, de courants induits dus à la proximité d'une ligne à haute tension ou d'un émetteur d'ondes électromagnétiques ou, tout simplement, par l'arrivée d'un orage. Dans certains cas, l'utilisation de détonateurs haute ou très haute intensité permet d'améliorer la sécurité.

■ N'effectuer le branchement des détonateurs entre eux et à la ligne de tir qu'au dernier moment, lorsque la totalité des trous est chargée et bourrée.

■ Lors d'un tir électrique, avant la mise à feu à l'aide d'un explosif, toujours contrôler la résistance du circuit à l'aide d'un ohmmètre, de façon à la comparer à celle obtenue par le calcul et à pouvoir ainsi détecter une éventuelle anomalie et y remédier (il peut s'agir d'une erreur de branchement des détonateurs entre eux, d'une perte de charge au niveau des épissures si elles sont en contact avec le sol, d'un défaut d'isolement de la ligne de tir, etc.).

■ Lorsque l'on utilise du cordeau détonant, il est indispensable de veiller à ce que des cordeaux ne se croisent pas en étant au contact l'un de l'autre ; en effet, dans ce cas, la détonation du premier sectionne l'autre sans automatiquement l'amorcer.

■ Lorsque l'on utilise des détonateurs électroniques, il faut s'assurer que leur fonctionnement ne peut pas être perturbé par la présence de courants induits dus à la proximité d'un émetteur d'ondes électromagnétiques ou, tout simplement par superposition des lignes bus.

■ Au cours du chargement, vérifier la progression de la hauteur de l'explosif dans le trou, de façon à déceler rapidement une éventuelle faille ou caverne dans laquelle s'accumulerait l'explosif qui provoquerait alors des projections dangereuses.

■ Avant le tir, le responsable doit faire évacuer la totalité de la zone environnante qu'il juge dangereuse. Des sentinelles doivent être postées suffisamment loin à tous les points d'accès de la zone dangereuse. Un ou plusieurs signaux sonores connus de tout le personnel doivent précéder la mise à feu.

■ Après le tir proprement dit, le préposé doit effectuer une reconnaissance minutieuse de façon à pouvoir déceler un éventuel raté partiel et la présence d'éléments explosifs qui ne seraient pas détruits, soit à l'intérieur des déblais, soit à l'intérieur d'un trou de mine qui n'a pas détoné. Tout raté doit être traité avec circonspection.

Les principales modifications de la réglementation en vigueur concernent :

- l'interdiction d'utiliser la poudre noire et l'oxygène liquide ;
- la limitation de l'utilisation de la mèche lente ;
- l'autorisation d'utiliser l'amorçage ponctuel en fond de trou dans le cas des mines de plus de 6 m ;
- la détermination précise des conditions de foration et de chargement des trous de mine simultanés ;
- le traitement des ratés par débouillage (préférable aux mines de remplacement).

3.2 Nuisances

L'énergie, inutilisée des explosifs pour la fragmentation et le déplacement, est libérée dans l'environnement. Elle est responsable de nuisances (bruit, vibrations et projections) qu'il est presque toujours possible de ramener à un niveau acceptable.

■ Une explosion dans l'air génère une **surpression aérienne** (souvent appelée **souffle à faible distance**). Cette dernière, qui peut atteindre plusieurs centaines de bars au contact de l'explosif, s'amortit très vite avec la distance à la charge selon la loi suivante :

$$P = K \left[\frac{d}{Q^{1/3}} \right]^{-1,2} \quad (12)$$

avec P (Pa) surpression,
 K constante de site,
 d (m) distance de la charge,
 Q (kg) charge unitaire.

La surpression aérienne peut avoir des conséquences néfastes sur les personnes et les biens. Signalons par exemple une probabilité significative de rupture de vitres pour une surpression supérieure à 133 dB soit 0,5 Pa.

Une circulaire de 1996 du Ministère de l'Environnement recommande de limiter la surpression aérienne à 125 dBI.

Dans les conditions habituelles d'utilisation, la charge étant confinée, les seules sources importantes de surpression aérienne sont le débouillage prématuré et la détonation de cordeau détonant en surface. Cet effet peut être supprimé en utilisant un amorçage *Nonel* ou électrique en fond de trou.

■ La détonation d'une charge confinée produit dans la roche une **onde de vibrations**, due à l'onde de choc non utilisée pour une grande part. Cette onde se transmet de proche en proche aux habitations et autres types de constructions, et est susceptible de créer une fissuration des ouvrages.

Le risque de fissuration est d'autant plus grand que la fréquence des vibrations est proche de la résonance de l'ouvrage étudié.

L'arrêté du 22/9/1994 du Ministère de l'Environnement définit les limites applicables, pour les mines et les carrières, dans les constructions accueillant des personnes.

Selon cet arrêté, les signaux vibratoires pondérés selon une méthode définie, ne doivent pas excéder 10 mm/s.

Ces limites réglementaires sont complétées par des recommandations dans d'autres domaines. Citons en particulier celles du GFEE (Groupement Français de l'Énergie Explosive) et celles de l'AFTES (Association Française des Travaux Souterrains).

On montre que le niveau de vibration, exprimé par la vitesse particulaire, est lié à la charge maximale par retard utilisée dans le tir :

$$V = K \left[\frac{d}{Q^{1/2}} \right]^{-1,8} \quad (13)$$

avec V (mm/s) vitesse particulaire,
 K constante de site,
 d (m) distance de la charge,
 Q (kg) charge unitaire.

La limitation des vibrations passe donc par la limitation de la charge unitaire. Cela conduit à une réduction de la taille des tirs ou à des plans d'amorçage plus complexes utilisant le tir séquentiel, éventuellement l'amorçage par charges étagées.

Des enregistreurs existent sur le marché, permettant de surveiller les niveaux de vibrations, éventuellement selon la fréquence.

Les nuisances dues aux vibrations revêtent également un caractère psychologique. Elles peuvent donc être réduites par le biais d'une information préalable diffusée aux riverains concernés.

Des limites particulières doivent être mises en place pour les ouvrages en phase de construction pour tenir en compte de la sensibilité des bétons frais aux vibrations.

■ Des **projections** exceptionnelles intempestives peuvent intervenir chaque fois que la concentration de la charge est trop importante par rapport à la masse de matériau à mettre en mouvement :

- accumulation d'explosif dans une poche du massif ou devant une faille ouverte ;
- hauteur de bourrage insuffisante, etc.

Elles sont réduites en portant une attention plus particulière au chargement des explosifs, aux défauts structuraux du massif et, lors de l'étude, par une définition correcte du plan de tir.

Des matériels ont été développés pour permettre un contrôle de la géométrie des fronts de taille et limiter les risques de projections :

- des « **profileurs de front** » qui fonctionnent à partir de distance-mètre laser et d'une mesure de l'angle vertical de mesure. Ces appareils permettent de réaliser un profil détaillé du front (dans lequel il est possible d'inscrire les forages prévisionnels) et de déterminer les épaisseurs de roche au droit des charges explosives ;
- des **sondes** qui déterminent l'épaisseur de roche à partir de l'affaiblissement d'ondes électromagnétiques.

Lorsque les conditions d'environnement sont très sévères (milieu urbain), il est possible de se prémunir des projections accidentelles en recouvrant la zone de tir par des géotextiles, des bottes de paille, des treillis, etc.

4. Aspect économique

Le tir à l'explosif n'est pas le seul moyen d'extraction des roches dures : à ciel ouvert, le **brise-roche hydraulique** (BRH) ou le **ripper**, en souterrain, le **tunnelier** et la **machine à attaque ponctuelle**, peuvent être utilisés. Ces moyens mécaniques ne sont toutefois utilisables que si les matériaux rocheux présentent une abrasivité faible et une résistance mécanique modérée.

L'abattage prend une part prépondérante en travaux publics ou dans les exploitations à ciel ouvert, alors qu'il n'occupe dans le coût global d'un projet minier ou souterrain qu'une place marginale.

L'économie d'un chantier est directement liée aux contraintes de sécurité et d'environnement. Ces limites s'expriment en seuil de vibrations, de bruits, de surpression, ainsi qu'en niveaux de sécurité.

L'optimisation de la granulométrie d'un tir, par exemple, peut correspondre à une diminution de la marge de sécurité concernant la variabilité du massif exploité : elle peut donc mener très rapidement d'un gain économique à des arrêts d'exploitation pour un dépassement de seuil de vibration, ou une projection.

L'**optimisation des tirs** doit donc être réalisée parallèlement à un suivi de toute la chaîne de production, prenant en compte la foration, les produits explosifs et leur mise en œuvre, le suivi des vibrations et de la surpression, les modes et temps de chargement. Ces études portent également sur le concassage (granulométrie de sortie, temps d'arrêt, consommation énergétique,...) dans les exploitations de granulats et de ciments, sur le phasage du chantier en TP.

Cependant, l'optimisation d'un tir est encore très souvent fonction des matériels disponibles sur l'exploitation : granulométrie fine pour une petite ouverture de concasseur, tas étalé pour un enlèvement des matériaux au chargeur...

Dans tous les cas, l'**impact de l'abattage** sur l'efficacité des opérations en aval est important. Le minage agit notamment par le biais de la granulométrie, de l'étalement du tas, de son foisonnement, des valeurs de vibrations et surpression et des projections. Les paramètres du minage qui constituent les clefs de réglage de ces résultats sont les suivants :

- pour la granulométrie : le massif rocheux, la quantité d'énergie par m³ de roche, la maille, la géométrie du front d'exploitation, l'organisation des retards entre charges ;
- pour l'étalement : la quantité d'énergie par m³ de roche, l'épaisseur de la banquette, la hauteur de front, l'organisation des retards entre charges ;
- pour les vibrations : le massif rocheux, la quantité d'énergie au m³ de roche, la charge unitaire, l'organisation des retards entre charges ;
- pour la surpression : les paramètres des vibrations et le confinement ;
- pour les projections : les paramètres de vibrations, la géométrie du front d'exploitation, le confinement.

La granulométrie du matériau extrait intervient directement sur la facilité de pénétration du godet de l'engin de chargement, le taux de remplissage de ce godet et des engins de transport, et la durée de vie des pièces d'usure. Les blocs surdimensionnés nécessitent d'être repris par un autre traitement (brise-roche ou boule) qui augmente considérablement les prix d'extraction.

La forme du tas de déblais, avec le foisonnement, influe également fortement sur le rendement de l'engin de chargement.

Les études complètes du processus de production passent par la mesure fine de chacun des facteurs. Les techniques se sont développées : levés des fronts et des paramètres de tir par mesures laser et traitements informatiques, enregistreurs embarqués des paramètres des engins de forage et de minage, analyse d'image pour la définition de la granulométrie... Ces études réalisées au départ pour la compréhension des fonctionnements et traitées statistiquement se développent maintenant dans le cadre industriel grâce à des techniques d'optimisation comme les plans d'expérience. En outre, elles constituent un outil de maîtrise de la reproductibilité des résultats de production, et par là s'inscrivent dans le **processus de suivi qualité de l'entreprise**.

L'optimisation du minage, et au-delà, de toute la chaîne de production, s'appuie sur des connaissances techniques et technologiques de plus en plus approfondies. Aussi, la formation des personnels impliqués dans la conception, le contrôle et la mise en œuvre des opérations de minage à l'explosif, constitue-t-elle également un véritable enjeu économique pour les années à venir.