

De la conception à la mise à feu

Développement de la **gestion numérique** des tirs de mines

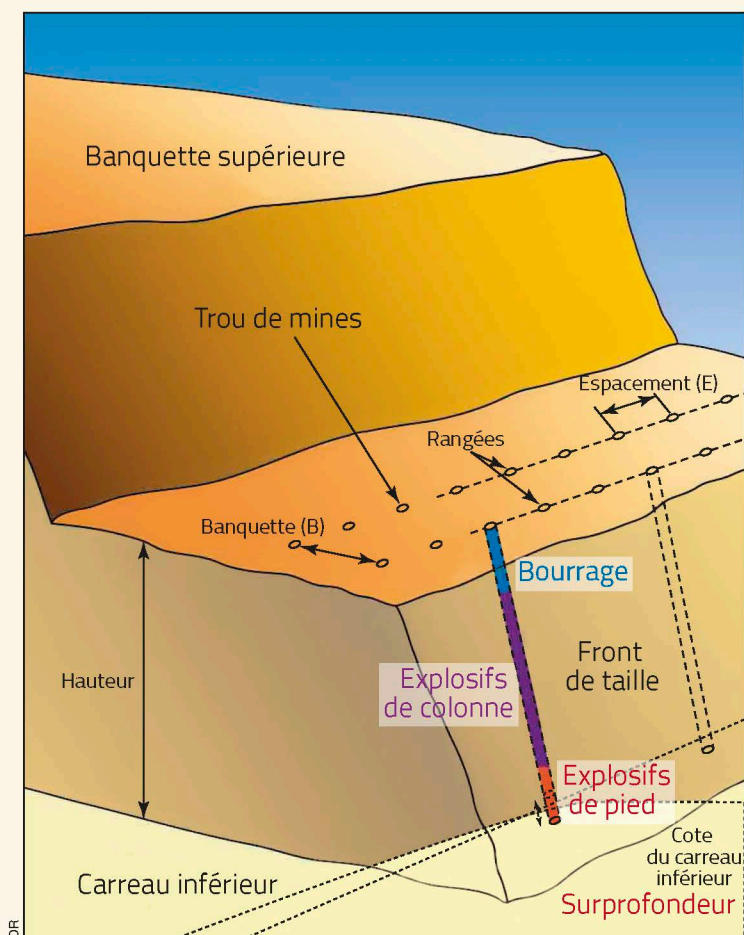
L'évolution technologique a fait migrer le minage vers le numérique d'un bout à l'autre de son processus. Chaque étape génère des données qui doivent être compatibles avec la suivante pour assurer une continuité dans l'optimisation du poste foration minage. Titanobel utilise des moyens matériels et logiciels qui sont articulés en plaçant des liens opérationnels de l'un à l'autre, qu'il s'agisse de la photogrammétrie par drone associée à un calage topographique, du relevé de front 3D, de l'implantation au sol, du contrôle des forages et du transfert des temps d'amorçage pour le plan de tir.

Par une évolution technologique constante, le minage a complètement migré vers le numérique d'un bout à l'autre de son procédé. Chaque étape de celui-ci peut désormais générer des données numériques qui doivent être compatibles avec l'étape suivante, assurant ainsi une continuité efficace dans l'optimisation du forage-minage. Dans le processus de minage, les moyens matériels et logiciels utilisés sont articulés grâce à des liens opérationnels de l'un à l'autre.

La conception initiale

Cette phase préparatoire s'appuie sur la connaissance du site, de son gisement géologique et sur l'expérience acquise lors des opérations précédentes de foration minage. Cette phase prend en compte les objectifs, les contraintes et les possibilités techniques identifiées. Un plan de tir est conçu en détaillant le dimensionnement du tir souhaité :

- plan et paramètres de foration (maille, diamètre, profondeur, cote à atteindre, hauteur de front, inclinaison...). Cet aspect est fondamental car il définit le volume du tir, la répartition et le dimensionnement des trous de mines ;
- plan de chargement ; il induit un choix dans le catalogue logiciel des types d'explosif au regard de leurs spécifications techniques, avec une prise en compte de la charge unitaire maximale pour la maîtrise des vibrations sismiques, des bourrages minimaux et maximaux à respecter pour bien gérer la blocométrie et le risque de projections ;
- plan d'amorçage ; il comprend la définition du type d'amorçage, avec le nombre de détonateurs par trou, le choix du type de détonateur, le choix des séquences de tir entre les trous et les rangées.



Terminologies employées pour un tir.

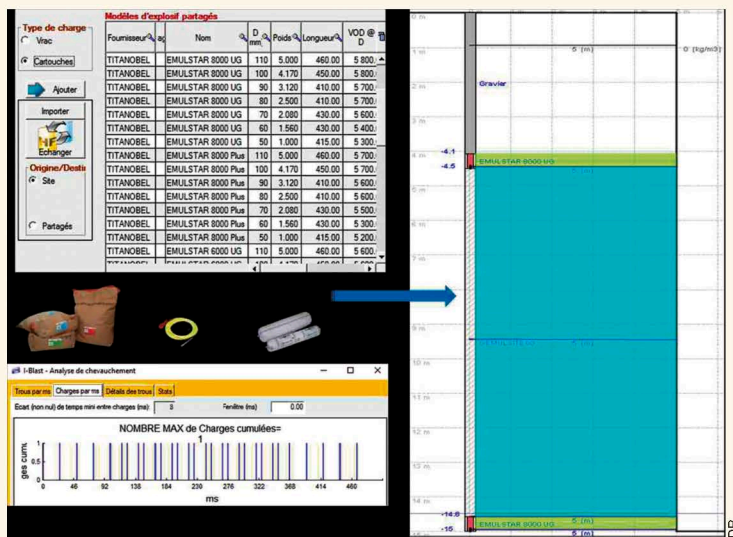


Schéma du chargement de l'explosif, avec contrôle de la charge unitaire et un tableau des explosifs.

L'usage de logiciels permet une préparation puissante, performante et facilitée pour le concepteur, avec des plans de chargement et d'amorçage (calculs de volumes, de quantités, de charges unitaires, etc.), une modélisation théorique des niveaux vibratoires sol-diens et aériens, une modélisation de la blocométrie et une modélisation des risques de projection.

L'implantation

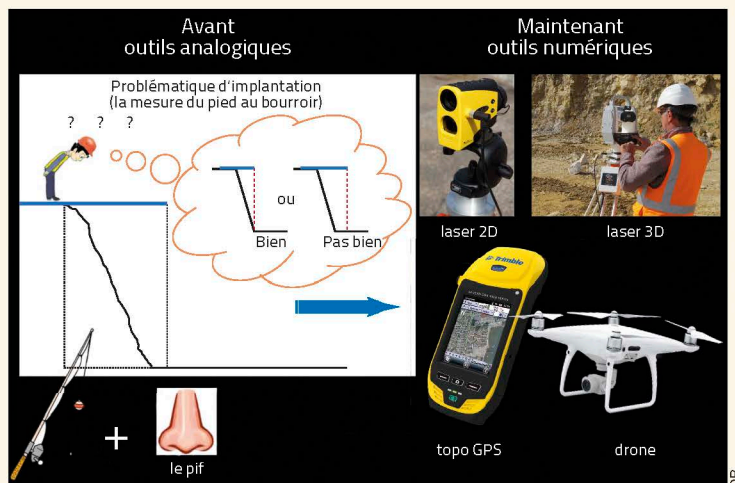
La préparation du tir de mines commence par l'observation du terrain et la mesure très complète de sa géométrie. Avant l'arrivée des profileurs laser, la méthode la plus efficace était "la canne à pêche", une méthode cependant très analogique et dépendante de la capacité d'évaluation précise du mineur, à partir du pied de son front de taille.

Avec les profileurs laser, il est possible d'utiliser un balayage laser pour constituer un relevé du front de taille (2D ou 3D), parfois en parallèle de quelques photos pour avoir le contexte de la géologie et de la fracturation en particulier.

Les limites des profileurs laser sont soit :

- un profil vertical dans l'axe du trou en 2D avec une quinzaine de points pour un front moyen de 15 m, c'est-à-dire environ quelques centaines de points pour un front complet ;

Évolution des outils, de l'analogique au numérique.



- un maillage plus ou moins large en laser 3D. Le volume de données monte à quelques milliers de points pour un front complet. La définition du maillage du front de taille est de l'ordre de quelques dizaines de centimètres ;

Dans les deux cas, il est rare d'avoir l'intégralité de la géométrie du tir, c'est-à-dire avec les banquettes inférieure et supérieure encadrant le front de taille.

Dorénavant, la photogrammétrie par drone, associée à un calage topographique précis, permet d'aller beaucoup plus loin en relevant le niveau d'exigence grâce à une analyse 3D très fine.

La photogrammétrie nécessite un travail d'intégration des photos aériennes et des données topographiques prises sur le terrain pour constituer des fichiers numériques de nuages de points géoréférencés.

Non seulement le relevé des paramètres de terrain est maintenant techniquement plus précis car plus détaillé, mais le rendu visuel est très pédagogique, contextuel avec l'environnement immédiat présent autour du futur tir de mines.

Le relevé photo 3D mémorise également les informations géologiques visibles sur le front (orientation des fracturations, stratification, différences lithologiques, présence de terre, etc.). La communication est ainsi facilitée en interne et avec l'exploitant pour s'inscrire dans son propre procédé, mais aussi dans certains cas auprès de riverains ou de services de l'État.

Les informations numériques sont ensuite intégrées dans un logiciel de minage comme Iblast (TBT) et utilisées pour la réalisation des plans de forage et de tir prévisionnels (volume précis, énergie, poids d'explosif au m³, etc.).

La numérisation très précise de la géométrie apporte au concepteur le moyen d'optimiser au maximum les paramètres de tir pour maîtriser au mieux à la fois la sécurité et les résultats du tir, en particulier la blocométrie et le coût global du poste foration-minage.

Grâce aux relevés de terrain obtenus et renseignés dans le logiciel de minage, le plan de foration est optimisé avec des informations encore plus précises, toujours pour valider les critères de sécurité et de performance.



Nuage de points en 3D et profils critiques sur la première rangée de forage.

L'étape de foration

Désormais un fichier numérique du plan de foration peut être édité pour une lecture directe par la foreuse. Ce fichier texte est au format XML Iredes, dont les caractéristiques ont été définies et standardisées par les fabricants de foreuses. Le fichier donne les coordonnées en XYZ de surface et de fond (cote à atteindre) pour chaque trou indexé dans le plan de foration. Ces informations topographiques, en plus de la position précise de la tête d'outil, permettent de calculer l'inclinaison et l'azimut nécessaires pour chaque trou et donc l'orientation précise de la flèche.

Le fichier est soit intégré physiquement dans la foreuse au moyen d'une clé USB ou par une prestation élargie du fabricant via le Cloud qui transmet les informations à la foreuse depuis le bureau du concepteur.

La topographie s'est considérablement démocratisée. Depuis longtemps les GPS sont en place, mais on les trouve désormais sur les foreuses, ce qui permet, en temps réel et avec une précision centimétrique, de positionner les trous et les angles des forages selon un plan de foration numérique préétabli.

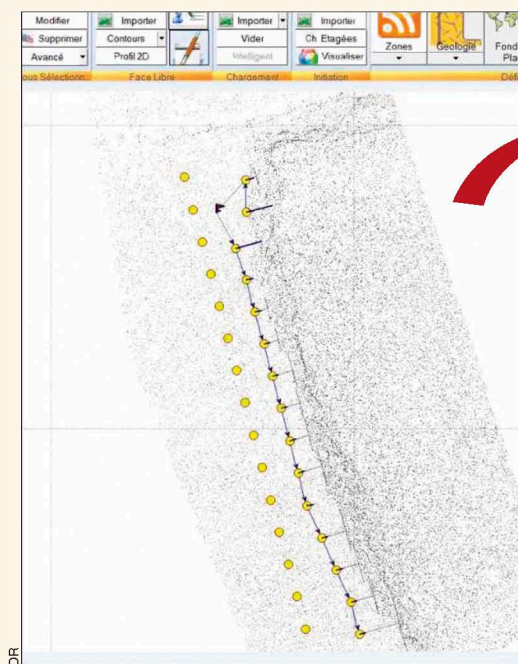
La gestion du positionnement en temps réel nécessite :

- soit une bonne couverture GSM pour la foreuse sur la zone de tir ;
- soit une station de calage topographique présente sur le site et qui permettra de relayer à la foreuse les corrections de calcul nécessaires liées à la rotation de la Terre.

Actuellement, le moyen de connaître précisément la géométrie d'un tir, et donc l'implantation la plus aboutie, est la photogrammétrie par le couple constitué du drone et de la topo GPS.

Contrôle et suivi des paramètres de foration

Lors de la foration, les informations suivantes sont contrôlées et enregistrées : vitesse d'avancement, pres-



Transfert
des caractéristiques de foration
Fichier IREDES

Clé USB
ou transfert cloud



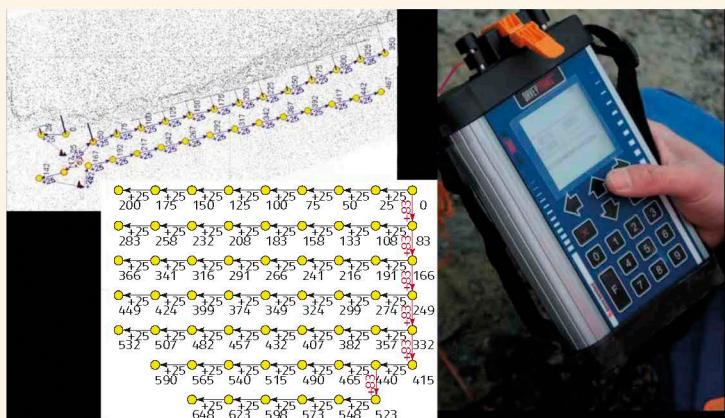
```
<Hole>
  <HoleId> 2</HoleId>
  <HoleName> R00 H0007</HoleName>
  <StartPoint>
    <IR.PointX>402693.577</IR.PointX>
    <IR.PointY>212457.365</IR.PointY>
    <IR.PointZ>61.172</IR.PointZ>
  </StartPoint>
  <EndPoint>
    <IR.PointX>402697.038626</IR.PointX>
    <IR.PointY>212458.9791827</IR.PointY>
    <IR.PointZ>43.80000030749</IR.PointZ>
  </EndPoint>
  <DrillBitDia>125</DrillBitDia>
  <MwdOn>0</MwdOn>
</Hole>
<Hole>
  <HoleId> 3</HoleId>
  <HoleName> R00 H0006</HoleName>
  <StartPoint>
    <IR.PointX>402696.022</IR.PointX>
    <IR.PointY>212452.758</IR.PointY>
    <IR.PointZ>61.155</IR.PointZ>
  </StartPoint>
  <EndPoint>
    <IR.PointX>402698.5413732</IR.PointX>
    <IR.PointY>212453.932803</IR.PointY>
    <IR.PointZ>43.80000003909</IR.PointZ>
  </EndPoint>
  <DrillBitDia>125</DrillBitDia>
  <MwdOn>0</MwdOn>
</Hole>
```

Migration du plan de foration vers les foreuses (fichier XML Iredes).



L'écran de contrôle d'une foreuse.

Transfert d'un plan d'amorçage Iblast vers une console Daveytronic.



sion de l'outil, profondeur, inclinaison... Les fabricants et des fournisseurs d'équipement indépendants proposent des solutions d'enregistrement des paramètres de foration, permettant d'effectuer un compte rendu numérique de foration.

Il est possible de contrôler la qualité de forage selon deux modes :

- 1 *pendant la foration*, et directement grâce à un équipement intégré à la foreuse et un suivi par écrans de contrôle dans la cabine (vitesse d'avancement, profondeur, etc.) ;
- 2 *après la foration*, par des sondes de type Boretrack ou Devialim pour les mesures.

La première méthode est la plus pertinente, car elle permet à l'opérateur d'avoir l'information immédiatement avec la possibilité de corriger lors de la prestation. L'optimisation est alors bien sûr source d'économies. Inversement, le contrôle après la foration est davantage dans le constat. L'adaptation se fait alors au niveau du chargement de l'explosif lorsque la sécurité notamment est en jeu avec des risques de projection.

Contrôle de la foration et optimisation

L'analyse des données de foration permet de mieux connaître un gisement et de s'y adapter, en particulier en milieu très fracturé et hétérogène. Cette connaissance sert à optimiser le chargement d'explosif par l'énergie dans le massif. On sécurise alors au maximum les risques de projection en connaissant les points de faiblesse dans l'épaisseur de la banquette du tir.

Parallèlement, on aura des informations précieuses pour l'analyse de la blocométrie du tir. La passerelle est alors possible pour alimenter des modèles géologiques informatiques couplés à des analyses éventuelles des cuttings de foration.

Le tir

Le plan d'amorçage numérique est transféré du logiciel de conception vers la console de programmation. Dans la logique de l'optimisation complète d'un tir, des détonateurs électroniques sont employés pour garantir la précision des séquences définies et offrir toutes les possibilités de temps possibles pour optimiser le tir (vibration, blocométrie, coût...). Par ailleurs, en raison de leur conception, les détonateurs électroniques reçoivent une information de temps numérique qui correspond à leur temps de mise à feu. Dans le cas du Daveytronic, il est possible, en plus du plan d'amorçage Iblast, de transférer directement les séquences du plan de tir vers la console de programmation, les informations sont justes validées lors de la connexion du détonateur à programmer.

La mise à feu est réalisée à distance, par radio. Les systèmes de mise à feu et de contrôle à distance par radio sont en utilisation exponentielle (pour des tirs en détonateurs non électriques de type Robis ou électroniques de type Daveytronic). Le boute-feu peut désormais choisir de façon optimale son poste de tir pour sa sécurité et avoir un accès aux informations jusqu'à la mise à feu. Par ailleurs, dans le cas de l'électronique,

l'ensemble des informations liées à la programmation et à la procédure de mise à feu sont enregistrées dans la boîte noire du système, permettant une éventuelle analyse ultérieure.

Lors de la mise à feu du tir, un ensemble de données numériques sont collectées et sont ensuite disponibles pour analyse :

- *enregistrements de la vitesse de détonation des explosifs (mesure VOD)*. Ils servent à mesurer le comportement réel de l'explosif *in situ* dans le gisement lors du tir et dans le contexte des paramètres de foration utilisés (confinement de l'explosif, diamètre de foration, fracturation, banquette, etc.). Ces enregistrements permettent ensuite d'alimenter les bases de données des logiciels de minage sur le comportement de l'explosif dans des contextes particuliers. Les informations utilisées, qui sont alors beaucoup plus précises pour la conception des tirs suivants, permettant réellement d'affiner l'approche technique du plan de chargement en explosif ;

- *enregistrements photo et vidéo (mesure VOD P37)*. Ils mémorisent le comportement du tir grâce au ralenti et aux enregistrements en haute vitesse. Les analyses des éventuelles projections ou la tenue des bourrages finaux sont alors possibles. La prise de vue aérienne (drone) permet d'avoir le meilleur angle de vue pour parfaire l'analyse globale.

Par ailleurs, la photographie des fronts de taille avant le tir sauvegarde les informations géologiques, notamment pour la partie fracturation et hétérogénéité du gisement, ce qui pourra être corrélé avec les données des comptes rendus de foration. Après le tir, la numérisation de l'étalement du tas (en particulier par drone) permet une analyse blocométrique pertinente que l'exploitant saura pleinement utiliser pour l'optimisation de son processus de production via le forage minage ;

- *enregistrements sismiques*. Les vibrations sismiques et aériennes enregistrées par les sismographes lors des tirs permettent de mesurer la contrainte environnementale au niveau des points sensibles référencés. Au-delà du contrôle strictement réglementaire, les données mesurées permettent également d'alimenter la base de données du site d'exploitation en vue de conforter le comportement vibratoire lié au gisement géologique et aux conceptions des tirs. Les cartes prévisionnelles vibratoires et de surpression issues des travaux de modélisation sont les fruits d'une base de données fiable et riche en informations.

Analyse du tir

L'ensemble des enregistrements et des informations liés aux tirs de mines enrichit les bases de données à chaque historique de tir ou retour d'expérience. Désormais, des outils numériques puissants et pleinement efficaces existent. Ils occupent complètement l'espace technique du minage. S'ils ponctuent chaque étape du processus de forage-minage, il y a surtout une réelle nécessité de compatibilité entre étapes et dans l'ensemble du processus lui-même.



Mise à feu à distance par radio avec le système Daveytronic.

Les passages entre étapes et d'un système logiciel à un autre nécessitent d'assurer une compatibilité et donc une ouverture de la part des développeurs d'outils dans la transmission d'informations. Pour la grande majorité, c'est le cas, mais parfois les choses ne sont pas aussi évidentes. Il y a donc encore une nécessaire prise de conscience de l'ensemble des professions techniques liées au forage-minage de coopérer pleinement dans l'échange d'informations sur les outils pour favoriser le fonctionnement du processus de chaque exploitant.

Seuls les moyens ou les méthodes qui permettront la plus grande compatibilité et la meilleure efficacité seront les gagnants de l'évolution ou plutôt de la révolution numérique.

Les possibilités grandissantes des moyens mis à disposition des exploitants apportent une réelle montée en puissance dans leur travail. Cependant, ces moyens restent toujours des outils qui doivent apporter de l'information accessible et pertinente au concepteur. Dans tous les cas, l'expérience et la compétence de terrain du mineur restent indispensables quant à la bonne gestion de ces outils. ■

Jean-François Jaccard, directeur technique,
minage et services de Titanobel,

Sylvain Bouillet, ingénieur région ouest de Titanobel

