

## ***Chapitre 1. Les machines de forage et leurs modes de foration***

---

### **INTRODUCTION**

La technologie de forage et de perçage joue un rôle majeur dans l'industrie minière. En fait, il serait juste de dire que l'optimisation des paramètres de forage est une partie intégrante de la réussite économique ou l'échec de toute exploitation minière.

Les opérateurs et les fabricants ne cessent d'explorer les moyens de réduire les coûts et accroître la productivité en améliorant les taux de pénétration de forage et de diminuer l'usure de l'outil perforation.

La plus grande partie de ces coûts proportionnels au temps est liée aux travaux d'avancement ou en un mot aux différents facteurs qui conditionnent la vitesse de pénétration du forage. Ces facteurs sont appelés « paramètres de forage » dont la nomination est présentée ci-dessous :

- La nature de la formation, sa forabilité, sa tendance à dévier et son abrasivité ;
- Le type et paramètres de l'outil utilisé pour détériorer ces roches et les paramètres des trous forés ;
- Le poids et la vitesse de rotation donnée à l'outil ;
- Le mode de soufflage des trous.

On sait par expérience que le régime de forage est influencé par le poids, la vitesse de rotation, l'état d'usure de l'outil, les paramètres du trou foré et la nature de la formation forée.

### **I. Définition**

**Le forage est :**

-Première étape dans la chaîne des opérations pour traiter la roche en carrière. Cette chaîne inclut: le forage, le tir, le chargement, le transport, et le concassage.

-Le forage, c'est l'action de construire un trou de mine de forme cylindrique dans le massif par la destruction de la roche. Le forage est effectué au moyen d'outils spéciaux dont l'action peut être le cisaillement, la coupe et abrasion



-Le forage c'est l'action de creuser un trou de diamètre allant jusqu'à 75mm ou un sondage dont le diamètre est supérieur à 75mm, de forme cylindrique dans le massif par la destruction de la roche.

La technique de forage est applicable en différents domaines comme (figure 1):

<b>CLASSIFICATION DES FORAGES SELON LEUR FINALITE</b>	
<b>un FORAGE est :</b>	<b>Applications</b>
<b>un ouvrage d'exploitation d'une ressource</b>	<b>puits pétroliers - puits d'eau - forages géothermiques</b>
<b>un outil de reconnaissance (d'exploration) et d'échantillonnage</b>	<b>forages géotechniques forages environnementaux recherche d'extension de gisement (carrières) reconnaissance géologique profonde exploration minière et pétrolière</b>
<b>un moyen de contrôle de l'évolution d'un paramètre dans le temps</b>	<b>piézomètres, extensomètres, tassomètres, inclinomètres, ...</b>
<b>un laboratoire de tests in-situ permettant de quantifier un paramètre (géotechnique - hydrogéologie - environnement)</b>	<b>pressiomètres, dilatomètres, essais Lugeon, essais Lefranc, slug-tests, diagraphies électriques, géophysique en forage</b>
<b>une voie d'accès aux sols, au sous-sol, à la nappe aquifère</b>	<b>remédiation in-situ (forages environnementaux)</b>

**Figure 1.**classification des forages selon leur utilisation

**I.1. Processus de forage :**

L'exploitation rationnelle des machines de forage demande une connaissance profonde de la nature du terrain. La résolution de ce problème demande une analyse détaillée du processus de forage. Le processus de forage est l'ensemble des opérations qu'on doit exécuter pour forer un trou, tel que : vitesse de rotation et d'avancement, force axiale et soufflage donnée à l'outil de forage. La pénétration de l'outil dans la roche est soumise à certains paramètres tels que :

- Nature de la formation (dureté, abrasivité, humidité, etc....) ;
- Paramètres des travaux de tir (diamètre du trou, angle d'inclinaison, type et quantité d'explosifs, distance entre les trous) ;
- Paramètres de réglage (vitesse de rotation et poids exercé sur l'outil), ces paramètres sont limités par la puissance de commande et la hauteur des dents de l'outil ;
- Indices qui caractérisent l'organisation du travail (coefficient d'utilisation de la machine, temps de manœuvre) ;
- Paramètre de sortie caractérisant les résultats de ce processus (prix du mètre foré, prix de mètre cube des roches abattues, vitesse de pénétration).



## I.2. Classification des méthodes de forage.

Une classification des méthodes de forage peut être faite sur plusieurs bases. Celles-ci incluent la taille du trou, la méthode de support, et le type de puissance. L'arrangement qui semble le plus logique à utiliser, générique, est basé sur la forme d'attaque de roche ou le mode de l'application d'énergétique menant à la pénétration.

Puisque le forage occupe seulement une catégorie dans la classification, la pénétration de roche plus de limite est préféré pour toutes les méthodes de former un trou directionnel dans la roche plus générale. Par conséquent il est préférable de parler de la perforation de gicleur comme méthode de pénétration thermique plutôt que le perçage thermique. Le forage est réservé pour les systèmes mécaniques d'attaque.

La classification préconisée ici s'applique générale, à toutes sortes d'exploitation et entourer toutes les formes de pénétration de roche. Ainsi les machines utilisées pour le découpage aussi bien que le perçage sont incluses. Cette classification soutient de la ressemblance à une pour des méthodes de fragmentation de roche (telles que le soufflage et d'autres techniques en gros de rupture), puisque les principes sont identiques, et la rupture de roche est l'objectif commun (figure.2)

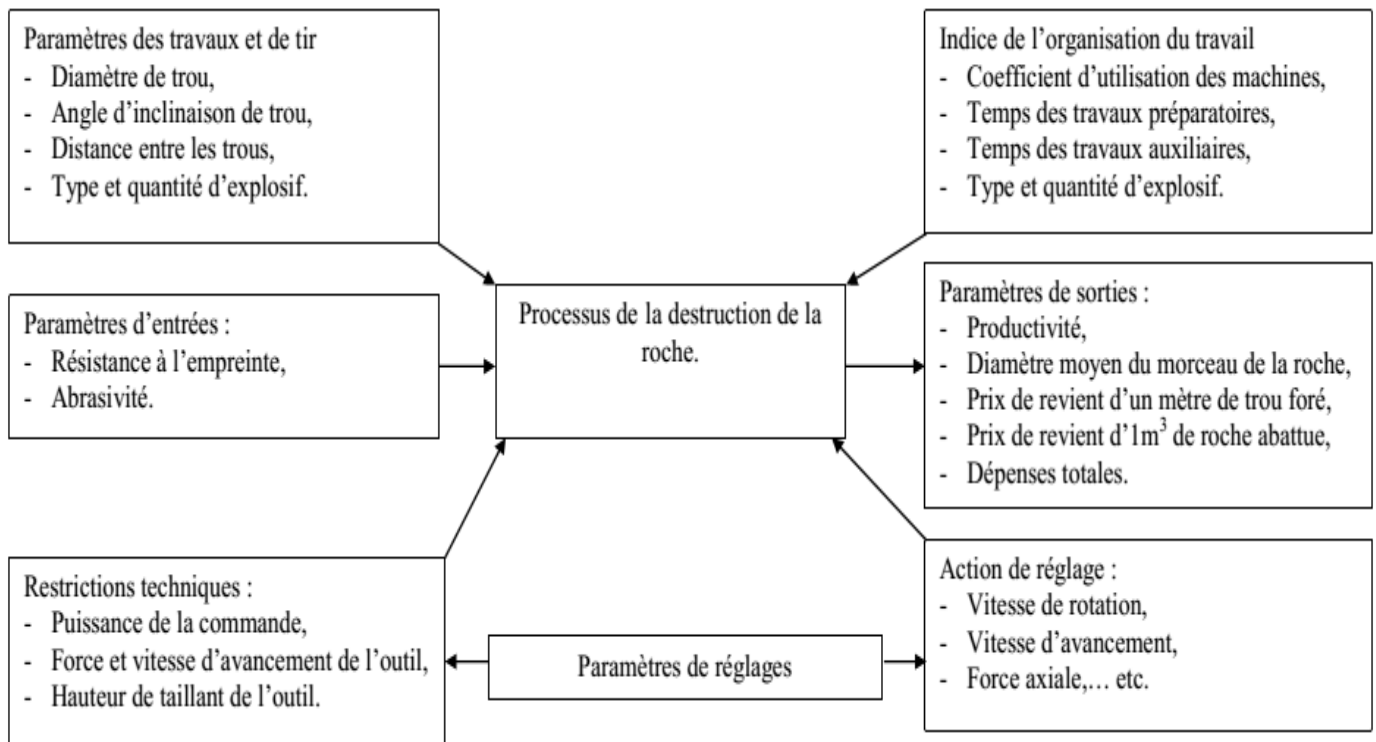


Figure 2. Schéma principal du processus de destruction de la roche par les machines de forage.



**I.3. Classification des machines de forage :** Les machines de forage utilisées pour le creusement des trous dans les carrières sont divisées en général en deux (2) groupes :

- Avec la destruction mécanique de la roche par l'outil spécial ;
- Avec la destruction physique de la roche.

Les machines du **premier groupe** qui sont à leur tour les plus répandues, peuvent être divisées d'après le caractère du travail de l'outil et l'application des charges. Ce sont les machines de forage rotatif, percutant et roto-percutant.

Et celles avec la **destruction physique** s'applique surtout pour le forage des trous dans les assises ayant de grande teneur en quartz, c'est pourquoi l'application de cette méthode dans les carrières de calcaire est très limitée.

#### **I. 4 Techniques de foration :**

Toutes les techniques de forage existant actuellement utilisent :

1- Un mouvement de rotation ; 2- Un mouvement d'avancement accompagné ou non d'un mouvement de percussion ; 3- Un soufflage d'air comprimé destiné à permettre la remontée des débris de foration (l'air comprimé peut, dans certains cas, être remplacé par une injection d'eau, de boue ou de mousse).

Les mouvements de rotation et de descente, ainsi que le soufflage d'air sont assurés par un train de tiges ou de tubes solidaires d'un outil (taillant, tricône, outil de coupe) situé à la base du trou.

La roto percussion nécessite l'utilisation d'un marteau (frappeur) situé soit en surface (hors du trou), soit entre le taillant et le train de tiges (fond de trou). A partir de là on distingue quatre techniques de foration :

- Foration par roto percussion avec marteau hors du trou ;
- Foration par roto percussion avec marteau fond de trou ;
- Foration par coupe rotative avec outil à lames ;
- Foration rotary avec outil tricône



#### **I.4.1. Foration par roto percussion avec marteau hors du trou :**

Les matériels roto percutants sont caractérisés par :

- La fréquence de frappe : 1000 à 4000 coups par minute ;
- L'énergie par coup ;
- La possibilité ou non de faire varier l'un ou l'autre de ces paramètres.

En règle générale, une faible énergie et une fréquence élevée donnent de bons résultats en terrains tendres, mais ne permettent pas toujours une foration correcte en terrains durs.

**I.4.2. Foration par roto percussion avec marteau fond de trou :** Cette méthode présente de nombreux avantages :

- Rectitude du trou, limitant les déviations et les risques de coincement par la présence du marteau immédiatement derrière le taillant ;
- L'énergie transmise au taillant est indépendante de la profondeur ;
- L'air de l'échappement est utilisé également pour le nettoyage du trou ;
- Rendement élevé.

#### **I.4.3. Foration par coupe rotative avec outil à lames :**

Le matériel utilisé doit assurer sur l'outil une pression élevée et transmettre un couple élevé si l'on veut obtenir une pénétration correcte. Le procédé est peu onéreux, mais il n'est utilisable qu'en roche peu abrasive et de résistance faible à moyenne.

#### **I.4.4. Foration rotary par outil tricône :**

Ce procédé est réservé à de très grosses exploitations ; il fait appel à de puissantes machines. L'outil utilisé comme broyeur permet de réaliser des trous à partir de 160 mm de diamètre.



### **I.5. Paramètres caractérisant l'engin de foration :**

Le matériel de foration à utiliser peut être caractérisé par :

- Le diamètre de foration : dans les travaux miniers d'abattage, le diamètre de foration varie de 45 à 152 mm ;
- La profondeur de foration : elle détermine la plage de diamètres utilisables, et peut, dans certains cas, imposer une technique de foration. Par exemple, les engins légers ne permettent que la foration à faible profondeur et en diamètre réduite. Un autre exemple peut être donné par l'imposition de la technique de foration avec marteau fond de trou pour les profondeurs importantes ;
- La quantité de matériaux à abattre : elle est directement liée au rythme de production, et définit les besoins en mètres forés en fonction des dimensions de la maille. Par exemple dans le cas d'une production importante, le choix peut se faire soit sur une machine puissante à haute performance, soit sur plusieurs machines moins importantes.

### **II. Choix du matériel de foration :**

Le matériel de foration est généralement choisi en fonction de :

- La forabilité de la roche, qui dépend de la nature de cette dernière et de ses caractéristiques (résistance à la compression et abrasivité) ;
- De la structure du massif : hétérogénéités et discontinuités ;
- Des caractéristiques d'exploitation : granulométrie recherchée, objectif de production;
- De l'environnement: présence d'habitations, vibrations, bruits, poussières.

Dans le tableau ci-dessous résume les paramètres des travaux de forage en fonction de dureté des roches et diamètre des trous à forer dans les carrières et mines à ciel ouvert avec les différentes sondeuses utilisées et leurs caractéristiques



**Tableau 1** : Choix de mode de forage en fonction de dureté et diamètre des trous.

Mode de forage	Machine de forage	Dureté des roches	Diamètre de trous (mm)	Profondeur de trous (m)
<b>Rotatif</b>	Sondeuse rotative à : -Outil coupant	$\leq 6$	110-160	30
	-Outil à molette	6-20	160-320	40
<b>percutant</b>	Equipement de forage avec perforateurs	6-20	40-85	20
	Sondeuses à battage	6-20	150-300	40
<b>Roto percutant</b>	Sondeuse avec percuteur pneumatique plongé au fond du trou	10-20	85-200	30
	Sondeuse avec percuteur pneumatique hors trous	8-20	50-125	30
	Sondeuse avec percuteur pneumatique à rotation indépendante	8-20	40-100	30

### **II.1 Indice de forabilité (If).**

La forabilité d'une roche exprime la facilité avec laquelle un outil de forage pénètre dans la roche. Elle dépend d'un certain nombre de paramètres, en particulier de la résistance, dureté et texture de la matrice rocheuse, et de son abrasivité. Certains essais, généralement utilisés dans les pays anglo-saxons, ont pour but de quantifier la forabilité. Il ne faut pas perdre de vue toutefois que la forabilité in situ dépend aussi de la densité de discontinuités.

Pour mesurer l'aptitude d'une roche au forage on effectue un test de laboratoire appelé (Drilling Rate Index) que l'on pourrait traduire par indice de forabilité, car il inclut à la fois des tests de friabilité, d'écrasement au choc, et d'abrasion, (arrachement de morceaux de roche à l'aide d'une lame à profil normalisé).



**II.1.1 Évaluation de l'indice de forabilité (DRI)**

L'indice de forabilité est déterminé par la formule suivante

$$D_f = 0,007 ( \sigma_{com} + \sigma_{cis} ) + 0,7\gamma \dots\dots\dots(1)$$

Où:

$\sigma_{com}$  : Résistance à la compression des roches :  $\sigma_{com} = 100 * f$  ; Kgf / cm<sup>2</sup>

$\sigma_{cis}$ : Résistance au cisaillement (déplacement)  $\sigma_{cis}$  (0,16-0,33) Kgf / cm<sup>2</sup>

$\gamma$  : Masse volumique de la roche en t/m<sup>3</sup> kg/dm<sup>3</sup>

Après calculer l'indice de forabilité on cherche dans tableau au-dessous quelle est le type de forabilité, leur classe et catégorie (tableau de classification de la forabilité des roches selon *V.RJEVESKI*).

**Tableau 2** .classification de la forabilité des roches.

<b>Types de forabilité</b>	<b>D<sub>f</sub></b>	<b>classes</b>	<b>catégories</b>
Forabilité très facile	≤05	<b>1</b>	1, 2, 3, 4, 5
Forabilité facile	5,1÷10	<b>2</b>	6, 7, 8, 9, 10
<b>Forabilité moyenne</b>	<b>10,1÷15,1</b>	<b>3</b>	<b>11, 12, 13, 14, 15</b>
Forabilité difficile	15,1÷20	<b>4</b>	16, 17, 18, 19, 20
Forabilité très difficile	20,1÷25	<b>5</b>	21, 22, 23, 24, 25

**II.1.2 Théorie de pénétration**

Puisque la grande majorité de la pénétration de roche dans l'extraction à ciel ouvert est effectuée par les systèmes mécaniques d'attaque, le reste de cette section est consacré presque entièrement au forage.

**II.2 Composants d'opération de système**

Il y a quatre principaux composants fonctionnels d'un système de forage (et de la plupart des autres systèmes de pénétration) :



1. Machine de forage (source d'énergie),
2. Tige de forage (émetteur d'énergie),
3. Outil de forage (applicateur d'énergie),
4. Fluide de circulation.

Ces composants sont liés à l'utilisation de l'énergie par le système de forage dans la roche d'attaque des manières suivantes :

1. La machine de forage, convertissant l'énergie de sa commande de grille d'origine (fluide, électrique, pneumatique,
2. La tige transmet l'énergie du moteur ou l'outil de forage. (moteur à combustion) en énergie mécanique pour enclencher le système.
3. L'outil de forage (Le taillant) est l'application de l'énergie dans le système, attaquant la roche mécaniquement pour réaliser la pénétration.
4. Le fluide nettoie le trou, refroidissent le taillant, et stabilisent parfois le trou.

Dans les machines de forage commerciales, l'attention s'est concentrée dans une certaine mesure sur la réduction de déperditions d'énergie par transmission. Ceci a mené à l'introduction des exercices de fond de trou (dans le trou), de la grande variété de percussion et du type rotatif de trépan à molettes (électro et turbine), bien que ce dernier ait trouvé l'application principalement dans le sondage de puits de pétrole. Ils remplacent la transmission d'énergie mécanique par la transmission liquide ou électrique, qui a habituellement comme conséquence plus d'énergie atteignant le taillant et le forage plus rapide.

### **II.3 Mécanismes de pénétration**

Il y a seulement deux manières de base d'attaquer la roche mécaniquement par la percussion et la rotation. C'est l'interaction de taillant/roche qui régit l'efficacité du transfert d'énergie et la nature du processus de rupture.

Entraînant la roche se casser pendant le forage est une question d'appliquer la suffisamment de force avec un outil pour dépasser la force de la roche. Cette résistance à la pénétration de la roche se nomme force de forage.



De plus, le champ de contrainte créé par l'outil doit être ainsi dirigé quant à la pénétration de produit sous forme de trou et de la taille désirée. Ces efforts sont quasi- statiques en nature, parce que des forces sont appliquées lentement dans le processus de forage. La force d'inertie, l'onde de contrainte induite, et le taux de charger des effets dans le forage de roche ont été démontrés pour être négligeables.

Les différentes manières dont les exercices de percussion, rotary, et de combinaison attaquent la roche sont comparées dans la figure 3.

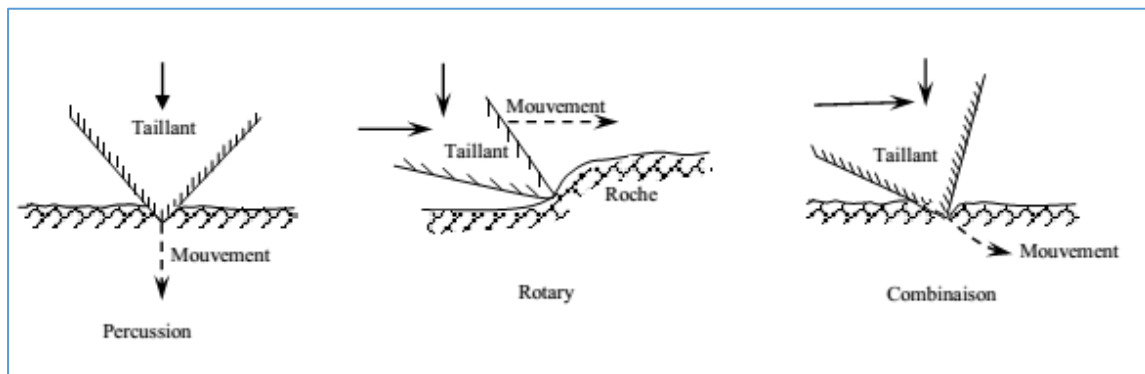


Figure 3. Différent types d'action de forage dans l'attaque mécanique des roches.

### II.3.1 Forage à percussion.

L'applicateur dans un forage à percussion est un outil formé par bouton clouté ou de burin qui effectue la roche avec un marteau comme le coup. L'effort efficace en cassant les actes de roche essentiellement dans une direction axiale et d'une façon de palpitation.

La rotation permet au taillant d'heurter la roche dans une tache différente sur les coups consécutifs, un mécanisme appelé l'indexation de coup, qui forme des cratères contigus et finalement un trou dirigé dans la roche.

Le couple de rotation appliqué, cependant, n'est pas habituellement responsable d'aucune pénétration de la roche, puisqu'il est petit dans la grandeur et, avec la rotation de barre de fusil, est opératif entre les coups seulement. De même, la fonction unique de la poussée appliquée est de rester le taillant en contact avec la roche (figure 4).



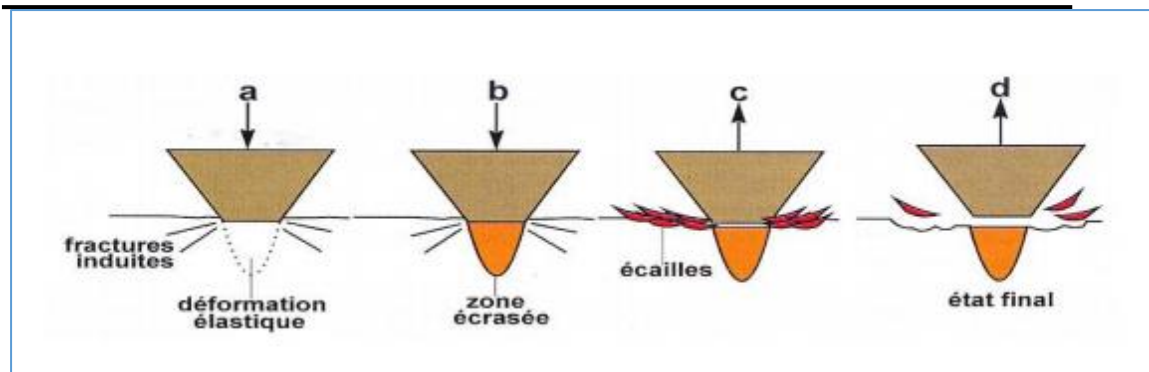


Figure 4. Mécanisme de la rupture par un outil à percussion

Au début du choc, la roche est comprimée élastiquement sous le taillant tandis qu'à distance se forment des fractures radiales (a). La roche comprimée sous le taillant s'écrase ensuite brusquement et se pulvérise (b).

Quand le taillant commence à rebondir, les parties périphériques se détachent en grandes écailles (c et d), il reste une surface rugueuse avec des coins de roche pulvérisés.

### II.3.2 Forage rotatif ou rotary coupante.

La planification ou l'action de forage rotary de trépan à lames est effectuée par une série d'outils, y compris la lame et les exercices de diamant comme la corde, la chaîne. Indépendamment des géométries du dispositif, l'action de dragage sur la surface de découpage est assurée par deux forces : pousser, une charge statique agissant normalement, et le couple, le composant de force tangentielle du moment de rotation agissant sur la surface de roche (figure 5).

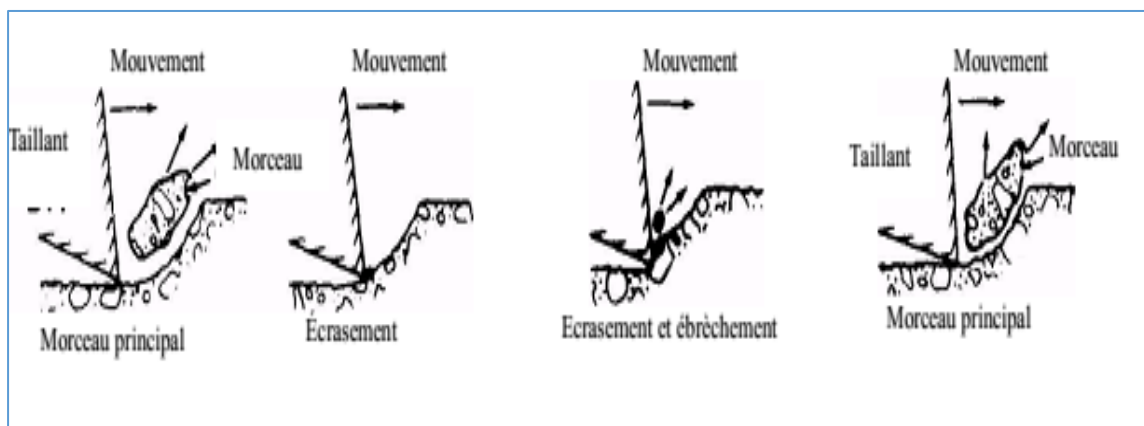


Figure 5. Mécanisme de la pénétration par un outil rotatif



Les paramètres principaux de la foration rotative sont les suivants (figure II.6) :

- Le soufflage : L'objectif du soufflage est d'évacuer les débris de foration ;
- La poussée : L'objectif de la poussée est de maintenir en permanence l'outil en contact avec la roche. Celle-ci sera déterminée empiriquement en fonction de la nature de la roche et du diamètre de foration. L'augmentation de la poussée se traduit par une augmentation de la vitesse jusqu'à une certaine limite au-delà de laquelle la vitesse diminue ;
- La rotation : Contrairement à la foration roto percutante, la relation de l'outil en forage rotatif a pour objectif la destruction de la roche. La vitesse de rotation décroît avec le diamètre de l'outil, et la vitesse de pénétration croît avec le diamètre de l'outil, et la vitesse de pénétration croît avec la vitesse de rotation.

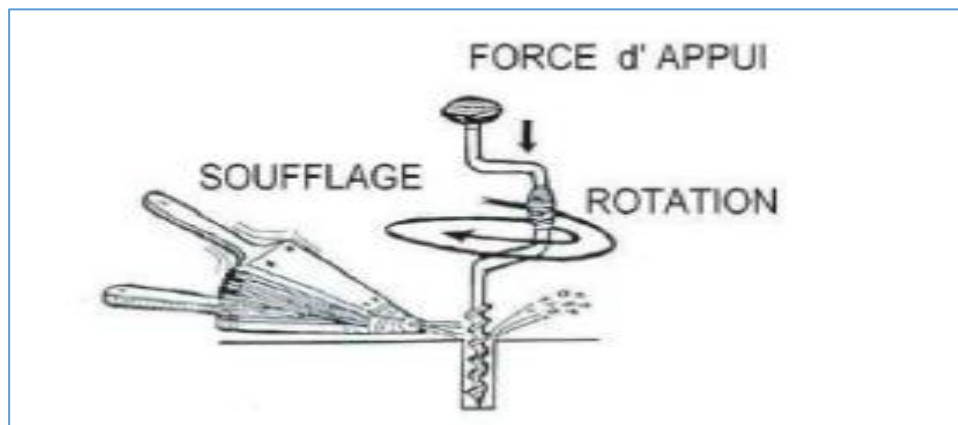


Figure 6. Paramètres principaux de la foration rotative.

### II.3.3 Qualité de la foration.

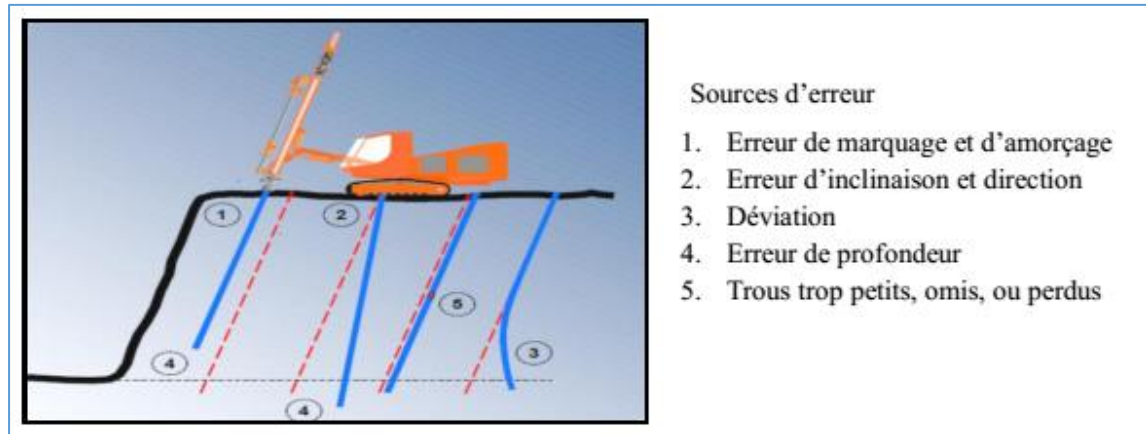
Pour des raisons économiques évidentes, le schéma de foration réel doit être parfaitement conforme au schéma prévu. La figure 7 présente les sources d'erreurs principales qui peuvent entraîner une différence plus ou moins importante entre les schémas théoriques et réels.

Les erreurs, d'implantation, d'amorçage et les trous omis sont des erreurs dues au Maître Mineur ou au foreur.

Les erreurs d'inclinaison, de direction et de profondeur peuvent être évitées avec les systèmes de mesures disponibles sur le marché. Autant les dispositifs de mesures d'angle tendent à devenir standards, autant les systèmes de mesures de la profondeur



par rapport à un plan de référence ne sont pas encore très développés malgré les économies qu'ils pourraient générer. Le fait d'obtenir des fonds de trous coplanaires permet d'avoir une banquette parfaitement plane et une meilleure venue du tir.



**Figure7.** Principales erreurs de foration.

L'analyse des travaux scientifiques réalisés dans le domaine du forage, nous a permis de dire que le mode de forage roto-percutant est le plus préférable dans les conditions des mines et carrières à ciel ouvert.

Donc, dans la suite, nous allons étudier les paramètres des sondeuses et régimes de fonctionnement des machines de forage roto-percutantes.

### **III. Détermination de Productivité des machines de forages (sondeuses):**

La production de la carrière est conditionnée par des engins de forage des roches contenant les minéraux utiles, car le forage représente la clé de la chaîne technologique de l'exploitation minière à ciel ouvert. Les engins de forage utilisés dans les carrières sont les sondeuses rotatives, percutantes et roto-percutante.

L'efficacité d'une machine minière peut être caractérisée par quelques paramètres parmi lesquels nous distinguons en premier lieu la productivité. La connaissance de cette dernière pour les machines de forage permet de savoir le volume de forage à réaliser, de faire le choix de la machine dans les conditions concrètes et de planifier la production de l'entreprise. Ce paramètre dépend de plusieurs facteurs qui pour les sondeuses roto-percutantes, peuvent être divisés en facteurs reflétant ;

- Les conditions d'exploitation (propriétés physico-mécaniques des roches, diamètre et profondeur des trous forés),



- La construction des machines en question (puissance des mécanismes d'avancement et de rotation du perceur, type de l'outil de forage).

En ceux qui caractérisent le degré de l'utilisation des sondeuses pendant le temps. C'est pourquoi il est nécessaire de distinguer la productivité théorique, technique et d'exploitation.

### **III.1 Productivité des sondeuses roto- percutantes**

#### **III.1.1 Méthode de détermination de productivité des sondeuses**

Jusqu'à présent, de nombreuses recherches ont été faites et ont permis d'aboutir à quelques méthodes de détermination de la productivité des sondeuses y compris celles roto percutantes, La plus répandue [4] est basée sur des suppositions suivantes :

- La productivité théorique correspond à la vitesse mécanique de forage,
- La productivité technique tient compte des pertes de temps qui sont liées à la réalisation des opérations auxiliaires ayant lieu lors du forage du trou, tout en tenant compte de la nécessité d'exercer les opérations préparatoires,

#### **III.2 Calcul la vitesse théorique de foration :**

$$V_f = h \cdot n_r \quad \text{m/heure..... (2)}$$

Où:

h:profondeur de pénétration de taillant dans les roches (cm)

$n_r$  : vitesse de rotation (tour/min) d'après les caractéristiques technique de sondeuse

#### **III.2.1 Calcule le rendement théorique d'exploitation de la sondeuse par poste**

$$R_{th} = V_f \cdot T_p K_u \quad \text{, m/poste..... (3)}$$

Où:

$T_p$  : durée d'un poste de travail de la sondeuse (h/p)

$K_u$  : coefficient d'utilisation de la sondeuse  $k_u=(0,7-0,9)$





la productivité des sondeuses. Comme dans le cas précédent, nous estimons qu'il est nécessaire de distinguer la productivité théorique, technique et d'exploitation et de calculer celle théorique de la façon suivante:

**III 3.3 La productivité théorique**

$$Q \text{ théo} = V_f, \text{ (m/min) } \dots\dots\dots (6)$$

**La productivité technique** doit tenir compte de l'influence de l'imperfection technique de la sondeuse envisagée sur sa productivité et s'exprime par la formule suivante ;

$$Q_{tech} = 60 \times Q_{théo} \times K_{tech}, \text{ (m/h) } \dots\dots\dots (7)$$

Où:

$K_{tech}$  : Coefficient de l'imperfection technique de la sondeuse,

$$K_{tech} = \frac{T_f}{T_f + T_{aux}}, \dots\dots\dots (8)$$

$T_f$ : Temps de travail productif de la sondeuse pendant un cycle, (min)

$$T_f = \frac{L_{tr}}{V_f}, \text{ (min) } \dots\dots\dots (9)$$

Où :

$L_{tr}$  : longueur du trou foré, (m);

$$L_{tr} = (H_{gr} / \sin \beta) + L_s, \text{ (m) } \dots\dots\dots (10)$$

**Taux ':** la somme des pertes de temps à la réalisation des travaux auxiliaires aux temps d'arrêt de la sondeuse à cause de son imperfection.

$$T_{aux} = T_{man} + T_{al} + T_{d\grave{e}p} + T_{rep} + T_{rem}, \dots\dots\dots (11)$$

Où :

$T_{man}$ : temps de manipulation préliminaire avant le forage de chaque trou, (mn),

$T_{al}$  : temps d'allongement et de levage du train des tiges, (mn).

$T_{d\grave{e}p}$ : temps de déplacement de la sondeuse au nouveau trou,

$T_{rep}$  : temps de réparation de la sondeuse, (mn);

$T_{rem}$ : temps de remplacement de l'outil de forage, (mn).



