

Recherches sur la perforation thermique des roches

Rappel du procédé d'attaque des roches par le feu.
Essais et développement de la lance à oxygène et du chalumeau
en vue de leur emploi dans les mines métalliques.

Dipl.-Ing. R. HUEBNER, Gelsenkirchen.

Traduction résumée de « Zeitschrift für Erzbergbau und Metallhüttenwesen » de novembre et décembre 1951,
par L. DENOEL, Professeur émérite de l'Université, à Liège.

SAMENVATTING.

Na een kort overzicht van de huidige toestand, brengt de auteur verslag uit over de proeven die door hem uitgevoerd werden betreffende de thermische perforatie van de gesteenten.

Deze proeven hebben aangetoond dat het procédé met de zuurstoflans nog niet op punt gesteld is en niet aan te bevelen is in de mijnen. Voor wat betreft het procédé met branders, waarbij de nodige warmte geleverd wordt door een naakte vlam, heeft men integendeel door systematische proeven en verscheidene verbeteringen van de uitrusting, de mogelijkheid van een economische toepassing van het procédé op verschillende rotssoorten onder ogen kunnen nemen. Uit diepgaande proefnemingen is daarenboven gebleken dat men geen continue vlam moet gebruiken, zoals dit tot hertoe het geval was, maar dat men belang heeft te werken met een oscillerende, t. t. z. periodisch onderbroken, vlam. Met het gewone procédé gelukt men er niet in te boren in rotsen met laag siliciumgehalte of met betrekkelijk laag smeltpunt. Door het feit dat men het meest gunstige temperatuurregime kan kiezen voor iedere rotssoort, vermijdt men de vorming van siliciumglas, terwijl men tevens in grote mate de verbrijzeling van het gesteente in kleine deeltjes begunstigt.

RESUME.

Après une courte rétrospective, l'auteur rapporte les essais qu'il a effectués sur la perforation thermique des roches.

Ces essais ont montré que le procédé de la lance d'oxygène n'est pas encore au point et n'est pas recommandable dans les mines. En ce qui concerne le procédé au chalumeau, dans lequel la chaleur nécessaire est fournie par une flamme nue, on a pu au contraire arriver, par des essais systématiques et divers perfectionnements de l'outillage, à entrevoir la possibilité d'une application économique du procédé à différentes espèces de roches. Par des essais approfondis, on a démontré qu'il ne faut pas employer une flamme continue, ce qu'on a fait jusqu'à présent, mais qu'il faut opérer avec une flamme oscillante, c'est-à-dire interrompue périodiquement. Avec le procédé usuel, on n'arrive pas à forer dans les roches à faible teneur en silice ou à point de fusion relativement bas. Par le fait que l'on peut choisir le régime de température le plus convenable à chaque espèce de roches, on évite la formation de verre de silice ; en même temps, on facilite dans une large mesure l'éclatement de la roche en fines particules.

INTRODUCTION.

Le procédé d'abatage des roches cristallines par le feu remonte aux temps les plus reculés de l'art des mines et il est décrit dans l'ouvrage d'Agricola, vieux de cinq siècles. Ce procédé a été abandonné

dès l'introduction du minage à la poudre. A l'époque moderne, c'est en 1902 qu'on a proposé l'application du feu à la perforation. Un appareil dénommé « lance de fusion » (fig 1) a été proposé pour ouvrir le trou de coulée d'un haut-fourneau engorgé ou pour débarrasser des lours les fours

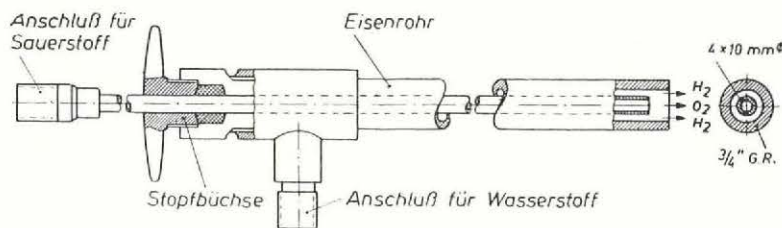


Fig. 1. — Lance à oxygène.

de fusion. Dans ce but, la place à forer est d'abord portée à la température voulue par un dard de chalumeau, ensuite on fait intervenir un jet d'oxygène sous pression et le métal chauffé brûle à son tour. Cet appareil ne s'est pas répandu parce qu'il ne s'applique qu'à des substances dont la température de combustion est inférieure à celle de fusion, en particulier aux aciers.

Le même principe se trouve appliqué dans le découpage des métaux par le chalumeau.

Un brevet de 1918 repose sur un principe un peu différent. La roche est chauffée par une flamme localisée, portée à la fusion ou à la décrépitation, rendue friable par refroidissement et les débris sont enlevés par un courant liquide ou gazeux. Comme combustible, on utilise le mélange d'air ou d'oxygène avec l'hydrogène ou l'acétylène.

Dans la suite, on a encore pris d'autres brevets pour perfectionner le procédé. En principe, on reconnaît que le forage thermique des roches est possible de deux manières :

- a) par combustion du fer (lance à oxygène),
- b) par combustion de mélanges gazeux avec l'oxygène (foreuses au chalumeau).

L'auteur a fait des essais par ces deux méthodes; avant de les exposer, il convient de dire quelques mots sur l'évolution des deux genres d'appareils.

Développements récents de la lance à oxygène.

Une forme simplifiée de construction américaine datant de 1935 et ne comprenant qu'un seul tube est représentée à la figure 2. (Fig 2) L'extrémité du tube est chauffée par un moyen quelconque jusqu'au point d'inflammation, ensuite on ouvre l'entrée de l'oxygène et la chaleur de combustion de la lance chauffe le minéral et le fond. L'année suivante,

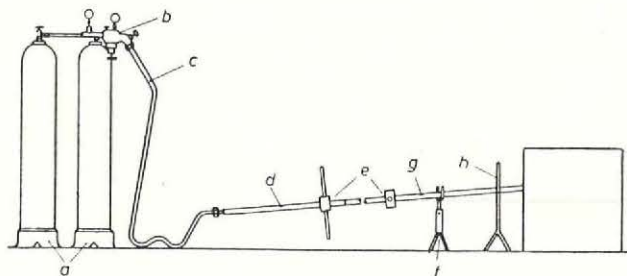


Fig. 2. — Lance à oxygène et appareillage :

- a) bonbonne d'O₂; b) détendeur; c) tube flexible;
- d) tube d'admission; e) modérateur; f) support; g) lance;
- h) écran protecteur; i) béton.

te, et de même source, l'attention a été attirée sur divers fondants. Ils ont pour but d'abaisser le point de fusion de la roche et ils sont introduits par l'espace annulaire entre le tube à oxygène et une enveloppe extérieure (fig 3).

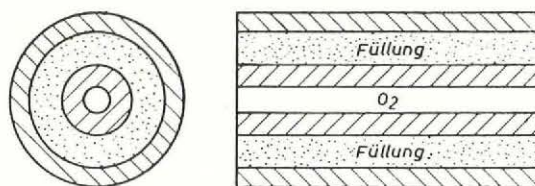


Fig. 3. — Lance avec bourrage (fondant).

En 1938, Wolf et Zorn ont appliqué avec succès, en Allemagne, la lance n° 2 au forage dans le béton. La lance allumée était pressée contre le bloc de béton et animée d'une rotation. En moyenne, dans la direction horizontale, on a obtenu les vitesses de progression suivantes :

Tube d'acier de 4×10 mm

$$v = 273 \text{ mm/min}$$

Tube d'acier de 21×10 mm avec noyau central de 5×3 mm

$$v = 178 \text{ mm/min}$$

Tube d'acier de 21×10 mm avec noyau de 7×4 mm

$$v = 207 \text{ mm/min.}$$

Le tube central a pour effet d'augmenter la masse de fer disponible pour la combustion. Une modification datant de 1939 consiste à placer à l'intérieur du tube un fer de section carrée (fig 4). Ce dispositif a permis d'atteindre des vitesses de 150 à 250 mm/min dans des blocs d'acier.

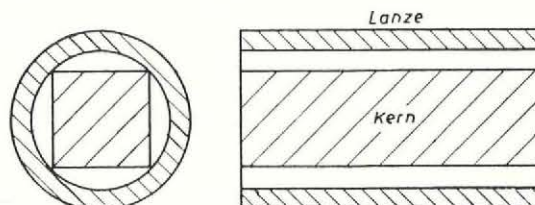


Fig. 4. — Lance avec noyau en fer carré.

Wolf et Zorn ont fait de nouveaux essais en 1940-1941 et réalisé des vitesses de 400 mm/min. dans le béton. Dans la lance employée, l'oxygène était distribué par plusieurs canaux constitués par

des rainures dans le noyau central. Dans des publications de 1950, on a établi les rapports entre les consommations de fer et d'oxygène. Dans ces essais, on a fait usage de lances à parois épaisses et la pression d'appui était de 60 kg. Après la guerre, cette lance a trouvé un champ d'application très étendu dans la destruction des abris et des fortifications, spécialement dans le mur atlantique, et on a pu rassembler de nombreux résultats d'expériences.

Jet Piercing.

Les lances de la deuxième espèce ont aussi évolué. C'est principalement en Amérique, et de 1940 à 1946, qu'on a fait de nombreux essais avec divers becs brûleurs et divers combustibles pour forer dans le béton ou dans la roche. Les résultats qui ont constitué un réel progrès ont été publiés en 1946. La réduction des frais d'abatage des énormes masses de tachonite dans le district minier de Mesabi (Minnesota (USA)) a été le stimulant de ces recherches. La méthode a été développée en premier lieu

système de progression et de recul, analogues à ceux des perforatrices mécaniques. Tous les mouvements sont à commande hydraulique. La pression est fournie par une pompe et une partie de l'eau foulée vers les moteurs est dérivée sur la lance en vue du refroidissement et du curage. Pour le contrôle de la commande, un tableau comprend des manomètres, un tachymètre et des indicateurs de volumes pour l'eau, l'oxygène et le combustible. Une vanne commandée à la main règle les afflux des fluides et par conséquent la vitesse d'avancement.

En 1950, la même Linde A. P. C^o a présenté une foreuse portable qui ne pèse que 8 kg et est facilement maniable; elle permet de creuser des trous de 50 mm à des profondeurs de 1,50 m à 2 m. La vitesse de forage variable avec la nature des roches est de 7 à 14 m/h. L'appareillage comprend un chariot portant les réservoirs d'huile, d'oxygène et d'eau, ainsi qu'une pompe de compression mue par un moteur à benzine. Les résultats obtenus sont rapportés dans le tableau I.

TABLEAU I.

Type de foreuse	Roche	Vitesse d'avancement cm/min	Consommations		Eau m ³ /h
			Oxygène m ³ /h	Huile l/h	
J. P. M ²	Quartzites divers	24	62 à 85	45	5
	Granite	15	—	—	—
	Taconit	7	—	—	—
F. S. J.	Quartzites divers	25	147	15	2,5
	Granite	12,5	—	—	—

par la Cie « Linde Air Products » sous le vocable de « Jet Piercing » (forage par jet) pour divers usages. Il en est sorti d'abord deux appareils désignés par JPM1 ou JPM2.

Ce sont des engins de forage complètement mécanisés qui, en plus de la perforatrice, comportent des véhicules rapides pour le transport des bonbonnes d'oxygène et d'huile. Le tube de forage est articulé et monté sur un bâti; il est susceptible de se déplacer en verticale et de prendre toutes les directions et inclinaisons. Dans la tête du tube, le combustible est pulvérisé par des ajutages et mélangé à l'oxygène. Le mélange arrive dans une chambre de combustion et les gaz brûlés en sortent à la vitesse d'environ 2.000 m/sec. Les canaux d'échappement sont dirigés de telle sorte que, pendant le forage, le fond du trou ait une forme sphérique et que le diamètre demeure constant. Sur le côté extérieur du tube se trouvent des palettes d'acier qui cassent les grosses particules de roches détachées. Pour refroidir la tête de l'outil et curer les débris, on amène de l'eau qui sort par diverses ouvertures. Le tube de forage est muni d'un dispositif de rotation à engrenages et d'un

LES ESSAIS DE L'AUTEUR.

Cette courte revue fait voir que les procédés thermiques peuvent convenir pour l'attaque des roches dures, aussi bien dans les travaux souterrains qu'à la surface. En plus des trous de mines, ils paraissent appropriés aux sondages à grand diamètre et à la prise de carottes. Ils pourraient aussi s'appliquer au fonçage des puits. En vue d'arriver à un outillage bien approprié, l'auteur a procédé au laboratoire et sur le terrain à des essais qui avaient pour premier but d'établir les relations fondamentales entre ces procédés et la composition des roches.

A. Essais avec la lance à oxygène.

Les travaux ont eu pour objet la détermination des rapports entre la nature de la roche et la masse et la nature du métal du tube et du noyau en combustion, la consommation d'oxygène et la pression d'appui, en faisant varier les conditions entre des limites aussi larges que possible. Les roches expérimentées sont le grès, la grauwacke, le quartzite, le schiste argileux et la psammite. L'installation d'essai

est très simple et analogue au schéma de la figure 2. Mais bientôt, on découvrit les exigences particulières auxquelles doit satisfaire une installation souterraine. Avant tout, elle doit être facilement transportable et maniable et s'adapter aux variations du milieu. L'appareil représenté à la figure 4 est monté sur un châssis déplaçable; il comprend la lance proprement dite et le tuyau d'amenée de l'oxygène, qui est relié à la glissière du mécanisme de progression. La lance est tirée en avant ou en arrière par une chaîne enroulée sur un tambour.

Pour les essais, on s'est servi de lances de différentes natures et dimensions, répondant au type n° 4, mais avec des noyaux de fer de formes diverses : fils, barres rondes ou carrées. Après quelques essais préliminaires, on s'est arrêté pour les essais comparatifs aux trois diamètres de $\frac{1}{2}$, 1 ou $1\frac{1}{2}$ pouce.

Pour commencer, on chauffe l'extrémité de la lance avec une lampe à souder jusqu'au rouge blanc. Par là, on amorce la combustion dans le flux d'oxygène. Elle continue vivement et sans interruption et sans apparition de flamme extérieure. Le fer en brûlant à une température de 1.700°C provoque une forte gerbe d'étincelles (fig 5). Un écran de protection est donc nécessaire.



Fig. 5. — La lance en fonctionnement, gerbe d'étincelles.

La lance étant allumée, on la maintient contre la paroi à forer; la chaleur dégagée par la combustion du fer opère en combinaison avec les différences de dilatabilité des constituants de la roche. Les particules ainsi désagrégées se fondent dans l'oxyde de fer. Il se forme des silicates de fer et de calcium facilement fusibles, qui se liquéfient. Cette scorie est expulsée par la pression de l'oxygène en excès et des gaz formés. La figure 6 illustre cette action immédiate de la chaleur dans la zone de contact.

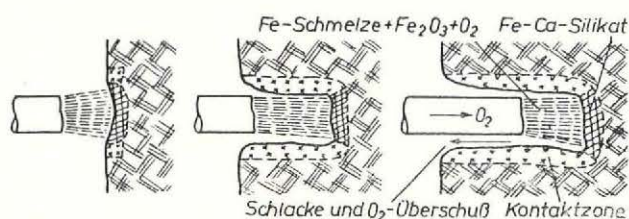


Fig. 6. — Représentation schématique du mode d'action de la lance à oxygène.

Dans une première série d'essais, on a opéré avec la lance normale, c'est-à-dire sans fondant et sous une pression d'appui constante. Le débit d'oxygène, qui devrait varier avec l'usure de la lance, a été maintenu constant pendant la durée du forage au moyen d'un débitmètre Neuhaus. La figure 7 donne

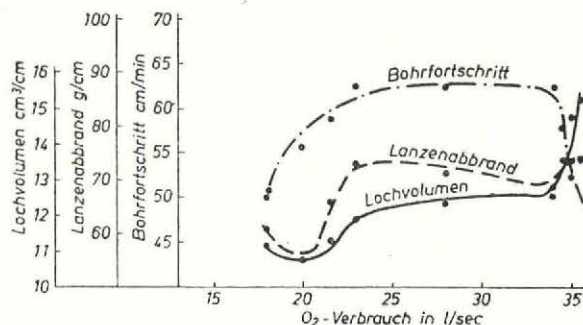


Fig. 7. — Forage en grès.

Lance de 21×15 mm avec fil central. Poids en kg/m : 2,15.
Profondeur maximum du forage : 1 m. Pression d'appui : 30 kg.
Diagramme en fonction du temps, du volume du trou, de l'usure de la lance et de l'avancement.

les résultats obtenus dans le grès en fonction de la dépense d'oxygène. Cette courbe est assez significative. Elle montre qu'un certain débit minimum est nécessaire pour la marche du procédé. Dans ce domaine, l'avancement et la dépense du fer sont très irréguliers, sans doute parce que la combustion est incomplète. D'autre part, si l'on exagère l'admission d'oxygène, la vitesse de progression diminue brusquement parce que le jet violent refroidit le noyau de la roche et dévore la lance. Ceci a pour résultat des irrégularités dans la combustion et dans la forme de l'excavation qui s'élargit. L'eau de curage n'élimine plus les débris et la lance se cale dans la scorie qui se fige. Ce calage s'observe aussi dans le cas d'une arrivée d'oxygène trop faible.

On a cherché aussi à déterminer l'influence du diamètre de la lance. Avant tout, il faut considérer la vitesse d'avancement. Les meilleurs résultats ont été obtenus dans les conditions suivantes.

	Section de la lance	Noyau modèle (fig 3) Diam du fil
Schiste	33×25 mm	4 mm
Psammite	id	5
Grès	id	5
Grauwacke	21×15	5
Quartzite	33×25	3

Dans tous ces essais, on a maintenu la même pression d'appui. Dans une autre série, on a recherché l'influence de cette pression. Le diagramme (fig 8) montre les résultats obtenus dans le quartzite. Il existe une pression optimum pour chaque espèce de roche. Cela peut s'expliquer par le fait

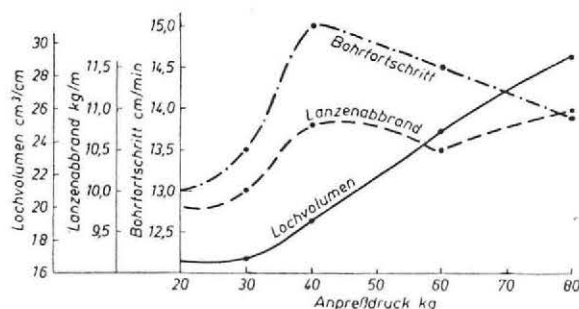


Fig. 8. — Volume du trou, usure de la lance et avancement en fonction de la pression d'appui.

Quartzite. Lance de 21 × 25 mm. Poids : 2,15 kg/m.

Dépense d'oxygène : 35 m³/h.

Profondeur maximum du forage : 5,09 m.

qu'une pression exagérée déforme l'extrémité du tube et rétrécit la section de passage du courant gazeux.

Voici les pressions qui ont donné les meilleurs résultats :

Schiste et psammite	60 kg
Grès ou quartzite	40 kg
Grauwacke	30 kg

Enfin, on a recherché l'influence d'un bourrage de la lance sur la rapidité de forage. En premier lieu, on a intensifié l'apport de chaleur par un remplissage de fer — thermité — charbon de bois en poudre. Contre toute attente, la progression n'a pas changé. Par suite de l'échauffement intense, il s'est formé un verre à haute teneur en silice et une scorie visqueuse, ce qui a contrarié le curage.

On a été conduit ainsi à augmenter la fluidité par l'addition de fondants. Wolfs avait déjà fait des essais dans cette voie. Par l'emploi du sel et de la fluorine, il avait obtenu des augmentations du diamètre, mais sans accroissement de la vitesse. Pour explorer l'action des fondants, l'auteur a fait d'abord des essais de laboratoire. Il en est résulté que, pour chaque espèce de roche, la combinaison avec les particules de fondant engendre un abaissement du point de fusion variable avec les proportions et, par conséquent, une tendance variable à la formation de verre.

Les proportions les plus favorables sont les suivantes :

- 85 % de schiste et 15 % de peroxyde de Na
- 95 % de psammite et 5 % de fluorine
- 90 % de grès et 10 % de fluorine
- 87 % de grauwacke, 10 % de fluorine et 3 % de chaux
- 85 % de quartzite, 8 % de soude et 7 % de sel de cuisine.

Le meilleur agent est la fluorine. Sa proportion en poids par rapport à la roche est de 1 : 9; c'est aussi sensiblement le rapport des volumes. Les lances de fabrication courante ne permettent qu'un rapport compris entre 1 : 14 et 1 : 24. Les essais comparatifs en roche ont montré qu'on n'obtenait que des améliorations insignifiantes. Par contre, le volume du trou augmente par suite d'une scorification

de la surface et d'une stagnation de la chaleur. La dépense de fer augmente aussi.

Pour obtenir de meilleurs résultats, il faudrait réaliser la proportion 1 : 9 obtenue au laboratoire. Dans ce but, on pourrait accélérer l'arrivée du fondant à la pointe de la lance en faisant agir un courant d'oxygène dans l'espace annulaire (fig 9).

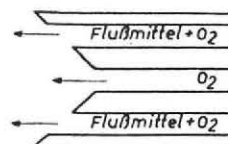


Fig. 9. — Bourrage renforcé.

La lance à oxygène a été essayée aussi dans la position verticale; elle était portée par un affût trépied ordinaire. On n'a jamais atteint les mêmes avancements qu'en horizontale. Le volume du trou augmente notablement, le fer non brûlé fond et s'accumule dans le trou, le tube extérieur brûle à la hauteur du bain fondu et ne conduit plus l'oxygène jusqu'au fond du trou.

Considérations théoriques.

La lance à oxygène utilise la chaleur de combustion du fer et des éléments alliés, avec ou sans noyau. La fusion exige un apport de calories suffisant pour atteindre une température de 1.470 à 1.710° suivant la composition minéralogique de la roche. La chaleur latente de fusion varie entre 31,5 et 55 Kcal par kg. La chaleur spécifique étant en moyenne de 0,25 cal par kg et degré C, il faut une quantité de 400 à 480 Kcal par kg de SiO₂.

Le fer se combine à l'oxygène sous les trois formes FeO, Fe₂O₃, Fe₃O₄. La quantité d'oxygène correspondante est respectivement :

- 1 kg de Fe + 200 l O₂ = 1,200 kg FeO + 1.150 cal.
- 1 kg de Fe + 267 l O₂ = 1,381 kg Fe₃O₄ + 1.580 cal.
- 1 kg de Fe + 300 l O₂ = 1,428 kg Fe₂O₃ + 1.720 cal.

La dépense théorique maximum est donc de 300 l d'oxygène par kg de fer.

Wolf et Zorn ont trouvé dans leurs essais une consommation comprise entre 170 l et 260 l. Ces chiffres résultent des analyses des scories formées lors du forage dans des blocs de béton. Les essais de l'auteur par la même méthode ont montré que l'oxygène combiné au fer varie entre 190 et 256 l/kg, en moyenne : 223. La dépense réelle d'oxygène est naturellement beaucoup plus grande. Dans les essais qui ont fourni des prélèvements de scorie, on trouve une dépense de 234 à 380 l/kg avec une moyenne de 307 rapportée aux roches de toute espèce.

Le rapport de l'oxygène dépensé à l'oxygène combiné est donc de 1,40; il varie comme suit :

schiste :	1,40
grès :	1,70
grauwacke :	1,30
quartzite :	1,20.

En plus de la chaleur de formation des oxydes de fer, il y a la chaleur de fusion du fer et de la scorie, les réactions entre le fer et les constituants de la roche (formation des silicates).

Observations critiques sur l'emploi de la lance à oxygène dans les travaux miniers.

Dans l'état actuel de la question, l'application du procédé dans les travaux miniers se heurte à certaines difficultés. Le transport des batteries d'oxygène et d'un très grand nombre de lances est difficile dans les excavations étroites. A cause des gaz brûlés, on ne peut provisoirement opérer que dans les voies de retour d'air. Il y a un certain danger d'incendie des soutènements à moins qu'on ne prenne des précautions spéciales.

Si l'on compare les résultats à ceux de la perforation mécanique, il y a un certain avantage dans les grès et les psammites. Dans les schistes, grauwacke, quartzite, le procédé thermique ne supporte pas la concurrence. Dans l'ensemble, les temps de repos, la dépense d'oxygène et de métal, les inconvénients des fumées sont des circonstances défavorables.

Du point de vue économique, l'application en grand, c'est-à-dire dans les chantiers, ne paraît pas indiquée et l'on devrait se borner à essayer le procédé dans les galeries en creusement. De toute façon, l'encombrement, la nécessité du chauffage préalable et d'une pression d'appui convenable, sont des difficultés.

En conclusion des essais faits jusqu'à présent, on devra tenir compte des résultats résumés dans le tableau ci-dessous.

Roches	Système de lance avec noyau	Pression d'appui	Fondant	Consommation d'oxygène	
				l/sec	m ³ /h
Schiste	21 × 15 mm	60 kg	Na ₂ O ₂	15	54
Psammite	35 × 25	60	fluorine	15	54
Grès	35 × 25	40		30	108
Grauwacke	21 × 15	30	fluorine et chaux	20	72
Quartzite	35 × 25	40	soude et sel	12	45

En vue d'un devis, on pourra utiliser les coefficients maximums suivants :

Roches	Oxygène m ³ /m foré	Usure de la lance kg/ m foré	Avancement cm/min
Schiste	3,90	10,3	17,8
Psammite	2,60	6,2	37,0
Grès	3,52	7,4	55,5
Grauwacke	6,9	15,0	15,0
Quartzite	4,85	10,4	15

B. Essais au chalumeau.

Les essais de cette catégorie ont débuté avec un appareil très simple, qui ressemble fort au « jet piercing » américain. L'installation comprend un brûleur, un affût avec le mouvement de progression, une bonbonne d'oxygène et une de gaz (fig 10).

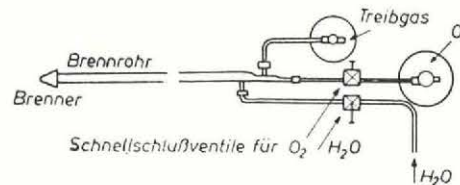


Fig. 10. — Dispositif général de l'essai au chalumeau. Brûleur. Soupape à fermeture rapide pour l'eau et l'oxygène.

Le brûleur se compose de trois tubes emboîtés dont les carreaux intérieurs donnent passage respectivement à l'oxygène, au gaz combustible et à l'eau. A l'extrémité se trouve vissé le bec brûleur proprement dit, dont la construction repose sur le principe des injecteurs (fig 11). L'oxygène et le gaz arrivent dans le mélangeur d'où ils sortent par six ouvertures vers une chambre d'alimentation dans laquelle puise le bec. Le brûleur est refroidi par un courant d'eau qui s'échappe par des ouvertures dirigées vers l'arrière et enlève les débris du forage.

Comme combustibles se présentent en premier lieu l'hydrogène et ses carbures. Cependant, l'hydrogène et l'acétylène, à cause de leur grande vitesse d'inflammation sont dangereux parce que, si les ouver-

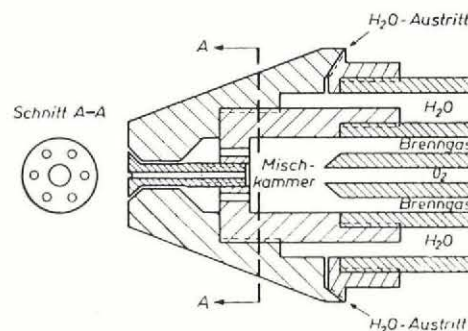


Fig. 11. — Principe de la tête du brûleur, type O. Coupe AA — Mélangeur - eau - gaz - échappement.

tures d'échappement s'obstruent, il peut y avoir un retour de flamme. Les hydrocarbures lourds sont beaucoup moins dangereux.

Par raison d'économie, on a fait les essais avec le gaz de moteur. Le mélange le plus avantageux déduit de l'analyse des gaz est en volume de 5,28 d'oxygène pour 1 de gaz. D'après les essais sur la durée d'échauffement d'une tôle de 10 mm d'épaisseur, ce rapport s'élève à 6.

L'eau de refroidissement est empruntée directement à une canalisation dont la pression est maintenue à 4 atm par une petite pompe.

Les vitesses d'avancement obtenues avec cet appareil sont toutes en dessous de celles de la lance à oxygène. Par contre, il y a de sérieux avantages : on ne brûle pas l'outil, la pression d'appui est inutile et on supprime l'ennui des fumées. La consommation d'oxygène est réduite à 1,2 m³ par mètre de trou foré au lieu de 5 à 9 m³. Le transport est plus facile et les temps d'arrêt sont moindres. C'est pour ces raisons qu'il a paru nécessaire d'étudier de plus près et de perfectionner le procédé au chalumeau, ce qui a conduit finalement à des points de vue entièrement nouveaux.

Considérations théoriques.

Dans le procédé au chalumeau, le travail de forage proprement dit est fourni par les gaz sortant à haute température d'une chambre de combustion. Sous l'influence de la chaleur transmise, la silice présente dans la roche se dilate, se sépare de l'agrégat solide et est enlevée par le courant gazeux. Les essais faits en Amérique ont démontré que le procédé ne réussit bien que dans les roches dont la teneur en SiO₂ atteint 90 %. Les autres constituants n'ont qu'un rôle assez effacé.

Dans le diagramme (fig 12) sont indiquées les modifications d'état de la silice cristallisée en fonc-

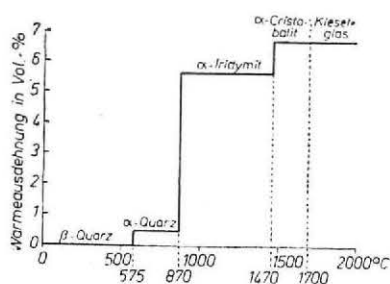


Fig. 12. — Les formes stables du système SiO₂ et leur dilatabilité (D'après Endeel et Pfeiffer).

tion de la température. Les transitions lentes du quartz α à la tridymite α et à la cristobalite α sont accompagnées d'une forte dilatation cubique. Les autres, par exemple le passage de l'état β à α , n'entraînent qu'une très faible variation de volume (0,2 à 2,8 %) ; néanmoins par suite des transformations de la structure, les tensions internes sont

dépassées, ce qui agit sur le phénomène du forage. Au-delà de 1725° C, la silice est fusible et il se forme un verre de silice qui n'a qu'une très faible conductibilité calorifique. On doit donc maintenir la température de travail entre certaines limites, d'une part, pour utiliser autant que possible la grande dilatation, les tensions naissant dans le passage du quartz α à la tridymite α et, d'autre part, éviter la formation du verre de silice. La température la plus favorable est donc comprise entre 870 et 1700° C.

La modification en tridymite α est continue entre 870 et 1470° C ; il en est de même du passage à la cristobalite entre 1470 et 1700° C.

Ces transformations demandent un certain temps, très court cependant. Dans le passage brusque de 573 à 1725° C, toutes les modifications peuvent se faire confusément. Dans ce cas, la dilatation est moindre et le travail de désagrégation de la roche est contrarié. En même temps les composés plus fusibles, qui existent toujours, en particulier les silicates binaires et tertiaires, agissent de telle façon que par la fusion la texture de la roche est bien modifiée mais il n'y a pas de crépitements. Il en résulte qu'il y a, pour chaque espèce de roche, un domaine de températures compatible avec des avancements avantageux.

Les essais de l'auteur ont montré que non seulement la température, mais aussi la durée de l'application de la flamme sont décisives. On a mesuré les coefficients de dilatation linéaire des roches en fonction des températures et du temps et recherché l'influence des silicates sur la dilatation des roches. Par le calcul et par l'expérience, on a déterminé la durée et la profondeur de l'échauffement et on les a mises en regard de la température de la flamme.

Développement d'un procédé spécial.

Ces essais dans le domaine physico-chimique-minéralogique ont alterné avec les recherches sur l'outillage. Au lieu des outils calés, on a cherché des outils légers et maniables. Peu à peu, on est arrivé à améliorer les rendements et les dépenses de gaz et d'oxygène.

On a créé successivement trois types d'appareils dénommés O₂, O₃, O₄ qui ont donné les résultats moyens suivants :

	Avancement	Oxygène	Gaz
O ₂	11 cm/min	10 m ³ /h	1,8 m ³ /h
O ₃	13 cm/min	6,5 m ³ /h	1,1 m ³ /h
O ₄	18 cm/min	3 m ³ /h	0,6 m ³ /h

Les diamètres ont varié entre 40 et 60 mm.

Les différents types se distinguent essentiellement par la construction du bec. Il se fait que, pour chaque espèce de roche, il faut employer un diamètre

et une forme appropriés. Les brûleurs ont donc été munis de becs interchangeables comprenant un ou plusieurs ajutages de sections différentes. Après avoir reconnu cette interdépendance entre la roche, les avancements et le volume du trou, on a cherché à déterminer pour chaque espèce de roches le diamètre de tuyère le plus avantageux, et en premier lieu, avec les becs n'ayant qu'une seule tuyère.

Voici les résultats trouvés :

Schiste	ϕ en mm :	8
Psammite	»	9
Grès	»	6
Grauwacke	»	11
Quartzite	»	7,5

Les essais avec plusieurs tuyères ont été menés par la même méthode. Ils ont montré qu'une flamme centrale est plus avantageuse qu'une gerbe de flammes.

L'importance qu'il y a de maintenir la température judicieuse s'est manifestée dans toutes les circonstances par le fait que le forage n'avance plus quand un excès de chaleur provoque la formation d'une pellicule de verre de silice sur le fond du trou.

Pour chaque espèce de roche, il faut une température et une flamme pulsatoire sans qu'il soit nécessaire de changer la composition du mélange gazeux combustible.

La pulsation a été obtenue d'abord par un robinet placé sur chacun des conduits parallèles, amenant l'oxygène et l'eau à la tête du brûleur et manœuvré par un seul levier. Quand on manœuvrait le levier à de courts intervalles, on interrompait alternativement les courants d'oxygène et d'eau. En même temps, on augmentait l'effet d'étonnement (fig 15).

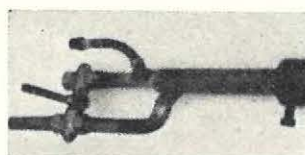


Fig. 15. — Levier actionnant simultanément les soupapes à eau et à oxygène.

Dans les essais avec ce nouvel appareil, la formation de verre de silice était facilement évitée. La pulsation à la main pouvait suffire pour les essais de démonstration. Le problème industriel a été de réaliser la pulsation mécanique à un rythme déterminé.

L'appareil avait en outre pour but de réaliser aussi une rotation du bec brûleur. L'expérience a montré en effet que, principalement dans la grauwacke, la fusion est irrégulière, vraisemblablement en raison de la grande diversité des éléments de cette roche. Le mouvement de rotation devait uniformiser l'action de la flamme. Avec une manivelle à main et un engrenage conique, on pouvait en même temps faire tourner le tube et provoquer la pulsation.

Pour tirer parti de ces résultats de laboratoire, on a construit de nouveaux types d'outils. On a reconnu qu'avec un type de tuyère bien approprié, il suffit d'imprimer une pulsation au courant d'oxygène de temps en temps, ou même simplement au début d'une attaque. Dans le type O_5 la poignée de pulsation est placée latéralement et une seule manœuvre engendre le mouvement oscillatoire qui se propage ensuite pendant assez longtemps et provoque les oscillations régulières exigées par la flamme.

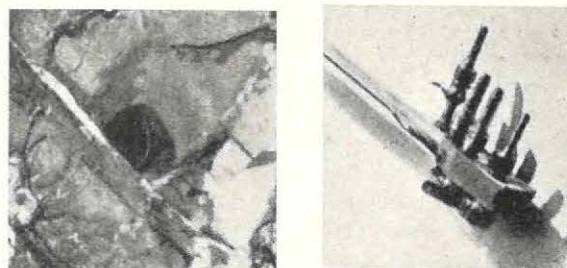


Fig. 14 et 15. — Forage d'essai dans la grauwacke - ϕ 50 mm - profondeur 1,35 m.

Organes d'admission du type simplifié O_6 .

Dans les figures 14 et 15 on voit un type de foreuse encore plus simplifiée (type O_8) qui a donné les résultats suivants :

Roches	Avancement cm/min	Tuyère ϕ mm	Trou ϕ mm
Schiste	28	8,5	40
Psammite	29	9	40
Grès	46	6,5	38
Grauwacke	9	10	36
Quartzite	42	8	40
Schiste	20	9,5	60
Psammite	24	10	60
Grès	40	8,5	60
Grauwacke	7	11,5	58
Quartzite	42	10	68
Schiste	14	11,5	78
Psammite	19	11,5	84
Grès	28	10	87
Grauwacke	5	12,5	81
Quartzite	30	11,5	89

La consommation d'oxygène a varié entre 1,8 et 2,8 m³/h et celle de gaz, entre 0,38 et 0,57 m³/h.

Une difficulté de construction est de trouver un métal convenable pour les têtes qui doivent résister aux hautes températures 2000° C et à l'érosion par les courants gazeux de grande vitesse 1200 à 1800 m/sec. Des recherches sont en cours.

Cet outillage ne donne pas encore les mêmes résultats que le forage mécanique. En particulier, la grauwacke présente une série de difficultés qui seront sans doute résolues par un nouvel appareillage en cours d'étude. On peut aussi attendre quelque progrès dans l'application aux autres espèces de roches.

Les chiffres de consommation déterminés par des essais comparatifs sur un forage de 30 mm de diamètre sont inférieurs à ceux du forage mécanique (20 à 30 %). L'avantage du forage thermique augmente avec le diamètre du trou. Il y a encore certaines difficultés d'ordre pratique, mais on peut

s'attendre à ce qu'elles soient écartées par des perfectionnements de l'outillage, à ce qu'on obtienne de meilleurs rendements et que l'opération souvent difficile du forage des mines se trouve simplifiée.

On a parlé incidemment de l'application éventuelle du forage thermique dans les puits en fonçage. Les brûleurs seraient dans ce cas distribués le long d'un arc circulaire à la périphérie du puits. Cet arc étant animé d'un mouvement alternatif autour de l'axe central, les flammes embrasseraient toute la périphérie et isoleraient le noyau central du puits. On pourrait aussi par des chalumeaux auxiliaires fondre la surface latérale du puits et consolider même des sables bouillants.

Il est à signaler que, dans aucun des nombreux essais, on n'a constaté la présence de nuages de poussières. Comme les gaz de combustion ne sont pas nocifs non plus, on peut envisager l'application du procédé dans les travaux souterrains, même dans les chantiers d'exploitation.