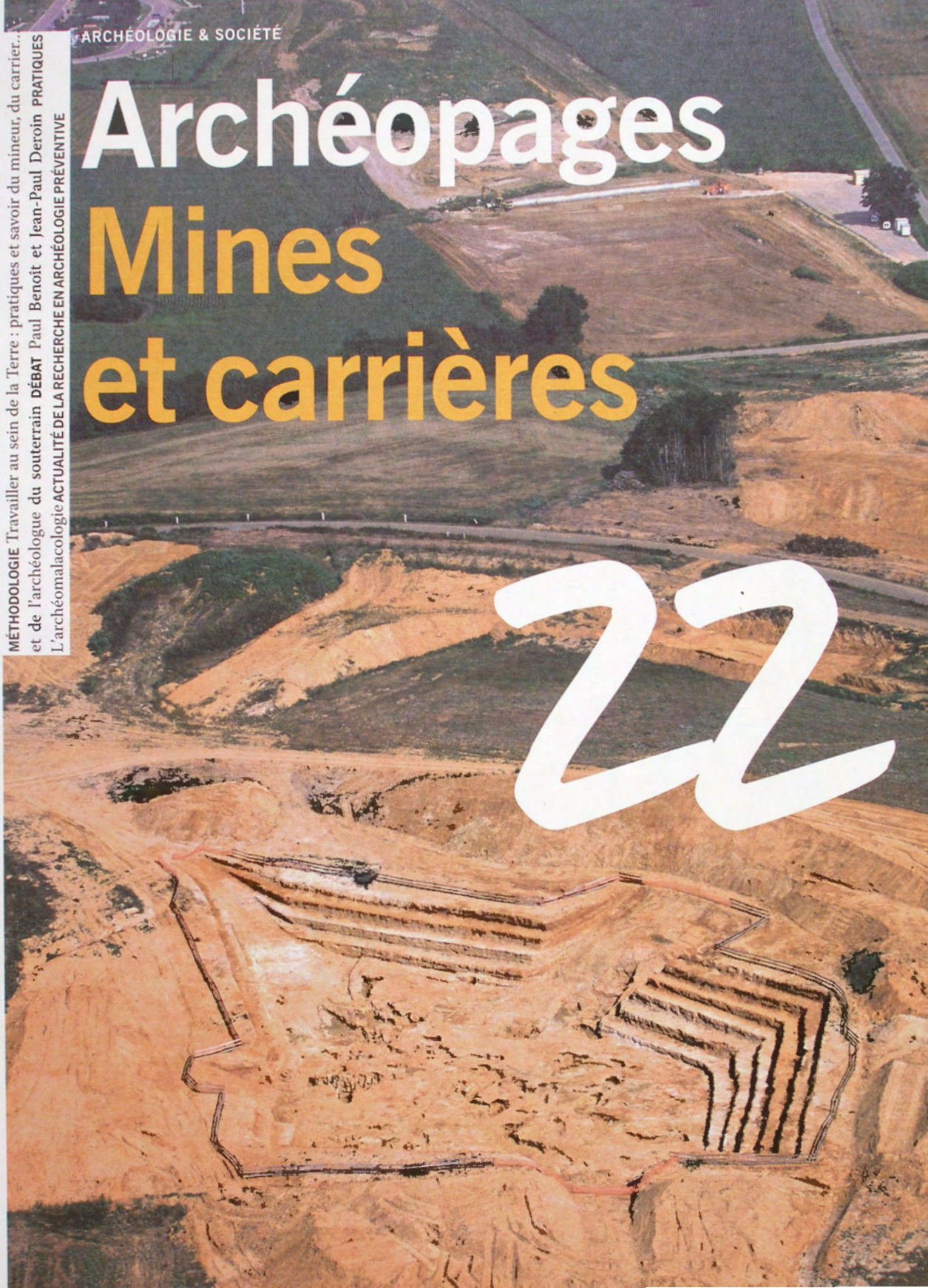
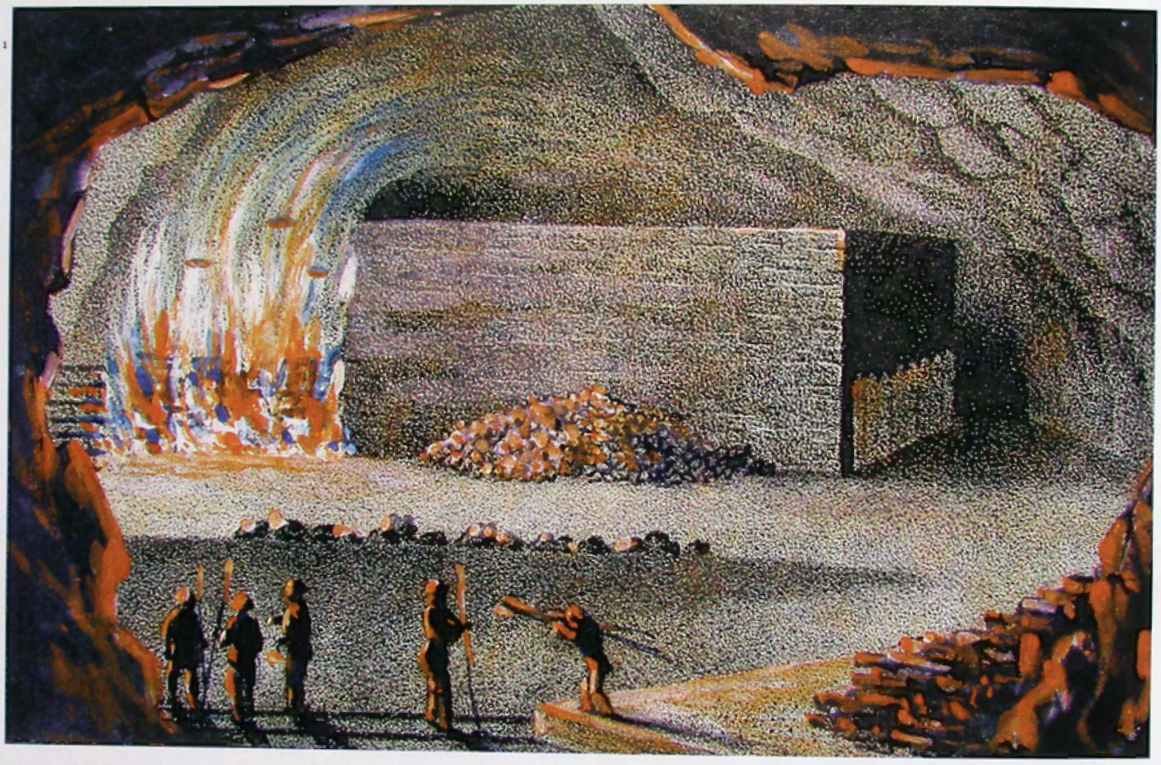
Archéopages
Mines et carrières



MÉTHODOLOGIE Travailler au sein de la Terre : pratiques et savoir du mineur, du carrier... et de l'archéologue **du souterrain DÉBAT** Paul Benoit et Jean-Paul Deroin **PRATIQUES** L'archéomalacologie **ACTUALITÉ DE LA RECHERCHE EN ARCHÉOLOGIE PRÉVENTIVE**

L'abattage par le feu : une technique minière ancestrale

Bruno Ancel *Service culturel municipal, L'Argentière-la-Bessée*
Vanessa Py *UMR 6572 « Laboratoire d'archéologie médiévale méditerranéenne »*



1. La mine du Rammelsberg près de Goslar (Harz) exploite une masse de pyrite de cuivre et de galène extrêmement dure. L'allumage des immenses bûchers, tous les samedis matin, constitue un spectacle fort prisé par les voyageurs (extrait du Mémoire de voyage de l'élève-ingénieur Lan, en 1850, École des mines, Paris).

Depuis la nuit des temps, l'homme sait que le feu a le pouvoir de fendre ou d'altérer certaines roches. Il a pu l'observer à l'occasion des incendies de forêt, lors d'un feu de campement, d'un essartage ou d'un écobuage. L'homme a ainsi très tôt compris l'utilité de maîtriser le feu pour attaquer et briser les roches dures qui résistaient aux outils en pierre, en bois ou en corne. Les premières attestations de cet usage remontent au Paléolithique pour l'extraction du silex et du quartz (Weisgerber, Willies, 2001)[1].

Le chauffage d'une roche entraîne une augmentation de son volume qui peut être sans conséquence s'il se produit de manière lente et homogène. Mais si le chauffage est violent, la surface chauffée se dilate plus vite que l'intérieur de la roche. Il se produit alors de fortes tensions entraînant une fissuration et un écaillage de la surface, phénomène appelé aussi « étonnement ». L'étonnement est d'autant plus prononcé que la roche est dure et homogène.
En revanche, une roche plastique déjà fissurée ou litée réagit mal au feu, mais elle peut être attaquée par les outils à percussion usuels. Le feu peut aussi modifier la structure minéralogique de la roche, comme transformer un calcaire en chaux, et la rendre plus tendre superficiellement.

Le principe du travail par le feu est simple : un bûcher de bois sec est construit au plus près de la surface de roche. Si le feu est violent, l'écaillage de la roche est important, par exemple quand le bois est très sec. Si le chauffage a lieu progressivement, les étonnements ne seront pas spectaculaires, mais des lames de roches se détacheront. Lorsque le front de taille est refroidi, la roche fragilisée qui n'est pas tombée est purgée à l'outil, puis l'aire de travail est nettoyée, et un nouveau feu peut être lancé. Chaque feu attaque la roche sur une épaisseur d'un à plusieurs centimètres, et c'est par des actions répétitives qu'elle sera détruite sur une grande profondeur. Quand le travail est abouti, la paroi rocheuse montre une surface lisse et concave, les plafonds peuvent être noircis par la suie, et les déblais de taille sont riches en écailles, en plaquettes de roche et en charbons de bois. Dans la mesure où les conditions pratiques rendent possible l'accès au front d'abattage, on peut aussi provoquer un refroidissement rapide et contracter la roche en surface en projetant de l'eau froide sur la surface chauffée.

Or la combustion d'un bûcher de bois ou de tout autre combustible dégage de la fumée irritante, toxique, voire mortelle dans un milieu confiné. De surcroît, le chauffage de certaines roches, des minerais en particulier, produit des gaz toxiques, tels que des vapeurs sulfureuses ou d'arsenic. De ce fait, le travail par le feu ne peut pas être conduit de la même manière selon que l'on se trouve à l'air libre ou au fond d'une cavité. Sous terre, dans une galerie par exemple, la chaleur dégagée pendant la combustion du bûcher va rayonner comme dans un four et aura une action sur le front de taille, les parois, le plafond et le sol de la cavité. Une fois le bûcher allumé, la chaleur et les fumées feront qu'il ne sera plus possible d'intervenir avant plusieurs heures. À l'air libre, le bûcher pourra recouvrir complètement le rocher à détruire et pourra être réalimenté à volonté. Dans ce cas, il sera possible, au moment opportun, de dégager les braises avec un outil et de procéder à un refroidissement rapide en projetant de l'eau. Beaucoup d'auteurs ont ainsi mélangé le travail par le feu à l'air libre et en souterrain et ont affirmé un usage combiné du feu et de l'eau en contexte minier, alors qu'il a été exceptionnel.

Un « outil » à tout faire autrefois très répandu

Aujourd'hui, le recours au feu dans la destruction de roches à l'air libre semble tout à fait singulier. Cependant, une abondante littérature révèle qu'il a été courant en Afrique, en Asie, en Amérique du Sud jusqu'au milieu du XX^e^ siècle et en Europe jusqu'au milieu du XIX^e^ siècle. Il intervenait dans des contextes variés, souvent pour régler un problème ponctuel pas forcément prévu au départ. Il était utile, en effet, pour détruire des rochers trop durs pour être désagrégés au pic ou à la masse, trop résistants pour être forés afin d'y placer des explosifs, ou trop volumineux pour être déplacés. Ainsi, il pouvait avoir lieu à l'occasion d'un épierrage de champ, du traçage d'une route ou d'un canal.

Dans la littérature contemporaine, il est souvent précisé que l'étonnement était obtenu au moment du refroidissement, par projection d'eau. Cette action, a priori inutile puisque le feu agit seul sur la roche, peut être justifiée dans certains cas. Le chauffage d'une roche était souvent réalisé avec du bois trouvé ou coupé au dernier moment, donc pas toujours bien sec, et dans ces conditions, il était difficile d'obtenir un choc thermique. Celui-ci pouvait alors être obtenu par un refroidissement instantané, en projetant une grande quantité d'eau.

La plus ancienne évocation de cette pratique est relative au passage de l'armée d'Hannibal à travers les Alpes en 218 avant notre ère. Au moment de la descente du col, les terrassiers devaient rétablir en trois jours un chemin effondré, l'élargir pour le passage des éléphants et détruire un obstacle rocheux en l'attaquant par le feu. Dans les versions de Tite-Live, Appien et Ammien Marcellin, il est question d'une aspersion de vinaigre, qui a été l'objet d'innombrables discussions et polémiques. À l'heure actuelle, il est communément admis que cet usage doit être attribué à une corruption du texte ou à l'imagination collective. Or, le vinaigre était surtout connu par les Grecs et les Latins pour ses propriétés réfrigérantes. Son usage par l'armée d'Hannibal doit être perçu non pas comme un fait véridique, mais comme un moyen de valoriser la puissance et la richesse de l'armée carthaginoise, n'hésitant pas à utiliser une quantité fabuleuse de vinaigre pour avancer dans le défilé des Alpes. Cette association feu-vinaigre, symbole du chaud

1. Les auteurs réalisent actuellement une recherche historique approfondie sur l'abattage par le feu : plusieurs centaines de références ont d'ores et déjà été compilées, apportant une vision nouvelle sur la question.



2. Les mineurs savent contrôler le gabarit d'ouvrage ouvert par le feu. Cette galerie du XVI[e] siècle présente la même largeur régulière que si elle avait été creusée à la pointerolle (mine Sanct Anna am Neuenberg, Sainte-Marie-aux-Mines).



3. Dans la mine de Vallauria, le filon/couche de galène argentifère a été exploité par une succession de chambres spacieuses. Leurs voûtes en ogive, noircies par les fumées, présentent un développement exagéré qui implique que de grandes quantités de roches stériles ont été abattues inutilement (niveau Saraceni, Saint-Dalmas-de-Tende, Alpes-Maritimes)

contre le froid, qui trouve ses origines dans les textes préalchimiques, existe aussi dans d'autres anciens récits d'Asie centrale.

L'usage du feu a connu une application militaire pour le siège des cités fortifiées. Il a été décrit par Apollodore de Damas dans ses *Poliorcétiques* et a été évoqué par d'autres auteurs jusqu'à la fin du Moyen Âge. Dans l'art du siège, le feu ne joue en fait qu'un rôle très ponctuel. Il permet d'amorcer le creusement d'un pan d'une muraille lorsque les sapeurs sont confrontés à des pierres massives très dures. L'opération consiste à mettre le feu au pied de la muraille pour desceller plusieurs blocs et créer une ouverture pour y développer une sape traditionnelle.

La méthode fut aussi utilisée dans les carrières pour l'extraction de roches dures, comme les granites. Avec de petits feux bien dirigés, il était possible de contrôler le développement de fissures pour détacher de gros blocs ou de grandes dalles. Dans le sud de l'Inde, cette méthode a perduré jusque dans les années 1990.

Tous ces usages de génie civil ou de carrière, assez mal documentés, ont été sans doute très répandus jusqu'à l'usage de la poudre. Des vestiges archéologiques ont été très rarement observés. On doit attribuer cette carence au manque d'intérêt de la communauté scientifique, mais aussi à des problèmes de conservation. Les surfaces rocheuses qui portent les stigmates de cet usage sont aujourd'hui masquées ou défigurées par les intempéries ou des reprises de travaux, et les déblais sont dispersés, remobilisés, mélangés.

Une spécialisation minière

L'usage minier du feu, contrairement aux autres applications, a laissé une abondante littérature, une riche iconographie et de nombreux témoignages archéologiques. Depuis la Préhistoire et jusqu'à l'usage généralisé de la poudre, les mineurs ont toujours eu recours au feu dès que les roches étaient trop dures.

La résistance d'une roche varie selon sa composition d'origine et son état d'altération. Sa cohésion interne dépend notamment de sa porosité, des minéraux constitutifs et de leur assemblage. Ainsi, les roches courantes les plus dures sont d'origine magmatique, comme les granites et les laves, et d'origine métamorphique, comme certains gneiss, les calcaires silicifiés, les marbres et les quartzites. La substance exploitée peut elle-même présenter une dureté importante, comme l'émeri, le jade, les imprégnations de sulfures ou les gangues de quartz. Quelle que soit sa nature, une roche s'effrite sans problème lorsqu'elle est naturellement fissurée. De même, elle est entaillée sans difficulté lorsqu'elle est altérée en surface par les intempéries ou en profondeur par les circulations hydrothermales. Un litage ou une fracturation permet de déchausser des blocs, puis de les fracasser à coups de masse.

L'abattage par le feu a toujours été en concurrence avec les techniques de taille classiques. Les roches meubles, tendres ou très fissurées pouvaient être creusées à l'aide d'un pic. Dans les mines les plus anciennes, les roches moyennement dures étaient attaquées avec des maillets en pierre. À partir de l'âge du Fer, les mineurs ont eu recours à la percussion posée avec des outils en fer. La roche était entaillée à l'aide d'une pointerolle, une sorte de burin emmanché, sur laquelle on frappait avec un marteau. Les galeries étaient en quelque sorte sculptées et leurs parois, très régulières, portent les stries continues laissées par la pointe, indiquant le sens de creusement. Cette méthode « marteau/pointerolle » a atteint un degré élevé de perfectionnement à la fin du Moyen Âge en Europe, permettant d'entailler des roches très dures, qui auparavant étaient abattues par le feu. Mais c'est l'usage de la poudre dans les mines, à partir du XVII^e^ siècle, qui a progressivement supplanté le feu. Cette technique consiste à forer une série de trous cylindriques, pour y placer des cartouches de poudre dont l'explosion fragmente une partie du front de taille. Dans les roches très dures, le forage des trous est resté problématique ; c'est pourquoi l'usage du feu s'est maintenu dans certaines mines. La difficulté de la foration a été surmontée à la fin du XIX^e^ siècle avec l'introduction des perforateurs pneumatiques.

L'allure du gîte exploité est un facteur important. Quand la minéralisation est concentrée dans un filon étroit, de quelques centimètres à quelques décimètres de puissance, les mineurs s'efforcent de creuser des chantiers d'abattage également étroits, d'une largeur d'homme, pour minimiser les efforts de creusement en roche stérile. S'ils ont recours au feu et veulent cantonner le creusement au strict nécessaire, ils devront procéder par petits feux. En revanche, quand le filon est puissant de plusieurs mètres ou quand la minéralisation est disséminée dans un grand volume de roche (stockwerk), les chantiers seront inévitablement spacieux. Les mineurs, en construisant des bûchers volumineux, pourront attaquer de grandes surfaces de minerai, sans produire de stériles.

Les exemples de travaux miniers anciens ouverts par le feu sont très nombreux. Dès le XIX^e^ siècle, à l'occasion de reprises d'exploitation, les ingénieurs des mines décrivent ces ouvrages caractérisés par des parois lisses et concaves et des charbons de bois. Depuis le développement de l'archéologie minière dans les années 1970, de nombreux sites ont été décrits, pour toutes les époques, surtout en Europe, et pour diverses substances. Quelques sites ont été étudiés de manière approfondie, et des expérimentations ont été menées par plusieurs équipes en Europe (Dubois, 1996 ; Py, Ancel, 2006). Mais, il y autant de cas de figures que de types de gisements en roche dure, et il serait imprudent de généraliser.

Pour les périodes les plus anciennes, les textes ou l'iconographie qui évoquent l'usage de cette technique sont peu nombreux et succincts. Dans une théorie platonicienne, le feu est considéré comme le seul corps qui puisse pénétrer dans la terre « condensée avec force ». Son application minière transparaît à travers quelques rares passages, dont le plus vivant est la description des mines d'or d'Égypte d'Agatharcide de Cnide rapportée par des auteurs plus tardifs. Le seul texte tiré d'un traité, le *De igne* de Théophraste, parle des problèmes de suffocation liés à son usage souterrain. Ces désagréments sont évoqués dans les plaidoyers civils de Démosthène, attestant son recours ponctuel dans les mines athéniennes au IV^e^ siècle avant notre ère. L'enfumage d'une mine, les nuisances et les dangers de l'abattage par le feu seront omniprésents dans les statuts et les règlements miniers médiévaux. À l'époque romaine, les effets du feu sur le roc sont magnifiés dans des poèmes et des récits épiques qui révèlent la fascination des Anciens pour les métaux et les arts du feu.

Il faut attendre la Renaissance pour voir naître des traités techniques consacrés à la mine et au souterrain. Cependant, les descriptions de la mise en œuvre du feu pour abattre la roche sont sommaires. Il est aujourd'hui difficile de s'en faire une idée concrète, notamment dans les ouvrages exigus creusés sur un filon étroit. Les descriptions des sites miniers exploités de manière traditionnelle en Afrique, en Asie et sur les marges de l'Europe, rapportées dans les récits de voyageurs faisant œuvre d'anthropologues au XIX^e^ et au début du XX^e^ siècle, autorisent d'esquisser des comparaisons. Les travaux décrits, des puits et des tranchées à ciel ouvert peu profonds, sont comparables à certains ouvrages protohistoriques, antiques et médiévaux. L'aérage n'était pas problématique et l'aspersion d'eau y était souvent pratiquée. Il est donc permis de supposer que les Anciens pouvaient avoir eu recours à l'eau pour les travaux à ciel ouvert. Or il n'a jamais été véritablement attesté d'un point de vue archéologique, et nous devons encore progresser sur cette question.

Pour les ouvrages miniers profonds que nous avons examinés[2], nous sommes amenés à exclure l'utilisation de l'eau comme agent de refroidissement. Les accès étant très incommodes, il devait être extrêmement difficile d'amener des quantités importantes d'eau jusqu'aux fronts d'abattage et les fumées rendaient une telle approche hautement périlleuse. De plus, l'eau pouvait rendre les fronts de taille très humides et compliquer l'étape de tri souterrain des fragments de roche étonnés, englués dans les charbons de bois ramollis. Cette constatation suggère un véritable savoir-faire minier du feu dont la maîtrise nous échappait avant d'avoir eu recours à l'expérimentation *(voir encadré ci-contre)*. Les Anciens savaient mener des feux assez vifs et puissants pour provoquer un choc thermique en l'absence d'eau.

Le travail par le feu a très souvent été mené de concert avec le travail à l'outil. La moindre zone de faiblesse du front de taille, qu'il s'agisse de la zone broyée d'une faille ou de la partie tendre d'un filon (calcite, barytine, etc.), a presque toujours été entamée à la pointerolle. La réalisation d'entailles étroites à l'outil pouvait être poussée jusqu'aux limites du possible. Dans un second temps, l'application du feu servait à élargir le passage et à abattre les parties dures du filon. Les parois des ouvrages taillés par le feu présentent des successions de concavités, qui dépassent souvent les limites de la zone d'exploitation ou le gabarit utile d'une galerie. La forme de ces concavités et les rétrécissements permettent, dans certains cas, de reconstituer la chronologie du creusement des chantiers (Ancel, 1998).

Le recours au feu dans les mines implique une parfaite maîtrise de l'aérage. Aussi, on voit se développer au-dessus des chantiers d'abattage des conduits d'aérage, progressivement ajustés à l'avancement de l'exploitation vers les profondeurs (Ancel, 1998, 2006).

L'archéologie des remblais miniers

Les mines exploitées au feu renferment les ultimes témoins des milliers de bûchers embrasés pour arracher à la terre les métaux convoités. Dans un souci d'économie des efforts et de rentabilité, les mineurs ont stocké sous terre la partie stérile de la roche abattue, mêlée aux charbons de bois résiduels. Un protocole d'étude de ces vestiges a été mis en place pour caractériser la chaîne opératoire technique du feu, depuis le choix du combustible en forêt jusqu'au tri de la roche abattue sur le front de taille (Py, 2006). Les coupes stratigraphiques dressées dans les remblais permettent d'observer des successions de couches différentes définies par leur granulométrie, leur couleur et leur composition (minerai, encaissant, gangue, charbon de bois). Leur analyse minutieuse révèle la complexité du mode opératoire de l'abattage par le feu, ponctué par des étapes de préparation du combustible, d'extraction au feu, à l'outil, de purge, de tri, de concassage et de déplacement des déblais, judicieusement aménagés dans la mine de façon à faciliter la poursuite du travail (zones de passage, plateformes, etc).

L'étude spécifique des charbons de bois, ou anthracologie, offre des informations sur l'état du combustible, le choix des essences et l'aire d'approvisionnement des mineurs en bois de feu. Calées sur l'échelle du temps grâce aux analyses par le radiocarbone, ces données permettent d'envisager l'impact de cette technique sur l'évolution du couvert forestier exploité pour la mine. Les résultats obtenus pour les mines médiévales du Fournel et de Faravel (Hautes-Alpes) ont démontré une bonne gestion des forêts

2. Neuenberg, Altenberg, Château-Lambert... dans le massif vosgien ; Fournel, Faravel, Vallauria, Caire Faraud, Pontet... dans les Alpes ; Banca, Castelminier... dans les Pyrénées ; Campolungo en Italie, Schwaz en Autriche, Dolaucothy au pays de Galles, Rosia Montana en Roumanie.

L'expérimentation archéologique : retrouver un savoir-brûler



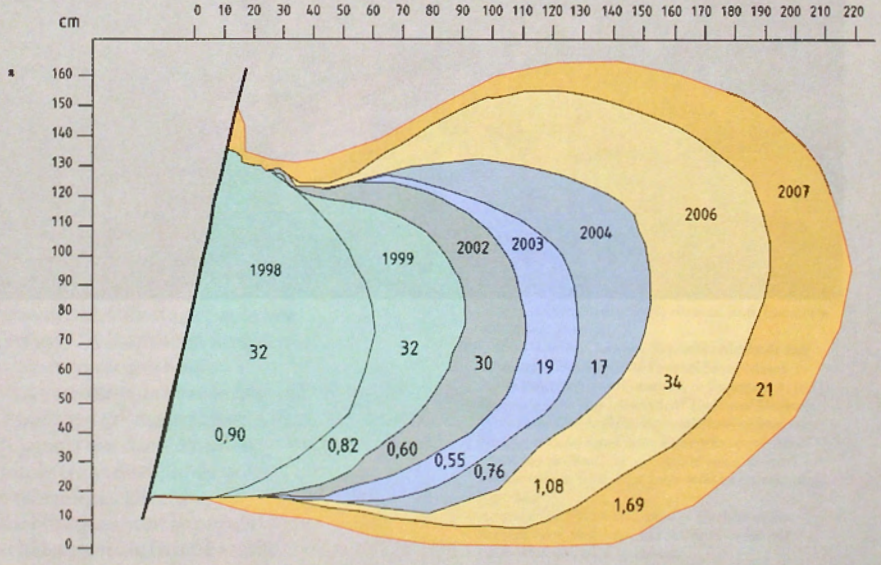
1. Cette image saisit l'instant précis où la paroi chauffée à 700 °C est étonnée : de fines écailles sont violemment projetées loin du front de taille, bousculant au passage des braises (expérience 2003/37, à 40 mn de l'allumage).

Depuis 1997, des expérimentations d'abattage par le feu sont menées dans la mine du Fournel à L'Argentière-la-Bessée (Hautes-Alpes). Elles visent à retrouver la gestuelle et les modalités de cette technique utilisée par les mineurs au Moyen Âge, en caractérisant les paramètres qui entrent en jeu et en confrontant les données expérimentales aux observations archéologiques (Py, Ancel, 2006). Ces expériences sont réalisées dans une salle spacieuse, de façon sérielle, durant les hivers, période de l'année où le courant d'air est favorable à l'évacuation des fumées. L'objectif est de creuser une galerie dans la quartzite stérile, dépourvue de toute fracture, sans intervenir sur le feu après l'allumage. Après 185 feux, l'ouvrage mesure 1,50 m de hauteur et 2 m de profondeur. Trois mètres cubes de roche ont été abattus (8 650 kg) et 40 m³ de bois sec ont été brûlés (8 400 kg).

À ce jour, deux grands types de bûchers ont été testés : le « bûcher adossé », où les bûches sont posées côte à côte dans un même sens, et le « bûcher tour », où elles sont arrangées en lits perpendiculaires. Le bûcher adossé permet de diriger la majeure partie des flammes vers une zone du front de taille choisie au préalable. Le bûcher tour peut être facilement dressé sur une grande hauteur et permet d'élargir la cavité en attaquant plus facilement le plafond et les côtés du front de taille. Pour assurer sa stabilité, sa cohésion et sa durabilité, il est capital de bien gérer l'emplacement des bûches les plus massives.

Le type de bûcher, l'aérage, la quantité de bois d'allumage, le calibre des bûches et leur taux d'humidité conditionnent la rapidité de l'embrasement. Quand le feu a envahi la structure, les flammes lèchent la voûte, puis sortent de la galerie. La température de la fournaise, au maximum de son intensité, peut dépasser 800 °C. Ainsi, au bout de 10 à 15 min, là où les flammes lèchent la roche, des écailles de roche se détachent dans un claquement puissant. Elles peuvent être projetées à plus de 5 m du front de taille. Puis cette phase d'étonnements s'estompe et cesse lorsque le bûcher se tasse, mais des lames de roche peuvent encore se décoller des parois latérales et de la sole. Le bûcher finit par s'effondrer et former une masse de braises ardentes qui tapissent la sole, où la roche peut être chauffée à plus de 1 000 °C. Les braises se consument encore pendant deux à quatre heures. Le taux d'oxygène étant insuffisant pour permettre la fin de l'oxydation, ces braises produisent du charbon de bois.

La moitié des produits abattus provient des étonnements et des décollements opérés durant le feu. L'autre moitié provient de la purge dont l'obtention du dernier quart nécessite de frapper énergiquement la roche pendant un bon quart d'heure. Suivant le type de bûcher, l'avancement du front de taille peut varier de 0 à 3 cm. Le savoir-faire des mineurs réside principalement dans la gestion du combustible, depuis son choix (taille, humidité, calibre, etc.) jusqu'à sa mise en œuvre.



2. Cette coupe de galerie montre la progression des expérimentations. Les chiffres indiquent l'année de la campagne, le nombre de feux réalisés et le rendement moyen « roche abattue/bois brûlé ». On voit bien l'accroissement de la galerie à partir de 2006, résultat de bûchers plus gros (50 à 100 kg) donnant des rendements très supérieurs à ceux de petits bûchers.

4. Contrairement aux idées reçues, il est tout à fait possible de foncer des puits verticaux à l'aide du feu. Cet exemple médiéval est un ouvrage de recherche profond de 8 m (puits de la Pinée, L'Argentière-la-Bessée).





5. Les remblais miniers issus d'un abattage par le feu sont souvent reconnaissables au premier coup d'œil : alternance de lits de plaquettes et de graviers fin, plus ou moins riches en charbons de bois (chantier de Saint-Roch, L'Argentière-la-Bessée).

sur la longue durée. Les mineurs ont privilégié les essences les plus riches et les plus dynamiques sur le plan de la production forestière (mélèze, pin sylvestre et sapin). Leur consommation élevée de bois les a poussés à exploiter les forêts d'altitude parfois éloignées de plusieurs centaines de mètres de dénivelé du lieu d'extraction. Les bûcherons pouvaient opérer des coupes à blanc ou sélectives dans des quartiers laissés en « jachère » plusieurs décennies. Ils devaient alors réorienter cycliquement leur aire d'approvisionnement dans l'étage montagnard situé à la transition entre les espaces cultes et incultes. Une charte promulguée à Fahlun en Suède en 1347 va dans ce sens : les mineurs obtiennent le droit de planter de nouveaux peuplements dans les forêts sans rien devoir aux propriétaires terriens. Ils sont aussi exonérés de taxes foncières et forestières et peuvent transmettre le fruit de leur travail à leurs enfants. Ce document exceptionnel préfigure le concept de développement durable auquel notre société est tant attachée.

Et la poudre supplanta le feu

L'usage de la poudre dans les mines européennes apparaît pour la première fois dans les Vosges en 1617, puis se diffuse rapidement dans les grandes régions minières de l'Europe. Le prix du bois, l'appauvrissement des forêts sud-européennes et probablement aussi un phénomène d'engouement pour cette nouvelle technique font que l'abattage par le feu tend à disparaître au profit de la poudre. Il peut réapparaître ponctuellement quand la poudre vient à manquer. La méthode au feu se maintient dans certaines mines du nord de l'Europe où les roches sont particulièrement dures et les minéralisations très puissantes. C'est le cas des mines du Rammelsberg dans le Harz, d'Altenberg dans l'Erzgebirge, de Kongsberg en Norvège, de Fahlun en Suède et de Felsobanya en Transylvanie, pour ne citer que les plus importantes. À partir du milieu du XVIII[e] siècle, la documentation minière technique qui se développe concerne particulièrement ces sites lorsqu'elle décrit l'usage minier du feu. On y abat le minerai dans de vastes chambres, avec des bûchers de plusieurs mètres cubes, dont la combustion peut durer plus d'une journée. Par conséquent, leur mise à feu est souvent réalisée à la fin de la semaine pour que la mine soit désertée des mineurs, le temps d'évacuer toutes les fumées. Au Rammelsberg, où la technique est parfaitement éprouvée et l'aérage maîtrisé, l'abattage par le feu se maintient jusqu'en 1877. À Konsberg, jusqu'en 1885, le percement de certaines galeries d'assistance reste plus économique avec le feu qu'avec la poudre. Pour tous ces exemples très bien documentés, il n'est jamais question d'utiliser de l'eau pour refroidir le front de taille ou pour provoquer un choc thermique. Divers perfectionnements techniques sont apportés pour concentrer la chaleur vers le front de taille. Le plus efficace est le Pragelkatze, utilisé à Felsobanya, sorte de caisse en fer qui circonscrit le bûcher et dirige les flammes vers l'avant.

Dans les années 1860, on tente de remettre au « goût du jour » la méthode par le feu. Le bois est substitué par de la houille placée dans des fourneaux mobiles activés par de l'air comprimé. Une machine de ce type a été testée dans la mine de plomb du Grand Clos (Hautes-Alpes). Elle a prouvé son efficacité pour le creusement, mais silicatisait une partie du minerai, ce qui posait des problèmes lors des opérations de métallurgie. Enfin, en 1926, l'ingénieur Stoces teste avec succès des brûleurs à gaz dans les mines d'étain de Zinnwald et Hodrusa, mais ses résultats restent confidentiels. L'ère du feu sous terre était finie.

Références bibliographiques

ANCEL B., 1998, « Techniques minières et maîtrise de l'espace dans les mines d'argent médiévales. Exemples de mines de plomb argentifère des Alpes du Sud (X[e]-XIV[e] siècles) », *in* Beck P. (dir.), *L'innovation technique au Moyen Âge*, Actes du 6[e] Congrès international d'archéologie médiévale, Dijon, 1996, Paris, éd. Errance (coll. Archéologie aujourd'hui), p. 108-110.

ANCEL B., 2006, « La mine d'argent du Fournel à L'Argentière-la-Bessée (Hautes-Alpes) : méthodologie et bilan 1991-2001 », *in* Barge H. (dir.), *4 000 ans d'histoire des mines. L'exemple de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur. Mélanges Jean-Paul Jacob*, Theix, Actilia multimédia, p. 71-85.

ANCEL B., PY V., MARCONNET C., [sous presse], « De l'usage minier du feu, à l'interface homme environnement, sources et expérimentations », *in Études offertes à Georges Comet*, Aix-en-Provence, Publications de l'université de Provence (coll. Cahier d'histoire des techniques, 8).

DUBOIS C., 1996, « L'ouverture par le feu dans les mines : histoire, archéologie et expérimentations. » *Revue d'archéométrie*, 20, p. 33-46.

PY V., ANCEL B., 2006, « Archaeological Experiments in Fire-setting : Protocol, Fuel and Anthracological Approach », *in* Dufraisse A. (éd.), *Firewood Economy : Analytical Tools and Methods. News Datas for Archaeology and Study of Societies, Techniques and Land Uses*, Papers from the table-ronde held in Basel, 14-15 octobre 2004, Oxford, Archaeopress, (coll. BAR International Series, 1483), p. 71-82.

PY V., ANCEL B., 2007, « Exploitation des mines métalliques de la vallée de Freissinières (Hautes-Alpes, France) : contribution à l'étude de l'économie sud-alpine aux IX[e]-XIII[e] siècles », *in* Della Casa P., Walsh K. (éd.), *Interpretation of Sites and Material Culture from Mid-high Altitude Mountain Environments*, Actes du 10[e] Congrès de l'Association européenne des archéologues, Lyon, 2004, Trente, Museo tridentino di scienze naturali (coll. Preistoria alpina, 42), p. 83-93.

PY V., 2006, « Mine Charcoal Deposits : Methods and Strategies. The Medieval Fournel Silver Mines in the Hautes-Alpes (France) », *in* Dufraisse A. (éd.), *Firewood Economy : Analytical Tools and Methods. News Datas for Archaeology and Study of Societies, Techniques and Land Uses*, Papers from the table-ronde held in Basel, 14-15 octobre 2004. Oxford, Archaeopress, (coll. BAR International Series, 1483), p. 35-46.

WEISGERBER G., WILLIES L., 2001, « The Use of Fire in Prehistoric and Ancient Mining : Firesetting. » *Paléorient*, vol. 26/2, p. 131-149.