



**HAL**  
open science

## De l'usage minier du feu : sources et expérimentations

Vanessa Py, Bruno Ancel, Christophe Marconnet

► **To cite this version:**

Vanessa Py, Bruno Ancel, Christophe Marconnet. De l'usage minier du feu : sources et expérimentations. Cahier des Techniques de l'INRA, 2012, Des outils des machines et des hommes (8), pp.133-153. halshs-00781160

**HAL Id: halshs-00781160**

**<https://shs.hal.science/halshs-00781160>**

Submitted on 25 Jan 2013

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Cahier  
d'Histoire  
des Techniques  
| 8 |

# Des outils des machines et des hommes



études offertes à Georges COMET  
éditées par Aline DURAND

PUP



De l'Espagne à l'Italie, de la Normandie à la Provence, l'outillage agricole a joué un rôle fondamental dans l'histoire des sociétés anciennes et dans la genèse du monde moderne. Cet ouvrage présente un large éventail d'outils, de machines,

de processus techniques consignés dans les registres agricoles, artisanaux et industriels. Il montre que l'outil n'est pas seulement un objet concret, matériel, mais qu'il est chargé de symboles, qu'il reflète l'image de la société qui le fabrique et l'utilise.

*Aline Durand est maître de conférences à l'université de Provence et spécialiste du monde rural médiéval méridional. Ses travaux conjuguent l'étude des charbons de bois archéologiques à celle des actes de la pratique et des traités d'agronomie.*

Couverture: *Heures à l'usage de Rome* enluminées en partie par le Provençal Enguerrand Quarton (vers 1440-1470), mois de mars, taille de la vigne, © Bibliothèques d'Amiens Métropole, ms Lescalopier 19 B, f°3r. Cliché CNRS-Institut de recherches et d'histoire des textes.

*Heures à l'usage de Rome* dont le travail d'enluminure est attribué au Flamand Simon Bening, mois de juillet, scène de fenaison à la faux (vers 1510-1525), © Bibliothèque municipale de Rouen, ms 3028 f°7v. Photographie Thierry Ascencio-Parvy.

PRESSES UNIVERSITAIRES DE PROVENCE



# De l'usage minier du feu : sources et expérimentations

Vanessa PY, Bruno ANCEL, Christophe MARCONNET

L'abattage par le feu est auréolé de mystères en raison de son caractère séculaire et archaïque<sup>1</sup>. Les découvertes récentes liées au développement des méthodes de l'archéologie minière lèvent le voile. Mais des questions restent toujours posées concernant notamment la technique et la pratique du travail par le feu sous terre, son évolution, et ses conséquences sur l'architecture des ouvrages, la morphologie et la composition des déblais, l'organisation du travail et la gestion de la forêt. Cet article, qui n'a pas la prétention d'être exhaustif sur la diversité des sources et des outils utilisés pour nourrir cette problématique, a pour objectif, grâce à une approche pluridisciplinaire située au croisement des sciences humaines et des sciences de l'environnement, de comprendre les modes opératoires, les systèmes techniques et l'adaptation-réaction entre les mineurs et leur environnement.

## **Le facteur géologique et les techniques d'abattage en mine**

La technique d'abattage par le feu a été développée pour résoudre un des problèmes majeurs rencontrés par les mineurs : la dureté des matériaux constituant le sous-sol. À cet égard, nous écartons ici le cas de figure des substances exploitables en surface souvent enfermées dans des terrains meubles. Les métaux comme le fer, le cuivre, l'étain, le plomb, l'antimoine, l'argent et l'or, recherchés et exploités dans les temps anciens, médiévaux et modernes, sont inclus dans des concentrations minérales appelées minerais. Ils sont presque toujours associés à d'autres minéraux inexploitable<sup>2</sup> appelés gangue, comme le quartz, la calcite, la barytine et la fluorine. Les minéralisations se forment au

---

1 ANCEL et PY, 2008, p. 35-38.

2 La barytine et la fluorine sont néanmoins exploitées à partir de la fin du XIX<sup>e</sup> siècle.

sein d'une roche encaissante et prennent des allures très variées : couche, filon, réseau de filons, amas, imprégnations, etc.

En exploitant une minéralisation ou en creusant un ouvrage de recherche ou d'assistance, les mineurs sont en présence de matériaux dont la résistance au percement est très variable. Elle dépend de plusieurs facteurs mais, en premier lieu, de leur dureté. La plupart des minerais ont des duretés faibles et sont donc facilement abattables manuellement, à l'exception de certains minerais de fer et d'étain. Les gangues sont également tendres, sauf le quartz. Sous l'action du feu, la barytine se désagrège en crépitant. La dureté des roches encaissantes est très variable. Les marbres, les grès et certains schistes peuvent être assez durs. Les granites, les gneiss, les laves et les calcaires silicifiés sont plus résistants. Les roches les plus dures sont les quartzites et les diabases.

De prime abord, les roches et les minéralisations de dureté moyenne ont été de tout temps abattues manuellement. Avant l'usage minier de la poudre, le recours à l'abattage par le feu est attesté pour les roches assez dures, très fréquemment dans les roches très dures et systématiquement dans les quartzites. Dans le détail, les choses ne sont pas aussi tranchées, car une fissuration ou une altération peuvent attendrir la roche encaissante, notamment au contact de la minéralisation. De même, quand la puissance de la minéralisation est importante, les mineurs peuvent se dispenser de creuser dans la roche encaissante stérile très dure. Aussi, au sein d'une même mine, les techniques d'abattage employées peuvent être diverses et ont des conséquences sur le mode opératoire et la gestion du souterrain. Une bonne expertise du contexte géologique et minéralogique est donc primordiale pour les caractériser.

L'action mécanique est la plus courante. Il s'agit de la percussion lancée, opérée à l'aide d'un pic, d'un maillet ou d'une masse. La percussion posée est quant à elle la plus communément observée pour les périodes hautes. Elle est pratiquée avec une pointerolle, emmanchée ou non, enfoncée à coups de marteau. D'autres modes d'attaque consistent à dilater la roche par expansion notamment à l'aide de coins ou de bois gorgés d'eau. Au XVII<sup>e</sup> siècle, l'abattage par expansion se généralise avec le recours à l'explosif. Il existe aussi l'attaque par abrasion, illustrée par les haveuses dans les couches de charbon, et par érosion hydraulique ou « hushing », pratiquée en surface pour décaper les terrains meubles. Pour exploiter les matériaux solubles, comme le sel, les mineurs ont fait appel à l'action chimique. Mais surtout, dans les roches dures, et dès la protohistoire, ils ont fréquemment recouru à l'action thermique ou abattage par le feu.

Durant l'âge du Fer et l'Antiquité, l'abattage par le feu reste systématique dans les roches dures, mais le développement fréquent d'ouvrages d'assistance spacieux (galerie, descenderie, puits), taillés dans les sédiments stériles, témoigne de la production d'une gamme d'outils métalliques plus performants. À la Renaissance, l'abattage à la pointerolle et au marteau atteint son apogée. Il répond au progrès de la production métallurgique associé au développement des

techniques de taille manuelle. Des roches auparavant attaquées par le feu sont littéralement sculptées avec parfois des vitesses d'avancement ne dépassant pas 15 mètres par an<sup>3</sup>. L'abattage par le feu devient plus rare ou marginal dans beaucoup de mines. Attesté à partir de 1613 en Saxe, et 1617 au Thillot, l'usage de la poudre se perfectionne et se généralise dès la fin du XVII<sup>e</sup> siècle. Il faut attendre la seconde moitié du XIX<sup>e</sup> siècle pour observer un bond technologique avec le recours à la perforation mécanisée, à l'air comprimé, à la mèche de sûreté, à la dynamite, etc.

## **Des éléments pour décrire les formes, les transferts et l'imaginaire d'un savoir-faire technique : les sources textuelles et iconographiques**

Durant l'Antiquité, l'application minière de l'abattage par le feu transparait à travers quelques rares passages<sup>4</sup> dont le plus vivant est la description qu'Agatharclide de Cnide donne du travail dans les mines d'or d'Égypte<sup>5</sup>. Les témoignages abondent sur le recours à cette technique lors de la traversée des Alpes par Hannibal. Pline l'Ancien pense qu'elle était couramment utilisée pour l'exploitation des mines espagnoles du chef carthaginois. Probablement inspiré par le récit de Tite-Live, il décrit l'action combinée du feu et du vinaigre<sup>6</sup>. Comme pour l'eau, l'apport en tant qu'adjuvant du vinaigre doit être perçu en relation avec son action réputée pour éteindre un feu efficacement et refroidir le matériau avec lequel il entre en contact<sup>7</sup>. Alors que le recours au feu pour ouvrir un passage dans le défilé des Alpes est probable, l'emploi d'une quantité fabuleuse de vinaigre<sup>8</sup> doit être considéré comme un moyen de valoriser la puissance et la richesse de l'armée carthaginoise. De cette manière, cette épopée a été reprise et adaptée par d'autres peuples pour valoriser le génie de leurs héros ou de leur armée<sup>9</sup>.

3 ANCEL, 1990, p. 277-278.

4 THÉOPHRASTE, *De igne*, 70; LUCRÈCE, *De Natura Rerum*, I, Propriétés (1, 483-634); PLINE L'ANCIEN, *Histoire naturelle*, XXXIII, 21; MANILIUS, *Les Astronomiques*, IV, 243-251; DIODORE DE SICILE, *Bibliothèque historique*, III, XII; PHOTIUS, *Bibliothèque*, VII, Agatharchide, 25.

5 DIODORE DE SICILE, *op. cit.*; PHOTIUS, *op. cit.*

6 TITE-LIVE, *Histoire romaine*, XXI, XXXVI; APPIEN, *Histoire romaine*, III, V, IV, 15, *Le livre d'Annibal*; JUVENAL, X, 151-153; AMMIEN MARCELLIN, *Histoire*, XV, 11.

7 THÉOPHRASTE, *op. cit.*, 25; PLUTARQUE, *Œuvre morales, Propos de tables*, III.

8 D'après A. DEMAN, en supposant qu'il ait fallu déblayer au moins 2000 m<sup>3</sup> de roche, il aurait fallu environ 60 000 000 litres de vinaigre à 10 % pour réaliser l'opération !

9 LE CLERC, 1783, section XVI, p. 18; HAMMERT, 1837, p. 224; CENAC-MONCAUT, 1853, p. 5-6.

Le seul texte antique tiré d'un traité, le *De igne* de Théophraste, mentionne des problèmes de pollution de l'air et de suffocation lors de son usage souterrain<sup>10</sup>. Pour les éviter, l'aération des travaux doit être conçue de manière à ce que « l'air soit dilué par le mouvement ». L'auteur explique que les fumées sont nocives, non pas pour les mineurs qui sont à proximité des feux, mais pour ceux qui travaillent en amont. Ces désagréments sont évoqués dans les plaidoyers civils de Démosthène attestant son recours ponctuel dans les mines athéniennes au IV<sup>e</sup> siècle av. J.-C.<sup>11</sup>.

L'air vicié, les nuisances et les dangers de l'abattage par le feu sont des problèmes récurrents traités dans les statuts et les règlements miniers médiévaux. Les textes toscans et sardes promulgués avant le XIV<sup>e</sup> siècle sont les plus précis. À Massa, les « partenaires » ou concessionnaires et leurs ouvriers pouvaient ouvrir des puits à quinze pas de ceux des autres exploitants. Bien souvent, les concessions étant fort étroites, les réseaux étaient recoupés par plusieurs travaux appartenant à différents propriétaires. En cas de nécessité, et avec l'autorisation du maître des montagnes, l'abattage par le feu était toléré. Pour éviter des dangers mortels, le code prévoyait une clause sur l'allumage des bûchers<sup>12</sup>. Il devait être exécuté le samedi ou à la veille des jours fériés, avant la neuvième heure du jour. Au moment des mises à feu, il était interdit de fréquenter les travaux. À l'exception de ces temps réglementaires, l'abattage par le feu était prohibé dans les mines exploitées par plusieurs partenaires. À la Villa di Chiesa, le *Breve* prévoit une très lourde peine pour les mineurs usant du feu dans l'objectif de nuire à autrui<sup>13</sup>. Si un feu est à l'origine d'un décès, le fauteur est puni de la peine de mort. Il en est de même à Schladming en Autriche (Styrie) dans le règlement de 1322<sup>14</sup>. Dans le statut vénitien de 1488, inspiré du code minier de Schwaz<sup>15</sup> (1449), il est spécifié que la sécurité dans les chantiers doit être une des préoccupations majeures des exploitants. Les mineurs doivent pouvoir travailler sans être incommodés par la combustion des bûchers<sup>16</sup>.

La réglementation du temps de travail pour l'usage du feu se retrouve dans la législation minière de la Renaissance et des Temps Modernes. Dans le règlement du Leberthal<sup>17</sup> daté de 1527, un article (art. 52) spécifie que chaque exploitant doit attendre son tour pour « faire sauter le roc ». De la Saint-Michel

10 THÉOPHRASTE, *op. cit.*, 24, 70.

11 Des travaux au feu préhistoriques ont été reconnus à Siphnos en Grèce (WEISGERBER et WILLIES, 2001, pl. X, 1).

12 BONAINI, 1850, p. 641-642.

13 BAUDI DI VESME, 1877, CVI

14 KUNNERT, 1961.

15 WORMS, 1904, document n° 7.

16 FOUCARD, 1915, § 14 et 30 du statut minier de 1488.

17 Archives départementales du Haut-Rhin, Archives de Sainte-Marie-aux-Mines, D 3497 (2), Règlement minier du Leberthal (1527).

(29 septembre) à la Saint-Georges (24 avril), les feux doivent être allumés à la tombée du jour, et de la Saint-Georges à la Saint-Michel, les feux doivent être allumés « à la place du poste de droit » (après une journée de huit heures de travail). Chaque exploitant doit prévenir l'autre de l'allumage du feu (art. 53). Enfin, il est précisé que cet usage doit être si possible de recours limité. L'obligation de prévenir le ou les autres exploitants avant l'allumage des feux se retrouve dans le traité de G. Agricola<sup>18</sup> et jusqu'au XVII<sup>e</sup> siècle, avant l'usage presque généralisé de la poudre. Il en est de même dans les mines de fer de Dannemora en Suède au milieu du XVIII<sup>e</sup> siècle. Dans la plupart des mines du nord de l'Europe, les bûchers sont allumés quotidiennement après une journée de travail. Au Rammelsberg près de Goslar, aux XVIII<sup>e</sup>-XIX<sup>e</sup> siècles, les bûchers étaient encore mis à feu uniquement le samedi, à midi<sup>19</sup>.

Avant le XVI<sup>e</sup> siècle, les textes ne donnent aucune précision technique ou pratique sur l'abattage par le feu. Parfois accompagnées d'images, les descriptions deviennent plus détaillées à la Renaissance, mais demeurent encore sommaires jusqu'au XVIII<sup>e</sup> siècle. G. Agricola est le premier à souligner la difficulté de sa mise en œuvre et la variabilité des usages en fonction des contextes rocheux et du type d'ouvrage à percer. Le feu est utilisé uniquement lorsque la roche est extrêmement dure ou lorsqu'il faut élargir des ouvrages trop étroits pour permettre un abattage conventionnel au marteau et à la pointerolle<sup>20</sup>. Le feu est également employé de façon combinée avec la taille à l'outil, notamment dans le cas où seul le filon serait trop dur. La technique est plus rentable dans les ouvrages spacieux pouvant accueillir de grandes quantités de bois, mais le feu attaque plus le toit et le mur de l'ouvrage que la sole. Cette technique est aussi employée pour creuser des petites veines grâce à de petits bûchers de bois sec. Les témoignages consignés dans les rapports d'activités de mines de l'ancienne province minière germanique avant la fin du XVII<sup>e</sup> siècle sont conformes à cette description.

Au XVIII<sup>e</sup> siècle, la majeure partie de la documentation, constituée de descriptions du travail dans les mines par des voyageurs, traite d'ouvrages spacieux et spectaculaires<sup>21</sup>, rarement étayés, ouverts sur des filons très puissants. Dans certaines mines, comme à Falun en Suède, les mineurs travaillent presque nus dans une chaleur étouffante<sup>22</sup>. Certains témoignages supposent que des équipes travaillent dans la mine alors que des bûchers sont toujours en train de se consumer (**Fig. 1**). La sécurité des mineurs est assurée par des ouvrages d'aération très spacieux et une bonne maîtrise du courant d'air.

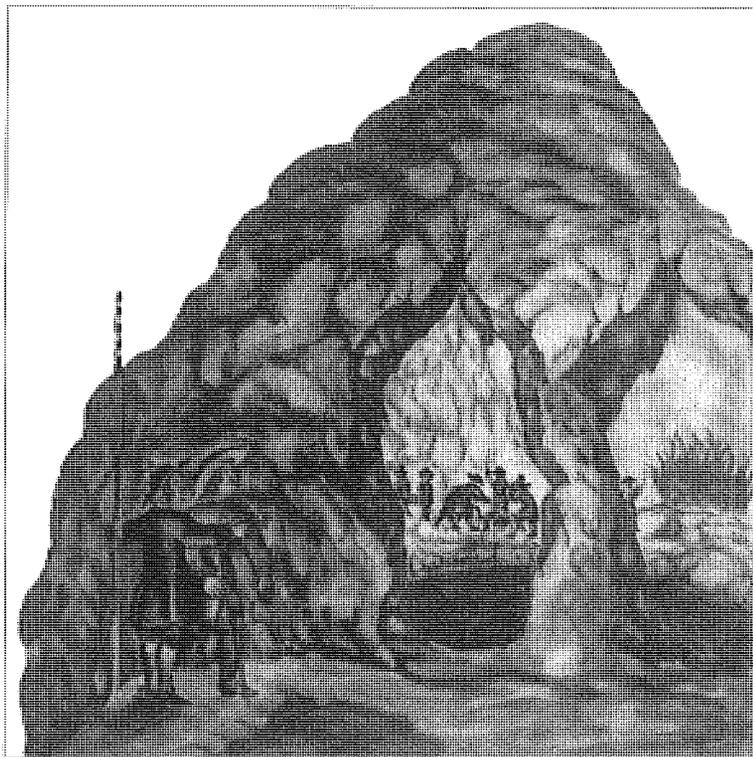
18 AGRICOLA, 1556, livres V et VI.

19 MONTESQUIEU, 1896, p. 245-248 et p. 268-271 ; COMBES, 1844, p. 292-297.

20 AGRICOLA, 1556, livre V.

21 DUROCHER, 1855, p. 237-238 ; MARMIER, 1843, p. 77.

22 OUTHIER, 1744, 1er juillet 1737, Les mines de cuivre (Falun).



*Fig. 1 - Scène souterraine d'abattage par le feu d'après H. Ranie (Map of Falun, 1687).*

L'usage combiné de la poudre et du feu est attesté dans les sources écrites pour le percement des ouvrages d'assistance dès le XVIII<sup>e</sup> siècle, mais remonte au XVII<sup>e</sup> siècle. Il est alors pratiqué dans toutes les grandes mines du nord et du nord-est de l'Occident où l'abattage par le feu est encore de rigueur. En Felzebanic, près des frontières de la Transylvanie, au Rammelsberg, ou encore à Kongsberg en Norvège, les sols des ouvrages et certains fronts de taille sont retouchés à la poudre<sup>23</sup>. À Falun, à partir de la première moitié du XVIII<sup>e</sup> siècle, la poudre est d'abord utilisée seulement pour l'approfondissement des puits. À Felsöbánya, où la roche est d'une extrême dureté, l'usage de la poudre a été exclu car il aurait nécessité des dépenses démesurées<sup>24</sup>. L'abattage

23 DELIUS, 1773, § 207; HÉRON DE VILLESFOSSE, 1819, p. 303-309.

24 BORN, 1780, lettre XVIII.

par le feu est même souvent préférable à la poudre pour le percement des galeries comme à Kongsberg<sup>25</sup>, où l'usage du feu se maintient jusqu'en 1890<sup>26</sup>, et pour l'exploitation de filons puissants et très durs comme au Rammelsberg au Hartz et à Altemberg en Saxe<sup>27</sup>. Les dépenses pour la poudre sont considérables et dans certains cas, l'abatage à l'explosif n'est pas plus performant que l'abatage par le feu. Cependant, à l'aube du XIX<sup>e</sup> siècle, dans certaines régions, comme dans le Hartz ou en Scandinavie<sup>28</sup>, l'augmentation du prix du bois fait restreindre son usage au profit de la poudre<sup>29</sup>. Suivant les mines, toujours en combinaison avec la poudre, il n'est plus qu'utilisé pour le percement des galeries, et de façon de plus en plus rare pour l'abatage en chambre<sup>30</sup>.

À partir du XVIII<sup>e</sup> siècle, dans la région de Felsöbánya, les mineurs ont mis au point une sorte de grille en fer<sup>31</sup> couverte de tôles, appelée « *Procgelkatze* » ou « *prägelkatze* ». Elle était placée dans une cavité ouverte au préalable à la poudre, de façon à circonscrire et retenir le bûcher, puis à diriger les flammes vers l'avant. Cette technique permettait notamment de réduire la taille des ouvrages sur le filon et facilitait le percement des galeries. Mais les mineurs étaient souvent obligés de retoucher le sol à la poudre, car la pente était trop grande. À Kongsberg, dans les années 1840, les mineurs optent pour l'installation de parois en métal ou en brique à l'arrière des bûchers de façon à condenser la chaleur comme dans un four. Les fumées étaient évacuées par des conduits de ventilation en fer installés dans des emmurements destinés à canaliser l'air<sup>32</sup>. Dans les années 1860, devenu beaucoup trop onéreux, le bois est remplacé par la houille placée dans des sortes de poêles<sup>33</sup>, ou dans des fourneaux mobiles activés par de l'air comprimé<sup>34</sup> (application de l'appareil de M. Hugon<sup>35</sup>). Enfin, en 1926, l'ingénieur B. Stoces teste avec succès des brûleurs à gaz dans les mines d'étain de Zinnwald et d'Hodrusa, mais ses résultats restent confidentiels<sup>36</sup>. L'ère du feu sous terre était révolue.

25 École des mines de Paris, *Mémoire de voyage* M. 831, NIVOIT (E.), *Mémoire sur les mines d'argent de Kongsberg en Norvège*, 1864.

26 BERG, 1992.

27 MONNET, 1773, p. 79-82 ; HÉRON DE VILLEFOSSE, 1819, *op. cit.*

28 DUROCHER, 1855, *op. cit.*, p. 243-244.

29 École des mines de Paris, *Mémoire de voyage*, n° 436, LAN (Ch.-R.), *Mémoire sur l'exploitation par le feu de la mine du Rammelsberg*, 1850.

30 DUROCHER, 1855, p. 244.

31 BORN, 1780, *op. cit.*

32 BERG, 1992, p. 73.

33 GRATEAU, 1864, p. 197-198.

34 PAYEN, 1865-1866, p. 156-161.

35 CALLON, 1874, p. 243.

36 STOCES, 1927.

## Les témoignages archéologiques

Pour toutes les périodes, de nombreux sites livrent des vestiges souterrains témoignant du recours à l'abattage par le feu. Leur reconnaissance est possible même lorsque les travaux ont été défigurés par des éboulements ou des reprises d'exploitations modernes. En effet, il est toujours possible d'observer des reliques de parois lisses et arrondies ou de déceler dans les remblais des charbons de bois résiduels qu'il ne faut pas confondre avec les vestiges de torches en bois. La prudence s'impose dans un environnement de roches carbonatées où l'érosion karstique génère des formes arrondies et lisses. Une confusion est donc possible d'autant plus que certaines minéralisations sont liées à des phénomènes karstiques. Les dépôts carbonisés dans les remblais sont souvent perturbés par des phénomènes de lessivages et/ou des remaniements. Seuls des sondages de plusieurs décimètres de profondeur accompagnés d'une analyse stratigraphique permettent de déterminer ces distorsions.

Dans de bonnes conditions de conservation, les cavités ouvertes au feu s'avèrent souvent assez vastes (**Fig. 2**). Elles présentent des parois concaves et des plafonds en coupoles pouvant prendre l'aspect de bulles coalescentes<sup>37</sup>. Ces ouvrages dépassent très souvent la zone minéralisée. Ils peuvent indiquer un mauvais contrôle de l'abattage dans certaines directions ou encore la combustion de grands bûchers. Mais il existe aussi des chantiers exigus et des galeries de très faible gabarit (**Fig. 3**). Malgré l'absence de marque d'outil, il est possible de reconstituer la dynamique de creusement de ces travaux<sup>38</sup>. Enfin, le percement d'ouvrages descendants ne paraît pas avoir posé de problèmes (**Fig. 4**).

Quand la roche est très dure, seule l'action du feu est visible. Elle est marquée par l'arrondi concave des parois. En roche moins dure, le travail par le feu se poursuit par un abattage manuel, notamment dans les zones de faiblesse, fissurées ou altérées, qui peut effacer en grande partie les traces du feu. Une entaille préparatoire est parfois visible sur les fronts de taille. Dans les mines plus récentes, les mineurs ont développé la méthode mixte décrite dans les textes. Elle consiste à creuser une entaille profonde à la pointerolle, puis à l'élargir à l'aide du feu<sup>39</sup>.

L'étude approfondie de ces ouvrages reste assez délicate. Il n'est pas toujours possible d'évaluer la dureté de la roche abattue. Les cavités rondes fortement remblayées sont difficiles à relever. Leur décombrement et le développement

37 Par exemple, de beaux exemples sont connus au Fournel dans les Hautes-Alpes (ANCEL, 1998a), à Vallauria dans les Alpes-Maritimes (ANCEL, 1998b), à Largentière en Vivarais (BAILLY-MAÎTRE, 2002), à Castelminier et à Banca dans les Pyrénées (ANCEL *et al.* 2001), et à Rosia Montana en Roumanie (CAUET *et al.* 2003).

38 ANCEL, 1998b, p. 108-110.

39 Cette technique est observée au XVII<sup>e</sup> siècle dans les mines du Thillot (88) et de Château-Lambert (70) (études en cours, F. Pierre et B. Ancel).

d'une fouille archéologique exhaustive sont rarement réalisables pour des raisons de sécurité et/ou de logistique.

Les données archéologiques, textuelles et iconographiques donnent une image relativement précise, mais incomplète, du mode opératoire associé à la technique d'abattage par le feu. La documentation historique pointe l'organisation du travail, sa codification, les difficultés propres à l'usage souterrain du feu. À partir de la Renaissance, elle met en scène le bûcher et le mineur. Malgré le décalage d'échelles chronologiques et géographiques, les textes convergent tous vers une constatation : l'abattage par le feu en mine relève d'un véritable savoir-faire. Il est fondé sur la maîtrise de plusieurs facteurs : variation de dureté de la roche, gîtologie, morphologie du front de taille, circulation de l'air, calibre et hygrométrie du bois, forme des bûchers. Dès le XVI<sup>e</sup> siècle, les textes et les fronts de taille témoignent d'une volonté de réduire son usage grâce au perfectionnement de la taille manuelle combinée au feu puis aux explosifs. Au Moyen Âge, les mineurs ont entièrement percé au moyen du feu des kilomètres de galeries, des puits verticaux, obliques, et ont ouvert des chambres souterraines parfois spectaculaires. Or, la documentation de cette période ne dit rien de leur



Fig. 2 - Chantier sur stockwerk dans la mine d'or de Carnic à Rosia Montana (époque romaine) (Roumanie) (cl. B. Ancel, 2000).



*Fig. 3 - Galerie en travers-bancs dans la mine de plomb argentifère du Castelminier à Aulus-les-Bains (Moyen Âge) (Ariège, France) (cl. B. Ancel, 2003).*



*Fig. 4 - Puits de recherche aveugle en cours de fouille dans la mine de plomb argentifère de la Pinée (XII<sup>e</sup> s.), à L'Argentière-La-Bessée (Hautes-Alpes, France) (cl. B. Ancel, 2001).*

travail, de leur gestuelle et du mode opératoire. Pour cette raison, le recours à l'expérimentation sérielle s'est imposé. Elle constitue un trait d'union entre nos connaissances empiriques des phénomènes et les anciens savoir-faire.

## Expérimenter : mesurer et pratiquer

Depuis 1997, des expérimentations d'abattage par le feu se déroulent chaque hiver dans la mine de Fournel à L'Argentière-La Bessée. Pour assurer la sécurité et la faisabilité du suivi et du protocole scientifiques, elles ont lieu dans une salle moderne, facilement accessible et bien aérée. Pour percer une galerie en travers-banc à l'image des portions observées dans le réseau médiéval (1,50 m x 1 m), les bûchers sont dressés contre une paroi de quartzites non altérées et très dures. Le bois utilisé (mélèze, épicéa, pin sylvestre) est stocké sous abri à l'extérieur. Après deux ans de séchage, leur taux d'humidité varie entre 18 et 15 %. Les principaux paramètres pressentis font l'objet de mesures et d'observations systématiques : poids du bois, taux d'humidité, calibre des bûches, type de bûcher (adossé contre la paroi, en tour, couché, etc.), dynamique du feu, températures ambiantes et sur le front de taille<sup>40</sup>. Les résidus de roche et les charbons font l'objet d'analyses granulométriques et d'observations microscopiques. L'avancement du front de taille est évalué et mesuré.

Généralement, un quart d'heure après l'allumage, alors que le bûcher est complètement embrasé, les premiers claquements de roche surviennent. Si le feu est réussi, des « explosions » appelées étonnements leur succèdent (Fig. 5). Des plaquettes de roche peuvent être projetées à plus de 5 m du foyer. Au bout d'une heure, le bûcher s'effondre et achève de se consumer. Après refroidissement, le foyer se compose d'une quantité importante de lames, de plaquettes et de poussières mêlées aux charbons. Après son nettoyage, le front de taille est purgé à coup de massettes, produisant encore un volume important de roche abattue.

Après 180 feux, le résultat est une galerie de forme ovale, profonde de 2,10 m. La direction de l'avancement est facile à maîtriser. Les rendements<sup>41</sup> peuvent être supérieurs à 1. L'abondance des charbons résiduels suppose un recyclage de la fraction supérieure et/ou d'importants remaniements (tris) en contexte archéologique. Un cinquième des résidus rocheux est d'une taille inférieure à 5 mm. Il est donc impossible de trier cette fraction manuellement *in situ*. Certains bûchers ont été infructueux car le volume de bois était trop faible, et/ou les proportions de bûches fines et massives n'étaient pas équilibrées, et/ou la construction mal conçue (orientation, inclinaison, plancher). À l'heure actuelle, pour faire avancer efficacement le front de taille, il faut alterner des

40 PY et ANCEL, 2006

41 Poids du bois/poids de la roche.



*Fig. 5 - Bûcher expérimental avec projection de plaquettes (étonnement) (cl. B. Ancel, 2003).*

bûchers assez gros (50 à 70 kg), adossés au front de taille, pour creuser la partie supérieure, combinés avec des bûchers plus petits (30 à 50 kg), couchés sur le pied du front de taille, pour attaquer la partie inférieure.

En l'état actuel des données, il est impossible de mesurer précisément le rythme d'avancement des mineurs du Fournel, très variable suivant les contextes rocheux, le type d'ouvrage et la profondeur des travaux. On peut juste constater la lenteur du procédé pour le percement des ouvrages d'assistance étroits, puisque la technique est plus rentable dans les cavités élargies. Le rendement global de l'exploitation année après année (quantité de bois consommée et volume de roche abattu) ne peut pas être évalué, ni même modélisé car trop de variables, pas toujours maîtrisées, entrent en jeu. En revanche, pour le cas spécifique de cette galerie expérimentale, une hypothèse d'avancement peut être formulée : en réalisant deux feux par jour, 250 jours par an, on peut espérer creuser environ 7 m de galerie, avec une consommation de 20 tonnes de bois sec.

## **L'approche granulométrique des résidus de l'abattage par le feu**

Les remblais sont le produit de l'accumulation des résidus issus directement ou indirectement de l'abattage par le feu. Il s'agit le plus souvent de résidus pauvres ou stériles en minerai utile, volontairement abandonnés et stockés dans la mine. Le classement granulométrique, la forme et l'aspect des grains composant ces matériaux, caractérisent ce mode d'abattage et les différentes étapes qui le constituent.

L'analyse des matériaux obtenus lors des expérimentations a permis d'identifier les caractères granulométriques propres à chaque étape du creusement et les facteurs susceptibles de les modifier<sup>42</sup>. Ainsi, lors de l'étonnement de la roche sous l'effet de la dilatation, l'essentiel des grains produits se présente sous forme de plaquettes de quelques millimètres à plusieurs centimètres. Cette proportion de plaquettes est nettement moins marquée dans la composition des matériaux issus de la purge manuelle des fronts de taille. Enfin, la dimension des grains s'accroît et les plaquettes s'épaississent avec l'augmentation de la taille des bûchers.

Une étude similaire a été conduite en parallèle sur des résidus prélevés dans les anciens travaux de la mine du Fournel. Les résultats des analyses ont été plus hétérogènes et plus variés que ceux obtenus lors des expérimentations, procédant, sans doute, d'abattages réalisés dans des contextes différents. Mais cette variété des faciès granulométriques souligne surtout l'existence d'un mode opératoire plus complexe que le protocole expérimental, comprenant des

<sup>42</sup> Depuis 1992, de nombreux résidus, issus notamment des installations minéralogiques, font l'objet d'études sédimentologiques (MARCONNET, 1994).

étapes de ramassage, de transport, de stockage et de tri, mises en évidence par la stratigraphie<sup>43</sup>.

## La gestion de la forêt industrielle à travers l'étude des charbons de bois

Aux alentours d'une mine, la forêt est sollicitée pour l'abattage par le feu, la consolidation et l'aménagement des travaux, la fabrication du charbon qui alimente la métallurgie et la forge. Il en résulte une synergie étroite entre les disponibilités forestières et l'exploitation minière. L'anthracologie s'est avérée une clé d'interprétation adéquate pour caractériser ces interrelations. En effet, les quantifications des fréquences des essences déterminées reflètent leurs proportions moyennes dans le territoire d'approvisionnement des mineurs.

Le développement d'une approche anthracologique en contexte minier a été réalisé dans les mines médiévales du Fournel<sup>44</sup>. Elle a consisté à élaborer une méthode de prélèvement et d'échantillonnage adaptée à la pluralité des contextes pour réfléchir sur la représentativité paléoécologique des charbons, les usages du bois et les modalités de gestion des ressources ligneuses. L'apport croisé de l'expérimentation, de l'analyse des dynamiques opératoires et de la sédimentologie détermine les biais inhérents aux perturbations des déblais et à leur rapport de durée<sup>45</sup>.

Les boisements situés dans l'aire d'approvisionnement des mineurs se composent essentiellement de mélèzes et/ou épicéas (*Larix* sp., *Picea* sp.), souvent en phase pionnière et en faux climax dans l'étage montagnard supérieur et/ou dans le subalpin inférieur à la place des sapinières ou des pinèdes. Cette prédominance n'est probablement pas due à un choix technique. L'expérimentation a démontré que le rendement des feux dépend avant tout de facteurs indépendants de l'espèce. Les mineurs exploitent en priorité les essences présentes en abondance dans leur environnement proche. Ils peuvent adapter leurs propriétés en fonction des contraintes techniques, notamment en gérant leur humidité, et en faisant varier leur calibre et l'architecture des bûchers.

Parallèlement à une restitution détaillée de l'état et de la composition des forêts à l'échelle du versant et de la vallée, les diagrammes anthracologiques mettent en évidence une gestion raisonnée des disponibilités forestières sous forme de quartiers spécialisés, mais pas spécifiques, et fondée sur l'anticipation des besoins<sup>46</sup>. Les mineurs ont favorisé la progression du mélézin dans les limites

43 Une approche comparable, entreprise dans les mines carolingiennes de Melle, a mis en évidence des opérations d'enrichissement du minerai à proximité des fronts de taille (TEREYGEOL, 2001).

44 PY, 2006.

45 PY, 2009.

46 PY, 2009.

maximales de son extension aux dépens d'essences moins dynamiques et moins intéressantes d'un point de vue agrosylvopastoral. L'aire d'approvisionnement était centrée dans les forêts d'ubac et dans la tranche de l'étage montagnard supérieur infiltrée par le mélézin de descente. De façon plus ponctuelle et cyclique, les mineurs se sont approvisionnés dans des stations subalpines d'adret à tendances mésophiles. Les choix étaient dictés par les disponibilités, variables en fonction de la mobilité du couvert forestier. La mine a de la sorte contribué à la fluctuation du degré d'ouverture ou de fermeture du paysage montagnard et subalpin pour produire du fourrage et du bois de feu industriel provenant surtout de bois de futaies matures.

De la sorte, cette étude contribue à reconsidérer l'idée que l'industrie minière médiévale est à l'origine de déboisements irréversibles. Dès le x<sup>e</sup> siècle, le paysage n'est pas constitué de forêts séculaires, mais d'une mosaïque de formations herbeuses et boisées. La forêt est progressivement éliminée sous l'influence d'activités anthropiques multiples : le mélézin de reconquête, les landes et les prairies s'étendent alors. Loin d'être un espace figé et délimité, convoité et déboisé par des paysans et des artisans cupides, ou encore rongé et gangrené par le pastoralisme et la mine, la forêt s'inscrit dans une évolution de la société et de ses techniques, elle est mobile, elle est mouvante, elle se régénère et change de physionomie sur des durées courtes jusque alors difficilement perceptibles. Au Moyen Âge central, l'exploitation minière a participé, au même titre que les autres activités, à sa mise en valeur économique comme à son démantèlement. Dans la Haute-Durance, elle concerne les zones les plus exposées à l'activité érosive et l'étage subalpin où l'extension croissante des terres pastorales sur des terrains fragiles a progressivement conduit à l'extinction du pin cembro qui s'est maintenu en altitude jusqu'à l'aube de l'ère moderne.

## Conclusion et perspectives

La conjugaison d'approches pluridisciplinaires élargit le champ d'investigation et replace la mine et les systèmes techniques associés au sein d'une dynamique générale de mise en valeur et d'exploitation des ressources minières et forestières. Le mode opératoire de l'abattage par le feu ne se réduit pas à des feux répétés, mais influe sur toute l'organisation du travail des mineurs. Il intègre des étapes de préparation du combustible (évaluation des besoins, stockage, etc.) étroitement liée à la gestion de la forêt, et des étapes de travail sous terre comme l'aménagement de l'aire de travail pour la circulation et l'aéragé, le stockage des déblais et le tri des matériaux produits par le feu.

Il s'agit maintenant d'affiner le procédé expérimental et de multiplier les enquêtes archéologiques pour bâtir une restitution fiable et détaillée du procédé et de ses variantes sur toute la chaîne opératoire. L'étude comparée de résidus d'origine différente permet de progresser dans la compréhension des techniques

d'abattage par le feu. Mais, elle nécessite de resserrer encore davantage les liens entre les observations et l'interprétation des faits archéologiques, les résultats et les méthodes de l'expérimentation.

Le site minier de Faravel-Fangeas<sup>47</sup> dans les Hautes-Alpes présente un cadre de travail exceptionnel grâce à sa situation isolée en haute montagne (2000-2200 m d'alt.) et à l'excellent état de conservation des ouvrages et des remblais (**Fig. 6**). Il ouvre des possibilités de comparaison avec les mines proches du Fournel (chronologie similaire, étage biogéographique plus élevé, abattage par le feu, etc.) notamment pour mieux cerner les liens et les interactions entre les systèmes techniques miniers et un milieu naturel sensible aux déséquilibres écologiques.

## Sources

- Archives départementales du Haut-Rhin, Archives de Sainte-Marie-aux-Mines, D 3497 (2), Règlement minier du Leberthal (1527), trad. Degermann.
- École des mines de Paris, *Mémoire de voyage* M. 831, NIVOIT E., *Mémoire sur les mines d'argent de Kongsberg en Norvège*, 1864.
- n° 436, LAN Ch.-R., *Mémoire sur l'exploitation par le feu de la mine du Rammelsberg*, 1850.
- AMMIEN MARCELLIN, *Histoire*, trad. É. Galletier, Paris, Les Belles Lettres, 1968, 295 p.
- APPIEN, *Histoire romaine*, trad. D. Gaillard, Paris, Les Belles Lettres, 1998, 90 p.
- DIODORE DE SICILE, *Bibliothèque historique*, trad. B. Bommlaer, Paris, Les Belles Lettres, 1989, 150 p.
- JUVENAL, *Juvenal and Persius*, trad. G.G. Ramsay, London, 1961.
- LUCRÈCE, *De Natura Rerum*, trad. H. Clouard, Paris, Garnier, 1939.
- MANILIUS, *Les Astronomiques*, M. Nisard, Stace, Martial, Manilius, Luci: œuvres complètes avec la traduction en français, Paris, Firmin-Didot, 1878.
- PHOTIUS, *Bibliothèque*, trad. R. Henry, Paris, Les Belles Lettres, 1974.
- PLINE l'Ancien, *Histoire naturelle*, trad. J. André, Paris, Les Belles Lettres, 1971.
- PLUTARQUE, *Œuvres complètes de Plutarque - Œuvres morales*, trad. V. Bétoulad, t. III, Paris, Hachette, 1870, 5 vol.
- THÉOPHRASTE, *De igne. A post-aristotelian view of the nature of fire*, trad. et éd. V. Coutant, Assen, Koninklijke Van Gorcum et Comp., 1971.
- TITE-LIVE, *Histoire romaine*, trad. P. Jal, Paris, Les Belles Lettres, 1988, 135 p.

47 PY et ANCEL, 2007.



*Fig. 6 - Chantier de la Grande Fosse de Fangeas (X<sup>e</sup>-XI<sup>e</sup> s.), à Freissinières (Hautes-Alpes, France), ouvert par le feu et boisé (cf. B. Ancel, 2008).*

## Écrits anciens

- AGRICOLA G., 1556, *De Re Metallica*, traduit de l'édition originale latine de 1556 par A. France-Lanord, Thionville, Gérard Klopp, 1987.
- BAUDI DI VESME C. (éd.), 1877, « *Codex Diplomaticus Ecclesiensis* », *Historiae Patriae Monumentae*, 17, *Augustae Taurinorum*.
- BONAIMI F. (éd.), 1850, « *Ordinamenta super arte fossarum rameriae et argenteriae civitatis Massae - Statuto delle miniere d'argento e di rame della città di Massa* », *Archivio Storico Italiano*, T. 6, série 1, appendice 8, appendice all'archivio storico italiano n° 27.
- KUNNERT H. (éd.), 1961, « *Der Schladminger Bergbrief (1322)* », *Der Anschnitt*, 13, 2, p. 3-9.
- BORN I. E. VON, 1780, *Voyage minéralogique fait en Hongrie et en Transylvanie*, 1770, A. G. Monnet (trad.), Paris, lettre XVIII.
- CALLON P. J., 1874, *Cours professés à l'École des Mines de Paris*, 2<sup>e</sup> partie, « Cours d'exploitation des mines », I, Paris, Dunod.
- COMBES Ch.-P.-M., 1844, *Traité de l'exploitation des mines*, t. I, Paris, p. 292-297, cf. « travail au feu au Rammelsberg ».
- CENAC-MONCAUT J. E. M., 1853, *Histoire des Pyrénées et des rapports internationaux de la France avec l'Espagne depuis les temps les plus reculés jusqu'à nos jours*, t. II.
- DELIUS C.-F., 1773, *Traité sur la Science de l'Exploitation des Mines*, trad. de J.-G. Schreiber, Paris, 1778, § 207.
- FOUCARD (éd.), 1915, *Notizie sull'industria mineraria nella Venezia sotto il dominio della Repubblica, Appendice alla Rivista del Servizio minerario nel 1913*, Rome, 82 p.
- HAMMER PURGSTALL J. von, 1837, *Histoire de l'Empire ottoman*, t. 9, Paris.
- HERON DE VILLEFOSSE A.-M., 1819, *De la richesse minérale*, t. II, Paris, Imprimerie royale, p. 303-309.
- LE CLERC, 1783, *Histoire physique, morale, civile et politique de la Russie ancienne*, t. II, livre cinquième, « Précis historique des Tatars », Paris.
- MARMIER X., 1843, *Voyage de la Commission Scientifique du Nord en Scandinavie, en Laponie, au Spitzberg et aux Feroë, pendant les années 1838, 1839 et 1840...*, Paris, t. II.
- MONNET A.-G., 1773, *Traité de l'exploitation des Mines*, Paris.
- MONTESQUIEU Ch.-L. de S., 1896, *Voyages de Montesquieu, mémoire sur les mines (vers 1730)*, Bordeaux, p. 245-248 et p. 268-271.
- OUTHIER R., 1744, *Journal d'un voyage au Nord en 1736 et 1737 pour déterminer la figure de la Terre*, 1744, reprint, Paris, 1994, 1<sup>er</sup> juillet 1737, Les mines de cuivre (Falun).

WORMS S. (éd.), 1904, *Schwazer Bergbau im fünfzehnten Jahrhundert*, Vienne, 176 p., document n° 7.

## Bibliographie

- ANCEL B., 1990, « Les techniques d'extraction dans les mines métalliques du XVI<sup>e</sup> siècle », *Vivre au Moyen Âge : 30 ans d'archéologie en Alsace*, catalogue de l'exposition présentée à Strasbourg, p. 276-284.
- 1998a, « La mine du Fournel (L'Argentière-La-Bessée, Hautes-Alpes, France) : l'exploitation rationnelle aux X<sup>e</sup>-XIV<sup>e</sup> siècles d'un filon de plomb argentifère », L. Brigo et M. Tizzoni (dir.), *Il monte Calisio e l'argento nelle alpi dall'antichità al XVIII secolo*, Atti del Convegno europeo promosso e organizzato dai comuni di Civezzano e Fornace e dalla Sat Società alpinisti trentini – Sezione de Civezzano, Civezzano-Fornace (Trento), 1995, p. 161-193.
- 1998b, « Techniques minières et maîtrise de l'espace dans les mines d'argent médiévales. Exemples de mines de plomb argentifère des Alpes du Sud (X<sup>e</sup>-XIV<sup>e</sup> siècles) », P. Beck (éd.), *L'innovation technique au Moyen Âge*, Actes du VI<sup>e</sup> congrès International d'archéologie médiévale, Dijon, Mont-Beuvray, Chenôve, Le Creusot, Montbard, 1-5 octobre 1996, Paris, Errance, p. 108-110.
- ANCEL B., DARDIGNAC C., PARENT G. et BEYRIE A., 2001, « La mine de cuivre antique des Trois-Rois, vallée de Baigorry », *Les ressources naturelles des Pyrénées, leur exploitation durant l'Antiquité*, Entretiens d'archéologie et d'histoire, Saint-Bertrand-de-Comminges, p. 179-194.
- ANCEL B et PY V., 2008, « L'abattage par le feu : une technique minière ancestrale », *Archéopages*, n° 22, « Mines et carrières », juillet, p. 33-41.
- BAILLY-MAITRE M.-Ch., 2002, *L'argent. Du minerai au pouvoir dans la France médiévale*, Paris, Picard, « Espaces médiévaux », 211 p.
- BERG B. I., 1992, « Les techniques d'abattage à Kongsberg (Norvège) du XVII<sup>e</sup> au XIX<sup>e</sup> siècle : pointerolle, travail au feu et tir à la poudre », *Les techniques minières de l'Antiquité au XVIII<sup>e</sup> siècle*, 113<sup>e</sup> Congrès National des Sociétés Savantes, Strasbourg 1988, Techniques minières, Paris, CTHS, p. 55-76.
- CAUQUET B., ANCEL B., RICO et TAMAS C., 2003, « Ancient mining networks. The French archaeological missions 1999-2001 », *Alburnus Maior I*, Bucharest, p. 467-526.
- DUROCHER J., 1855, « Note sur l'exploitation des mines et des usines dans le nord de l'Europe », *Annales des Mines*, 5<sup>e</sup> série, t. VII, p. 237-238.
- GRATEAU E., 1864, « Exploitation par le feu », *Revue universelle des Mines*, 1<sup>re</sup> série, t. XVI, p. 197-198.
- MARCONNET Ch., 1994, *La préparation mécanique du minerai de galène, au XIX<sup>e</sup> siècle, sur le site du Fournel, à partir d'une étude sédimentologique des restes de traitement*, Mémoire de Diplôme d'Études Approfondies, Université de Paris I.

- PAYEN A., 1865-1866, « Flambage des bois et des roches », *Annales du Conservatoire des Arts et Métiers*, 1<sup>re</sup> série, t. VI, p. 156-161.
- PY V., 2006, « Mine charcoal deposits : methods and strategies. The medieval Fournel silver mines in the Hautes-Alpes (France) », A. Dufraisse (ed.), *Charcoal analysis : new analytical tools and methods for archaeology*, Papers from the table-ronde held in Basel, 14 -15 octobre 2004, Oxford, Archaeopress, British Archaeological Reports International Series S 1483, p. 35-46.
- 2009, *Mine, bois et forêt dans les Alpes du Sud au Moyen Âge. Approches archéologique, bioarchéologique et historique*, Thèse de doctorat, Université de Provence, Aix-Marseille I, 3 vol.
- PY V. et ANCEL B., 2006, « Archaeological experiments in fire-setting : protocol, fuel and anthracological approach », A. Dufraisse (ed.), *Charcoal analysis : new analytical tools and methods for archaeology*, Papers from the table-ronde held in Basel, 14 -15 octobre 2004, Oxford, Archaeopress, British Archaeological Reports International Series S 1483, p. 71-82.
- 2007, « Exploitation des mines métalliques de la vallée de Freissinières (Hautes-Alpes, France) : Contribution à l'étude de l'économie sud-alpine aux IX<sup>e</sup>-XIII<sup>e</sup> siècles », Ph. Della Casa, K. Walsh (éd.), Actes de la session montagne « Interpretation of sites and material culture from mid-high altitude mountain environments », colloque de l'European Association of Archaeologists, Lyon, septembre 2004, *Preistoria Alpina*, 42, p. 83-93.
- STOCES B., 1927, *Anwendung der Feuermethod im Modernen Bergbau*, Zurich.
- TEYREGEOL F., 2001, *Les mines d'argent carolingiennes de Melle*, Thèse de doctorat, Université de Paris I, 3 vol., 608 p.
- WEISBERGER G. et WILLIES L., 2001, « The use of fire in prehistoric and ancient mining : firesetting », *Paléorient*, 26/2, CNRS, p. 131-149.