

effektivität, sowie die Prozeßentwicklung in Verbindung mit der archäologischen und archäometrischen Datierung und der Grabungsstratigraphie. Dieses gilt ebenso für die Bestimmung der Art und des Umfangs der jeweiligen Verhüttung und der generellen Erkenntnis der technischen Entwicklung. Eine allgemein einsetzbare Analysenmethode dafür gibt es noch nicht. Es müssen immer mehrere, nach Möglichkeit verschiedene Untersuchungsmethoden angewandt und die Meßergebnisse kritisch gewertet werden.

Durch die große Zahl der im Harz vorhandenen unterschiedlichen Erze bzw. Lagerstätten ist der Rückschluß von den Schlackencharakteristika auf die Herkunftsstätte (ohne Erzfunde) problematisch und nur möglich, wenn Hüttenplätze archäologisch gegraben und archäometallurgisch untersucht werden, die zweifelsfrei einer Lagerstätte zugeordnet werden können.

PAUL BENOIT · IVAN GUILLOT · ALAIN PLOQUIN · PHILIPPE FLUZIN

## ARCHEOLOGIE ET PALEOMETALLURGIE DES SITES DE MINOT ET FONTENAY EN BOURGOGNE

### Introduction: la sidérurgie cistercienne

Quel a été le rôle des moines de l'ordre de Cîteaux dans le développement de la sidérurgie européenne? Tel est le problème historique qui est à l'origine des travaux présentés ici. Le recensement des chartes concernant le fer, systématique dans la province ecclésiastique de Reims et très avancé dans le diocèse de Langres, du XII<sup>ème</sup> au milieu du XIV<sup>ème</sup> siècle, montre que 85% des actes sont d'origine cistercienne<sup>1</sup>. Le pourcentage est impressionnant, il doit cependant conduire à certaines remarques. En premier lieu les moines blancs ont su, mieux que n'importe qui alors, conserver leurs archives; mieux que la plupart des seigneurs ecclésiastiques, infiniment mieux que les laïcs dont les biens n'apparaissent, le plus souvent, qu'au moment où ils tombent entre les mains de l'Eglise<sup>2</sup>. L'image d'une économie cistercienne dominante, sans doute en grande partie vraie, est grossie par la nature même des sources. L'indéniable expansion de la métallurgie des abbayes cisterciennes ne doit pas faire oublier que d'autres hommes aussi, et sans doute les plus nombreux, extraient le minerai de la terre et le transformaient en métal<sup>3</sup>. Ces faits conduisent à

<sup>1</sup> Lauzanne, 1983. Cette enquête a été menée à partir du fichier des cartulaires de l'Institut de Recherches et d'Histoire des Textes (C.N.R.S.).

<sup>2</sup> Dans son étude sur les cartulaires du Nord-Est de la France, Lauzanne (note 1) notait qu'à l'exception des biens issus des domaines de l'évêque de Langres, le patrimoine acquis par les établissements religieux venait des laïcs, essentiellement des seigneurs.

<sup>3</sup> De nombreux auteurs ont insisté sur l'importance de la sidérurgie cistercienne sans toujours aller au-delà de la simple affirmation. Parmi les travaux les plus notables: Fossier 1961. – Gilles 1968. – Roger 1973. – Chauvin 1976. – Verna 1983. – Karlsson 1985.

préciser la question initiale et à se demander si le développement de la sidérurgie cistercienne ne correspond pas seulement à une mainmise économique, ou si au contraire elle s'est accompagnée, et a été en partie le fruit, d'une mutation des techniques, d'innovations. On a pu parler d'*hypothèse cistercienne* pour l'origine et la diffusion du martinet, le marteau hydraulique qui servait à cingler la loupe de fer sortie du four de réduction<sup>4</sup>. Les réponses ne peuvent provenir des seuls textes qui sont pur l'essentiel, aux époques qui nous concernent ici, des chartes, actes de donations ou de ventes, contrats d'échanges, confirmations de tous ordres. Précieux pour l'identification des personnes et des lieux, pour certains aspects juridiques concernant la propriété des mines et l'usage du bois, ils restent à peu près muets pour ce qui touche aux techniques<sup>5</sup>. Les recherches peuvent se poursuivre pour rassembler tous les documents connus, pour en découvrir de nouveaux, ces lacunes persisteront toujours. Or, de la mine au lingot une série d'opérations avaient nécessairement lieu: extraction, préparation du minerai, construction des fours, réduction, cinglage, mise en forme du produit demi-fini, dont nous ne pouvons avoir par les archives qu'une idée très imprécise. Force est donc de recourir à l'archéologie, archéologie de terrain mais aussi de laboratoire. Nous sommes dans un domaine où, plus que dans tout autre, les résultats de la fouille ne donneraient que des informations tronquées et incertaines si on ne faisait appel aux ressources de l'archéométrie.

### Fontenay et Minot: l'apport des textes et du terrain

Deux sites permettent de débiter l'étude, tous deux localisés en Bourgogne du Nord (Fig. 1), pays d'antique tradition métallurgique, où le fer est particulièrement abondant<sup>6</sup>. Berceau de l'ordre cistercien, entre Citeaux et Clairvaux, les moines y ont, plus encore qu'ailleurs, investi dans la sidérurgie<sup>7</sup>. L'un, Fontenay (Côte-d'Or, France), abbaye mondialement connue, est incontestablement cistercien même si des travaux d'extraction ont pu s'y développer plus tardivement. L'autre, Minot (Côte-d'Or, France), à une quarantaine de kilomètres à l'Est, était, en partie au moins, possession d'un seigneur laïc. La comparaison des résultats obtenus sur les deux sites devrait permettre d'établir des corrélations, de mettre en évidence ressemblances et différences, de tenter de caractériser les grandes lignes d'une sidérurgie cistercienne, si cette sidérurgie a vraiment ses caractères propres. Ce travail ne peut être qu'une première approche qu'il faudra compléter et corriger par l'étude d'autres sites. Il n'en est pas moins long et difficile pour qui veut retrouver toutes les étapes de la fabrication du fer. De cette première approche, nous ne donnerons ici que les prémices, notre recherche est trop récente pour espérer obtenir autre chose que des conclusions partielles sur des points limités et des orientations pour les travaux à venir. En effet si les interventions sur le site de Minot remontent à 1981 et si les investigations initiales à Fontenay datent de la même époque, les recherches véritables n'ont commencé à Minot qu'en 1982 et à Fontenay un an plus tard<sup>8</sup>. Encore faut-il signaler que les travaux ont porté essentiellement sur les mines et sur l'hydraulique et que l'étude de la métallurgie ne fait que débiter<sup>9</sup>.

<sup>4</sup> Anonyme 1960. Cet article, non signé, est attribué par beaucoup à B. Gille alors rédacteur en chef de la revue.

<sup>5</sup> Lauzanne (note 1) et Verna (note 3), après une étude serrée des textes arrivent à cette conclusion.

<sup>6</sup> Sur l'ancienneté du travail du métal en Bourgogne, voire, en dernier lieu, Mangin et Keesmann 1984. Le département de la Côte-d'Or est resté jusque dans la seconde moitié du XIV<sup>ème</sup> siècle un de tous premiers départements français pour la production de fer.

<sup>7</sup> Verna (note 3).

<sup>8</sup> Les recherches à Minot ont débuté grâce à un contrat d'archéologie métropolitaine, elles se sont poursuivies sous forme de fouille programmée en 1984 et 1985 mais avec des moyens extrêmement modestes, l'Université de Paris 1 et le C.N.R.S. assurant l'essentiel des dépenses. L'intervention de l'U.R.A. 34 du C.N.R.S. Paléométaballurgie et conservation et l'obtention d'un important crédit du même C.N.R.S. sous forme d'une Action Thématique Program-

mée (A.T.P.), les contrats avec le C.R.P.G. ont permis de relancer les opérations en 1986 par une série d'analyses de laboratoire. A Fontenay, c'est un contrat avec la Cellule du Patrimoine Industriel de l'Inventaire Général qui a permis de lancer le chantier en 1983. Depuis 1984 le site fait l'objet d'une fouille programmée; il bénéficie des mêmes avantages que Minot dans le domaine des analyses.

<sup>9</sup> La recherche dans le domaine de la paléométaballurgie est le résultat d'une coopération entre l'Equipe d'Histoire des Mines et de la Métallurgie animée par P. Benoit (Université de Paris 1 - C.N.R.S.) qui effectue les prospections, les fouilles et les recherches d'archives, le Laboratoire de Physico-Chimie des Matériaux (U.A. 849 du C.N.R.S.) dirigé par G. Béranger de l'Université de Technologie de Compiègne (U.T.C.), qui a pris en main toute la recherche en métallographie et a entrepris les premières analyses, et le Centre de Recherches Pétrographiques et Géologiques (C.R.P.G.) de Nancy qui assure actuellement les analyses

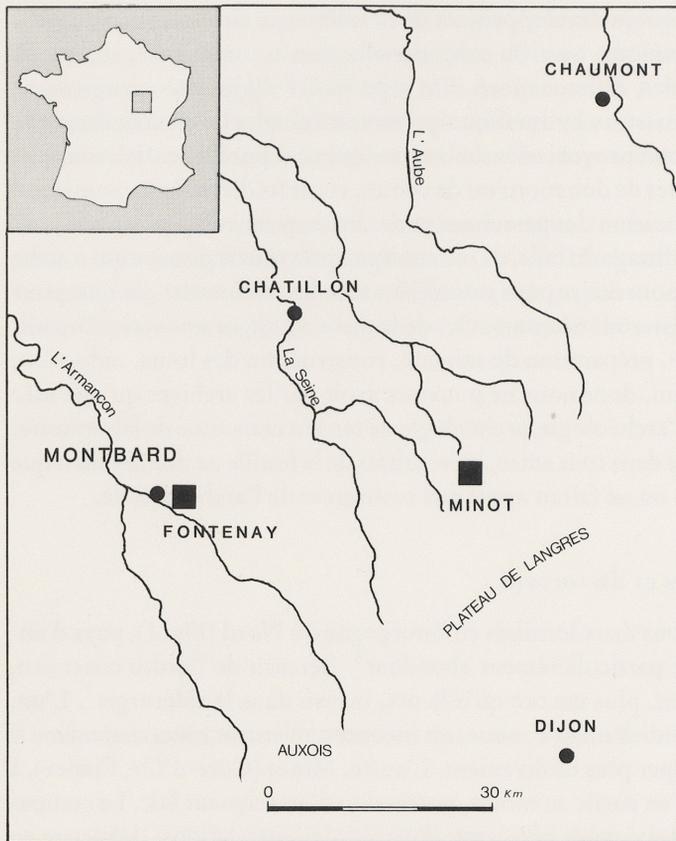


Fig. 1 Localisation de Minot et Fontenay.

Qu'apportent les textes et le terrain avant que les travaux de laboratoire ne permettent de mieux les interpréter? Les documents écrits fixent, malgré leurs lacunes, les grandes lignes du cadre économique et juridique de l'évolution de la métallurgie cistercienne. Comme l'a montré Catherine Verna, les moines blancs ont développé rapidement leur sidérurgie à partir des années 1140 grâce à des acquisitions aisées, ils possèdent des mines, des fours et des forges qu'ils exploitent en faire valoir direct; cette phase d'essor s'arrête vers 1225, lui succède un temps où les abbayes cisterciennes doivent défendre leur patrimoine sidérurgique contre les revendications des seigneurs mais sans doute aussi des communautés rurales, les conflits se multiplient, les acquisitions se font plus rares et coûtent cher. C'est une sidérurgie cistercienne toujours active mais sur la défensive que la crise frappe au milieu du XIV<sup>ème</sup> siècle. Au cours du siècle qui voit disparaître au moins la moitié de la population de l'Europe occidentale, s'effondrer la production et les prix agricoles, la sidérurgie cistercienne s'efface de nos sources. Lors de la reconstruction qui débute aux alentours de 1450-1470 la production de fer prend des formes nouvelles; quand les moines de Clairvaux fondent en 1479 une véritable usine fonctionnant selon le procédé indirect, c'est pour la bailler à ferme comme le font autres seigneurs. La sidérurgie spécifiquement cistercienne a vécu<sup>10</sup>.

Si les cartulaires permettent de se faire une idée d'ensemble, dont les laïcs ne sont pas absents, celui de Fontenay ne fournit aucun acte concernant le fer. Par contre, les débuts de l'abbaye sont relativement

élémentaires et la diffraction X (contribution C.R.P.G. n° 718). En aucun cas il ne s'agit d'un simple service, mais tous les chercheurs cités participent à une interprétation commune des résultats et à l'élaboration de la synthèse. Dans les cadres des programmes H.27 et ARTEMISE, nom de la base de données géochimiques du C.R.P.G., une collaboration étroite est entretenue avec Michel Mangin et

son équipe, dont Ph. Andrieux, et avec le Laboratoire d'Archéologie des Métaux de Jarville dirigé par Cl. Forrières. Un programme d'application d'ARTEMISE à l'archéologie des sites de production de fer a été lancé sous la responsabilité de M. Mangin et d'A. Ploquin.

<sup>10</sup> Verna (note 3).

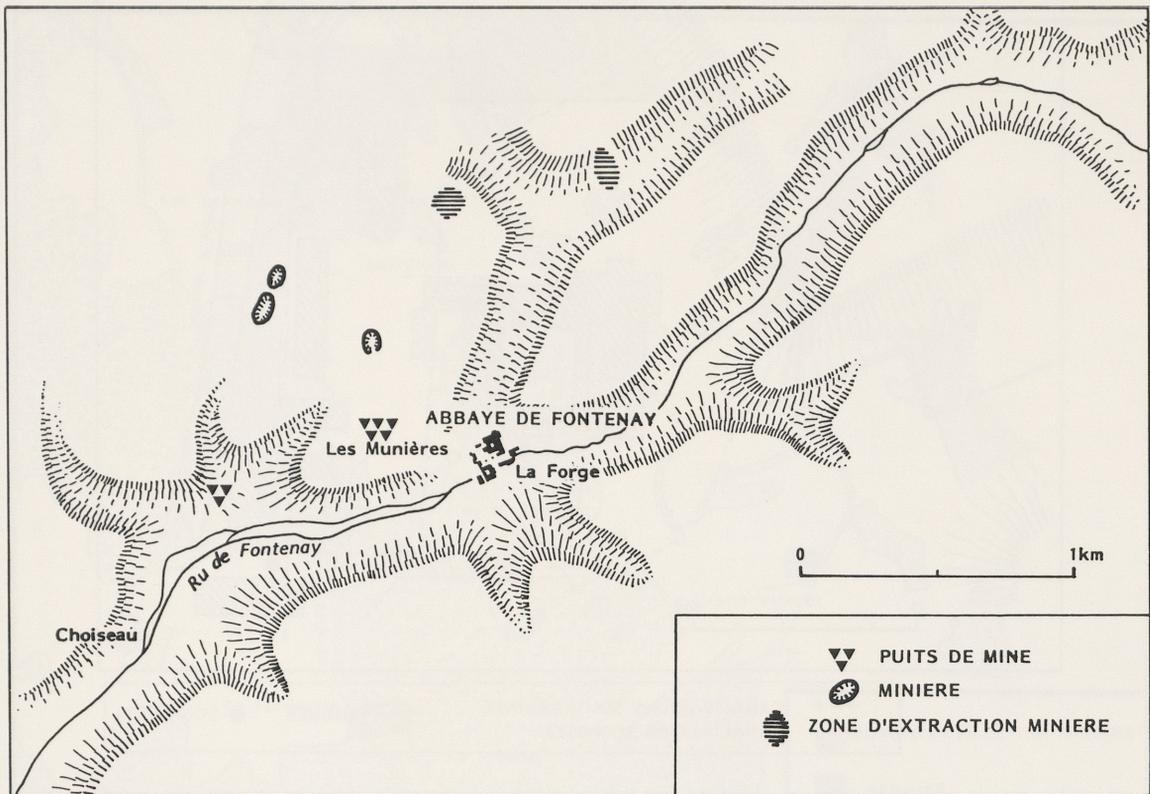


Fig. 2 Fontenay: Vestiges miniers et métallurgiques.

bien connus (Fig. 2). Fondée en 1118 par Saint Bernard, elle est donc fille de Clairvaux, la communauté s'installe sur les hauteurs avant de descendre dans la vallée où des bâtiments monastiques sont construits à la fin de la première moitié du XII<sup>ème</sup> siècle puisque le pape Eugène III consacre l'Eglise en 1147<sup>11</sup>. On ignore la chronologie exacte des campagnes de construction qui semblent avoir duré tout au long du XIII<sup>ème</sup> siècle<sup>12</sup>. L'abbaye reste riche et active jusqu'au milieu du XIV<sup>ème</sup> siècle. L'installation dans la vallée (Fig. 2) a nécessité d'énormes aménagements hydrauliques, en particulier deux digues imposantes barrent la vallée principale, celle du *Ru de Fontenay* et le vallon adjacent de la *Combe Saint Bernard*. Le ru, canalisé et rejeté vers le Sud, était capable de fournir à l'abbaye la force hydraulique dont elle avait besoin. Un canal longe la Forge, bâtiment composé de quatre pièces s'allongeant d'Est en Ouest. La seconde de ces pièces en partant de l'Ouest possède deux grandes cheminées dont la vocation industrielle est à peu près certaine<sup>13</sup>. La tradition a conservé au bâtiment le nom de Forge. C'est cette dénomination qui attira notre attention tout comme l'affirmation selon laquelle il existait à proximité de vastes ferriers, nom donné aux dépôts de scories de fer. Des sondages ont révélé qu'il s'agissait en fait d'amas de mâchefer et autres déchets provenant de la papeterie qui s'est installée dans l'abbaye au XIX<sup>ème</sup> siècle<sup>14</sup>. Des scories ont par contre été retrouvées à l'ouest du monastère, hors du mur d'enceinte, lors du creusement d'une tranchée destinée à conduire des cables électriques; elles sont actuellement en cours d'analyse à Nancy.

<sup>11</sup> Begule 1984.

<sup>12</sup> L'étude, en cours, du bâtiment de la Forge montre une construction complexe, fruit de plusieurs campagnes étagées probablement au cours de décennies en fonction des besoins du monastère: Kuhn-Regnier 1983. – André, Benoit et Cailleaux 1985.

<sup>13</sup> Il est impossible que ces cheminées aient appartenu à des cuisines en raison de leur place à l'écart des bâtiments conventuels.

<sup>14</sup> Un dépôt particulièrement important se trouve au Sud de la Forge, sur la rive opposée du *Ru de Fontenay*. Le mâchefer contenu provient des machines à vapeur de la papeterie, il n'est pas impossible qu'il ait recouvert un dépôt de scories plus anciennes mais seule une fouille très importante, et au résultat très aléatoire, permettrait de vérifier cette possibilité.

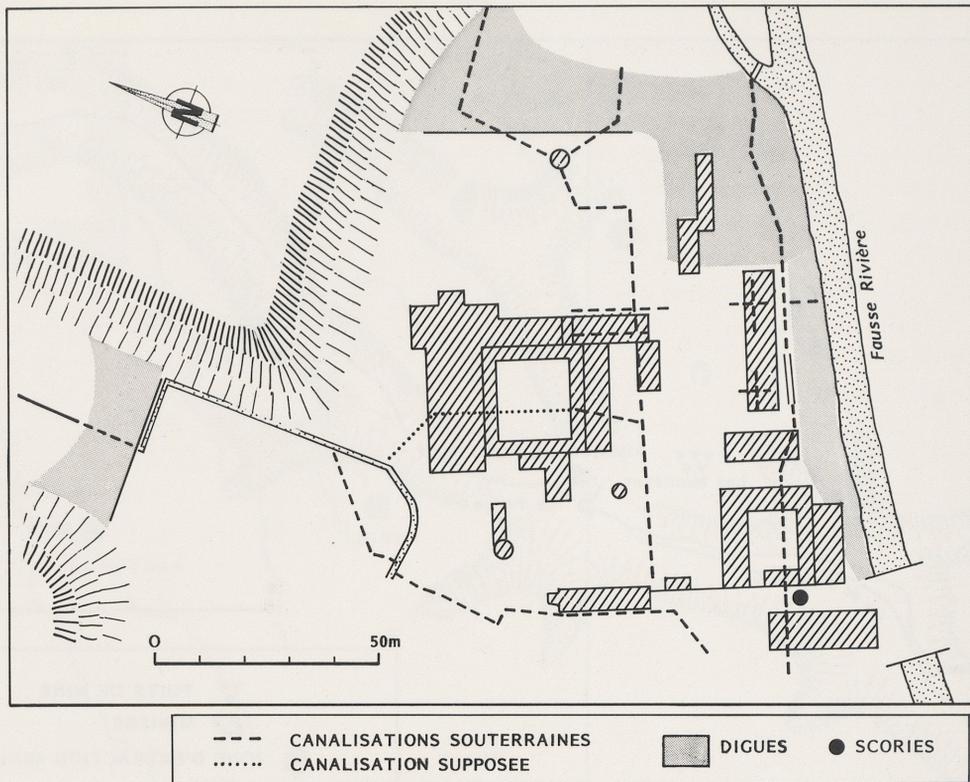


Fig. 3 Site de l'Abbaye de Fontenay.

La zone où elles ont été retrouvées a dû subir de très nombreux remaniements en particulier au moment de la construction des logements ouvriers de *La Carpière* (Fig. 3).

Par contre, les prospections dans les bois ont montré la présence au Nord et à l'Ouest de l'abbaye d'importants sites d'extraction du minerai de fer dont plusieurs minières à ciel ouvert, l'une atteint cent mètres de longueur. De telles exploitations sont actuellement impossibles à dater, elles peuvent avoir été creusées au Moyen Age comme au XVIII<sup>ème</sup> siècle puisque Buffon a recherché du minerai jusqu'en forêt de Fontenay. Outre ces minières, les prospections ont révélé en plusieurs lieux des ouvertures de puits de mines, en particulier dans le secteur dit *Les Munières*. Leur désobstruction, commencée en septembre 1985, a permis d'atteindre un réseau souterrain qui se développe entre le sol et le niveau - 12,5 m. Le minerai s'est accumulé dans les cavités naturelles creusées par l'érosion karstique dans les calcaires du bathonien. L'homme a vidé ces poches de minerai en utilisant lui aussi les cavités de karst. Les aménagements du milieu naturel restaient très sommaires. L'abattage et surtout la circulation, s'effectuaient dans des conditions très difficiles en raison de l'exiguïté des passages. Il y a tout lieu de penser que ces mines, fort anciennes, datent probablement de l'exploitation monastique, mais nous en recherchons encore la preuve formelle.

Un gisement du même type se rencontre à Minot (Fig. 4). Dans les bois à l'Ouest du village, au lieu-dit Lavières-et-Bouquet, plus d'une centaine de puits ont été repérés et relevés<sup>15</sup>. Quelques puits permettent d'atteindre des profondeurs de 7 à 8 m. L'un d'eux débouche sur une mine d'importance, encore pénétrable, la mine A. Le cheminement parcouru par les derniers mineurs s'étend sur une centaine de mètres. Les

<sup>15</sup> L'essentiel du travail de relevé a été effectué par le Laboratoire d'Archéologie de l'Ecole Normale Supérieure de la

rue d'Ulm, sous la direction de Ch. Peyre qui a mis à notre disposition sa topographie. Nous tenons à le remercier ici.

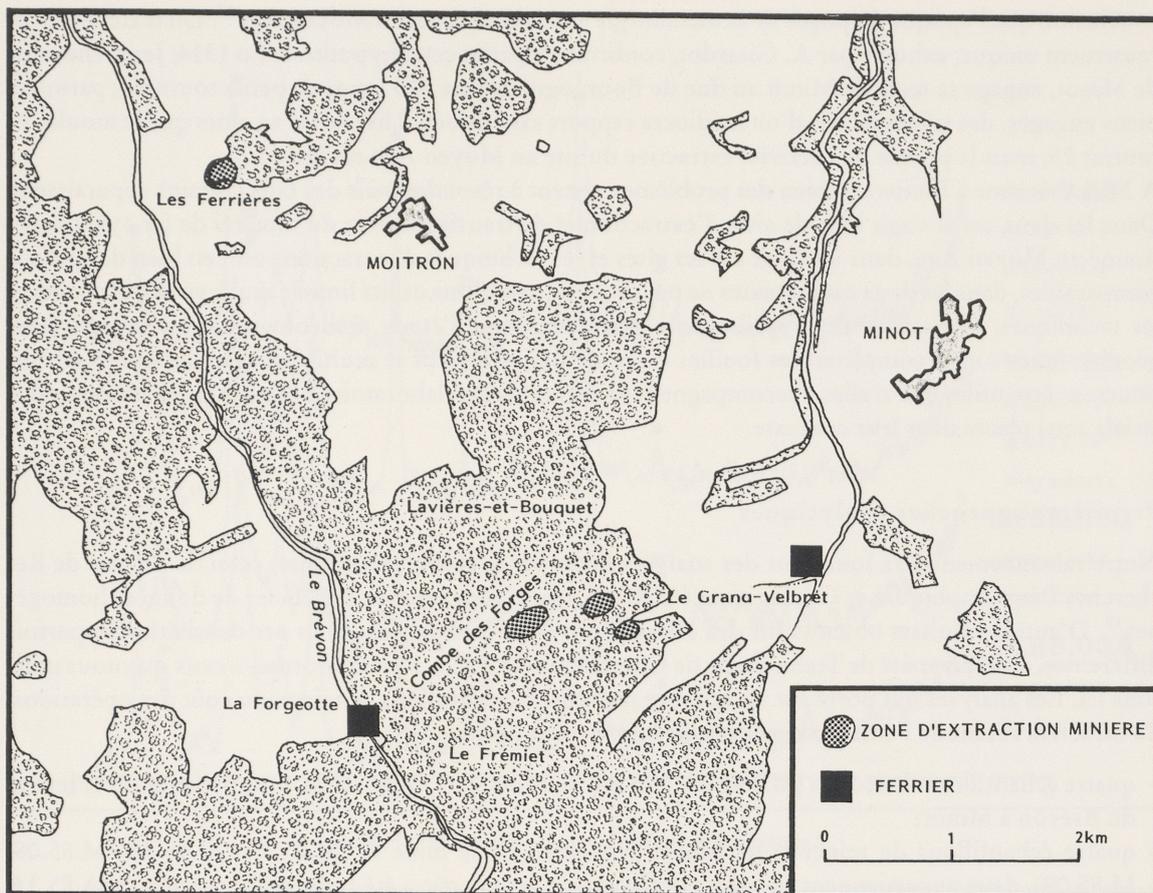


Fig. 4 Minot: Vestiges miniers et métallurgiques.

conditions de travail, proches de celles des mines de Fontenay, devaient être particulièrement pénibles. A côté des exploitations souterraines, on remarque aussi des minières, parfois importantes, sans cependant atteindre les dimensions rencontrées en forêt de Fontenay. Le minerai provenait du remplissage du karst développé dans les couches de calcaire bathonien qui forment le plateau, il était traité dans les vallons qui l'enserment à l'Ouest et à l'Est. On retrouve là deux ferriers, le ferrier du Brévon et le ferrier du Grand Velbret qui témoignent d'une activité métallurgique notable. L'étude des ferriers est en cours et au moment où se déroule ce symposium, une très importante campagne de prospections géophysiques a lieu, elle doit permettre de se faire une idée précise de leur étendue et des structures qui les composent<sup>16</sup>. Pour l'instant les scories inventoriées manifestent des différences certaines. Sur le ferrier oriental, le ferrier du Grand Velbret, n'ont été retrouvées que des scories denses, souvent cordées, alors que le ferrier du Brévon fournit des types beaucoup plus variés. Aux scories lourdes s'ajoutent des scories plus légères, plus bulleuses, et surtout des laitiers, très vitreux et de faible porosité. Des fragments de parois de fours ont été retrouvés et plusieurs fonds de fours d'épaisseurs différentes mais tous d'un diamètre d'environ 30cm. L'abondance des laitiers a pu faire penser que Minot avait été le siège d'une installation de réduction indirecte, les fonds de four n'étant autre chose que des culots de foyers d'affinerie. A ce très riche enseignement du terrain, les sources écrites n'apportent que des compléments peu nombreux mais cependant importants. Ch. Peyre avait noté que la toponymie minière et métallurgique était médiévale alors que le nom du village venait de celui d'un grand propriétaire gallo-romain. Il en tirait la

<sup>16</sup> Ces prospections sont menées par Michel Dabas, chercheur au Centre de Recherches Géophysiques de Garchy.

conclusion que l'époque d'apogée de la métallurgie avait dû se situer au Moyen Age<sup>17</sup>. Un texte, malheureusement unique, exhumé par A. Girardot, confirme en partie cette hypothèse. En 1314, Jean, chevalier de Minot, engage sa terre de Minot au duc de Bourgogne contre 375 livres de petits tournois; parmi les biens engagés, des mines de fer, d'un médiocre rapport sans doute, 8 livres par an alors que le moulin en fournit 25, mais la preuve de l'activité extractive du site au Moyen Age est là<sup>18</sup>.

A Minot comme à Fontenay, bien des problèmes restent à résoudre mais des faits certains apparaissent. Dans les deux cas il s'agit bien de sites d'extraction et de transformation du minerai de fer ayant fonctionné au Moyen Age, dans les deux cas les gîtes et les techniques d'extraction sont, en bien des points, comparables, dans les deux cas les textes ne peuvent être que d'une utilité limitée, nulle en ce qui concerne les techniques. L'essentiel du travail repose maintenant sur l'étude archéologique: les prospections géophysiques sont à compléter, les fouilles et les sondages doivent se multiplier mais ces opérations ne pourront être utiles que si elles s'accompagnent de recherches en laboratoire portant sur les résidus industriels ainsi placés dans leur contexte.

### Premières approches analytiques

Notre raisonnement sera fondé sur des analyses faites par le même laboratoire, celui du Centre de Recherches Pétrographiques et Géologiques (C.R.P.G.) de Nancy, afin de bénéficier de données homogènes<sup>19</sup>. D'autres résultats obtenus sur des échantillons du même origine, mais par des méthodes parfois différentes, à l'Université de Technologie de Compiègne (U.T.C.), sont conformes à ceux que nous utilisons ici. Les analyses ont porté sur un nombre restreint d'échantillons en raison du coût des opérations, du caractère récent de l'entreprise et du soin à apporter à l'échantillonnage:

- quatre échantillons de scories (MB.85.53, MB.85.56, M.86.01A, M.86.01B), tous prélevés sur le ferrier du Brévon à Minot;
- quatre échantillons de minerais de Minot provenant de la mine A (M.85.3A, M.85.3B, M.85.08, M.85.09), deux appartiennent au même prélèvement, une partie a été lavée et l'autre non (MA 85.3A et 3B);
- trois échantillons de minerai de Fontenay extraits de la mine des Munières à proximité du puits n°1 (FM.86.02, FM.86.03, FM.86.05).

Les minerais ont tous été prélevés en place, dans les recoins des poches d'extraction. Nous les considérons comme significatifs, car s'ils ont été délaissés, ce n'est pas en raison de leur médiocre qualité mais bien parce qu'ils étaient trop difficiles à atteindre et en quantité insuffisante. De tels échantillons semblent préférables aux fragments de minerais abandonnés par les métallurgistes sur les lieux de réduction et que peuvent avoir été méprisés pour leur trop faible teneur. Aussi bien à Minot qu'à Fontenay le minerai étudié se présente sous une forme assez granuleuse, fragments parfois compacts ou pulvérulents. Les prises d'échantillons ont été relativement importantes afin de s'affranchir du risque d'un «effet de pépite» et d'obtenir une analyse représentative<sup>20</sup>.

La diffraction des rayons X a permis de constater que les minerais étaient essentiellement composés de goethite (FeO(OH)) dans l'un et l'autre des cas (Fig. 5 et 6). Il faut cependant remarquer la présence de pics secondaires représentatifs de l'hématite (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). La calcite, visible sur les spectres de diffraction X provient, selon toute vraisemblance, de débris calcaires. L'analyse diffractométrique n'a servi, ici, qu'à déterminer la nature des différentes phases cristallisées des minerais et scories, il était alors nécessaire de

<sup>17</sup> Peyre 1982. – Benoit 1982.

<sup>18</sup> Arch.dép. de Côte-d'Or, B 1328, du 11 juillet 1314. Nous remercions A. Girardot d'avoir eu l'obligeance de nous communiquer ce document.

<sup>19</sup> Les résultats des analyses quantitatives sont disponibles auprès de la banque de données Artémise-Scorie au C.R.P.G. de Nancy.

<sup>20</sup> Par effet de pépite on entend la présence dans l'échantillon de minéraux non-significatifs de l'ensemble. L'importance du soin à apporter aux prélèvements a été signalée à de nombreuses reprises, en dernier lieu par Guillot et Fluzin 1986.

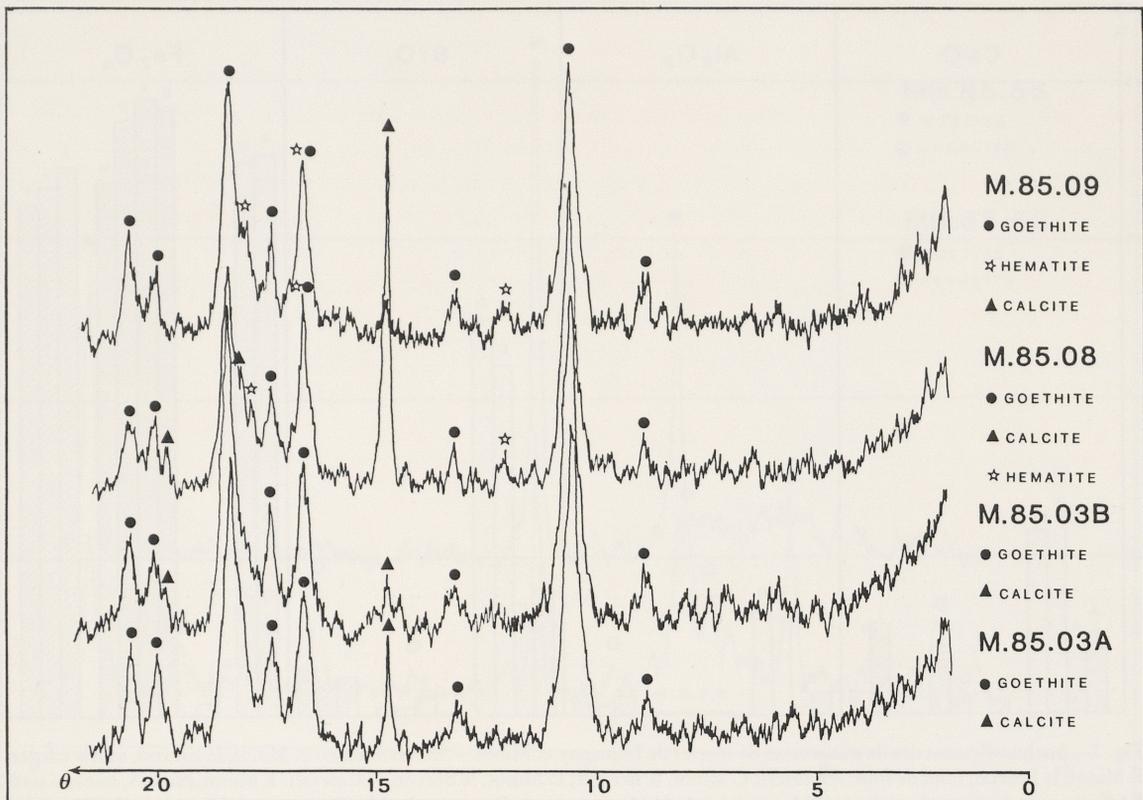


Fig. 5 Minerais de Minot: Diffraction des rayons X.

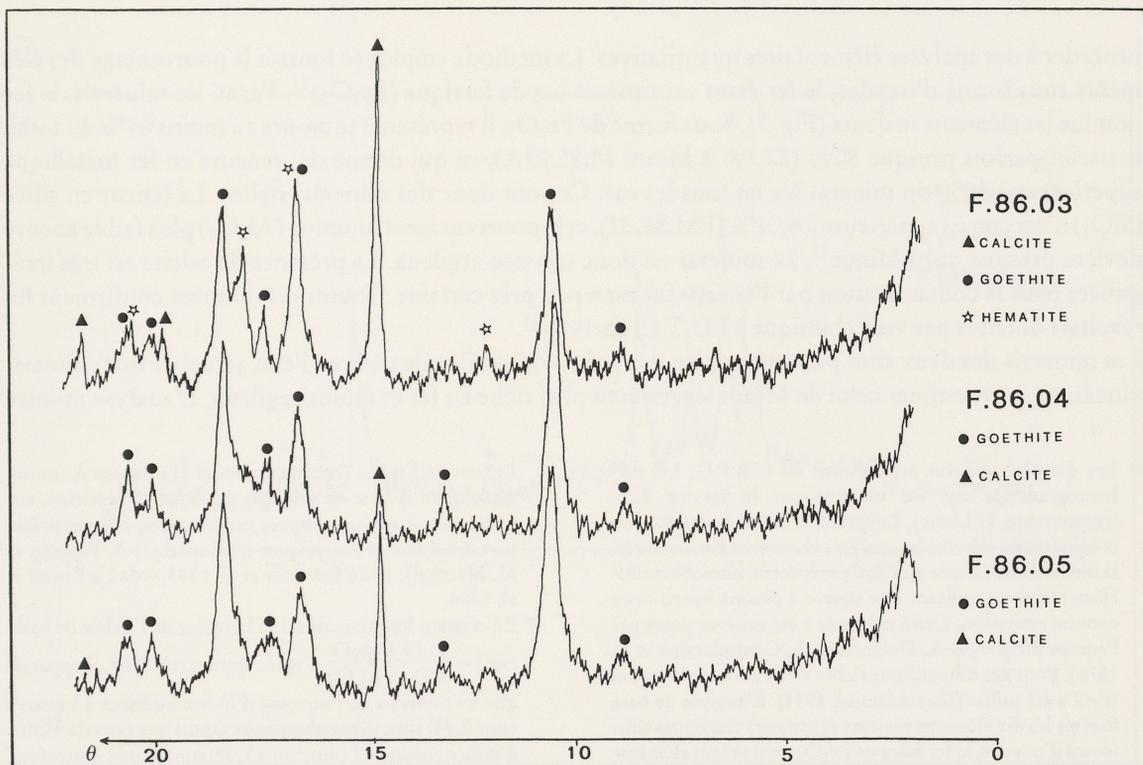


Fig. 6 Minerais de Fontenay: Diffraction des rayons X.

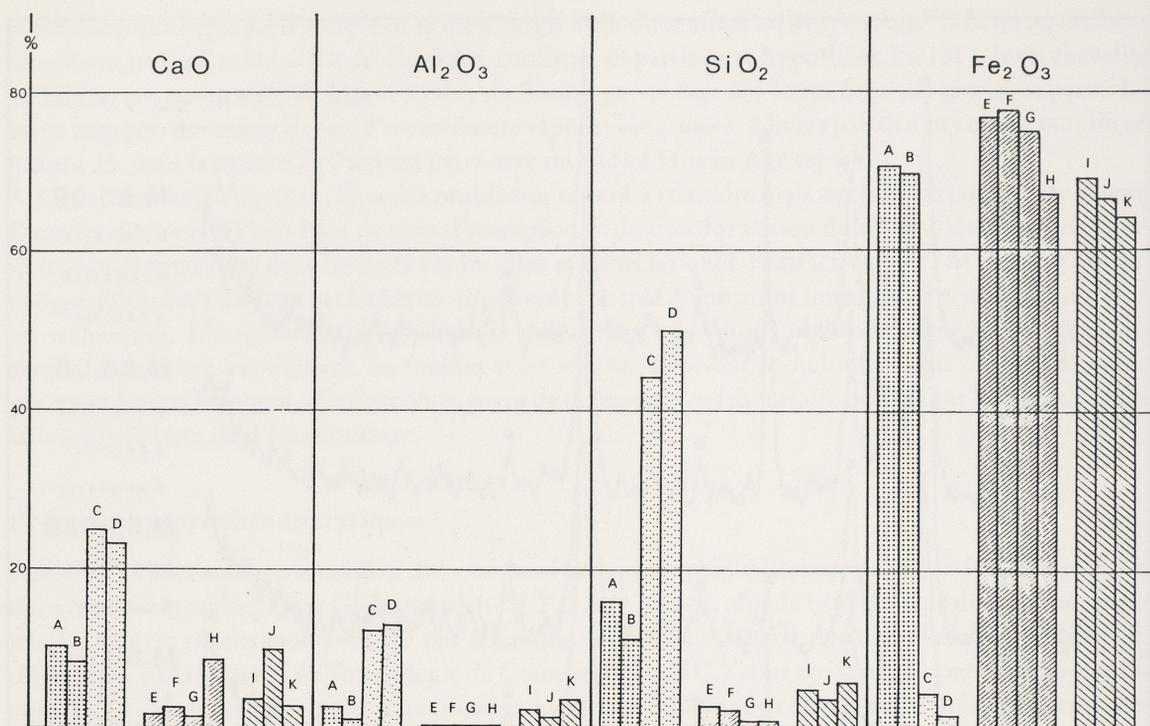


Fig. 7 Analyse élémentaire de minerais et de scories de Fontenay et Minot. – *Scories lourdes*: A Minot, le Brévon, scorie cordée; B Minot, le Brévon, fond de four. – *Laitiers*: C Minot, le Brévon; D Minot, le Brévon. – *Minerais*: E Minot, mine A, minerai lavé; F Minot, mine A, minerai non lavé; G Minot, mine A; H Minot, mine A. Fontenay, les Munières, puits 1; J Fontenay, les Munières, puits 1; K Fontenay, les Munières, puits 1.

procéder à des analyses élémentaires quantitatives. La méthode employée fournit le pourcentage des éléments sous forme d'oxydes, le fer étant exprimé en oxyde ferrique ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )<sup>21</sup>. Parmi les minerais, le fer domine les éléments majeurs (Fig. 7). Sous forme de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , il représente toujours au moins 64% du total, il atteint parfois presque 80% (77,7% à Minot M.85.03A), ce qui donne des teneurs en fer métallique supérieures à 50% du minerai sec en tous les cas. Ce sont donc des minerais riches. La teneur en silice ( $\text{SiO}_2$ ) n'est jamais supérieure à 6,01% (FM.86.02), et le pourcentage d'alumine ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) plus faible encore devient presque nul à Minot<sup>22</sup>. Le minerai est donc très peu argileux. La présence de calcite est très irrégulière mais la contamination par l'encaissant est à peu près certaine. Toutes ces données confirment les résultats obtenus par voie chimique à l'U.T.C. en 1985<sup>23</sup>.

Les minerais des deux sites présentent bien des points de similitude mais en l'état actuel de nos connaissances, on peut estimer celui de Minot légèrement plus riche en fer et moins argileux. L'analyse montre

<sup>21</sup> Les données utilisées proviennent du C.R.P.G. Les diffractogrammes ont été obtenus par le service R.X. (responsable, F. Lhote). Le service d'Analyse des Roches et Minéraux a effectué les analyses chimiques élémentaires, la méthode employée est l'analyse spectrochimique multi-élémentaire en utilisant une source à plasma micro-once comme excitation. Cette méthode a été mise au point par l'équipe dirigée par K. Govindarajuk (Govindarajuk et al. 1976). Pour ces échantillons riches en fer, le nouvel étalon IF-G a été utilisé (Govindarajuk 1984). L'analyse de base fournit les dix éléments majeurs et mineurs classiques sous forme d'oxydes, le fer étant en  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  total et huit éléments traces. Ces dix éléments majeurs et la perte au feu sont exprimés en pourcentage du poids et les traces en p.p.m.

Le Service Etudes Documentaires et Traitement Automatique, gère la base de données Artemise et participe, sur demande ou sur ses propres programmes, à l'interprétation des données analytiques (responsables A. Ploquin et M. Marchal); voir Leterrier et al. 1983. – de La Roche et al. 1986.

<sup>22</sup> En classant les minerais selon la valeur de l'indice de basicité  $I = \frac{\text{CaO} + \text{MgO}}{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3}$  d'après Bubenicek 1969, il apparaît que les minerais de Fontenay d'indice inférieur à 1 (moyenne 0,44) sont silico-alumineux tandis que ceux de Minot d'indice voisin de 1 (moyenne 1,09) sont plutôt «auto-fondants».

<sup>23</sup> Guillot 1985.

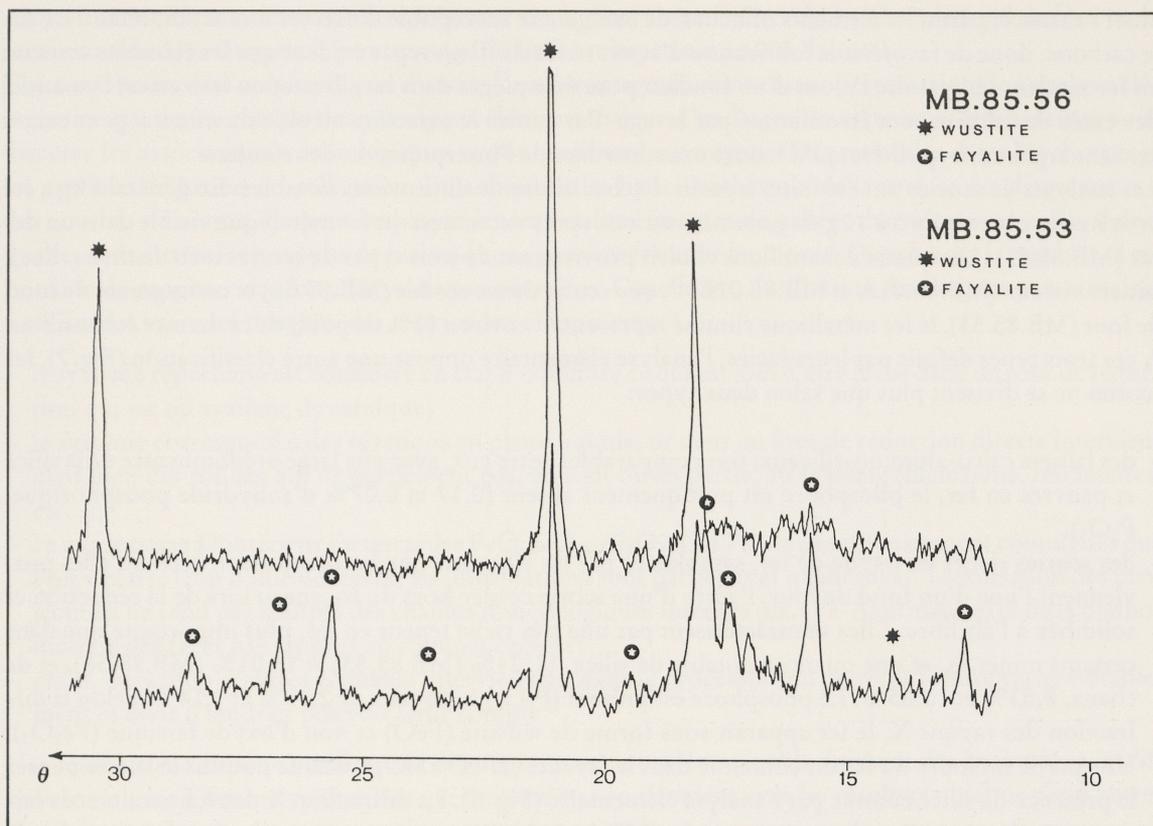


Fig. 8 Scories lourdes de Minot: Diffraction des rayons X.

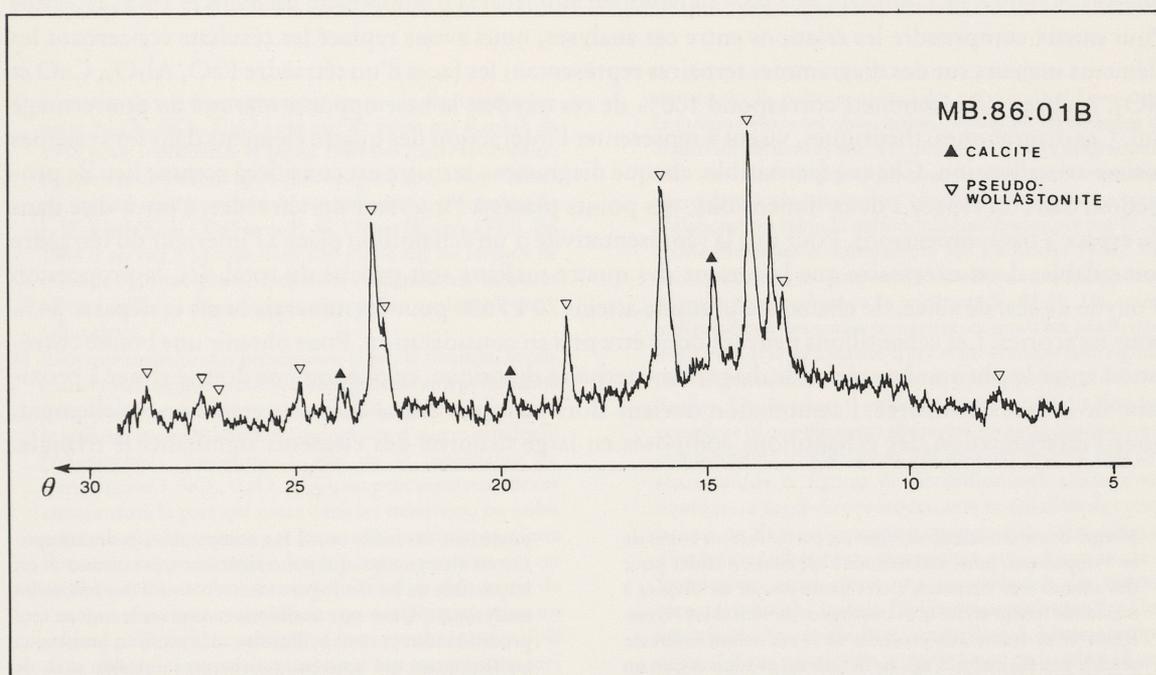


Fig. 9 Laitier de Minot: Diffraction des rayons X.

aussi l'absence, parmi les éléments mineurs, de manganèse susceptible d'exercer une action rétentrice sur le carbone, donc de favoriser la fabrication d'aciers naturels. Il n'est pas évident que les éléments associés au fer rendent obligatoire l'ajout d'un fondant pour être piégés dans les silicates ou les verres; l'essentiel des excès de calcaire peut être éliminé par lavage. Par contre le caractère meuble du minerai peut exiger un liant argileux, hypothèse qu'il faudra examiner lors de l'interprétation des résultats.

Les analyses de scories ont été faites à partir d'échantillons de dimensions notables. En général 1 kg a été broyé pour obtenir les 5 à 10 g de prise nécessaires, après extraction du fer métallique visible dans un des cas (MB.85.53). Les quatre échantillons choisis proviennent de trois types de scories bien distincts: deux laitiers vitreux (MB.86.01A et MB.86.01B)<sup>24</sup>, une scorie dense cordée (MB.85.56) et un fragment de fond de four (MB.85.53), le fer métallique éliminé représentait environ 13% de poids de ce dernier échantillon. A ces trois types définis par leurs faciès, l'analyse élémentaire oppose une autre classification (Fig. 7), les scories ne se divisent plus que selon deux types:

- des laitiers calco-alumino-siliceux, très comparables entre eux, avec une large prédominance de la silice et pauvres en fer, le phosphore est pratiquement absent (0,17 et 0,07% d'anhydride phosphorique,  $P_2O_5$ ).
- des scories riches en oxyde de fer, semblables par les éléments que les composent, bien qu'elles proviennent l'une d'un fond de four, l'autre d'une scorie coulée hors du fourneau lors de la réduction et solidifiée à l'air libre. Elles se caractérisent par une très riche teneur en fer, plus importante que dans certains minerais, et une quantité notable de silice, 11,24% (MB.85.53) et 16,01% (MB.85.56), et de chaux, 8,53% et 10,65%. Le phosphore est présent ( $P_2O_5$ ) à des taux de 2,45% et 1,14%. Selon la diffraction des rayons X, le fer apparaît sous forme de wüstite (FeO) et non d'oxyde ferrique ( $Fe_2O_3$ ). Une partie moindre du fer est contenue dans la fayalite ( $2FeO \cdot xSiO_2$ ) comme pouvait le laisser penser la présence de silice connue par l'analyse élémentaire (Fig. 8). La diffraction X des échantillons de laitiers a révélé que, si l'un d'eux est amorphe (MB.86.01A), l'autre comporte en plus les pics caractéristiques de la pseudowollastonite (Fig. 9).

### Interprétation

Pour mieux comprendre les relations entre ces analyses, nous avons replacé les résultats concernant les éléments majeurs sur des diagrammes ternaires représentant les faces d'un tétraèdre FeO,  $Al_2O_3$ , CaO et  $SiO_2$ . A chacun des sommets correspond 100% de ces oxydes, la base opposée marque un pourcentage nul. Ces diagrammes, théoriques, visent à représenter l'interaction des quatre éléments dans les systèmes fusion-cristallisation. Chaque face visible, chaque diagramme ternaire est considéré comme lieu de projection, dans un espace à deux dimensions, des points placés à l'intérieur du tétraèdre, c'est-à-dire dans un espace à trois dimensions. Pour que la représentativité d'un échantillon placé à l'intérieur du tétraèdre soit valable, il est nécessaire que la somme des quatre majeurs soit proche du total. Ici, la proportion d'oxyde de fer, de silice, de chaux et d'alumine atteint 70 à 75% pour les minerais bruts et dépasse 84% pour les scories. Les échantillons peuvent donc être pris en considération. Pour obtenir une bonne corrélation entre le phénomène réel et le diagramme ternaire théorique, ce phénomène doit se situer à proximité de la face considérée, l'assimilation devient alors possible. Aussi doit-on retenir essentiellement, pour l'interprétation, les échantillons composés en large majorité des éléments signifiant le triangle.

<sup>24</sup> Malgré des avis contraires, émis en particulier au cours de ce Symposium, nous maintenons l'appellation laitier pour des scories très vitreuses, à très haute teneur en silice et à très faible teneur en fer qui constituent de véritables verres. Réserver ce terme aux produits de la réduction indirecte semble peu réaliste, il s'agit de définir un produit et non un processus qui a conduit à son élaboration. Provenant de la réduction directe ou de la réduction indirecte, les laitiers

possèdent des faciès tout à fait comparables et des compositions élémentaires qui pourraient être très voisines. Il est impossible de les distinguer sans recourir à des méthodes analytiques. Dans ces conditions cantonner le mot au seul procédé indirect semble illusoire et le rendrait inutile aux archéologues qui souvent prospectent sur des sites de réduction de procédé inconnu.

Ainsi, il serait illusoire de vouloir représenter sur le diagramme  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ , le fond de four ou la scorie cordée dans lesquels le pourcentage de  $\text{FeO}$  est supérieur à 60% du total.

Cette méthode, déjà employée par d'autres<sup>25</sup>, a l'avantage de donner une présentation de l'analyse élémentaire qui tienne compte des principaux éléments majeur. Ces diagrammes peuvent être précieux pour discuter les associations minéralogiques et pour estimer les compatibilités possibles entre les charges et les produits de fusion-cristallisation. En assimilant les lignes isothermes de la surface des diagrammes à des courbes de niveau, on peut employer les expressions imagées de vallées thermiques, vers l'aval desquelles sont attirés les produits de fusion qui ne peuvent franchir les monts. Dans les cas favorables, il est possible de proposer des fourchettes de températures. Cependant, l'utilisation des diagrammes ternaires a ses limites voire ses dangers, des restrictions s'imposent :

- le système représenté est considéré en état d'équilibre ce qui est loin d'être le cas dans un four de réduction qui est un système dynamique;
- le système correspond à des réactions en phase liquide, or dans un four de réduction directe interviennent bien des solides qui ne participent pas, en tout ou en partie, au système (inclusions, réfractaires, etc...);
- ce qui se passe à l'intérieur du tétraèdre  $\text{FeO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$  n'est pas suffisamment connu; dès que l'on s'écarte trop d'une des faces, les informations sont partielles et qualitatives. L'utilisation des projections ne rend pas compte des champs minéralogiques internes (ex. :  $\text{Fe}$ -Åkermanite) et de la nonhomotéie des faces par rapport au sommet opposé;
- enfin, beaucoup d'autres éléments interviennent dans le processus qui peuvent le faire varier notablement et dont il faudrait pouvoir tenir compte<sup>26</sup>.

Ces réserves conduisent à utiliser ces diagrammes en considérant qu'ils donnent des indications, qu'ils ouvrent la voie à des interprétations qui doivent être confrontées avec les résultats obtenus par d'autres types de recherches.

Le diagramme  $\text{FeO}$ - $\text{SiO}_2$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  (Fig. 10) représente mal les laitiers puisque les éléments pris en compte ne correspondent qu'à 60 et 65% du total. Leurs points représentatifs sont donc trop éloignés de la face. Il convient par contre très bien aux scories lourdes puisque le total des éléments représentés atteint environ 80%. De l'examen du diagramme il ressort que les minerais sont très proches. Les scories se rassem-

<sup>25</sup> L'emploi de tels diagrammes est ancien, le diagramme ternaire  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$  a été mis au point par Rankin en 1915 pour représenter le laitier final des hauts fourneaux. Repris depuis ils sont appliqués à la géologie, à la métallurgie comme à la céramique. Nous utilisons ici les travaux de I. W. Eitel (Eitel 1954) et de E. G. Ehlers (Ehlers 1972). En 1964 il servait à Monot dans son étude sur les ferriers de l'Yonne (Monot 1964). Depuis les diagrammes ternaires ont été utilisés à des nombreuses reprises par les paléométallurgistes.

<sup>26</sup> Bien que constituants principaux, le fer, le silicium, le calcium et l'aluminium sont accompagnés d'autres éléments qui peuvent modifier certains minéraux présents, comme le sodium pour l'Anorthite, ou induire d'autres minéraux (Åkermanites, Sarcrolites,...) afin de se rapprocher du tétraèdre  $\text{FeO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  on peut soustraire de ces constituants la part qui entre dans les minéraux, ou pôles minéralogiques, induits par les autres constituants. Cette opération suppose connus les minéraux « parasites » et on en déduit un calcul de norme; c'est-à-dire qu'à partir de l'analyse chimique on recalcule une composition selon un schéma préétabli, de préférence aussi proche que possible de la réalité, les verres donnent ainsi une composition virtuelle. Ces calculs de normes ont été largement utilisés par les pétrographes, même s'ils tombent actuellement en

désuétude, ils peuvent aider à des prévisions et à une confrontation entre les observations optiques, les données de la diffraction des rayons X et de la chimie. Des diagrammes chimico-minéralogiques plus simples à mettre en œuvre et répondant à ces nécessaires confrontations sont en cours d'élaboration selon la méthodologie développée par H. de La Roche et ses collaborateurs (de La Roche 1972). Les « corrections » que l'on peut déduire de la norme supposent en outre que les champs de minéraux  $\text{Si}$ ,  $\text{Al}$ ,  $\text{Fe}$ ,  $\text{Ca}$ , soient indépendants des autres minéraux, ce qui n'est pas strictement vrai. Il reste à établir si ces « corrections » sont significatives parmi toutes les causes de perturbations et d'incertitudes. D'autre part il est fréquent qu'un échantillon soit complexe et que plusieurs phénomènes aient concouru à sa composition: solidification des liquides (verres plus cristaux tardifs et figures de dévitrification), cristaux « au liquidus », c'est-à-dire précoces, avec possibilités de cumulations ou de fractionnement, présence de réfractaires et d'inclusions, altérations secondaires, etc... Au cours de ce Symposium nous avons pris connaissance des travaux récents réalisés à l'Institut für Geowissenschaften der Universität Mainz, sous la direction du Prof. I. Keesmann, que nous n'avons pas encore intégrés à nos recherches (Keesmann et Bachmann 1984).

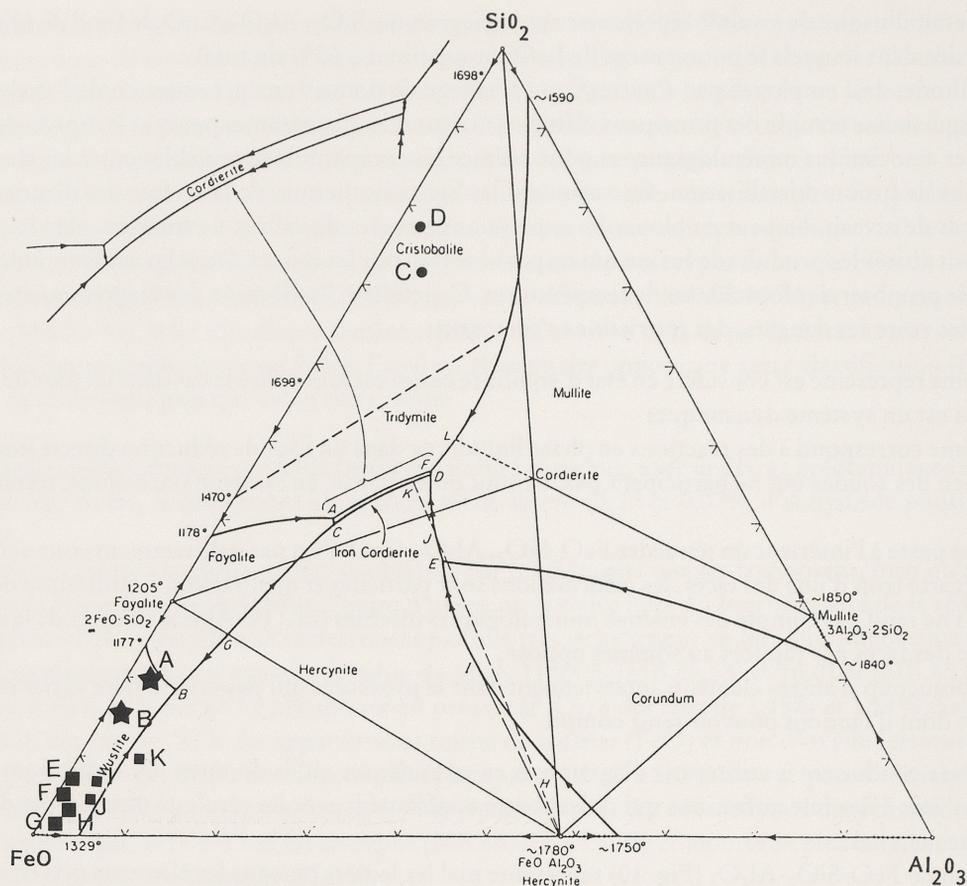


Fig. 10 Diagramme ternaire FeO – SiO<sub>2</sub> – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Sur cette graphique, la dimension des symboles est fonction de la représentativité de l'échantillon. – *Scories lourdes*: A Minot, le Brévon, scorie cordée; B Minot, le Brévon, fond de four. – *Laitiers*: C Minot, le Brévon. D Minot, le Brévon. – *Minerais*: E Minot, mine A, minerai lavé; F Minot, mine A, minerai non lavé; G Minot, mine A; H Minot, mine A. Fontenay, les Munières, puits 1; I Fontenay, les Munières, puits 1; K Fontenay, les Munières, puits 1.

blent à proximité du minimum de fusion (1177°C) c'est-à-dire de l'eutectique ternaire wüstite, fayalite, hercynite tout en restant dans le domaine de la wüstite. Les tracés d'isothermes manquent malheureusement pour les températures entre 1150°C et 1300°C. Les résultats obtenus par la diffraction des rayons X (Fig. 8), indiscutables, confirment ces données, la wüstite domine mais la fayalite est présente et la hercynite n'est pas décelée. Le décalage des pics de la fayalite indiquerait une quantité non négligeable de calcium dans son réseau (kirschsteinite environ 10%). La position des minerais et des scories dans le même domaine, regroupés à des niveaux différents, montre qu'on assiste à une évolution au sein d'un même processus qui tire les phases liquides vers un minimum thermique. Les scories lourdes peuvent donc, théoriquement, être produites à partir de ces minerais. Par contre il semblerait y avoir incompatibilité entre minerai et laitiers. Pour expliquer leur présence, il faut faire intervenir l'apport d'un autre constituant, probablement l'argile, ou d'un phénomène de démixtion<sup>27</sup>.

<sup>27</sup> Un fondant, destiné à favoriser la formation de silicates et à se rapprocher d'un minimum thermique, ou un liant destiné à améliorer la tenue mécanique du minerai auraient été intimement mêlés aux minerais pour être efficaces et constituer la charge; pour quelle raison le produit de fusion du minerai et de l'adjuvant se seraient-ils séparés? Il faut rappeler un phénomène signalé dans le volcanisme

basique, riche en fer, objet de nouvelles recherches à l'occasion d'études d'échantillons lunaires. Un magma riche en fer peut se séparer en deux liquides, l'un plus riche en fer et phosphore, l'autre plus siliceux alcalin et alumineux. Nos analyses ne contredisent donc pas l'hypothèse de travail suivante: les scories lourdes sont issues de la phase liquide riche en fer et en phosphore et les laitiers représen-



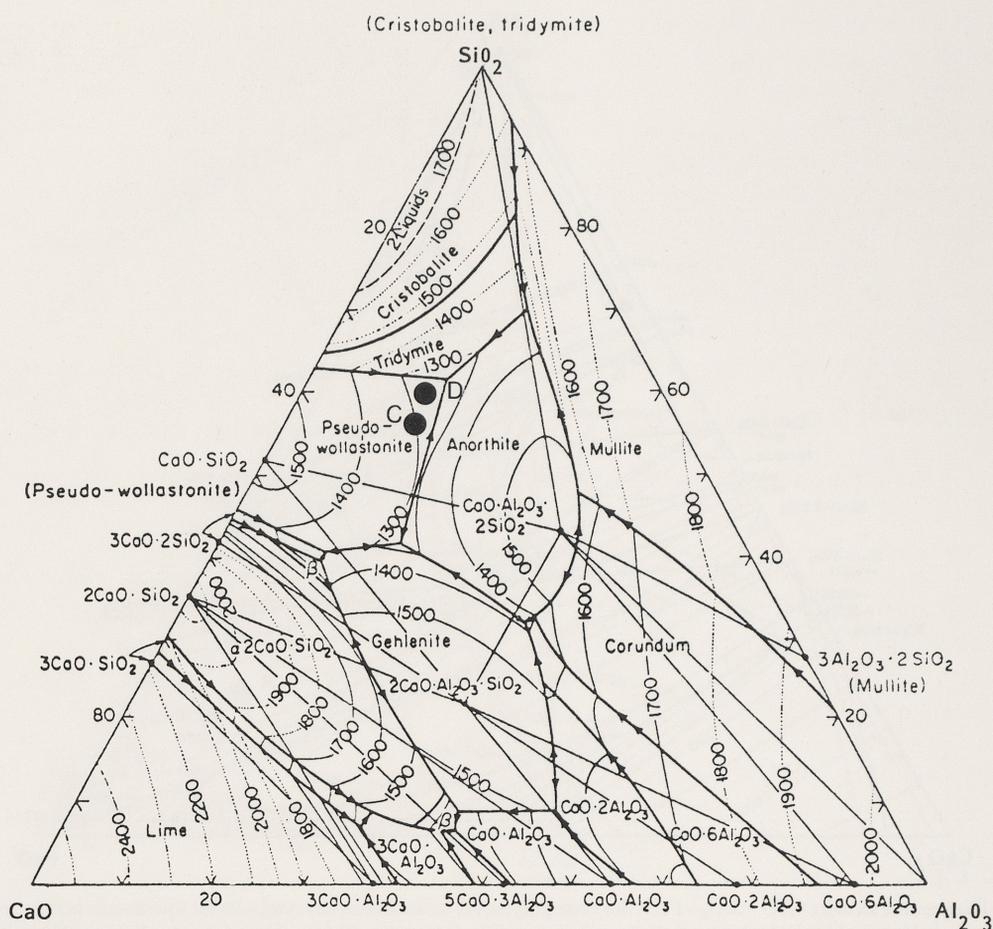


Fig. 12 Diagramme ternaire  $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$ . Sur cette graphique, la dimension des symboles est fonction de la représentativité de l'échantillon. Laitiers: C Minot, le Brévon. - D Minot, le Brévon.

tiers siliceux, ou acides, fondent à des températures relativement basses, dès  $1200-1250^\circ\text{C}$ , mais supérieures à la température de réduction de  $\text{FeO}$ . Dans le cas industriel des hauts fourneaux, les laitiers siliceux, très bien étudiés, se forment à environ  $1350-1400^\circ\text{C}$ , ils sont visqueux, passent par un état pâteux et, solidifiés, présentent une cassure vitreuse comme nous l'avons constaté à Minot<sup>28</sup>.

L'interprétation des diagrammes confirme largement les données tirées de l'examen des diffractogrammes et de l'histogramme des éléments. Ils montrent plus nettement encore la compatibilité entre minerais et scories, et permettent d'émettre des hypothèses de travail quant à l'origine des laitiers. Ils donnent en outre des indications, de toute première importance pour les historiens des techniques, sur la température atteinte dans les fours, proche de  $1300^\circ\text{C}$ . Cependant les limites que nous avons invoquées plus haut restent valables et il est nécessaire de confronter ces résultats avec d'autres données.

### Métallographie des fonds de four

Les prospections sur le ferrier du Brévon ont fourni des blocs lourds, d'une trentaine de centimètres de diamètre que nous avons assimilés à des fonds de four. L'un d'entre eux (MB.85.53) a été analysé par diffraction des rayons X et par spectrométrie d'émission. Deux autres ont fait l'objet d'une étude métal-

<sup>28</sup> Chaussin et Hilly 1956.

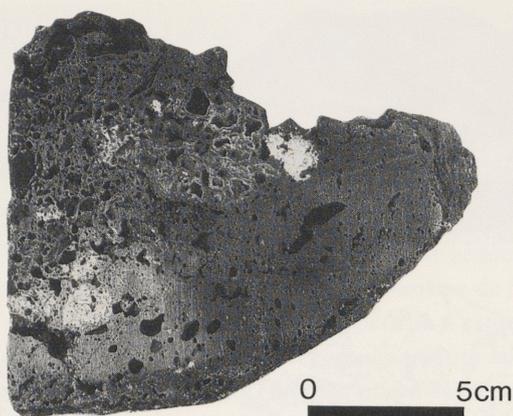


Fig. 13 Minot, le Brévon MB.83.1, surface.

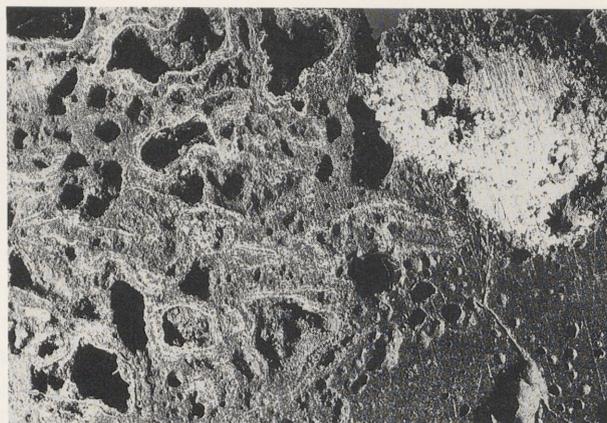


Fig. 14 Minot, le Brévon MB.83.1, coupe.

graphique. Le premier (MB.83.1), très proche de l'échantillon analysé ci-dessus et de la très grande majorité des spécimens rencontrés sur le site, possédait une épaisseur atteignant 13,5 cm en son centre.

Après sciage, il a montré des caractères tout à fait comparables à ceux que le fond de four (MB.85.53) avait révélé à l'analyse: peu de fer et abondance de scorie formée de wüstite principalement, qui enveloppe les parties métalliques (Fig. 13). Le fer apparaît sous des formes différentes et en des localisations différentes. On remarque en certains endroits une réduction diffuse du fer à partir de la wüstite. Ayant été exposé un certain temps à l'air, le métal a conservé un aspect brillant donc peu oxydé. Il s'agit vraisemblablement de ferrite, alliage de fer à 0,02% de carbone au maximum. Un métal du même aspect s'est aussi formé autour des cavités qui parsèment le bloc. Par contre le fer qui entoure les fragments de charbon de bois conservés dans la masse apparaît beaucoup plus oxydé (Fig. 14), alors qu'il a été soumis à l'action des mêmes agents extérieurs. La différence d'oxydation tiendrait donc aux qualités du métal, ce qui tend à faire penser qu'il contient un pourcentage de carbone relativement important. L'oxydation des zones en contact avec le charbon de bois avait été remarquée sur des échantillons provenant des expériences de Ph. Andrieux<sup>29</sup>.

Certaines conclusions peuvent être tirées de ces observations:

- le fer se forme à partir de wüstite, stade obligatoire du processus. Dans ce type de four, sa réduction s'effectue selon les deux réactions physicochimiques possibles, par le monoxyde de carbone et par le carbone.
- il existe des sites privilégiés pour cette transformation. En premier lieu les bords des cavités, lieux où circule le gaz dans le four, la réduction s'est ici produite sous l'action du monoxyde de carbone:  $\text{FeO} + \text{CO} \rightleftharpoons \text{Fe} + \text{CO}_2$ . Nous sommes ici dans une phase essentielle de l'ancien processus d'élaboration du fer selon le procédé direct puisque le métal peut être obtenu à basse température. La réaction est thermodynamiquement possible à partir de 570°C mais dans une atmosphère à plus de 50% de CO, ce qui n'est pas le cas dans un bas fourneau. Elle ne devient cinétiquement possible qu'aux alentours de 750°C.
- au contact du charbon de bois, la wüstite peut subir une réduction directe par le carbone:  $\text{FeO} + \text{C} \rightleftharpoons \text{Fe} + \text{CO}$ . La réaction se produit en théorie à partir de 805°C, mais ne devient effective que vers 1300°C, lorsque la wüstite atteint le stade pâteux et entre en contact intime avec le charbon. Les conditions de température et de contact entraînent alors la cémentation du fer<sup>30</sup>, ce que montre ici l'observation. Les

<sup>29</sup> Observation faite par I. Guillot, en juin 1986, lors d'une discussion sur les échantillons produits expérimentalement et sciés par Ph. Andrieux.

<sup>30</sup> Chaussin et Hilly (note 28) 61.

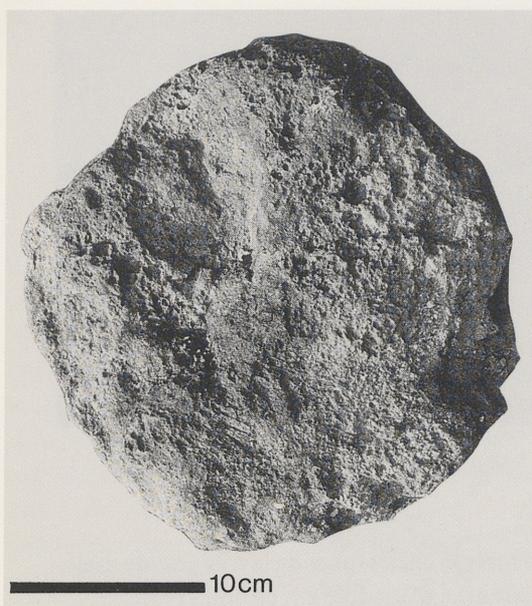


Fig. 15 Minot, le Brévon, fond de four MB.86.3.

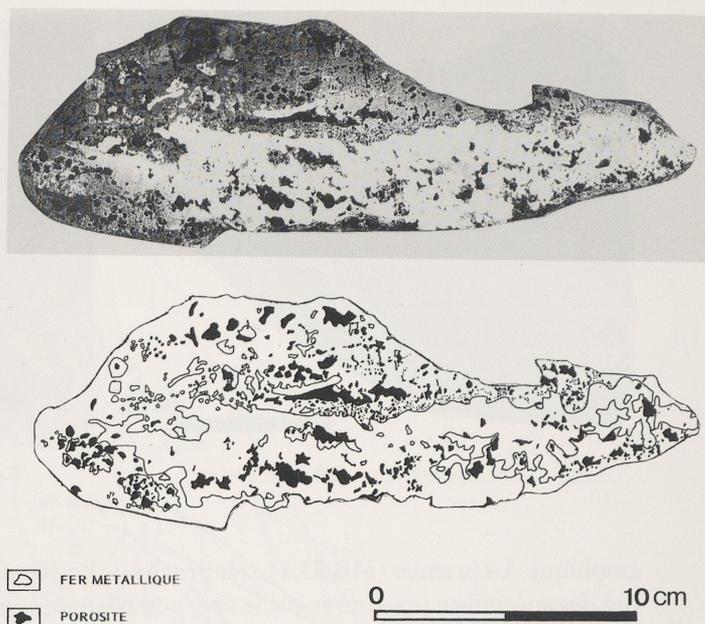


Fig. 16 Minot, le Brévon, fond de four MB.86.3.

températures atteintes sont proches de celles de la fusion de la wüstite. La présence de fayalite dans les scories coulées, visible sur les diffractogrammes X, entraîne un abaissement sensible des points de fusion (1370°C)<sup>31</sup>.

Dans l'état actuel de la recherche, la découverte à Minot de plusieurs fonds de fours de ce type, et surtout de nombreux fragments, permet d'envisager deux hypothèses quant à leur origine qui tiennent compte de leur pauvreté en métal. Il peut s'agir de la partie inférieure d'un ensemble qui aurait été arrachée, à la fin de la réduction, au plus bas du fourneau. La loupe, formée au centre et sur le fond de four, aurait été détachée avant d'être cinglée et transformée en lingot. Une telle position de la loupe a existé en certains cas, les découvertes archéologiques le prouvent, mais d'autres positions sont possibles<sup>32</sup>. L'autre hypothèse serait celle de réductions manquées, le peu de métal existant dans la loupe ne justifiant pas l'effort nécessaire à son extraction à la forge.

Le fond de four MB.86.3 diffère des autres, plus mince et plus plat (Fig. 15), il est particulièrement dense, une masse très importante de fer étant concentrée dans sa partie inférieure (Fig. 16). Comme dans le cas précédent, le métal a été obtenu à partir de la wüstite. L'analyse métallographique d'un cube de 1 cm de côté prélevé au centre de la masse de fer indique qu'il est constitué essentiellement de ferrite. Le métal obtenu s'avère très différent de celui qui a été obtenu à Bliesbrück. Analysé selon les mêmes méthodes, la différence provient très probablement du minerai<sup>33</sup>. C'est aussi un fer plus pauvre en carbone que celui qui entourait les fragments de charbon de bois de l'échantillon MB.83.1. Le fond de four MB.86.3 d'un type inhabituel sur le site, au stade actuel des prospections, serait le résultat d'une réduction réussie, abandonné sur place pour des raisons inconnues. Cette constatation laisse penser que les autres fonds de fours retrouvés proviendraient d'échecs dans la réduction. Il est trop tôt cependant pour dépasser le stade des hypothèses<sup>34</sup>.

<sup>31</sup> La cémentation, c'est-à-dire la diffusion du carbone dans le fer, qui produit un acier, peut s'effectuer dans le bas fourneau. La wüstite réduite directement par le charbon de bois donne un fer qui se trouve alors dans les conditions de température et de contact avec le carbone favorables à la

cémentation. Ces conditions particulières expliquent que seul une part minime du fer soit ainsi carboné.

<sup>32</sup> Domergues, Rebeschoul et Tollon 1982.

<sup>33</sup> Forrières, Petit et Schaub 1987.

<sup>34</sup> Par certains aspects les fours de Minot pourraient être

## Discussion: Le bas-fourneau et son fonctionnement

Ces résultats, obtenus en laboratoire à partir d'échantillons prélevés sur le terrain, doivent à nouveau être confrontés avec les données du terrain, seule procédure susceptible de fournir aux interprétations des analyses une réalité historique et technique, seul moyen d'éviter des contresens.

L'échantillonnage n'a pas été fait au hasard et les scories étudiées sont particulièrement significatives du ferrier du Brévon. Les fonds de fours n'ont jamais été retrouvés en place, pas plus que les scories cordées. Ils ont été rejetés hors des structures de réduction, probablement avant un nouvel usage. Tous les fonds de fours connus à Minot ont un diamètre de 30 cm environ. Les nombreux fragments retrouvés confirment ces données. Il est donc possible d'estimer les dimensions de la cuve du four. Les scories coulées, quelles soient lourdes, formées de wüstite et de fayalite, ou plus légères, comme les laitiers, sont trop nombreuses sur le site pour qu'on puisse considérer qu'elles aient été obtenues accidentellement. Nous pensons à des coulées volontaires pratiquées par le métallurgiste pour utiliser au mieux la capacité de son fourneau. Nous avons déjà insisté sur l'importance des laitiers, exceptionnelle, semble-t-il sur un site de réduction directe; leur présence atteste l'importance des produits coulant hors du fourneau. Le rejet des fonds de fours permet de penser à des fourneaux ayant pu servir à plusieurs opérations. Les hypothèses tirées de l'étude métallographique confortent celles que nous avons avancées après étude des diagrammes ternaires et de la diffraction X. Les températures probables de réduction ou de fusion des scories indiquent un fonctionnement du fourneau à des températures maximales de 1300°C, situation tout à fait favorable à la démixtion des liquides et à la coulée des scories denses et des laitiers.

Au total, sans qu'il soit possible de déterminer encore les dimensions exactes de l'appareil et s'il recevait une ventilation naturelle, artificielle ou mixte, nous avons une idée de ses dimensions au sol et de son type: four de dimensions modestes, construit pour résister à plusieurs réductions avec évacuation des scories en cours d'opération et élimination du fond de four scorifié. Parmi les fourneaux connus à ce jour, on pourrait le rapprocher de certains exemples de l'Europe centrale, occidentale ou d'Afrique<sup>35</sup>. Mais il est possible d'aller au-delà de cette simple typologie. Les scories lourdes sont tout à fait compatibles avec les minerais, ce qui confirme la très grande probabilité de l'utilisation du minerai local. Il n'est pas certain que les laitiers proviennent exclusivement du minerai, ce qui laisse entrevoir la possibilité d'un adjuvant argileux provenant des parois du four, d'un agglomérant rendu nécessaire par la nature même d'un minerai trop friable ou d'un fondant apporté comme tel.

La température atteinte serait supérieure à 1200°C, suffisante pour la réduction de la wüstite par deux voies différentes et pour une bonne évacuation des scories. Néanmoins, une part importante du fer reste dans les déchets, conséquence normale d'un tel processus. Les scories, wüstite mais aussi fayalite, retiennent une part importante du métal. Le procédé est donc coûteux en minerai et ce qu'on oublie souvent, en énergie. Si notre hypothèse est exacte, les opérations se sont soldées à plusieurs reprises par des échecs sans qu'il soit possible d'en évaluer la fréquence. Le métal obtenu, au terme de l'opération de réduction, est un fer non carburé. Ainsi, malgré l'abondance des laitiers nous sommes en présence d'un site de réduction directe utilisant du minerai extrait à proximité. Les études analytiques permettent donc de penser à des vestiges médiévaux comme la toponymie et un document écrit, malheureusement unique, le laissent entendre.

## Conclusions

Il y a très loin entre les questions que nous posons au début de ce texte et les conclusions auxquelles nous arrivons. Voulant étudier l'originalité et les techniques de la production sidérurgique cistercienne en

comparés aux fours du XIII<sup>ème</sup> siècle de Radětice, à 60 km au Sud de Prague. Ils possédaient un diamètre intérieur de 30 cm et une ouverture par laquelle coulaient les scories; la loupe de fer était évacuée par devant et le four pouvait ser-

vir à plusieurs reprises. Les températures intérieures ne devaient pas dépasser 1330° (Pleiner 1962).  
<sup>35</sup> La position de la loupe dans le four varie selon le type d'appareil mais les études en ce domaine restent insuffisantes.

Bourgogne du Nord, nous parvenons juste à jeter les premiers éléments d'une étude de l'extraction du minerai autour de l'abbaye de Fontenay et sur le site proche de Minot qui produisent dans des conditions assez semblables un minerai comparable. Les résultats touchant la métallurgie ne concernent, pour l'instant que ce dernier site et ne permettent que d'émettre des hypothèses sur la nature des fourneaux et les techniques de réduction.

Il reste un travail considérable à accomplir à Fontenay comme à Minot pour retrouver le plus de vestiges possible liés à la production du fer. La recherche, déjà bien avancée dans le domaine minier, doit se poursuivre par la fouille des ferriers et de zones voisines<sup>36</sup>. L'idéal serait de retrouver les vestiges bien conservés d'un four, l'espoir en est mince. Les fours étaient, comme partout ailleurs, certainement construits en matériaux locaux, à savoir en calcaire. Or, les expériences sur des fours en calcaire ont montré qu'ils résistaient très mal à l'érosion<sup>37</sup>. En l'absence de four, l'étude des diverses structures encore en place mais aussi des vestiges des parois de fours, de scories, de métal ou de charbon de bois devrait permettre de mieux dater les sites, de mieux comprendre le procédé en croisant les données du laboratoire et celles du terrain.

A cette approche, nous voudrions en ajouter une autre car l'analyse offre à l'archéologue plus d'hypothèses, plus de confirmations ou d'informations, que des certitudes. Nous pensons le recours aux études expérimentales indispensable pour comprendre le processus dans ses détails. Deux approches existent qui ne sont pas contradictoires mais complémentaires. Une voie qui recherche à se replacer dans les conditions de travail les plus proches de celles du métallurgiste médiéval et d'analyser scientifiquement les résultats obtenus, c'est la voie suivie par Ph. Andrieux. Il en a montré tout l'intérêt dans sa contribution à ce symposium. L'autre voie, celle sur laquelle nous nous engageons à Compiègne, consiste à utiliser une plateforme expérimentale de réduction, appareil qui reproduit en grandeur réelle les conditions de l'opération et qui est doté du maximum de moyens d'enregistrement et d'analyse. Une telle démarche permet le contrôle de tous les paramètres (minerai, charge, débit du vent, position des tuyères, nature des parois, fondants ...) que le chercheur peut faire selon les besoins de l'expérience. Actuellement il a encore été impossible de tester les minerais de Minot et Fontenay selon ces méthodes, elles demandent trop de minerai par rapport à ce qui a pu être extrait par les archéologues à ce jour.

Si dans cette première étude bien des points restent mal définis, si les données archéologiques sont encore insuffisantes, si tous les moyens d'investigations n'ont pas été mis en œuvre, nous n'avons pas encore recours à l'examen de lames minces qui pourrait cependant apporter beaucoup, si les méthodes de traitement des données peuvent être améliorées nous pensons cependant apporter des conclusions acceptables. Cette confiance en des résultats, même provisoires, tient à ce que nous avons en permanence cherché à les établir, non à partir d'une seule méthode d'investigation mais par le croisement des données et des méthodes d'origines diverses. Le fait est vrai pour l'usage de l'analyse élémentaire et de la métallographie, il l'est aussi par les rapports constants que nous avons cherché à établir entre les acquits du laboratoire, du terrain et des textes. Analyses, expérimentations, fouilles et inspections, recherches d'archives ne sont pas des voies distinctes qui convergent vers un but final mais lointain, la synthèse sur le site, mais des chemins qui se croisent en permanence, qui s'interpénètrent, des éléments qui s'expliquent mutuellement à toutes les étapes de la recherche.

Dans sa reconstitution du bas fourneau de Lodénice, que nous pensons être relativement proche du modèle concevable à Minot, R. Pleiner place la loupe au fond du four sous la scorie (Pleiner 1958, 174).

<sup>36</sup> La fouille des deux ferriers du Brévon et du Velbret s'avère possible depuis que M. Dabas en a entrepris le relevé en prospection électrique. Il a déterminé leur étendue, cartographié la présence des structures particulières permettant ainsi de choisir les emplacements des sondages, puis des fouilles.

<sup>37</sup> L'utilisation de matériaux locaux a été mise en évidence par P. L. Pelet (Pelet 1977). Les expériences de Ph. Andrieux ont montré à quel point les fours calcaires étaient fragiles. Portée à haute température, la roche, malgré le revêtement argileux interne a tendance à se transformer en chaux. Après abandon les fours sont facilement détruits sous le seul effet de la pluie (Andrieux 1983).