

Gebläsetyp	Hubmenge (l)	Hubzeit (s)	Leistung (Nm ³ /h)	HK-Verbrauch Kg/h	Bemerkung (Lit.)
Zwillingsblasbalg	je 3	je 1	10	1	Afrika (Anm. 7)
Trommelgebläse	~5	1/2	~40	~5	Afrika (Anm. 7)
Spitzblasbalg	50	2	90	11	m. Größe
Staubsauger 0,5 kW	–	–	40	5	Vers. (4)

So läßt sich durch Änderung der Konstruktion des Zwillingtierbalges zum Spitzblasbalg die Leistung je Person auf das 5- bis 10-fache steigern, was nachweislich schon in der Antike bekannt war⁶. Aus dieser Rechnung ergibt sich je nach verwendetem Blasbalg für 2500 m³ ein Arbeitsbedarf von 250 bis 23 Mann-Stunden. Da bei der verwendeten Ofengröße wohl kaum mehr als 4 Mann gleichzeitig Luft zugeführt haben können, wie es auch Berichte aus dem Afrika der jüngsten Vergangenheit zeigen⁷, würden sich hier für die Verarbeitung von 100 kg Braunerz zu 15 kg Eisen Betriebszeiten von mehr als zwei Tagen durchgehend für einfache Blasbälge ergeben. Man erkennt aus dieser Rechnung die große Bedeutung der Windzufuhr auf die Menge und wohl auch auf die Qualität des erzeugten Produktes, was insbesondere für die Eisenerzeugung gilt, wo der Kohlungsgrad von solchen Leistungsdaten abhängt (vgl. Anm. 2). Es erscheint daher für die Rekonstruktion der historischen Hüttenprozesse notwendig, neben dem Schlackenbefund beim archäologischen Befund vor allem die Windzuführung in Zukunft mehr zu beachten.

⁶ Weisgerber u. Roden 1985. – Weisgerber u. Roden 1986.

⁷ Todd 1979.

IVAN GUILLOT · PHILIPPE FLUZIN · PAUL BENOIT · GERARD BERANGER

ETUDES PALEOMETALLURGIQUES COMPARATIVES D'OUTILS MINIERES DU XV^{ème} ET DU XVI^{ème} SIECLES

Introduction

Intérêt de l'étude structurale

La structure d'un métal étant conditionnée par son histoire thermomécanique et thermo-chimique, il est possible, à partir d'études structurales¹, de déterminer en partie les processus mis en jeu lors de l'élaboration et de l'utilisation de l'objet (Ph. Fluzin et al. 1983). Ainsi, l'étude métallographique permet d'appréhender les techniques de forge en usage au XV^{ème} et au XVI^{ème} siècle. Dans un premier temps, on a réalisé des observations macrographiques en lumière rasante, afin de faire apparaître la texture de métal. Cette dernière permet d'évaluer de façon globale la mise en forme de l'objet (alignements d'impuretés, soudu-

¹ Ces études ont été réalisées au Laboratoire de Physico-chimie des Matériaux de l'Université de Technologie de Compiègne et au Laboratoire d'Ingénierie des Surfaces de l'Université de Technologie de Compiègne-Sévenans dans

le cadre de l'URA 34 du CNRS et en relation avec les membres du projet «Mines et Métallurgie dans l'Est de la France» (programme H 27 de la sous-direction de l'Archéologie).



Fig. 1 Un mineur au travail (d'après G. Agricola 1556).

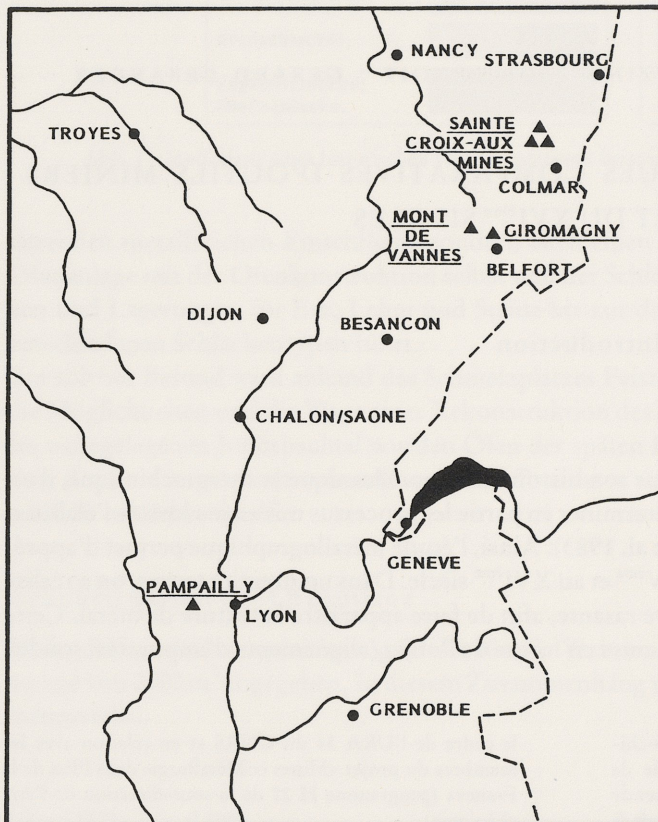


Fig. 2 Localisation des différents sites étudiés.

res ...). Par ailleurs, les examens micrographiques (optiques et électroniques) précisent les structures les plus caractéristiques, et révèlent les corrélations avec les traitements thermomécaniques inhérents à l'élaboration et à l'utilisation de ces outils.

Contexte historique et technologique

Pour réaliser cette recherche, nous avons étudié douze pointerolles correspondant à quatre districts miniers. Les pointerolles sont les principaux outils utilisés pour la taille des galeries et l'abatage du minerai dans les mines polymétalliques avant l'usage de la poudre, donc avant le XVII^{ème} siècle. Ces pointerolles se présentent comme des outils emmanchés à percussion posée, destinés à être frappés à l'aide d'un marteau (Fig. 1). Quatre pointerolles proviennent de la fouille du site minier de Pampailly (Brussieu, Rhône, France) (Fig. 2). Les campagnes de 1983 à 1985 ont mis à jour, à l'entrée de la galerie d'hexaure du Vernay, deux forges situées à des niveaux stratigraphiques différents; l'installation sommaire du XVI^{ème} - XVII^{ème} siècle recouvre les vestiges beaucoup plus importants de la forge de la seconde moitié du XV^{ème} siècle dont les pointerolles sont issues (P. Benoit 1986). Dans les deux cas, la datation est précise, grâce à des documents d'archives exceptionnels (M. Mollat 1953. – A.-T. Rendu 1985) et aux données dendrochronologiques²: entre 1764 et 1772 pour la forge supérieure, et entre 1455 et 1480 pour la forge inférieure. La mine de Pampailly est une grande exploitation du XV^{ème} siècle. Elle a appartenu à Jacques Cœur jusqu'en 1451, date de la confiscation de ses biens, puis exploitée en régie royale de 1456 à 1457. Affermée de 1457 à 1458, elle fut ensuite rendue aux héritiers de J. Cœur. Les textes et les résultats archéologiques (P. Benoit – I. Guillot à paraître) donnent l'image d'une exploitation modèle, des investissements considérables y ont été réalisés.

Cinq autres outils proviennent du vallon du Saint-Pierremont (Sainte-Croix-aux-Mines, Haut-Rhin, France) situé sur la rive gauche de la Liepvrette (Fig. 2) et appartenant au duché de Lorraine. De 1512 à 1628, 276 mines ont été ouvertes sur ce vallon, elles étaient les plus productives du Duché et leur apogée se situe entre 1551 et 1575 (J. Grandemange 1986, 188). Afin d'établir des comparaisons entre l'outillage de ces différentes exploitations, nous avons choisi de limiter l'étude aux quartiers de la Goutte des Pommes (Fig. 3) où les recherches archéologiques sont les plus abondantes. Ainsi, nos observations ont porté sur deux pointerolles des mines Wurtzelmauerstollen (1550-1580) (B. Ancel et al., à paraître), deux outils de l'*Erbstollen*³ de la mine inférieure à la Fontaine des Chouettes (1550-1575), et une pointerolle du carreau de la mine Samson. D'après les comptes miniers (J. Grandemange 1986), le filon du Samson fut exploité entre 1542 et 1610. La dendrochronologie propose la date de 1554⁴.

Pour compléter l'étude, nous avons choisi d'inclure dans la recherche trois outils provenant des Vosges méridionales (Fig. 2). Il s'agit de deux pointerolles de la fin du XVI^{ème} siècle découvertes sur la halde de la mine Barthélemy du Mont-Jean (Giromagny, Territoire de Belfort, France)⁵. Le dernier outil est issu de la fouille de l'*Erbstollen* de la mine Saint-Barthélemy (Mont-de-Vannes, Haute Saône, France), daté de 1576 par les sources écrites⁶.

Mode de prélèvement des échantillons

Les pointerolles sont des outils relativement massifs dont les plus grandes sections transversales varient de 2 à 4 cm². Ils comportent donc suffisamment de métal non encore oxydé pour permettre une étude métallurgique significative. La figure 4,1 dresse un tableau récapitulatif du mobilier étudié en précisant d'une part la morphologie de chaque outil par rapport à la position de l'œil et d'autre part le type de prélèvement effectué.

² Analyses dendrochronologiques effectuées au Laboratoire Romand de Dendrochronologie de Moudon (Suisse) dirigé par A. et C. Orcel.

³ *Erbstollen* est le nom germanique d'une galerie d'hexaure située au plus bas de la montagne.

⁴ Etude effectuée au Laboratoire de Chrono-écologie de Besançon, dirigé par J. Lambert.

⁵ Fouille dirigée en 1985 par M. Rillot.

⁶ Fouille dirigée en 1985 par M. Py et D. Morin.

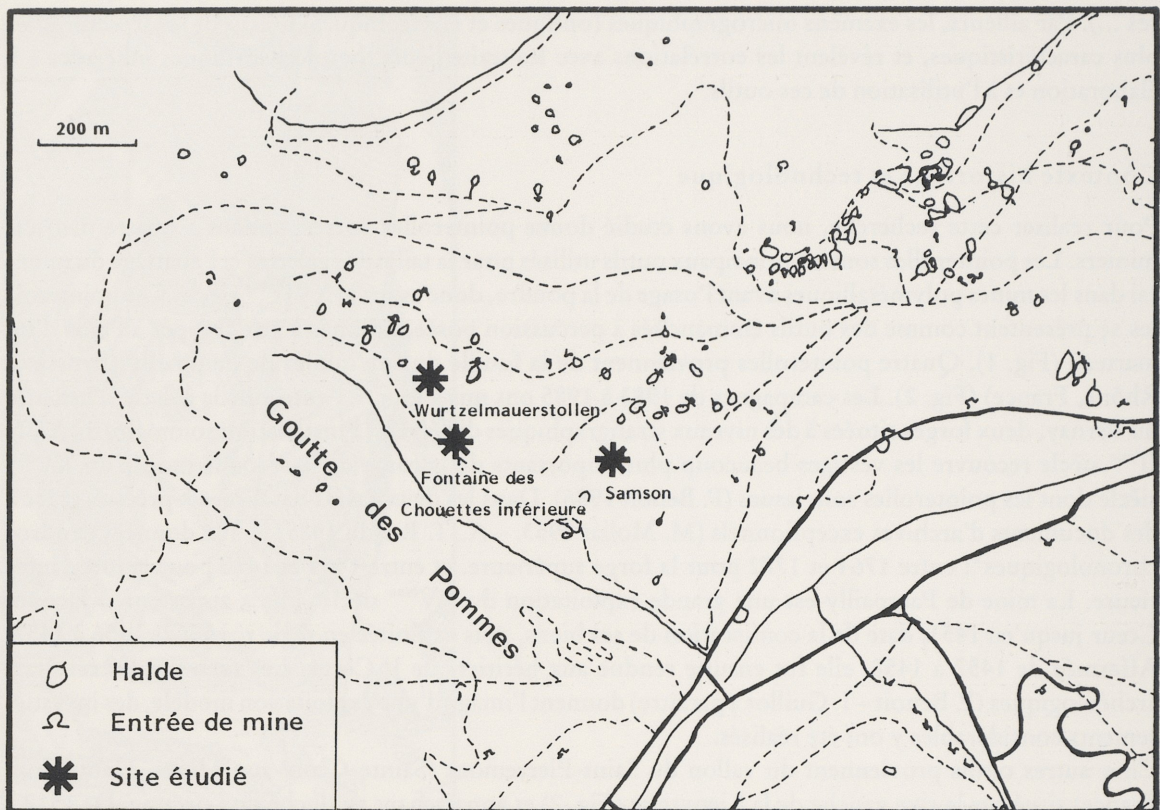


Fig. 3 Quartier de la «Goutte des Pommes» à Sainte-Croix-aux-Mines (d'après la carte des haldes de P. Fluck).

Mise en forme et utilisation de ces outils à travers quelques exemples

Afin de faciliter l'interprétation des données résultant de la «lecture structurale» des surfaces polies, l'étude de la tête de l'outil, organe récepteur du choc, sera chaque fois que possible séparée de celle de la pointe, organe de transmission du choc. Les différentes techniques de mise en forme rencontrées et leurs variantes seront illustrées à l'aide de quatre exemples jugés significatifs.

Pointerolle V-85-3 de Pampailly

Les pointerolles de Pampailly constituent un lot homogène dont nous avons défini les caractéristiques principales lors d'une précédente publication (Guillot et al. 1987). Ces données sont résumées ici à l'aide de l'exemple de l'outil V-85-3. Il présente au niveau de la pointe, une zone elliptique (zone I), plus sombre sur le cliché de la figure 5, intéressant environ le tiers de la longueur totale. La différence de contraste est due à l'action sélective du réactif d'attaque en fonction principalement de la teneur en carbone de l'acier. Cette zone I, que nous nommerons «insert» par la suite, est constituée d'un acier à environ 0,8% de carbone, inséré dans une matrice en acier de teneur en carbone variable. La matrice, loin d'être homogène, est constituée schématiquement de quatre zones distinctes (Fig. 5). Les zones II, III, et IV sont ferritiques, donc de teneur en carbone inférieure à 0,02%, tandis que la zone V est en acier mi-doux c'est-à-dire en alliage fer-carbone à environ 0,4% de carbone.

On observe au niveau de la tête, une fissure ramifiée située à l'intersection des zones II, III et IV (Fig. 5; 6,1). Elle correspond à la rupture des soudures de forge entre les différentes zones. La matrice apparaît ainsi constituée d'un agrégat de feuillets métalliques résultant probablement de la récupération d'anciens



































	DATATION	DESSIN 10 cm	$D = \frac{L'}{L}$	PRE- VEMENT	ETAT	POINTE ACIEREE	CORPS	OEIL
PAMPAILLY V.83.1.	XV ?		0,62		USEE	INSERT + CEMENTATION	FERRITE ?	?
PAMPAILLY V.84.2.	1460-1480		0,55		USEE	INSERT	FERRITE	
PAMPAILLY V.85.1.	1460-1480		0,57		USEE	INSERT	FERRITE	
PAMPAILLY V.85.3.	1460-1480		0,5		REFORGEE	INSERT	FER ET ACIER CORROYES RECUPERATION	
WURTZEL. SUP.	1550-1580		0,59		REFORGEE	SOUDURE EN BOUT	FER ET ACIER CORROYES RECUPERATION	
WURTZEL. INF.	1550-1580		0,78		USEE	DOUBLE INSERT ?	STRUCTURE EN BANDES	
FONTAINE 82.21.	1569		0,63		REFORGEE	SOUDURE EN BOUT	STRUCTURES EN BANDES	
FONTAINE 82.37.	1569		0,59		USEE	SOUDURE EN BOUT	STRUCTURES EN BANDES	
SAMSON 81.7.	1554		0,60		USEE	INSERT	STRUCTURES EN BANDES	
GIROM. 1.	FIN XVIè		0,88		REFORGEE	INSERT	FER ET ACIER CORROYES RECUPERATION	
GIROM. 2.	FIN XVIè		0,65		USEE	NON	STRUCTURES EN BANDES	
MONT DE VANNES	1576		0,62		REFORGEE	ACIER	ACIER	?

Fig. 4 1 Objets étudiés. – 2 Résultats des études métallographiques.

outils (partie V en acier) selon la technique du corroyage (Ph. Fluzin 1983). L'application de cette technique ainsi que l'ajout de l'insert en acier nécessitent la réalisation simultanée des soudures fer/fer et des soudures fer/acier à la forge. Dans l'ensemble, ces soudures sont de bonne qualité, seules celles de la tête ont présenté une certaine faiblesse sous les sollicitations violentes de l'utilisateur. A l'inverse, la soudure de l'insert est parfaitement réalisée (Fig. 7), ce qui dénote une grande habileté du forgeron. Le dernier apport de l'examen macrographique précise le mode de réalisation de l'œil, trou pour loger le manche, par poinçonnage dans un seuls sens (Fig. 5).

L'ensemble des microstructures observées en pointe de l'outil, et particulièrement au niveau de l'insert, montre l'emploi de la trempe. Elle permet une augmentation considérable de la dureté du matériau nécessaire pour percer le rocher. En effet, à l'extrémité de l'insert, nous observons une structure de microdureté⁷ élevée ($H_v = 950$) dont le faciès indique qu'il s'agit de martensite (Fig. 6,3). Cette structure, caractéristique d'une grande vitesse de refroidissement (environ $100^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$), s'obtient par trempe à l'eau. En fait, la pointe devait être entièrement trempée puisqu'au coeur de l'insert où la vitesse de refroidissement est plus faible, l'examen du cliché de la figure 6,4 montre une perlite nodulaire ($H_v = 400$) dans un environnement bainito-martensitique. Les zones ferritiques de la tête de l'outil présentent une cristallisation équiaxe indiquant une relative homogénéité du traitement thermomécanique. Les grains de ferrite de ces outils, de taille relativement élevée, ne révèlent jamais de structure maclée, comme on le rencontre souvent lors de l'étude d'objets anciens (L. Uran 1983. – I. Guillot et Ph. Fluzin 1987). L'hypothèse la plus vraisemblable quant à la formation des macles mécaniques est celle d'une forte vitesse de déformation à température ambiante. De telles structures ne s'observent qu'après une utilisation intensive de l'outil (Guillot et al. 1987). La surface de frappe ne porte pas non plus de trace d'écrouissage consécutive aux

7 Les essais de microdureté ont été effectués sous une charge de 300g, le résultat correspond à la moyenne de 10 mesures.

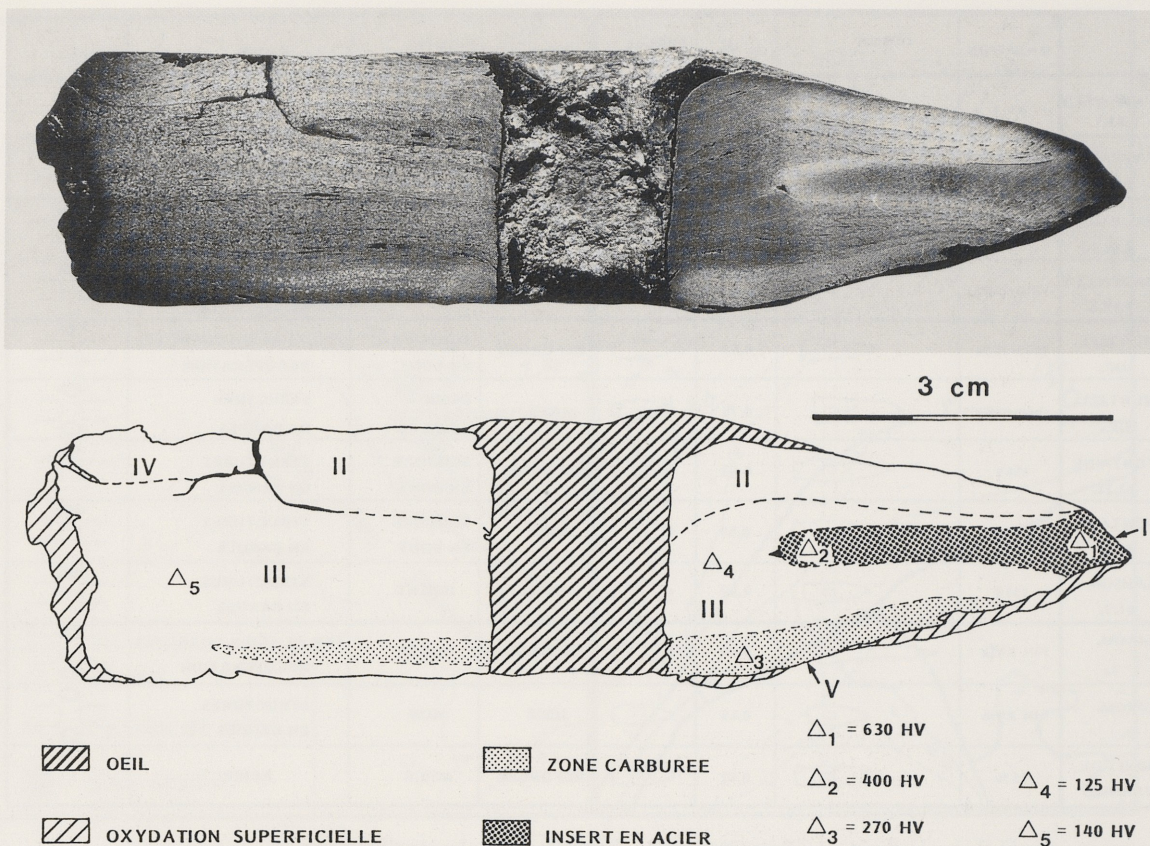


Fig. 5 Pointe V.85.3 de Pampailly.

chocs violents du marteau sur la tête de la pointe (Fig. 1). L'absence de maclage et d'écaillage laisse penser que la pointe était brute de forgeage ou de reforgeage lors de son abandon. En effet, tout chauffage du métal dans le domaine austénitique, donc tout passage à la forge, réinitialise la structure et annihile les déformations antérieures (Guillot et Fluzin 1987). Retrouvé dans la forge, l'outil ne présente aucune trace d'usure de la pointe, ni d'écrasement de la surface de frappe. L'hypothèse d'une pointe brute de forgeage est donc renforcée.

Les observations effectuées sur les pointes de Pampailly montrent une unité d'élaboration primaire, correspondant à la mise en place au sein d'une matrice, de ferrite ou d'acier corroyé, d'un insert en acier par une soudure en «gueule de loup». On peut alors proposer le schéma de mise en forme suivant:

- 1^{ère} étape: formage séparé du corps et de l'insert carburé;
- 2^{ème} étape: ouverture du corps en «gueule de loup» à l'aide d'une tranchette à chaud et façonnage de l'élément d'acier à rapporter de manière à remplir parfaitement l'intervalle de la fente;
- 3^{ème} étape: «chauffe» au rouge clair (environ 860°C) de la région des lèvres de l'ouverture, puis fermeture de celles-ci sur le morceau d'acier introduit dans la fente, ce dernier étant à la température ambiante;
- 4^{ème} étape: soudage proprement dit par forgeage; l'écart de température introduit lors de la troisième étape est nécessaire pour que fer et acier atteignent en même temps leurs paliers de soudabilité;
- 5^{ème} étape: poinçonnage de l'œil;
- 6^{ème} étape: façonnage de la pointe;
- 7^{ème} étape: réalisation de la trempe;
- 8^{ème} étape: réparations ultérieures.



Fig. 6 1 Fissures au niveau de la tête de la pointerolle. – 2 Soudure de l'insert. – 3 Martensite. – 4 Perlite nodulaire dans un environnement bainito-martensitique.

Afin de saisir avec un maximum de fidélité et d'honnêteté l'information que contient l'objet archéologique, et d'éviter des formulations intellectuellement séduisantes mais sans fondement technologique, nos hypothèses concernant les techniques de mise en forme pourraient être confrontées aux réalités de la forge artisanale traditionnelle. Des reconstitutions devraient être tentées pour reproduire à la fois les for-

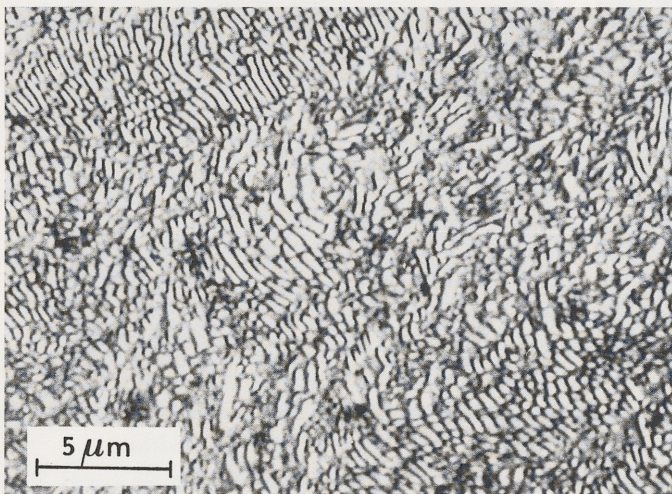
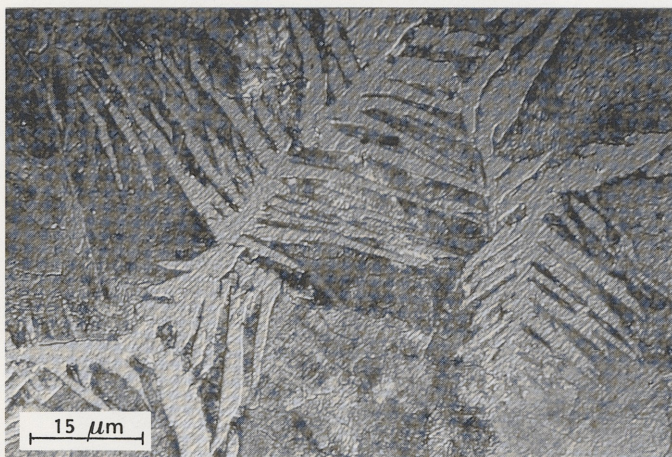
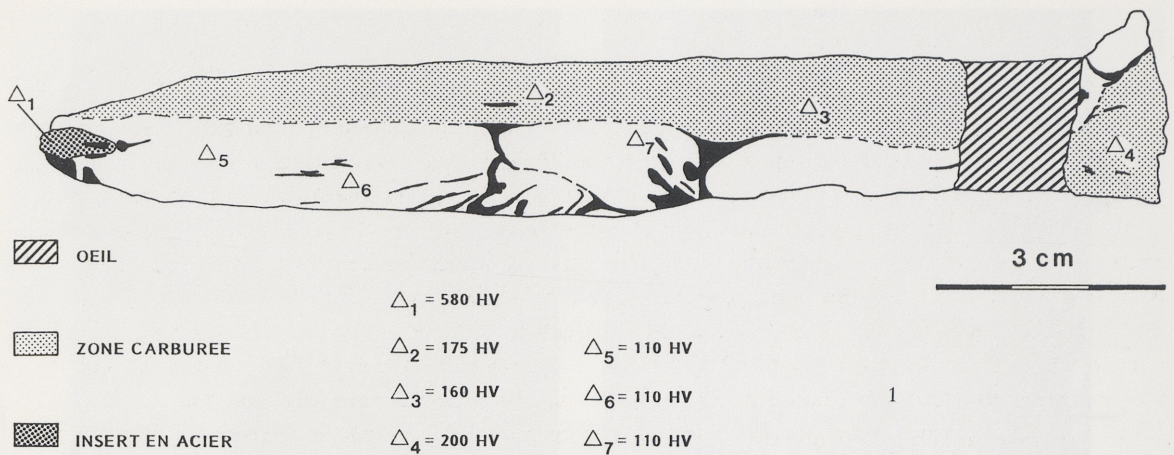


Fig. 7 1 Pointe no. 2 de Giromagny. – 2 Structure de Widmannstätten. – 3 Perlite lamellaire au centre des grains.

mes et les structures observées en utilisant un matériel de base très proche de celui de forgerons de ces époques (Fluzin et al. 1983). En effet, dans les conditions extrêmement précises que requiert le travail du fer, l'outillage a fort peu évolué depuis des siècles (J.-P. Mohen 1980).

Pointerolle N° 1 de Giromagny

Malgré sa morphologie particulière, cette pointerolle (Fig. 7,1) présente de grandes similitudes avec celles de Pampailly. Le corps est constitué d'une âme en acier et de plusieurs zones ferritiques, il semble avoir été, lui aussi, élaboré par corroyage à la forge. La soudure des parties ferritiques sur l'âme en acier est presque parfaite. Le forgeron s'est placé dans de bonnes conditions pour réaliser les soudures fer/acier, donc dans des conditions non optimales pour effectuer les soudures fer/fer, ce qui provoque les décohé-sions observées sur la figure 7,1. De plus, ce type de soudure perpendiculaire au grand axe de l'outil, donc parallèle à la direction de martelage ne permet pas, par sa nature, un contact intermétallique intime. Elle est, de ce fait, très délicate à exécuter. La pointe est aussi formée d'un insert mais de dimensions réduites par rapport à l'exemple précédent (Fig. 7,1). Sa réalisation n'apparaît d'ailleurs pas excellente, l'ouverture en gueule de loup étant trop grande. L'œil, quant à lui, est poinçonné dans les deux sens.

L'insert a une structure bainitique ($H_v = 580$) qui correspond à une vitesse de refroidissement inférieure à la vitesse critique de trempe. Les structures bainitiques ont en général de meilleures propriétés mécaniques que les structures martensitiques, car tout en conservant une grande dureté, elles sont moins fragiles, ce qui peut éviter une rupture de la pointe lors d'une utilisation trop intensive. L'âme en acier, de teneur en carbone élevée, a subi, elle aussi, un refroidissement accéléré. On observe, en tête de l'outil une ferrite aciculaire (Fig. 7,2) tandis que le centre des grains est constitué de perlite lamellaire (Fig. 7,3). La structure de Widmannstätten est caractéristique d'un acier surchauffé, et d'un refroidissement rapide, à l'air par exemple. Ce résultat est corroboré par la faible distance interlamellaire de la perlite, difficilement résolue au microscope optique. Les zones ferritiques, de cristallisation équiaxe et de taille de grain élevée, laissent supposer également un maintien prolongé à haute température. L'absence de macles et d'écrouissage indique, là encore, un outil brut de forgeage, c'est-à-dire neuf ou venant d'être réparé.

La forme de l'objet, une longueur inaccoutumée pour la section, un œil très décentré vers la surface de frappe, des propriétés mécaniques médiocres et des soudures de mauvaise qualité font penser à un outil minier particulier. Les mineurs le réservaient peut-être à des usages spécifiques, liés à de la nature de la roche ou de la technique d'abatage. Appartient-il à une famille différente mais proche de celle des pointerolles? La métallurgie structurale n'apporte pas de réponse, elle permet simplement de concevoir un schéma de mise en forme voisin de celui des pointerolles de Pampailly.

Pointerolle 82.37 de la mine inférieure à la Fontaine des Chouettes

Seule une demi-section de la pointe a été prélevée (Fig. 8,2 et 8,1). La tête de cet outil a une surface de frappe fortement écrouie (Fig. 8,2). Retrouvé dans une galerie, il a donc été perdu ou abandonné par le mineur après utilisation. Seules deux pointerolles de la mine inférieure à la Fontaine des Chouettes ont été étudiées. La seconde, 82.21, est brute de forgeage. Le nombre restreint d'objets de cette mine qui ont été pris en compte n'a pas permis d'établir de façon certaine la réutilisation, comme matière première, des outils après usure. L'observation de la pointe montre cependant un corroyage très marqué (Fig. 8,1 et 8,3), constitué d'une sorte de fibrage. Il présente des alignements de grains ferritiques de grosseur différente. Les soudures entre les diverses bandes sont très bien réalisées. Le faciès d'un tel corroyage (bandes très allongées et très régulières) laisse supposer une exécution à l'aide d'un martinet (marteau hydraulique). La pointe, quant à elle, relève d'une conception différente de celle des autres échantillons. Elle n'est plus constituée d'un insert, mais simplement d'un morceau d'acier soudé en «bout» sur le corps ferritique. L'œil, comme les pointerolles de Pampailly, a été percé d'un seul côté.

La pointe en acier a subi une trempe à l'eau et l'on observe une structure bainito-martensitique de dureté assez élevée ($H_c = 780$). Au cœur de la zone trempée (Fig. 8,1), quelques fines fissures apparaissent. Ces fissures prennent naissance lors de la trempe et sont appelées tapures de trempe: au cours du refroidissement, des gradients thermiques élevés sont créés au sein du matériau, ils introduisent des déformations permanentes qui provoquent les fissurations (Benard et al. 1984). Lors de l'utilisation de l'outil, des fissures peuvent se propager et produire une rupture brutale de la pointe, la pointerolle est alors inutilisable.

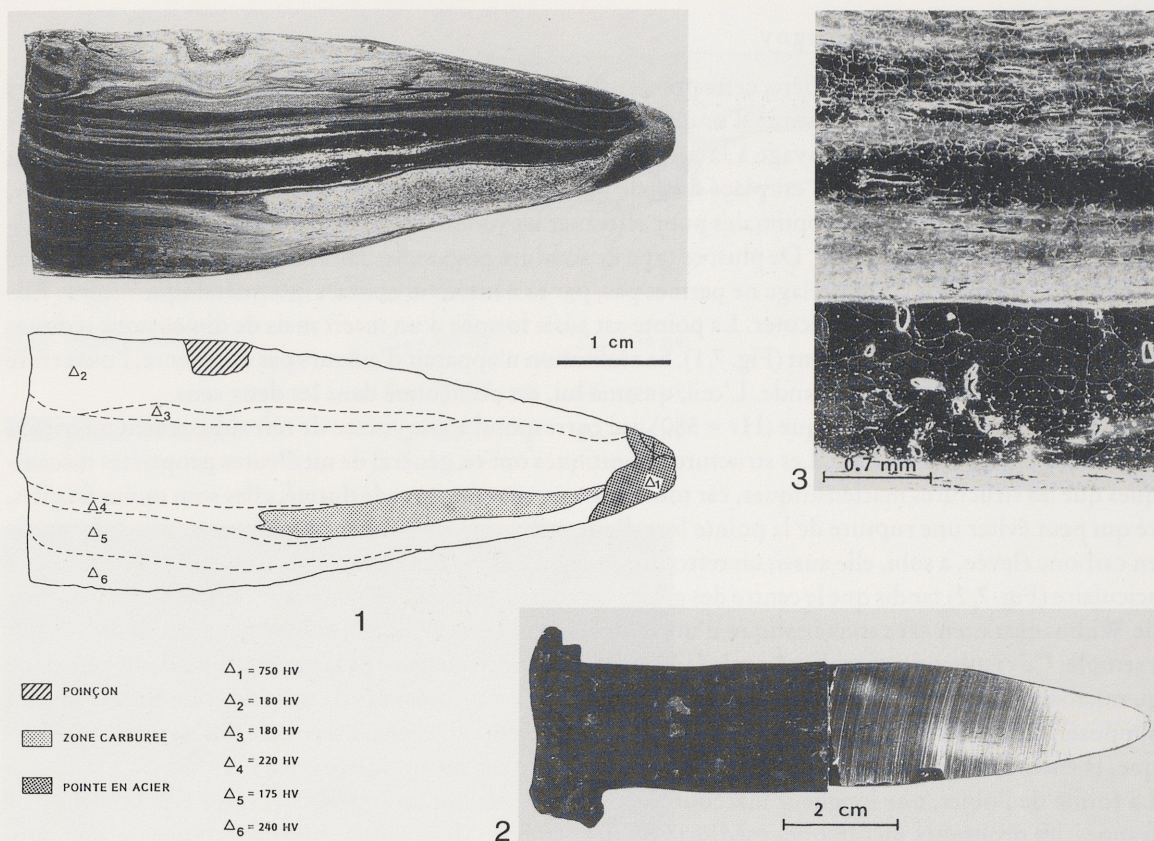


Fig. 8 1 Pointerolle 82.37 de la Fontaine des Chouettes. – 2 Prélèvement et écouissage de la surface de frappe (82.37).
3 Structure en bandes.

La différence de taille des grains de ferrite des diverses bandes (Fig. 8,3) est corrélée avec la dispersion des mesures de microdureté (Hv = 175 à 240). En effet, la diminution de la taille des grains de ferrite favorise une légère augmentation de la dureté.

Les opérations de forgeage peuvent se résumer ainsi: les pointerolles (82.21 et 82.37) possèdent une pointe en acier rapportée sur le corps par »une soudure en bout«. Cela suggère une série d'opérations en forge artisanale:

Elaboration du lingot de base: corroyage énergique au martinet;

Elaboration de l'outil:

1^{ère} étape: préparation séparée du corps et de la pointe;

2^{ème} étape: ajustage des pièces à souder;

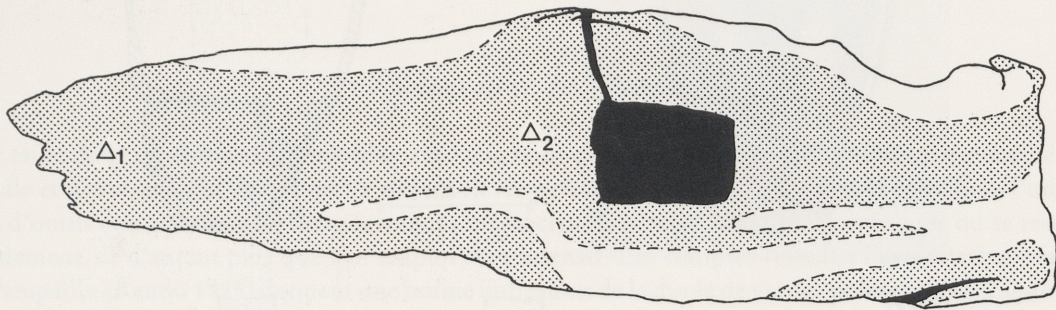
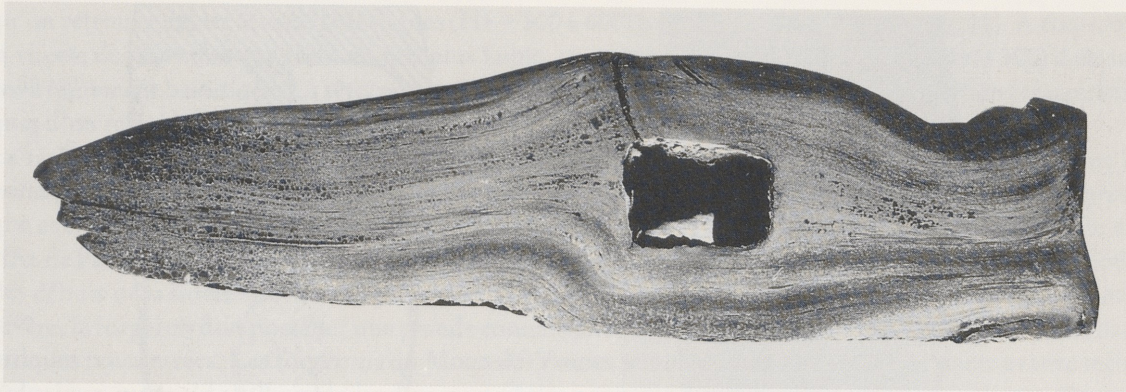
3^{ème} étape: exécution de la soudure, jet de sable pour épurer les surfaces à souder puis mise en compression des pièces pour assurer la liaison intermétallique;

4^{ème} étape: poinçonnage de l'œil;

5^{ème} étape: réalisation de la trempe.

Pointerolle du Mont-de-Vannes

C'est le seul exemple d'outil dont le corps, conçu totalement en acier, exclut la mise en place d'une pointe rapportée (Fig. 9,1). Il est en fait constitué de bandes d'aciers soudées par corroyage, de teneur en carbone variable, inférieure toutefois à la composition eutectoïde (0,8% de carbone). Le fibrage consécutif au cor-



$\Delta_1 = 580 \text{ HV}$

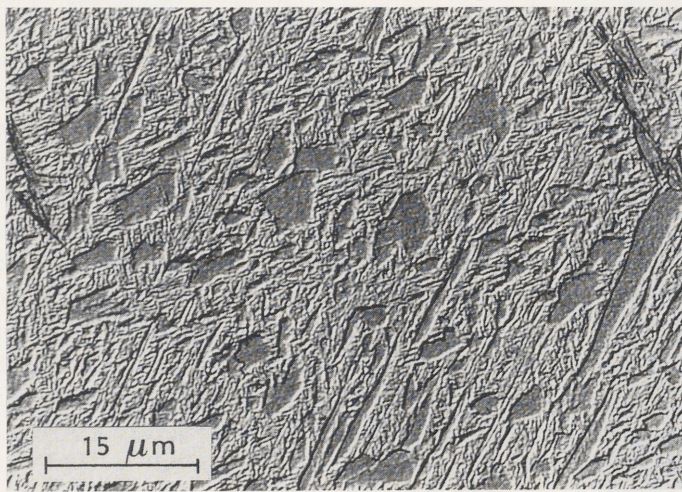
$\Delta_2 = 485 \text{ HV}$



ZONE CARBUREE

3 cm

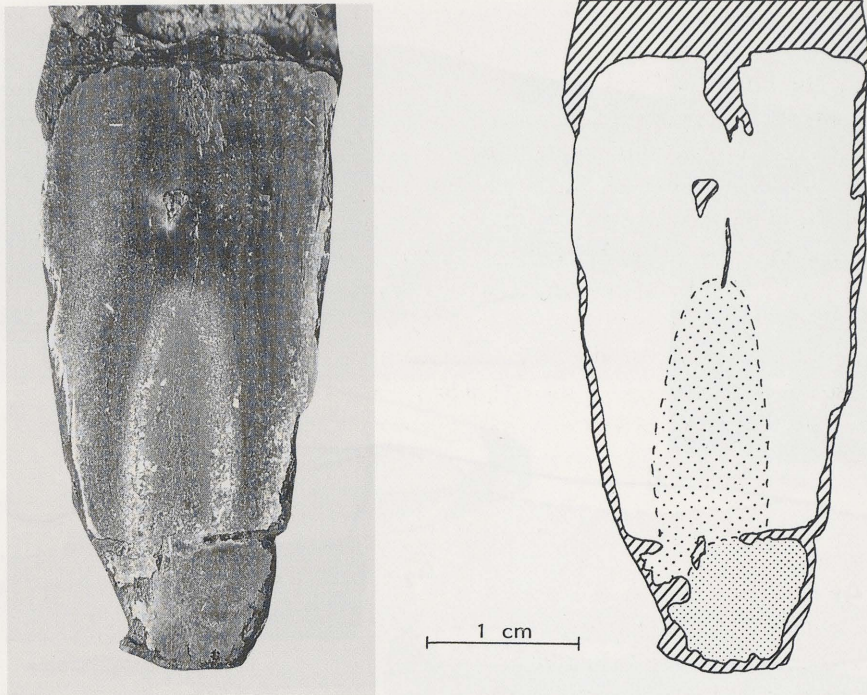
1



2

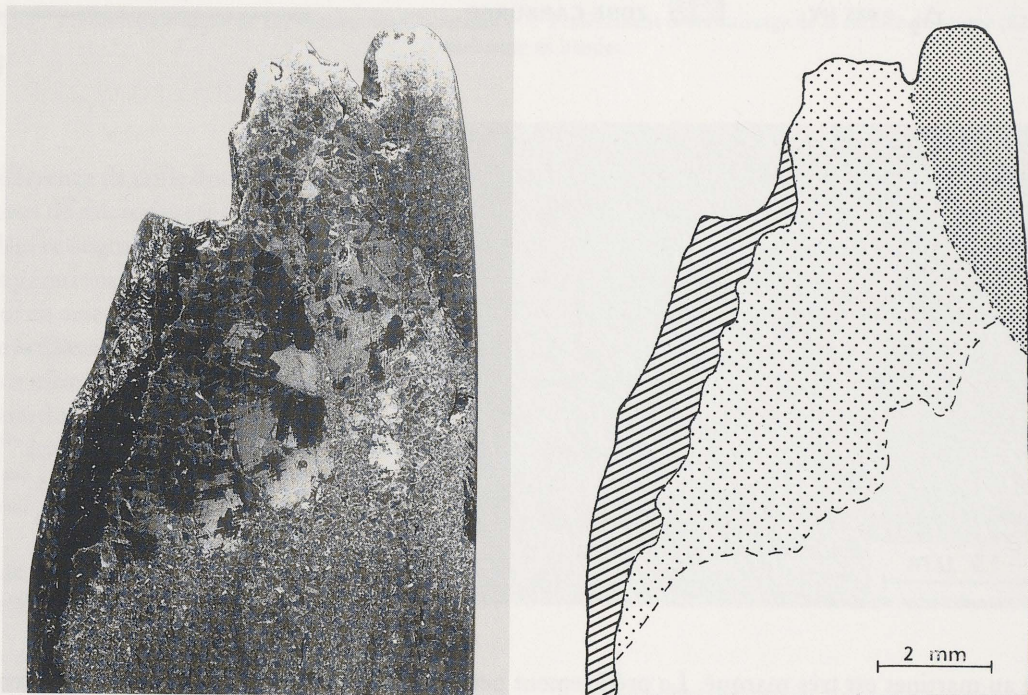
Fig. 9 1 Pointerolle du Mont de Vannes. – 2 Structure bainitique.

royage au martinet est très marqué. Le prélèvement perpendiculaire à l'axe de l'œil met en évidence la courbure des fibres au niveau du poinçonnage. La fissure située au coin de l'œil, endroit où la concentration de contrainte est maximale lors du perçage, a dû s'amorcer lors de la réalisation de ce dernier. La propagation s'est probablement effectuée lors de l'utilisation de l'objet. Bien qu'à demi-rompu, il porte des traces de reforgeage au niveau de la tête (Fig. 9,1). L'outil a subi une trempe douce dans la masse puis-



 Oxydation superficielle
  Insert
  Réparation

Fig. 10 Réparation de la pointerolle V.84.2






 Oxydation superficielle
  Insert martensitique
  Zone cémentée

Fig. 11 Réparation par cémentation.

qu'on retrouve des structures bainitiques ($H_v = 500$ à 600) jusqu'au niveau de l'oeil (Fig. 11). A cœur, où la vitesse de refroidissement est un peu plus faible, on observe une perlite nodulaire ($H_v = 300$) dans un environnement bainitique. La tête, non trempée, présente des structures de Widmannstätten caractéristiques d'un refroidissement encore rapide.

La réalisation d'un tel outil est très simple, le travail de forge consiste uniquement à mettre en forme la pointerolle à partir d'une barre en général livrée brute à la forge des mines⁸. L'utilisation d'un corps presque exclusivement en acier, relève d'une conception relativement moderne de l'outil. Elle nécessite en effet de l'acier disponible en quantité importante et bon marché, ce qui est rarement le cas à cette période des débuts de la sidérurgie indirecte. De plus, afin d'éviter de fragiliser l'outil, résultat d'une trempe trop sévère, le forgeron doit posséder une grande connaissance du phénomène pour obtenir les structures bainitiques rencontrées. Les forgerons du Mont-de-Vannes semblent bénéficier d'une certaine avance technologique, puisqu'il a fallu attendre plusieurs siècles pour que de telles méthodes se généralisent. Cependant, ces forgerons utilisent probablement aussi les autres techniques de mise en forme rencontrées⁹.

Réparation de l'objet

Une taille de grain élevée, incompatible avec une bonne tenue mécanique, des soudures de qualité très inégale et des structures de trempe de dureté élevée présentant une certaine fragilité entraînent l'utilisation d'outils aux caractéristiques mécaniques médiocres. Ces objets devaient donc s'user ou se rompre rapidement, ce d'autant plus que leur emploi était intensif. Les comptes relatifs à l'exploitation minière de Pampailly (Rendu 1985) donnent une bonne indication de la durée de vie des pointerolles: «...*que chacun desdits ouvriers soit toujours pourveu pour son ouvrage d'un martel et d'une douzaine de coignetz*¹⁰ *qui luy sera délivrée en la forge, en telle manière que par faulte desdits martel et coignetz, il n'ait cause de chomer ne perdre temps...*». Le forgeron, en plus de l'élaboration des outils, devait donc les entretenir chaque jour et leur nombre pouvait devenir vite important. Le fer et surtout l'acier étant alors des matières premières coûteuses, on conçoit que ces outils puissent comporter de nombreuses traces de réparation au niveau de la pointe aciérée.

En pointe de l'insert (pointerolle V. 84.2 de Pampailly), deux fissures fortement oxydées délimitent une plage de structure particulière. La microdureté élevée de cette zone ($H_v = 1020$) et le faciès de la microstructure signalent une structure martensitique (Fig. 10). En fait, la pointe devait être entièrement trempée. La forme de cet îlot martensitique et la limite très franche entre martensite et bainite indiquent la présence probable de deux aciers de composition différente. Dans cette hypothèse, l'îlot martensitique proviendrait d'un rechargement de la pointe consécutif à la réparation de l'outil. Nous avons aussi observé l'existence possible d'une cémentation volontaire (pointerolle V. 83.1 de Pampailly). Ainsi, la figure 11 montre une répartition particulière de la zone carburée. La partie la plus sombre en bordure de coupe et limitée par une fine fissure corrodée, est entièrement composée de martensite ($H_v = 890$). Cette pointe martensitique correspond sans doute à un ancien insert usé ou rompu. La zone la plus claire est composée de bainite ($H_v = 545$). Le cliché en regard (Fig. 11) met en évidence des plages bainitiques de dimension importante (environ 1 mm^2), reflet de la grosseur des grains de la phase de haute température. Cette partie correspond probablement à une zone cémentée destinée à prolonger la durée de vie de l'outil. De plus, à chaque passage à la forge, la tête écrouie de ces outils est refaçonée (Guillot et al. 1987).

⁸ Le fer est livré en barre aussi bien à Pampailly au milieu du XV^e siècle (Rendu 1985) qu'à la Rouge Mine de Saint Nicolas à La-Croix-aux-Mines dans les années 1520, dessin de H. Gross (Manuscrit de Heinrich Gross, vers 1530, Ecole Supérieure des Beaux-Arts de Paris, France; Reproductions in Pierres et Terre 25-26, 1982).

⁹ L'étude récente d'une pointerolle du même corpus montre une élaboration différente où l'on ne peut exclure la soudure d'une pointe en acier sur le corps ferritique de l'outil.

¹⁰ Le coignet est ici synonyme de pointerolle.

Discussion

Les examens métallographiques (Tableau de résultats, Fig. 4,2) effectués sur les différents outils, montrent que «l'organe de transmission du choc», c'est-à-dire la pointe, est toujours constitué d'acier de composition voisine de l'eutectoïde (environ 0,8% de carbone). Seules les pointerolles du Mont-de-Vannes et de Giromagny (n°2) font exception. Dans chaque cas, la présence de martensite, bainite et perlite nodulaire indique l'emploi de la trempe. Cette pointe en acier est réalisée selon deux techniques de mise en forme: l'ajout d'un insert par une soudure en gueule de loup ou d'un morceau d'acier par une soudure en bout. On rencontre schématiquement deux types d'élaboration du corps de l'objet. Le premier correspond à l'utilisation d'une barre de fer ou d'acier de teneur en carbone variable (0,02 à 0,7%), présentant des structures en bande, caractéristiques ici d'un corroyage au martinet. Le second consiste en la récupération d'anciens outils usés ou rompus et corroyés à la forge. Le poinçonnage de l'œil peut se faire indifféremment dans un sens ou dans les deux sens, il ne caractérise donc pas une technique d'élaboration. Les soudures fer/acier sont toujours nettement visibles. On observe, au niveau de la soudure, une diffusion du carbone des zones aciérées vers les zones ferritiques. La surchauffe locale nécessaire pour réaliser cette soudure n'est jamais suivie d'un recuit d'affinage structural, résultat corroboré par les structures de Widmannstätten rencontrées.

Dans chaque mine, quel que soit le lieu de la découverte, forge, galerie ou carreau, on trouve des outils usés ou reforgés. Il ne semble cependant pas que la longueur de l'objet soit considérée comme un critère de réforme de l'outil puisque des pointerolles de petites dimensions sont reforgées. La faible tenue mécanique de ces objets (structures de trempe sans revenu d'adoucissement, nombreuses soudures...) montre la nécessité d'effectuer de nombreuses réparations. L'exemple de Pampailly est à cet égard significatif. La recherche débutant, il est difficile de savoir si tous les forgerons des mines étudiées pratiquaient la récupération des vieux fers. Il est en particulier impossible de conclure pour le complexe de la Fontaine des Chouettes puisque les observations récentes n'ont pas apporté d'éclaircissement complémentaire.

La seconde pointerolle de Giromagny est la seule qui soit entièrement ferritique. Le fer, métal ductile, sans pointe en acier, est impropre à l'utilisation classique de ces objets. Néanmoins, la faible dimension de cette pointerolle¹¹ et son extrême usure font penser à un outil abandonné par les mineurs. La pointe comportait sans doute une partie en acier, rompue au cours de l'utilisation. L'exemple de la pointerolle du Mont-de-Vannes, entièrement en acier est unique.

Le nombre restreint d'outils étudiés rend les corrélations très difficiles. Néanmoins, les pointerolles de Pampailly, les mieux connues, présentent une unité de conception indiscutable. Sauf usure extrême, elles sont toutes constituées d'un insert important: il représente environ le tiers de la longueur totale, soudé en gueule de loup sur la matrice. Ces soudures ont été exécutées avec grand soin et la qualité interne de ces objets s'oppose bien souvent à celle des outils des autres mines. Il semble donc, comme nous l'avons précisé, que Pampailly soit en tout point une exploitation modèle. La qualité des travaux: creusement de la galerie du Vernay, construction de la forge et fabrication des outils y est toujours réalisé avec un soin extrême (Benoit et Guillot, à paraître).

Sur la commune de Sainte-Croix-aux-Mines, la recherche se limite aux quartiers de la Goutte-des-Pommes (Fig. 3). A ce jour, trop peu d'objets ont été étudiés pour établir des correspondances. De plus, le nombre considérable de mines de ce vallon, donc de forges et de forgerons ayant chacun leur tour de main, rend l'interprétation difficile. Néanmoins les recherches historiques (Grandemange 1986), étude des comptes miniers lorrains, archéologiques, fouille de la forge de la mine Samson inférieure, et les travaux paléométallurgiques devraient permettre une synthèse comparable à celle de Pampailly en cours de publication (Benoit et Guillot, à paraître). L'étude des secteurs de Giromagny et du Mont-de-Vannes encore à ses débuts, soulève plus de questions qu'elle n'apporte de renseignements complémentaires.

¹¹ Il existait sur le Territoire de Belfort des forges importantes. Le fer y était produit en grande quantité à l'aide du procédé indirect. L'approvisionnement des forges des

mines en métal était ainsi assuré de manière aisée et la récupération n'était probablement plus systématique.

Conclusion

La caractérisation de ces structures est donc assez précise. Toutefois, leurs relations avec les faits techniques sont difficiles à définir. En effet, après réduction du minerai, l'élaboration peut comporter de nombreuses étapes simultanées ou successives, épuration du lingot, puis mise en forme de l'objet à partir du lingot. Suivant les températures de travail nécessaires à ces opérations, la structure que nous observons peut donc être issue d'une série de transformations, ce qui rend l'interprétation d'autant plus délicate. Il ne faut d'ailleurs pas exclure d'éventuelles réparations.

Face à ces incertitudes, nous avons choisi de confronter les hypothèses de fabrication déduites de la »lecture structurale« à la reconstitution expérimentale. Ceci permet également d'appréhender la difficulté technique de la mise en forme de l'objet en fonction de sa morphologie, de la quantité et de la qualité du métal. Notons qu'il est difficile aujourd'hui, de trouver des nuances industrielles de composition voisine de celles utilisées à la période considérée, ce qui complique considérablement les opérations de reconstitution expérimentale.

YVONNE ZIPPERT · GEORG MÜLLER

MINERALOGISCHE UNTERSUCHUNGEN AN SPÄTMITTELALTERLICHEN EISENSCHLACKEN AUS DER GRABUNG »BARKHOF« IN SCHIEDER, KREIS LIPPE

Einleitung

Bei der Anlegung des Erholungszentrums Schieder, Kreis Lippe, rund 20 km östlich von Detmold, stieß man im Frühjahr des Jahres 1980 unerwartet auf die spätmittelalterliche Handwerkersiedlung »Barkhof« (Abb. 1). Entdeckt wurde sie während großflächiger Ausbaggerungen in der Talaue des Flusses Emmer im Zuge eines Stauseebaus. Notgrabungen des Lippischen Landesmuseums von 1980-1982 unter Leitung von Herrn Dr. F. Hohenschwert führten zur Sicherstellung größerer Mengen von Probenmaterial.

Archäologische Funde in der Handwerkersiedlung »Barkhof«, Geschichte und Alter der Siedlung (nach Hohenschwert, 1983)

Neben Funden aus der ehemaligen Glashütte, von Töpfereien, von Fundamenten der Wohn- und Werkstattbauten fanden sich auch Reste einer Eisenverhüttung sowie Beweise für das Betreiben von Ackerbau innerhalb dieser großen mittelalterlichen Siedlung. Reste der Verhüttung zeigten sich in Gruben, gefüllt mit Holzkohle, Eisenschlacken sowie Lehmkuppelstücken. Schmelz- und Ausheizöfen wiesen einen runden oder rechteckigen Querschnitt auf. Die durchschnittliche Länge dieser Öfen, einschließlich der Arbeitsgruben, wird von Hohenschwert mit 3 m bis 3,5 m angegeben, ihre Breite mit 1,5 m bis 2 m. Daneben fanden sich in einem anderen Grabungsbereich kleinere birnenförmige Gruben, welche mit Holzkohle, Eisenluppe und -schlacke sowie Rotlehm gefüllt waren und als Reste von »Rennfeuer- oder Ausheizöfen« gedeutet werden. Messer, Scheren und Radnägel, um nur einiges zu nennen, wurden als Produkte der Verschmiedung des Eisens freigelegt.