

Métallographie de quelques objets en bronze d'Auvernier

Autor(en): **Lüthy, Heinz / Pressl-Wenger, Rex**

Objekttyp: **Appendix**

Zeitschrift: **Cahiers d'archéologie romande**

Band (Jahr): **37 (1987)**

PDF erstellt am: **18.04.2024**

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Appendice

Métallographie de quelques objets en bronze d'Auvernier

par Heinz Lüthy et Rex Pressl-Wenger

(Institut de métallurgie structurale, Université de Neuchâtel, Suisse)

1. Introduction

L'étude microstructurale de quelques objets d'Auvergnier/Nord a pour but de reconstituer la succession des traitements de fabrication qu'ils ont subis entre la coulée initiale du bronze et leur état définitif. Ces traitements, en la modifiant, laissent chacun dans la structure du métal des traces bien caractéristiques, que la métallographie optique permet d'identifier.

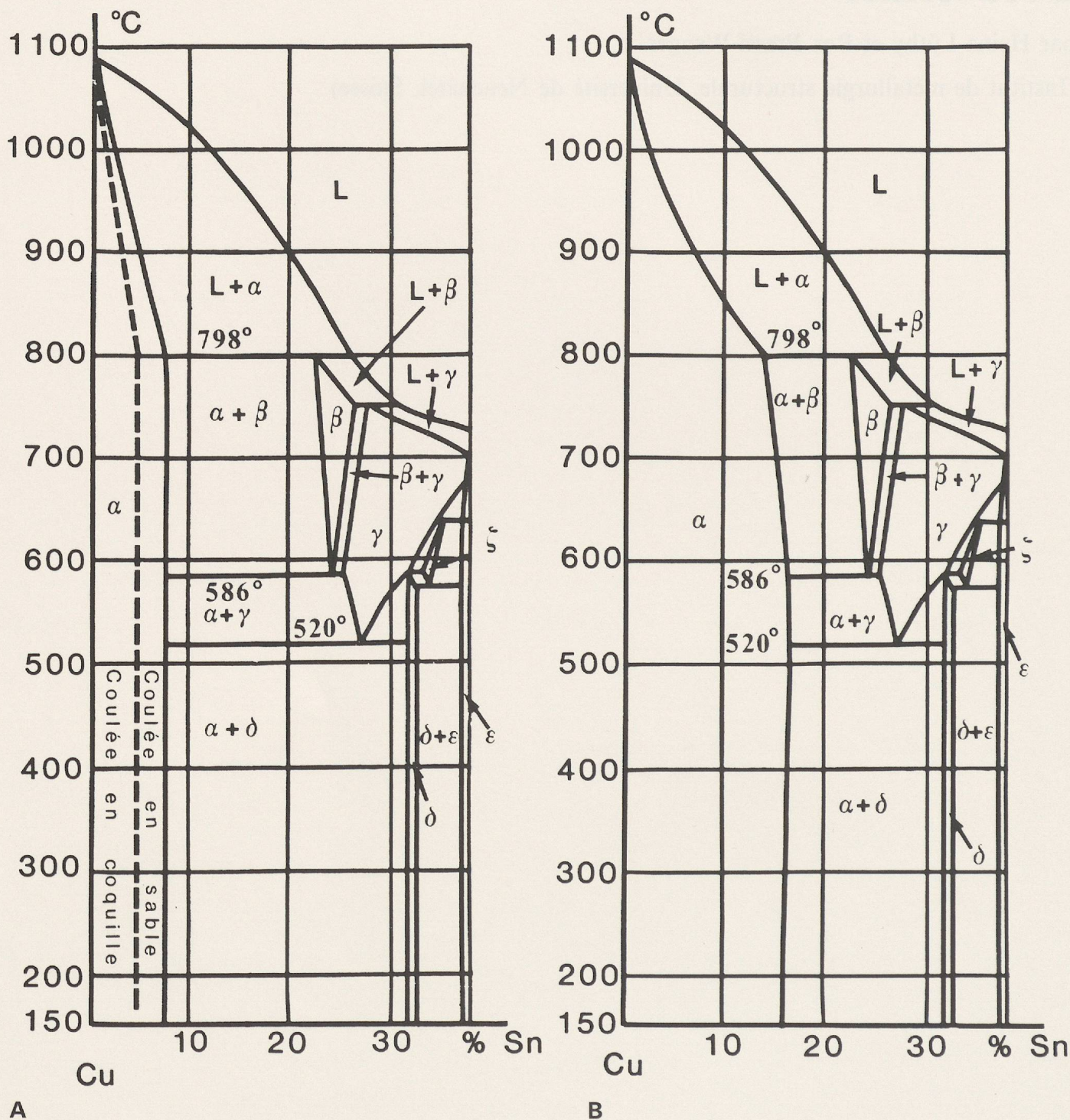


Fig. 1 Diagramme de phase cuivre-étain «hors équilibre». A: brut de coulée. B: après recuit. Lorsque l'on coule un bronze à faible taux d'étain ($\leq 7\%$ Sn) dans un moule en sable, où le refroidissement est rapide, on obtient à température ambiante un domaine monophasé α . Pour un taux d'étain plus élevé, on est en présence d'un domaine biphasé $\alpha+\delta$. Si le refroidissement est encore plus violent (par exemple dans une lingotière), un bronze à 7% d'étain se situera déjà dans le domaine biphasé (fig. 1 A). La phase α ductile se laisse facilement travailler à froid, par exemple par martelage. Par contre, la phase δ est dure et fragile. Par un recuit de quelques heures autour de 700°C (par exemple), on parvient à supprimer la phase δ au profit de la phase α dans un bronze contenant jusqu'à 15% d'étain. La connaissance de ces diagrammes est indispensable au métallurgiste moderne, mais c'est sur des bases purement empiriques, bien entendu, que les bronziers préhistoriques utilisaient la technique du recuit.

Structure dendritique (fig. 2/1)

Microstructure à formes arborescentes droites, ou dendrites, se formant lors de la solidification d'un alliage liquide. La gradation de ton du bord au centre des dendrites reflète un gradient de composition chimique, d'autant plus accentué que la solidification est plus rapide. Les espaces interdendritiques, ou matrice, sont plus riches en étain que les dendrites elles-mêmes.

Dendrites déformées (fig. 2/2)

Elles résultent de la déformation à froid d'un alliage coulé.

Grains équiaxes (fig. 2/3)

Un recuit homogénéise la composition et permet ainsi la mise en évidence des grains en faisant disparaître les dendrites. D'éventuels liserés témoignent d'un recuit d'homogénéisation insuffisant.

Grains maclés (fig. 2/4)

Le recuit d'une structure de coulée déformée (fig. 2/2) homogénéise la composition et produit d'autre part de nouveaux grains non déformés et maclés (traits droits à l'intérieur des grains).

Grains déformés et bandes de glissement (fig. 2/5)

Déformés à froid, les grains équiaxes s'allongent et changent de forme en même temps qu'apparaissent des bandes de glissement. Le recuit de cette structure engendre une microstructure recristallisée identique à celle de la fig. 2/4.

Grains maclés et bandes de glissement (fig. 2/6)

La déformation à froid des grains maclés a le même effet que celles des grains non maclés. Les macles sont elles aussi tordues.

En modifiant sa microstructure, les différents traitements agissent aussi sur les propriétés mécaniques de l'alliage. Le martelage à froid, en particulier, le durcit et finit par le rendre cassant. Un recuit intermédiaire de recristallisation est alors nécessaire pour adoucir la structure du matériau avant d'en poursuivre la déformation. Par l'expérience empirique, les forgerons préhistoriques parvenaient à maîtriser ces phénomènes, et l'étude métallographique de leur production, dans la majorité des cas, montre qu'ils savaient adapter les traitements à la fonction des objets qu'ils fabriquaient.

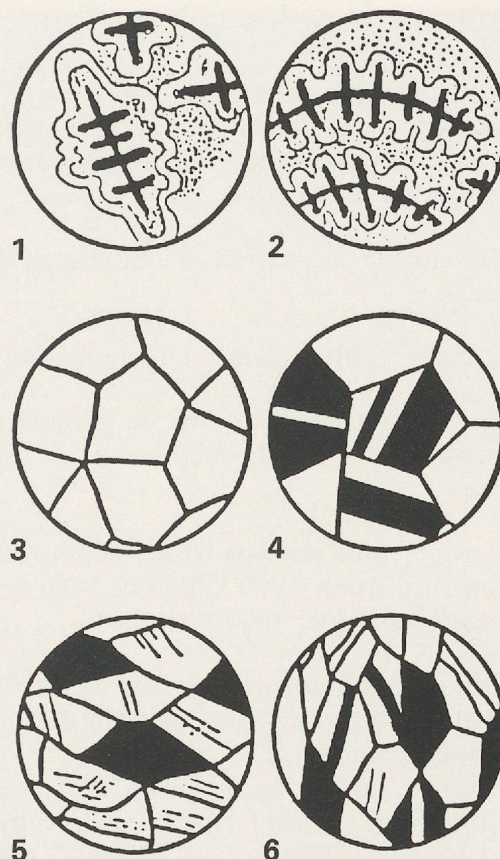


Fig. 2 (voir ci-contre)

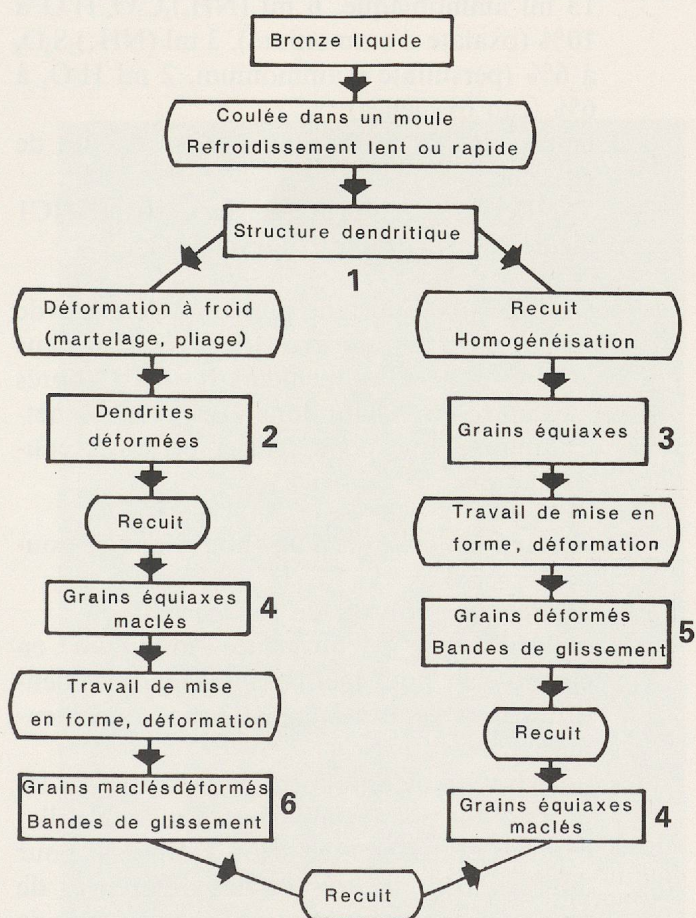


Fig. 3 Schéma des traitements thermiques et/ou mécaniques subis par un objet en bronze lors de sa fabrication. Les numéros renvoient aux microstructures schématisées de la figure 2.

2. Préparation des échantillons

Le souci constant de ne pas altérer la structure originelle du métal préside à toutes les opérations, depuis le prélèvement de l'échantillon jusqu'à son observation au microscope.

- Prélèvement: au moyen d'une scie à diamant lente.
- Enrobage: à froid, dans du Technovit 4071 vert.
- Prépolissage: papier au SiC de granularité 220, 320, 400, 800, 1200, toujours sous aspersion d'eau.
- Polissage: toile de type «Microcloth» chargées d'une suspension d' Al_2O_3 dans de l'eau de savon. Finesse de grains: 3000 * et 200*.
- Après chaque étape de polissage, nettoyage individuel aux ultrasons dans un bain d'alcool.
- Réactifs d'attaque:
 - 1) montre surtout les dendrites
100 ml H_2O , 8 ml H_2SO_4 (acide sulfurique), 1.5 g NaCl (chlorure de sodium), 2 g $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ (bichromate de potassium)
 - 2) montre les joints de grains et les dendrites
13 ml ammoniacque, 6 ml $(\text{NH}_4)_2\text{C}_2\text{O}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ à 10% (oxalate d'ammonium), 3 ml $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$ à 6% (persulfate d'ammonium, 2 ml H_2O_2 à 6% (eau oxygénée)
 - 3) montre les joints de grains et les bandes de glissement
5 g FeCl_3 (perchlorure de fer), 30 ml HCl (acide chlorhydrique), 100 ml H_2O

Les échantillons comportant plusieurs éléments de structure ont été attaqués avec les 3 réactifs, dans l'ordre 1, 2 et 3, avec les meilleurs résultats. Après chaque attaque, les échantillons étaient alors nettoyés à l'ammoniacque pour enlever certaines couches d'oxydation.

- Techniques de prise de vue (noir-blanc et couleurs):
 - Microscope Polyvar de Reichert-Jung;
 - défocalisation à ouverture minimum en champ clair pour mettre en évidence les dendrites sans recourir à une attaque supplémentaire;
 - polarisation de la lumière pour distinguer les pores d'une phase supplémentaire éventuelle;
 - contraste interférentiel selon Nomarski pour faire ressortir de très faibles différences de niveau et donc permettre de travailler avec de faibles attaques garantissant netteté et finesse de trait pour tous les joints.

Pour observer les pores, les inclusions et les phases de couleurs différentes, ces trois métho-

des furent également appliquées à des échantillons non attaqués.

- Les photographies noir-blanc ont été prises sur film Kodak 2415 (formats 135 et 4" × 5"), celles en couleurs sur Kodak Ektachrome 160 Professionnel (135) avec filtre de correction, ou sur Kodak Photomicrography color film (135).

3. Description et interprétation des microstructures

Anneau 11/24 (fig. 4)

Comme la quasi-totalité des autres anneaux de ce type, 11/24 est brut de fonte. Sa magnifique structure à dendrites non déformées témoigne d'une grande inhomogénéité locale de composition et prouve qu'il n'a subi ni recuit ni aucun traitement mécanique. La fonction de l'objet ne devait donc pas nécessiter un bronze résistant.

Anneau 10/9 (fig. 5)

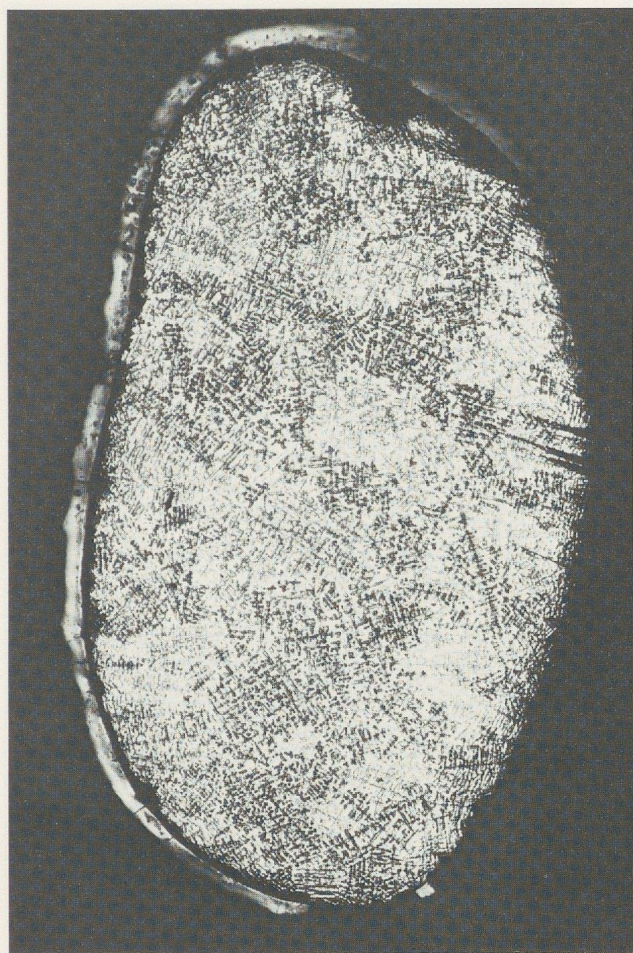
Au contraire des anneaux fermés comme 11/24, qui sont épais et massifs, les anneaux ouverts filiformes ne pouvaient pas être coulés directement dans leur forme définitive. Leur usage probable comme bracelet ou boucle d'oreille impliquait d'autre part des sollicitations nombreuses, et nécessitait donc une structure métallique résistante. Celle de 10/9, en effet, révèle de petits grains réguliers souvent macclés, issus du recuit qui fit suite au martelage. On distingue aussi quelques inclusions.

Séquence opératoire: coulée d'une ébauche - mise en forme mécanique (pliage et/ou martelage) - recuit.

Tige d'épingle 4/5 (fig. 6)

Microstructure à grains équiaxes macclés et bandes de glissement. La tige, directement après la coulée, a probablement subi un forgeage à chaud intense, qui a donné aux inclusions leur forme allongée. Un recuit intermédiaire a été suivi d'un martelage à froid qui devait conférer à la pointe la dureté voulue. La structure de la coupe transversale (fig. 6 b) est la même, au détail près que les inclusions, vues ici en coupe, apparaissent rondes et beaucoup plus petites.

Séquence opératoire: coulée - forgeage - recuit - martelage à froid.



A

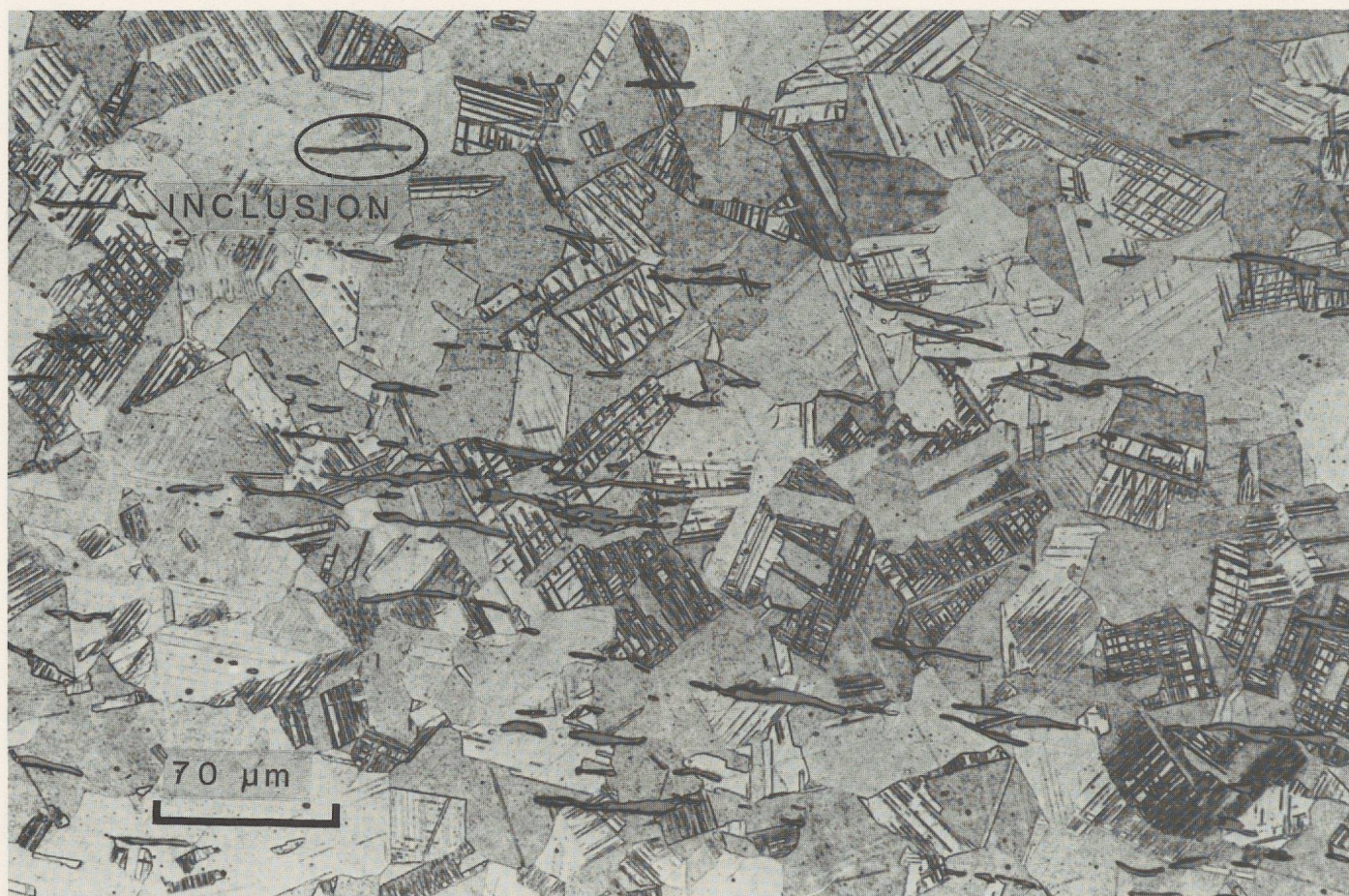


B

Fig. 4 Anneau 11/24. A: section totale. B: détail.



Fig. 5 Anneau 10/9. Détail de la coupe transversale.



A



B

Fig. 6 Tige d'épingle 4/5. Coupes à travers la pointe. A: longitudinale. B: transversale.

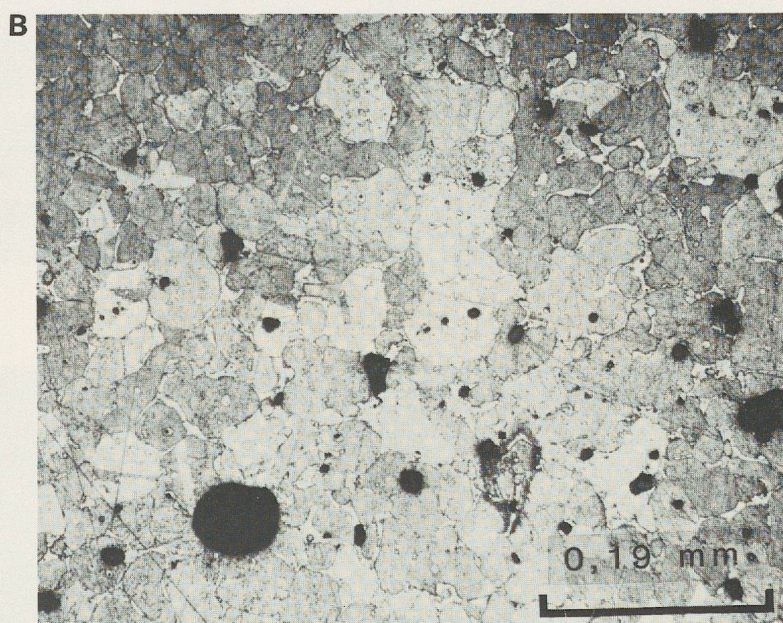


Fig. 7 Couteau 19/5. Coupe transversale totale et détails. 1 = liseré. 2 = phase δ . 3 = traces du polissage de l'échantillon.

La région voisine du dos (fig. 7 a) n'a été soumise à aucun traitement mécanique, mais seulement recuite. Les liserés et la phase δ (voir fig. 1) montrent cependant que ce recuit d'homogénéisation fut insuffisant. La quantité de phase δ , pour une teneur en étain qui n'est pas très élevée (8.3%), témoigne d'autre part d'un refroidissement assez rapide après la coulée. Vers le milieu du couteau (fig. 7 b), le refroidissement plus lent du métal a engendré des grains un peu plus grands, mais la structure est exactement du même type. Les grains maclés du

tranchant (fig. 7 c), par contre, sont les traces d'un forgeage qui précéda le mauvais recuit d'homogénéisation. Les bandes de glissement, quant à elles, sont nées de l'affûtage final par martelage à froid. L'in-homogénéité structurale et la présence de phase δ expliquent que le couteau se soit cassé, sans doute assez vite après sa fabrication.

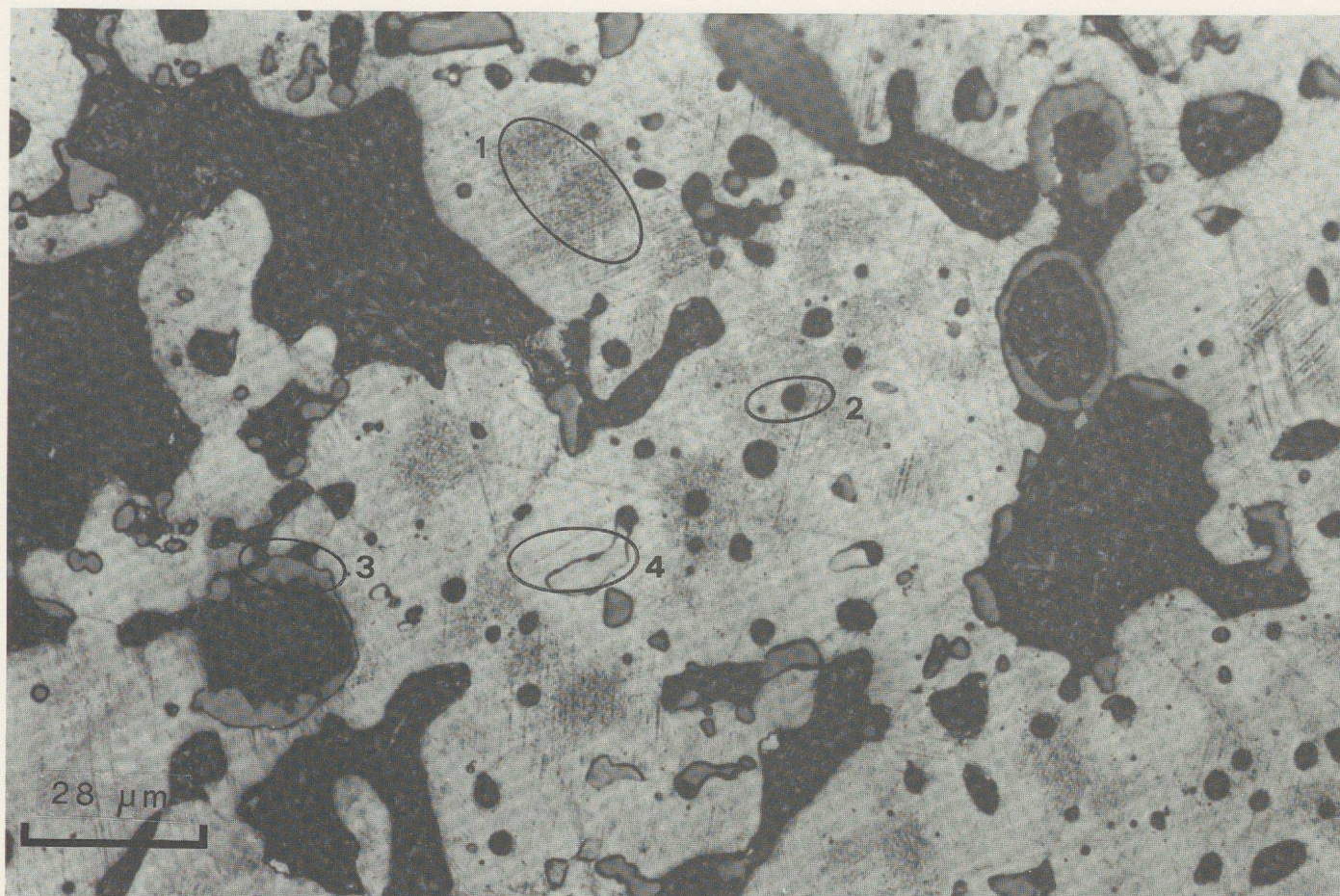
Séquence opératoire: coulée - forgeage de la région du tranchant - mauvais recuit - martelage à froid du tranchant.

Dans le contexte d'Auvernier, la haute teneur en plomb (18%) de cette épée en fait une curiosité métallurgique. Le but du bronzier n'était assurément pas de fabriquer une arme résistante. On a en effet constaté depuis longtemps qu'aucune des épées trouvées entières dans les palafittes ne portaient de traces d'utilisation comme armes. On doit donc considérer ces objets beaucoup plus comme des symboles que comme des instruments fonctionnels. Dans cette optique, il n'était pas désavantageux d'ajouter au bronze une forte quantité de plomb, car celui-ci, en abaissant le point de fusion de l'alliage, le rend nettement plus fluide et facilite ainsi la coulée délicate d'un objet long et mince. Si l'on en juge d'après l'épée 18/10, à 2.5% de plomb, un pareil ajout de plomb n'était cependant pas toujours nécessaire.

La microstructure de 18/9 est assez chargée. Des dendrites γ sont encore visibles, mais le seraient mieux en prise de vue défocalisée. La phase δ apparaît en gris clair dans la phase α de la matrice. Les

inclusions noires, parfois très volumineuses, correspondent au plomb qui, contrairement à l'étain, n'est pas soluble dans le cuivre. On distingue finalement de très nombreuses inclusions de sulfures, en gris foncé sur le fond clair. Quelques bandes de glissement sont les seules traces d'aménagement de l'objet après la coulée. Il n'a donc subi aucun forgeage sérieux, ce qui confirme l'intention du bronzier de ne fabriquer qu'un objet d'apparat. La figure 8 b met bien en évidence la couche superficielle de produit de corrosion. De couleur jaune-vert, elle s'écaille facilement et se rattache parfaitement à notre type de patine 2 (voir p. 39). Une analyse à la microsonde a montré qu'elle était composée de 30% de cuivre, 30% de fer et 40% de soufre, ce qui confirme bien l'analyse par diffraction aux rayons x de ce genre de patine et son identification comme chalcopryrite (CuFeS_2).

Séquence opératoire: coulée - probablement recuit insuffisant - polissage terminal.



A

B

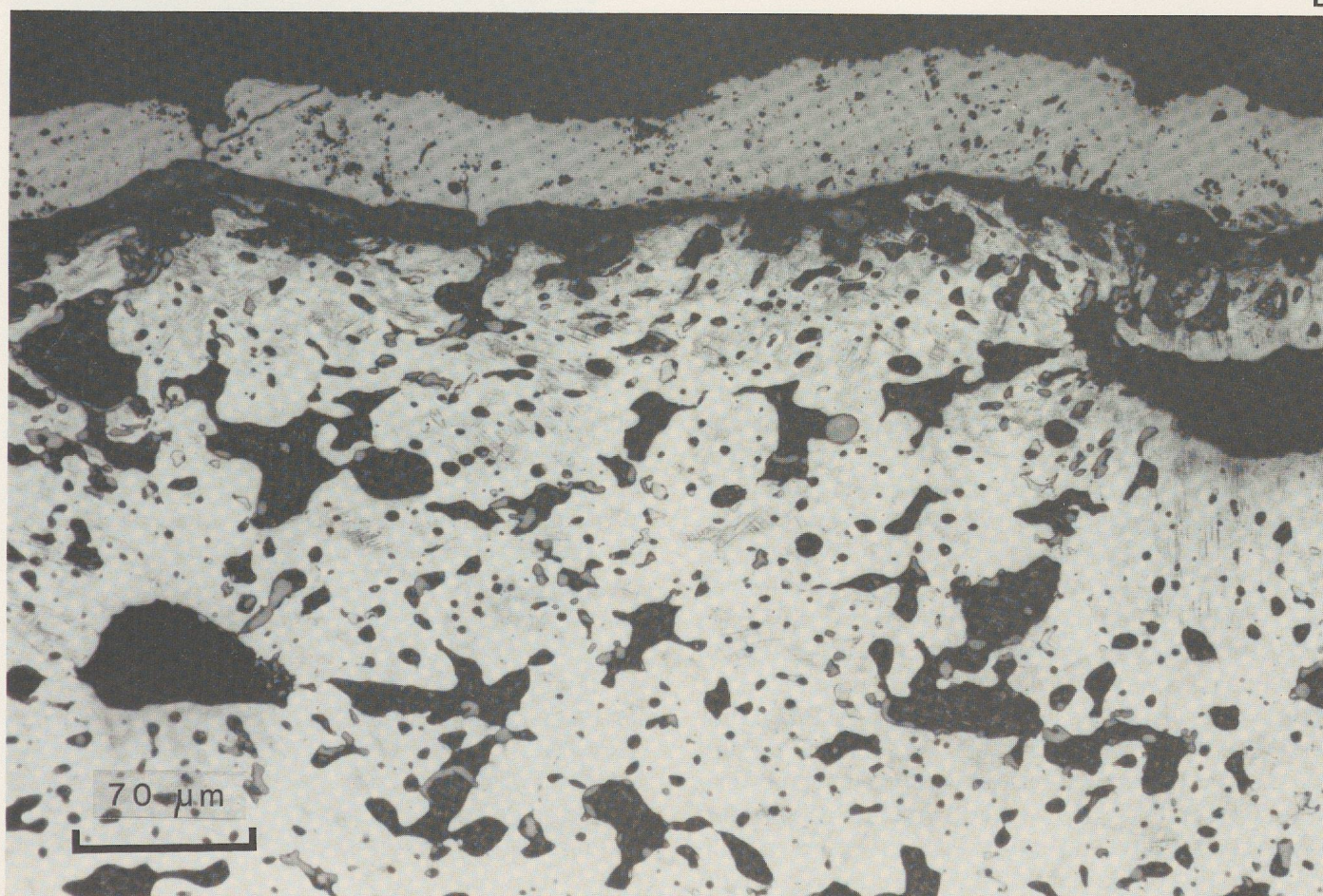
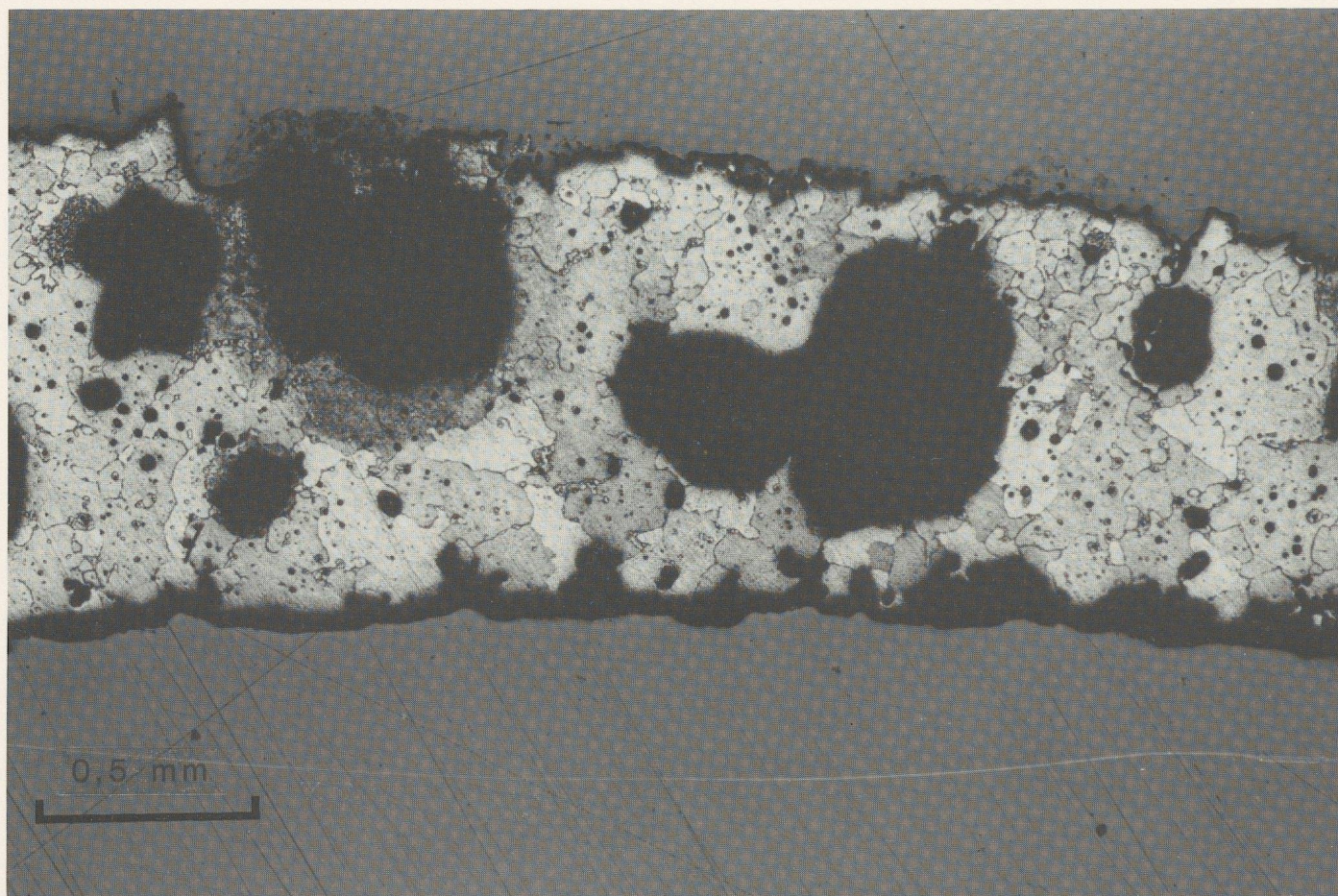
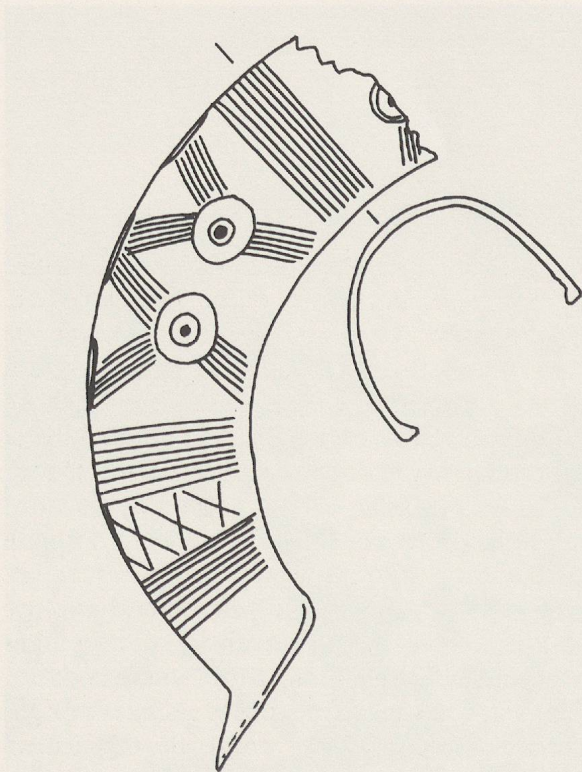


Fig. 8 lame d'épée 18/9. Coupe transversale. 1 = dendrite. 2 = plomb. 3 = inclusions de sulfures. 4 = phase δ .



A



B

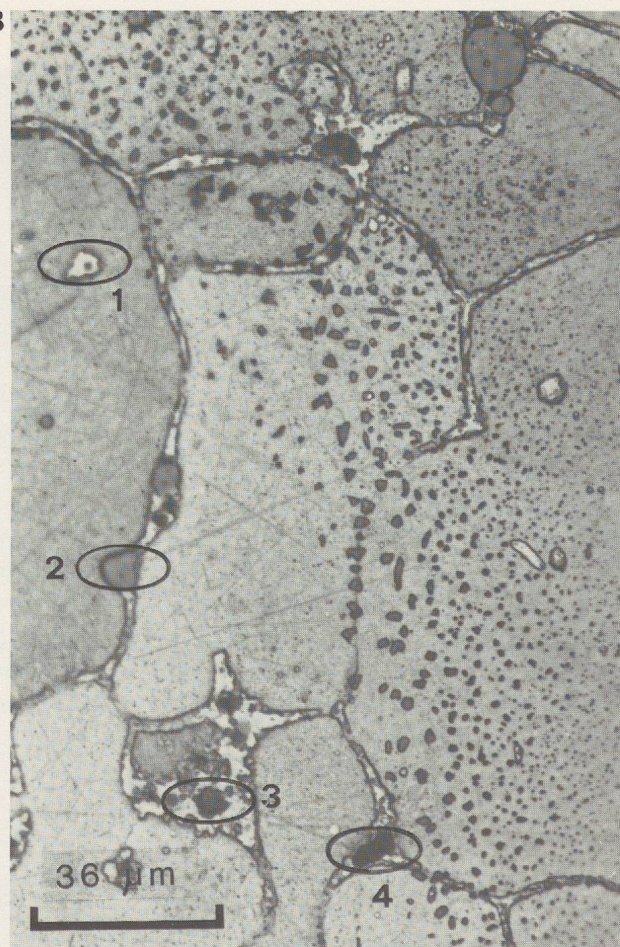


Fig. 9 Bracelet ocellé de provenance inconnue (probablement Grandson/Corcelettes), MCA Neuchâtel, 895. Dessin (échelle 1:1) et coupe transversale. 1 = phase δ . 2 = inclusions de sulfures. 3 = inclusions de plomb. 4 = pores.

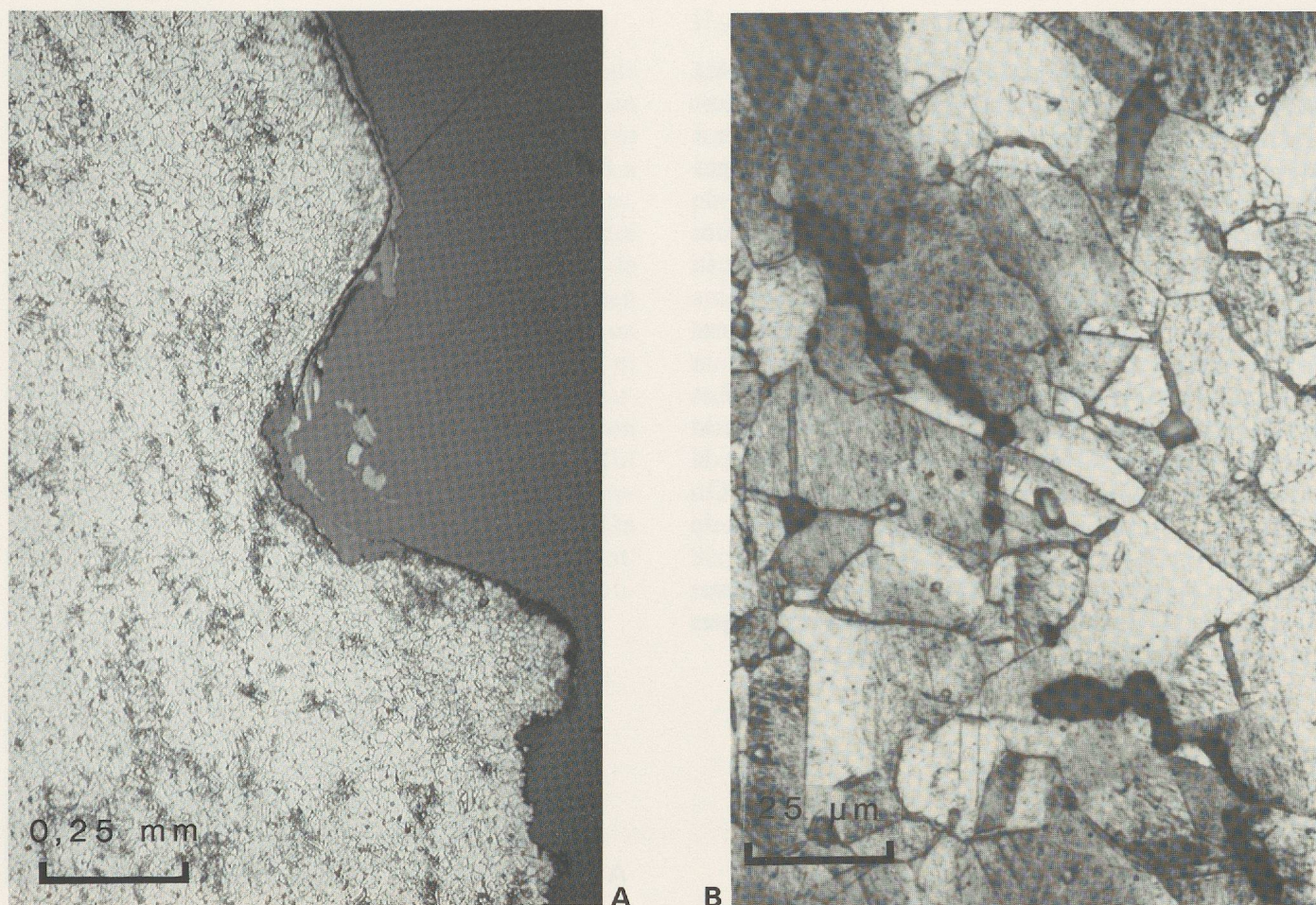


Fig. 10 Bracelet 6/4. A: coupe transversale dans un trait du décor. B: détail de la microstructure interne.

Bracelet ocellé coulé (fig. 9)

Ce bracelet ne provient pas d'Auvernier mais il figure cependant ici parce qu'il est un classique représentant de la variante 1, coulée à cire perdue, des bracelets de forme 1 (voir p. 46). La coupe totale (fig. 9 a) montre à quel point le métal est corrodé et poreux. Sa microstructure se caractérise par la taille très variable des grains. L'agrandissement plus fort (fig. 9 b) montre qu'elle est d'autre part biphasée. A l'intérieur de la phase α constituant la matrice, la phase δ se détache en clair, aux joints de grains. On retrouve également une multitude de petits pores ainsi que des inclusions de sulfures et de plomb (1.07%), ces dernières de préférence aux joints de grains. Aucune trace de traitement mécanique n'apparaît. Ce bracelet coulé a donc subi seulement un recuit d'homogénéisation, d'ailleurs insuffisant puisque la phase δ est encore présente malgré la faible teneur en étain (3.99%).

Séquence opératoire: coulée - recuit insuffisant.

Bracelet ocellé martelé 6/4 (fig. 10)

Contrairement au précédent, qui était coulé à cire perdue dans sa forme définitive, ce bracelet a été façonné par martelage à partir d'une plaque de bronze. La figure 10a est une coupe transversale à travers un des traits du décor. Le bourrelet de matière repoussée montre qu'il s'agit de ciselure et non de gravure (voir p. 51). Les grains du métal sont très petits, encore plus fins à proximité du trait ciselé. L'absence de bandes de glissement indique qu'un recuit est intervenu après l'application du décor. Le détail agrandi de la microstructure (fig. 10b) révèle des grains équiaxes maclés. Les quelques bandes de glissement ont été produites après le recuit. Elles ne sont, cependant, pas obligatoirement les séquelles d'une phase de fabrication (ultime finition par martelage ou polissage) mais peut-être seulement celles de l'usage du bracelet ou celles de sa fracture (pliage, torsion). On remarque d'autre part des inclusions, probablement de sulfures.

Séquence opératoire: coulée d'une ébauche - martelage - ciselure - recuit - peut-être finition mécanique.

Elle partage avec toutes les autres phalères analysées la particularité de ne contenir du plomb qu'en quantité infime (0.05% dans ce cas). La microstructure à grains très fins résulte de la succession de martelages et de recuits qu'a subi l'objet entre la coulée de l'ébauche et sa mise en forme définitive. La figure 11a est une coupe transversale dans le rebord de la phalère, à un endroit non décoré. Les grains équiaxes maclés indiquent que le dernier traitement fut un recuit. Les figures 11b et 11c montrent la face (c) et le profil (b) d'une perle du tambour. Les abondantes bandes de glissement prouvent que la dernière phase de fabrication, dans cette partie de l'objet, fut la mise en place du décor repoussé. On distingue, d'autre part, de nombreuses inclusions de forme allongée.

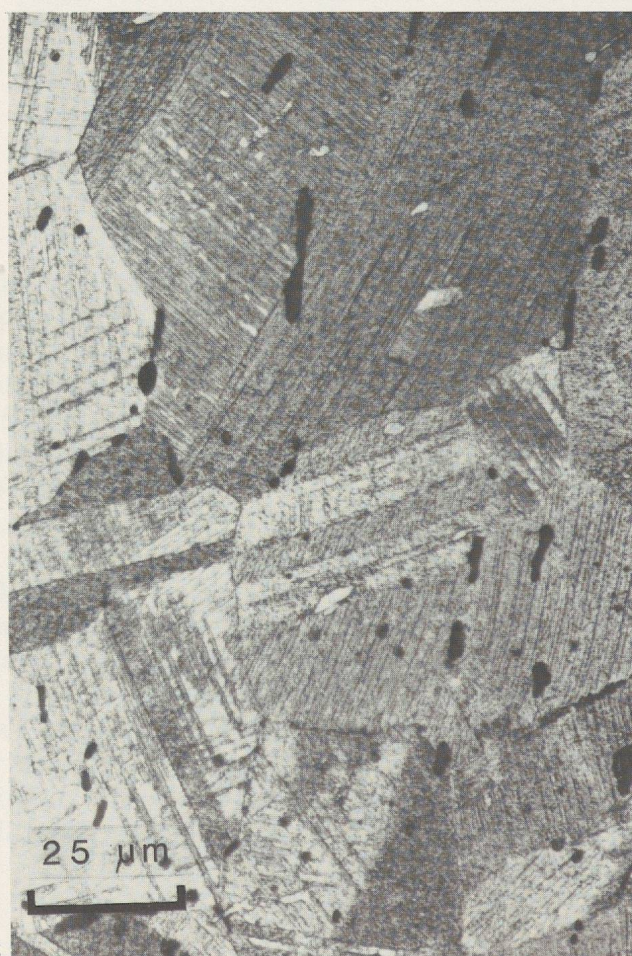
Séquence opératoire: coulée d'une ébauche - succession de phases de martelage et de recuit terminée par un recuit - application du décor repoussé.



A



B



C

Fig. 11 Phalère 17/2. A: profil du rebord, entre deux perles. B et C: profil et face d'une perle du tambour.

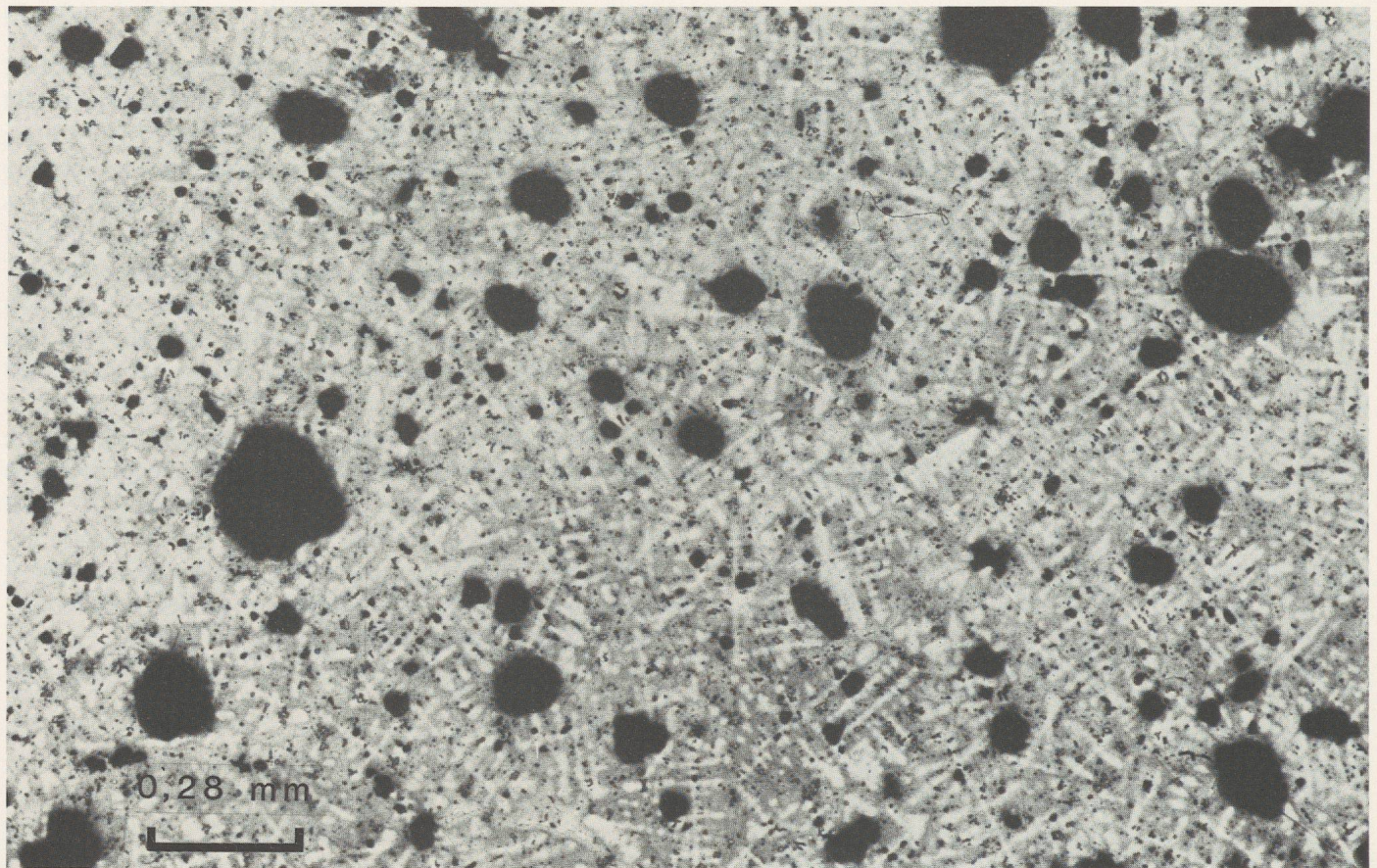
Faucille 23/2 (fig. 12)

Quoique de composition parfaitement normale (6.9% Sn, 1.12% Pb), elle constitue l'exemple d'un outil mal fabriqué. Le dos (a) et le tranchant (b) présentent en effet des structures très différentes. La première est une structure de coulée où les dendrites, non déformées, sont très visibles, ainsi que des pores volumineux. Il n'y a pas trace, à cet endroit, de travail mécanique ou thermique. Comme l'examen superficiel de l'objet l'indique déjà, le tranchant, en revanche, a été martelé. Les inclusions allongées et la finesse des grains en témoignent. Les liserés, d'autre part, montrent qu'il y eut recuit partiel (la région du dos n'en portent pas les traces), mais qu'il fut insuffisant. Manquant d'homogénéité, poreux, l'outil n'a pas dû servir longtemps avant de casser. On ne repère, en tout cas, aucune bande de glissement. Séquence opératoire: coulée - martelage du tranchant - recuit partiel insuffisant.

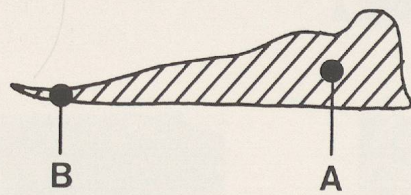
Hache 28/15 (fig. 13)

La finition mécanique de la hache n'a pas atteint le centre de la lame (a). On n'y distingue, en effet, aucune macle, mais des inclusions et une forte porosité. Comme l'indiquent les liserés, le recuit, d'autre part, ne s'est pas manifesté dans cette zone de façon suffisante. Plus près de la surface, mais encore dans l'épaisseur de l'objet (b), la structure du métal est analogue mais de nombreux petits grains maclés montrent que le martelage, avant le recuit, s'est fait sentir au moins jusqu'à cette profondeur. Les macles et l'allongement des inclusions montrent enfin que le tranchant (c) a subi un martelage violent, dès avant le recuit. Les très nombreuses lignes de glissement proviennent aussi bien du martelage final à froid que de l'usage de l'outil.

Séquence opératoire: coulée - travail mécanique - recuit insuffisant - probablement affûtage final par martelage à froid du tranchant.



A



B

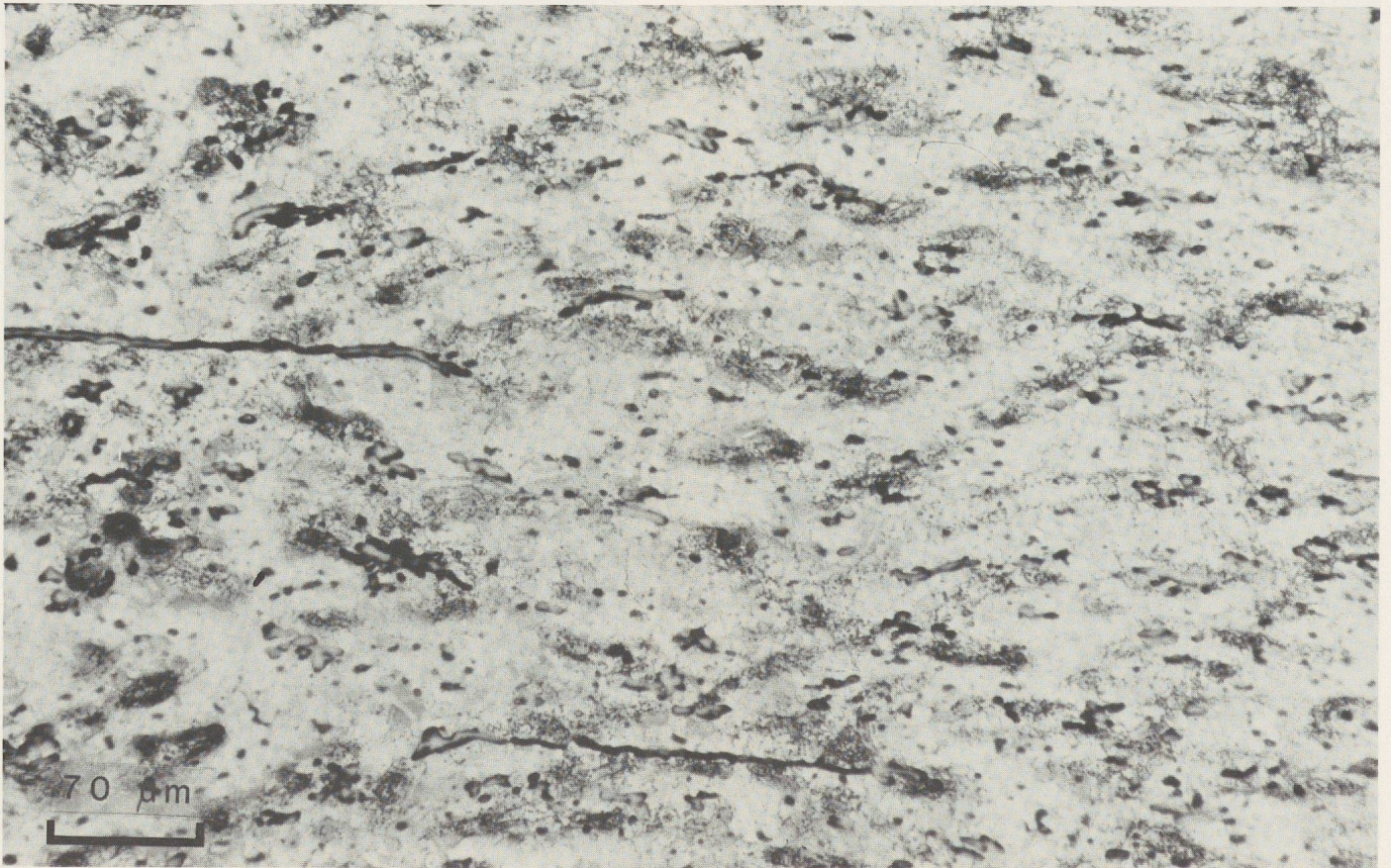


Fig. 12 Faucille 23/2. Coupe transversale de la lame au voisinage de la cassure.

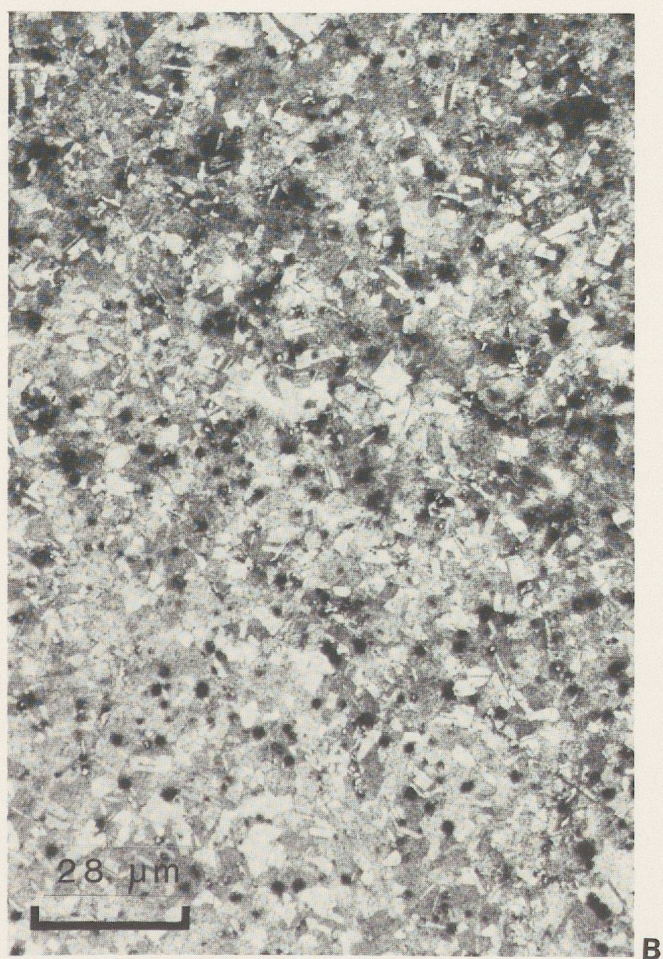
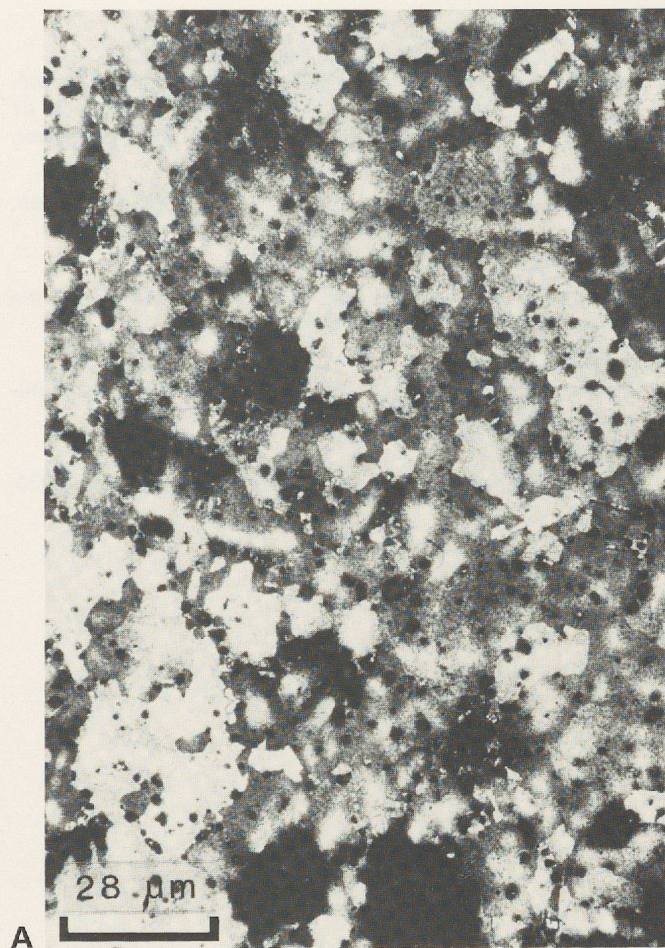
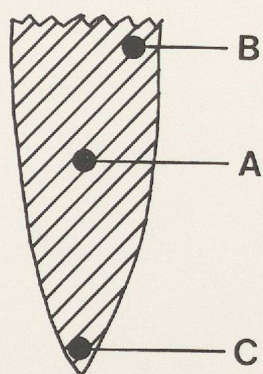


Fig. 13 Hache 28/15. Coupe longitudinale.

Références bibliographiques

CANEVA, C., DI MAIO, A. et MARABELLI, M.

Metallographic microscopy, dans: *Caractérisation des métaux anciens* (1^{re} Ecole d'été européenne du Conseil de l'Europe, Urbino-Rome, avril 1979), 33 p. multigraphiées.

HIGGINS, R.A.

Engineering metallurgy. London, Hodder & Stoughton, 1978.

HODGES, H.

Artifacts. An introduction to early materials and technology. London, John Baker, 1964.

PALISSY

Des matériaux. Montréal, Edition de l'Ecole polytechnique de Montréal, 1980.

TYLECOTE, R.F.

A history of metallurgy. London, The Metal Society, 1976.

Adresse des auteurs:

Université de Neuchâtel
Institut de métallurgie structurale
Avenue de Bellevaux 51
CH-2000 Neuchâtel