

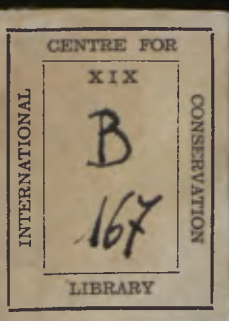
ANCIENT METALS

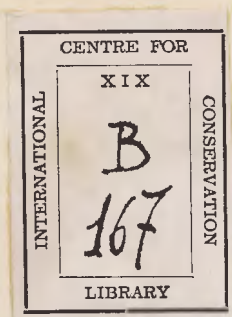
STRUCTURE AND CHARACTERISTICS
TECHNICAL CARDS



METAUX ANCIENS

STRUCTURE ET CARACTERISTIQUES
FICHES TECHNIQUES





Publication was made possible by a grant from the Direction des Musées de France.

All photos by the author with the exception of the cover photo, which comes from the Medieval Art Museum in Rome, and photo no. 73, which was supplied by the Istituto Centrale del Restauro.

English translation by Marie Christine Keith.

Booklet designed by Véronique Demaret.

Ce livret a été publié grâce à une subvention de la Direction des Musées de France.

Les photos sont de l'auteur à l'exception de la photo de la couverture qui provient du musée d'art médiéval à Rome et la photo no. 73 qui a été fournie par l'istituto Centrale del Restauro.

Traduction anglaise par Marie Christine Keith.

La maquette a été réalisée par Véronique Demaret.

ANCIENT METALS

STRUCTURE AND CHARACTERISTICS
TECHNICAL CARDS



METAUX ANCIENS

STRUCTURE ET CARACTERISTIQUES
FICHES TECHNIQUES

● INTRODUCTION

Metal objects pose quite a series of problems for art historians, conservationists, archaeologists and restorers, as well as for museum laboratory personnel as they are liable to undergo changes in their lifetime even more radical than those suffered by other materials of antiquity. As a result, an ancient metal object surviving to the present day may well be profoundly altered in its form, colour, mass and matter.

To identify, conserve or study metal objects, it is of basic importance to be able to appreciate the characteristic transformations that they undergo when worked by man and when exposed in different environments.

To supply such information is the aim of this series of cards which relate particularly to the techniques applied by metal craftsmen from remote antiquity to the end of the Renaissance period.

Other cards will be dedicated in the future to the working of metals and to corrosion so that the often delicate problems concerning the cleaning, conservation and restoration of artifacts may be tackled with practical information readily available providing sound knowledge of the possible causes of alteration.

This contribution is but a part of the technical card system to be compiled for the conservation course on ancient metals held at ICCROM since 1974. It is now becoming available for the first time in the confident hope that it will form a useful adjunct to the notes already provided for beginners in this field.

It is based upon an original card index the establishment of which would have been impossible without the continuous collaboration of Claudine Prouvé. Special thanks also go to Catherine Curchod in Rome and Annette Laumon in Nancy and to all those who have cooperated in the realisation of this work, in particular, Dr. Harold J. Plenderleith, who revised the English version and to whom I owe my personal gratitude.

A.F.L.



● INTRODUCTION

Les objets métalliques posent souvent aux historiens d'art, conservateurs, archéologues, restaurateurs, ainsi qu'au personnel des laboratoires des musées, toute une série de problèmes. Les métaux sont en effet des matériaux qui au cours de leur « vie » se modifient plus radicalement que d'autres. De ce fait, un objet métallique ancien nous parvient en général plus ou moins profondément altéré dans sa forme, sa couleur, sa masse et sa matière.

Que ce soit en vue d'identifier un objet, de l'étudier ou de le conserver, il convient d'abord de connaître la structure des métaux et les transformations qu'ils subissent au cours de leur élaboration.

C'est le but de ces fiches techniques qui concernent les métaux utilisés depuis l'antiquité jusqu'à la Renaissance.

Ultérieurement d'autres fiches seront consacrées à la mise en oeuvre des métaux (fabrication des objets) et à la corrosion, permettant ainsi d'aborder en toute connaissance de cause les problèmes souvent délicats de nettoyage, de conservation et de restauration des objets métalliques.

Ce fascicule réunit une partie des fiches techniques mises au point spécialement pour le cours de conservation des métaux anciens donné à l'ICCROM depuis 1974.

Elles sont publiées pour la première fois. Les notions qui y sont développées le sont d'une manière aussi didactique et progressive que possible.

L'établissement du fichier initial n'aurait jamais pu se faire sans la collaboration de tous les jours de Claudine Prouvé.

Qu'elle en soit ici tout spécialement remerciée, ainsi que Catherine Curchod à Rome et Annette Laumon à Nancy, qui ont apporté leur concours à la réalisation de ce fascicule. La version anglaise a été revue par le Dr Harold J. Plenderleith à qui j'adresse l'expression de ma gratitude.

● TABLE OF CONTENTS

Introduction	2
Table of contents	4
1. General remarks concerning metals and their alloys	6
1.1 Properties of metals	8
1.2 Properties of alloys	10
1.3 Alloys in antiquity	12
2. Structure of metals and alloys	14
2.1 Formation of a crystal and a grain	16
2.2 Relation between the grains and the working undergone by the metal	18
2.3 Dendritic structure obtained from casting	20
2.4 Modifications in the shape and dimension of grains through thermal and mechanical treatment	22
3. Ancient metals	26
3.1 Gold	28
3.2 Silver	30
3.3 Copper	32
3.4 Tin	34
3.5 Lead	36
3.6 Bronzes	38
3.7 Brasses	42
3.8 Iron	44
3.9 Cast irons	46
3.10 Steels	48
3.11 Pattern-welded and other steels	50
4. Conclusions	52
Annex 1. What is metallography?	54
Annex 2. Is a metallographic examination a necessary adjunct to conservation work?	56
Annex 3. How is a metallographic examination carried out?	58
Annex 4. Radiography	60
Glossary	62
List of manufacturers	64
Bibliography	66

● TABLE DES MATIERES

Introduction	3
Tables des matières	5
1. Généralités sur les métaux et alliages	7
1.1 Propriétés des métaux	9
1.2 Propriétés des alliages	11
1.3 Les alliages dans l'antiquité	13
2. Structure des métaux et des alliages	15
2.1 Formation du cristal et du grain	17
2.2 Relations entre la forme des grains et le travail subi	19
2.3 Structure dendritique obtenue par coulée	21
2.4 Modification de la forme et des dimensions des grains par traitement thermique ou mécanique	23
3. Les métaux anciens	27
3.1 L'or	29
3.2 L'argent	31
3.3 Le cuivre	33
3.4 L'étain	35
3.5 Le plomb	37
3.6 Les bronzes	39
3.7 Les laitons	43
3.8 Le fer	45
3.9 Les fontes	47
3.10 Les aciers	49
3.11 Les aciers damassés et autres	51
4. Conclusions	53
Annexe 1. Qu'est-ce que la métallographie?	55
Annexe 2. De la nécessité de faire un examen métallographique pour la connaissance d'un objet ancien	57
Annexe 3. Comment réaliser un examen métallographique	59
Annexe 4. Radiographie	61
Glossaire	63
Liste des fabricants	65
Bibliographie	66

1. General remarks concerning metals and their alloys

2. Structure of metals and alloys

3. Ancient metals

4. Conclusions

1.

● GENERAL REMARKS CONCERNING METALS AND THEIR ALLOYS

Some 75 different metals are of common occurrence. These are, for the most part, an unstable form of matter found in the earth in the form of minerals. When used as source material for the metals, these minerals are called ores (Fig. 1).



Fig. 1: Mineral extraction. Schwazer Bergbuch 1556.

Fig. 1: L'extraction du minerai. Schwazer Bergbuch 1556.

Metallurgy permits the extraction, by physical and chemical means, of the metals from the ores (Fig. 2).



Fig. 2: A domed furnace. Schwazer Bergbuch 1556.

Fig. 2: Un bas fourneau. Schwazer Bergbuch 1556.

Modern industry employs only about thirty different metals of which a mere six were known in antiquity!

Using various techniques, metal can be worked and transformed into what are known as artifacts. Each metal possesses its own physico-chemical characteristics and a peculiar structure often only observable under high magnification.

The structure of a single metal changes, however, according to the manner in which it has been won, worked and elaborated by the craftsman.

In most cases, a single metal is accidentally or intentionally contaminated with or actually melted together with one or more different metals; in this way it may give rise to what is called an alloy.

When a metal object is unprotected the metal tends to corrode, which means that it reverts back to its mineral state. Such corrosion modifies the aspect, form, colour and physico-chemical characteristics of the object (Fig. 3). Such mineralization yields two kinds of products:

- a) stable products in which mineralization seems to have become arrested even in a high relative humidity,
- b) unstable products in which mineralization continues if the relative humidity is too high.

1. Généralités sur les métaux et alliages

2. Structure des métaux et des alliages

3. Les métaux anciens

4. Conclusions

1.

● GENERALITES SUR LES METAUX ET ALLIAGES

Il existe 75 métaux différents. A l'exception de quelques uns qui sont stables, les métaux sont une forme instable de la matière et se trouvent dans le sol sous forme de minerais (Fig. 1).

La métallurgie, par des traitements physiques et chimiques, permet d'extraire les métaux du minerai (Fig. 2).

L'industrie actuelle utilise plus de trente métaux; alors que dans l'antiquité seulement six d'entre eux étaient connus.

Le métal extrait va être élaboré et transformé en objet manufacturé grâce à diverses techniques. Chaque métal possède des caractéristiques physico-chimiques et une structure particulière qui peut être observée au microscope.

Pour un même métal, la structure différera selon la manière dont il aura été élaboré et travaillé. La plupart du temps, le métal est associé volontairement ou involontairement à un ou plusieurs autres métaux; il forme alors un alliage.

Lorsqu'un objet métallique n'est pas protégé, le métal a tendance à se corroder, c'est-à-dire à retourner à l'état de minerai. Cette corrosion modifie aspect, forme et couleur de l'objet et ses caractéristiques physico-chimiques (Fig. 3).

La corrosion se divise en deux types de produits:

- a) la corrosion stable quand la minéralisation semble s'être arrêtée même en présence d'humidité,
- b) la corrosion instable quand la minéralisation se poursuit dès que l'humidité est suffisamment élevée.



Fig. 3: Trois ornements romains en bronze provenant de la même trouvaille. A gauche, état à la découverte: objet déformé par les produits de corrosion. Au centre, objet au cours de nettoyage. A droite, objet nettoyé révélant sa forme primitive.

Fig. 3: Three bronze Roman ornaments found together. On the left, the condition of the object when discovered; it is damaged by corrosive products. In the centre, the object during cleaning. On the right, the object after cleaning showing its original form.

1. General remarks concerning metals and their alloys

2. Structure of metals and alloys

3. Ancient metals

4. Conclusions

1.1.

● PROPERTIES OF METALS

Metals are a group of bodies possessing a certain number of physical and chemical characteristics in common:

- Thermal and electrical conductivity
- Reflection of light
- Melting at high temperature
- Elasticity
- Resistance
- A high specific weight
- Reaction to chemical products
- A crystalline structure

For each metal or alloy the above mentioned characteristics are specific.

When highly polished and attacked by a suitably selected reagent, metals and their alloys reveal under the microscope a crystalline structure which varies according to the treatments to which the metal is subjected.

Only the following metals, used in antiquity, will be studied: gold, silver, iron, lead, copper, tin and some of their alloys such as bronze (copper + tin), brass (copper + zinc), steel (iron + carbon), cast iron (iron + carbon) *.

(*) Cast iron and steel are not really alloys in the strict sense but combinations of the metal (iron) with the non-metal carbon in variable proportions.

1. Généralités sur les métaux et alliages

2. Structure des métaux et des alliages

3. Les métaux anciens

4. Conclusions

1.1.

● PROPRIETES DES METAUX

Les métaux forment un groupe de corps ayant un certain nombre de caractéristiques physiques et chimiques communes:

- Conductibilité électrique et thermique,
- réflexion à la lumière,
- fusion à haute température,
- élasticité,
- résistance,
- poids spécifique élevé,
- réaction aux produits chimiques,
- structure cristalline.

Pour chaque métal ou alliage, les caractéristiques précédentes sont spécifiques.

Polis et attaqués par un réactif, les métaux ou leurs alliages révèlent, sous le microscope, une structure cristalline qui est variable en fonction des traitements subis par le métal.

Nous n'étudierons que les métaux suivants, qui ont été utilisés dans l'antiquité: or, argent, fer, plomb, cuivre, étain et certains de leurs alliages: bronze (cuivre + étain), laiton (cuivre + zinc), acier (fer + carbone), fonte (fer + carbone) (*).

(*) En fait, l'acier et la fonte ne sont pas des alliages, mais les combinaisons d'un métal (fer) avec du carbone, en proportions variables.

1. General remarks concerning metals and their alloys

2. Structure of metals and alloys

3. Ancient metals

4. Conclusions

1.2.

● PROPERTIES OF ALLOYS

In antiquity, metals were rarely available or used in their pure forms, but more often in the form of alloys, i.e. mixtures of two or more metals in variable proportions prepared by melting and stirring to uniformity prior to solidification.

Alloys are rarely composed of equal parts of their constituent metals; usually there is a large percentage of one metal with the addition of one or more other metals.

An alloy possesses certain properties different from those of its components taken separately such as, for example,

- a) a lower melting-point which makes casting easier (*);
- b) a modification of mechanical qualities, hardness and elasticity;
- c) a change in the colour: gold, which is yellow, may turn white, pink or green depending on the metal with which it is alloyed (Fig. 4);
- d) a lowering of the cost price of objects manufactured by combining a common metal with a rare metal.

Alloys thus constitute two types:

- chance alloys;
- intentional and normalised alloys.

(*) Melting-point of copper — 1083° C.

Melting-point of tin — 231° C.

Melting-point of bronze, a tin-copper alloy — 795-1000°, depending on the constituents and the proportions in which they are present.

1. Généralités sur les métaux et alliages

2. Structure des métaux et des alliages

3. Les métaux anciens

4. Conclusions

1.2.

● PROPRIETES DES ALLIAGES

Dans l'antiquité, les métaux sont rarement employés purs, mais sont plutôt utilisés sous forme d'alliages, c'est-à-dire de mélange de deux ou plusieurs métaux dans des proportions variables. Dans un alliage, les composants sont rarement en parties égales; le plus souvent, on a un gros pourcentage d'un métal avec adjonction d'un ou plusieurs autres métaux.

L'alliage possède certaines propriétés, différentes de celles de ses composants pris séparément:

- a) abaissement du point de fusion, ce qui rend la coulée plus facile (*);
- b) modification des qualités mécaniques, dureté, élasticité;

c) modification de la couleur: l'or, qui est jaune, peut devenir blanc, rouge ou vert selon le métal auquel il est allié (Fig. 4);

d) diminution du prix de revient des objets manufacturés en combinant un métal courant à un métal rare.

Les alliages sont donc de deux types:

- alliages fortuits;
- alliages voulus et normalisés.



Fig. 4: Boîtier de montre du XVIII^e siècle. Le décor est réalisé en ors de diverses couleurs par suite d'alliages. L'alliage ternaire or-argent-cuivre permet d'obtenir l'or jaune, l'or vert, l'or blanc, l'or rose etc...

(*) Fusion du cuivre à 1083°.

Fusion de l'étain à 231°.

Fusion du bronze de 795° à 1000°, suivant le pourcentage de cuivre et d'étain.

Fig. 4: 18th century watch-case. The embellishment is in different coloured golds obtained by using alloys. An alloy of the three elements gold-silver-copper produces yellow, white, green or pink gold etc....

1. General remarks concerning metals and their alloys

2. Structure of metals and alloys

3. Ancient metals

4. Conclusions

1.3.

● ALLOYS IN ANTIQUITY

In antiquity, the prime means of winning the metal was by roasting the ore, and even with the greatest care it was not always possible to eliminate a certain number of impurities - both non-metallic (sulphur, phosphorus, arsenic) and metallic (lead in silver, silver in gold), etc.

On the other hand, the ancients knew very well the value of these alloys and how to use them to best advantage. For example, the high content of tin in bronze mirrors (some 20-25 %) showed that they recognised that reflection and hardness were the result of making a high tin alloy which could, thus, take a very high polish. Similarly, gold used to make jewellery was alloyed with copper to reduce the malleability of the gold.

The most common alloys in ancient times were the bronzes (copper + tin, copper + lead, copper + tin + lead) which must be distinguished from brass (copper + zinc) known as orichalcum. Alloys obtained from gold + silver and silver + copper were also in common usage.

It is interesting and sometimes significant that in certain rare cases the presence of an impurity can be indicative of the source of the ore.

1. Généralités sur les métaux et alliages

2. Structure des métaux et des alliages

3. Les métaux anciens

4. Conclusions

1.3.

● LES ALLIAGES DANS L'ANTIQUITE

Dans l'antiquité, les moyens d'élaboration du métal à partir du minerai et de contrôle des matières premières ne permettaient pas d'éliminer un certain nombre d'impuretés non métalliques (soufre, phosphore, arsenic, ...) et métalliques (plomb dans l'argent, argent dans l'or, ...).

Par contre, empiriquement, les Anciens savaient très bien régler les alliages en fonction du but recherché: la haute teneur en étain des bronzes de miroirs augmentait le pouvoir réfléchissant de l'objet et la dureté du matériau qui pouvait alors supporter un polissage plus poussé; l'or, pour la fabrication des bijoux, était allié au cuivre pour réduire la malléabilité de l'or.

Les alliages les plus courants dans l'antiquité sont les bronzes (cuivre+étain, cuivre+plomb, cuivre+étain+plomb) qui doivent être distingués des laitons (cuivre+zinc) appelés aurichalques, ainsi que les alliages or+argent et argent+cuivre. Dans certains cas rares, la présence d'une impureté peut être caractéristique de l'origine d'un minerai.

1. General remarks concerning metals and their alloys

2. Structure of metals and alloys

3. Ancient metals

4. Conclusions

2.

● STRUCTURE OF METALS AND ALLOYS

Metals and their alloys are characterized by their structure. The smallest constituents are the atoms; a group of atoms of regular structure form a crystal; a group of crystals form a grain.

Each metal or alloy possesses a specific crystalline structure. This structure may be observed both with a magnifying glass (magnified up to 10 X), and with a microscope (magnified up to 800 X). Normally a magnification of 200 X actual size is adequate. This examination, known as a metallographic examination, can, with a little ingenuity, generally be carried out without damage to the object. A metal surface of 1 mm² may be sufficient to obtain all the necessary information (Figs. 5, 6, 7 and 8). See appendix 3 for the preparation of this surface, but it is very important in selecting a sample to ensure that it is representative of the material that is under investigation.

The crystals and grains form when a liquid metal is cooled.

In a single metal the size and form of the grains may vary according to the mechanical treatments (hammering, drawing) and thermal treatments (reheating, tempering) to which it is subjected. The crystalline structure of a metal can also be revealed by X-ray examination.



Fig. 5: The object is a small bronze vase from which an important fragment is missing. It is possible to remove a small sample. Height of vase: 10 cm. The circle marks the place from where the sample was taken.

Fig. 5: L'objet est un petit vase de bronze dont il manque un important fragment. Il est possible de prélever un très petit échantillon. Hauteur du vase: 10 cm. Le cercle situe la place du prélèvement.

1. Généralités sur les métaux et alliages

2. Structure des métaux et des alliages

3. Les métaux anciens

4. Conclusions

2.

● STRUCTURE DE METAUX ET DES ALLIAGES

Les métaux et leurs alliages se caractérisent par leur structure cristalline. La partie la plus petite est l'atome; un groupe d'atomes empilés régulièrement forme un cristal; un regroupement de cristaux forme un grain.

Chaque métal ou alliage possède une structure cristalline spécifique. On observe cette structure, soit à la loupe (agrandissement jusqu'à $\times 10$), soit au microscope (agrandissement jusqu'à $\times 800$). Généralement un agrandissement de $\times 200$ suffit. Cet examen, appelé examen métallographique, peut être pratiqué sans effet destructif. Une surface de métal de 1 mm^2 est largement suffisante pour obtenir toutes les informations nécessaires (Figs. 5, 6, 7 et 8). Voir l'annexe 3 pour la préparation de cette surface.

Les cristaux et les grains se forment lors du refroidissement du métal liquide.

Pour un même métal, la taille et la forme des grains varient suivant les traitements mécaniques (martelage, étirage, ...) et les traitements thermiques (recuit, trempe, ...) subis.

La structure cristalline d'un métal peut être aussi révélée par des examens par diffraction de rayons X.

Fig. 6: L'échantillon prélevé est inclus dans une résine d'enrobage qui en permet le polissage. $\times 1,5$.

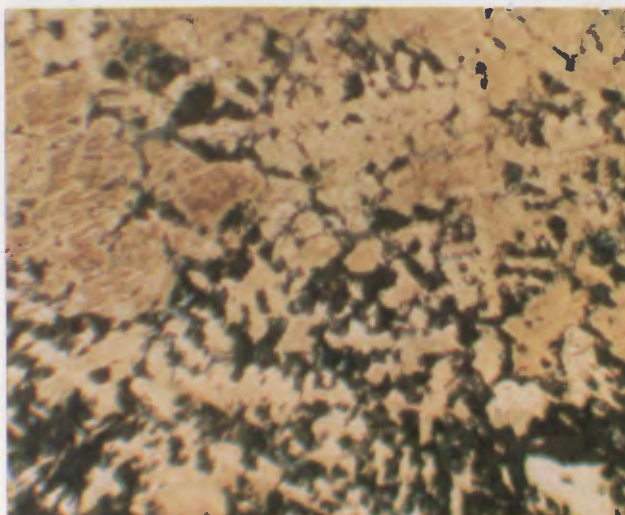
Fig. 7: L'échantillon enrobé est délicatement poli afin de créer une surface métallique, parfaitement plane qu'il sera possible d'observer au microscope.

Fig. 8: Micrographie d'une partie de cette section. Le métal est fortement corrodé. Le métal est en jaune, la corrosion en vert. On peut cependant constater qu'il s'agit d'un bronze coulé dont la structure dendritique est discernable. La corrosion attaque d'abord la phase riche en étain. $\times 200$.

Fig. 6: The removed sample is encapsulated in resin which allows it to be polished. Magnified $1.5\times$.

Fig. 7: The surrounded sample is carefully polished to obtain a perfectly flat metallic surface which can then be examined under a microscope.

Fig. 8: Micrograph of a part of this section. The metal is very corroded, the metal shows up yellow and the corrosion green, but it is still possible to identify it as cast bronze and to discern its dendritic structure. Corrosion first attacks the phase which is rich in tin. Circa 10% tin. Magnified $200\times$.



1. General remarks concerning metals and their alloys

2. Structure of metals and alloys

3. Ancient metals

4. Conclusions

2.1.

● FORMATION OF A CRYSTAL AND A GRAIN

A metal or alloy heated to melting-point liquifies. This liquified metal is formed of atoms.

If this liquified metal is brought to just below its melting-point, the atoms join together following an ordered system in a point of the liquid mass and form a seed or micro-crystal (Fig. 9).

This first crystal is called the nucleus. The metal then begins to solidify.

Other atoms bind themselves around this crystal nucleus and the crystal grows until all the liquid metal has solidified.

This unique crystal formation is only produced under exceptional conditions.

Usually when a liquid metal is brought to just below its melting-point, atoms group together simultaneously in several points of the liquid mass to form several crystalline nuclei (Fig. 10). Other atoms very rapidly bind themselves around each of these nuclei. The nuclei grow until they meet each other thus forming the volumes called grains.



Fig. 9: Small cubic pyrite crystal, ferrous sulphide, FeS_2 . Magnified 1.5 $\times$.

Fig. 9: Petit cristal cubique de pyrite, sulfure de fer, FeS_2 . ($\times 1,5$).

1. Généralités sur les métaux et alliages

2. Structure des métaux et des alliages

3. Les métaux anciens

4. Conclusions

2.1.

● FORMATION DU CRISTAL ET DU GRAIN

Un métal ou un alliage, chauffé jusqu'à son point de fusion, se liquéfie. Ce métal en fusion est formé d'atomes.

Si ce métal liquéfié est ramené juste en-dessous de son point de fusion, les atomes se regroupent en un point de la masse liquide, selon un système ordonné et forment un cristal (Fig. 9). Ce premier cristal est appelé souche cristalline. Le métal commence à se solidifier.

Autour de cette souche cristalline, viennent s'agglutiner d'autres atomes et le cristal croît jusqu'à ce que tout le métal liquide se soit solidifié.

Cette formation d'un cristal unique ne se produit que dans des conditions exceptionnelles.

En fait, la plupart du temps, lorsqu'un métal liquide est ramené juste en dessous de sa température de fusion, simultanément, en plusieurs points de la masse liquide, des atomes se regroupent, formant ainsi plusieurs souches cristallines (Fig. 10).

Autour de chaque souche cristalline viennent s'agglutiner très rapidement d'autres atomes. Ces différentes souches cristallines grossissent jusqu'au moment où elles se rencontrent, formant ainsi des volumes appelés grains.

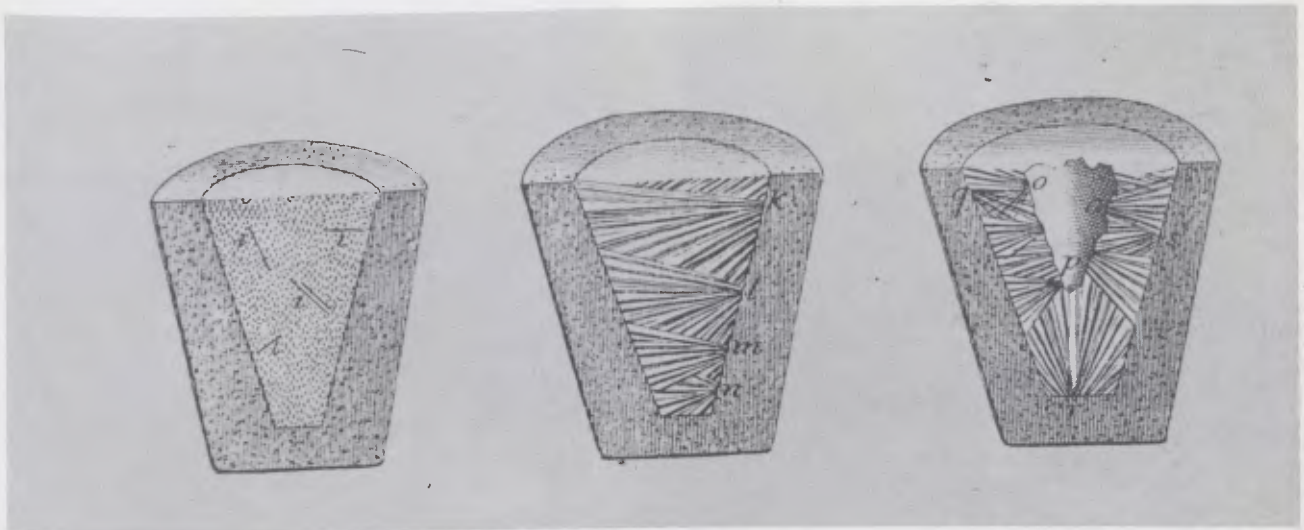


Fig. 10: Solidification et cristallisation.

Ce phénomène a été observé et décrit par Réaumur en 1725. Ici solidification de l'antimoine dans un creuset refroidi dans diverses conditions. (Mémoire à l'Académie des sciences).

Fig. 10: Solidification and crystallization. This phenomenon was observed by Réaumur in 1725. The solidification of the antimony in a cooled crucible is shown here under various conditions (Mémoire to L'Académie des Sciences).

1. General remarks concerning metals and their alloys

2. Structure of metals and alloys

3. Ancient metals

4. Conclusions

2.2.

● **RELATION BETWEEN THE GRAINS AND THE WORKING UNDERGONE BY THE METAL**

In a single metal or alloy the size and the disposition of the grains depend on different factors:

- a) the way in which the metal is cast (Fig. 11);
- b) the rapidity with which it is cooled;
- c) the mechanical treatment applied to the object (hammering, drawing, forging, ...) (Fig. 12);

- d) the thermal treatment to which the object is subjected (reheating, tempering, ...) (Fig. 13);
- e) the stresses and deformations to which the object has later been exposed.

Important: Thus a metallographic examination of the object can furnish information concerning the nature of the metal, the way in which the object was made, and what has happened to it since it was made.



Fig. 11: Brass alloy obtained by sand casting. Large basaltic equiaxial grains. Magnified 100 $\times$.

Fig. 11: Laiton - alliage pur coulé en coquille. Gros grains basaltiques ϵ , equiaxiaux. $\times$ 100.

1. Généralités sur les métaux et alliages

2. Structure des métaux et des alliages

3. Les métaux anciens

4. Conclusions

2.2.

● RELATION ENTRE LA FORME DES GRAINS ET LE TRAVAIL SUBI

Dans un même métal, ou un même alliage, la taille et la disposition des grains dépendent de divers facteurs:

- a) le mode de coulée du métal (Fig. 11);
- b) la vitesse de refroidissement;
- c) les traitements mécaniques subis par l'objet (martelage, étirage, forgeage, ...) (Fig. 12);

d) des traitements thermiques subis par l'objet (recuit, trempe, revenu, ...) (Fig. 13);

e) les efforts et les déformations que l'objet a subi depuis sa création.

Important: L'examen métallographique de l'objet peut donc nous renseigner sur la nature du métal, la façon dont l'objet a été fabriqué et sur ce qui lui est advenu depuis lors.

Les caractéristiques mécaniques d'un même métal dépendent de l'arrangement et de la taille des grains.



Fig. 12: Laiton à haute résistance, filé. Grains réguliers. $\times 100$.

Fig. 12: Highly resistant brass which has been drawn. Regular grains. Magnified $100\times$.



Fig. 13: Laiton au nickel, filé puis étiré à froid. Structure fibreuse. $\times 200$.

Fig. 13: Nickel brass, drawn and then cold drawn. Fibrous structure. Magnified $200\times$.

1. General remarks concerning metals and their alloys

2. Structure of metals and alloys

3. Ancient metals

4. Conclusions

2.3.

● DENDRITIC STRUCTURE OBTAINED FROM CASTING

In antiquity most metal objects were made by casting. A cast metal is characterized by a particular crystalline formation of arborescent shapes called dendrites. It was first observed by Tschernoff in 1878 (Fig. 14). These dendrites interlace with one another (Figs. 15 and 16).

Attention: If the finished object is reheated for some time at a temperature below its melting point, the dendritic structure starts to fade and eventually completely disappears.

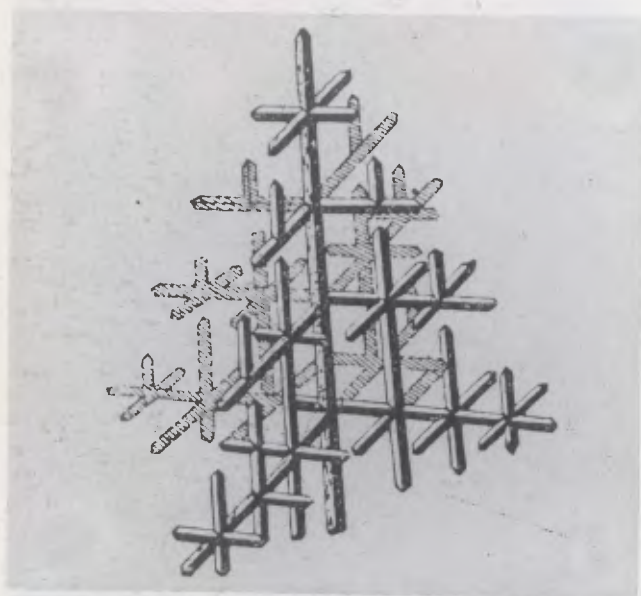


Fig. 14: Diagram of crystalline formation in cast steel.

Fig. 14: Schéma du squelette cristallin de l'acier coulé.

1. Généralités sur les métaux et alliages

2. Structure des métaux et des alliages

3. Les métaux anciens

4. Conclusions

2.3.

● STRUCTURE DENDRITIQUE OBTENUE PAR COULEE

Dans l'antiquité, la plupart des objets métalliques sont obtenus par coulée.

Or, un métal coulé est caractérisé par un arrangement cristallin, de forme arborescente, appelé dendrite, observé par Tschernoff en 1878 (Fig. 14). Ces dendrites s'enchevêtrent l'une dans l'autre (Figs. 15 et 16).

Attention: Si l'objet fini est réchauffé pendant un certain temps à une température légèrement inférieure à son point de fusion, la structure dendritique s'atténue plus ou moins et peut complètement disparaître.

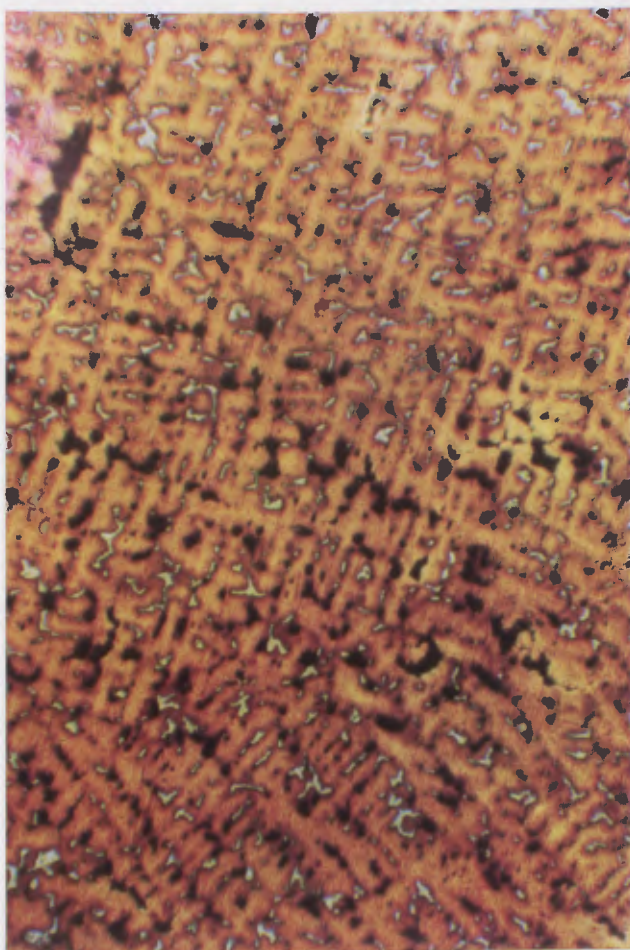


Fig. 15: Anse de vase romain. Section faite dans le plan horizontal. Formation de dendrites dans un bronze coulé. $\times 100$.

Fig. 15: Handle of a Roman vase, section taken in the horizontal plane. Dendrite formation in cast bronze. Magnified 100 $\times$

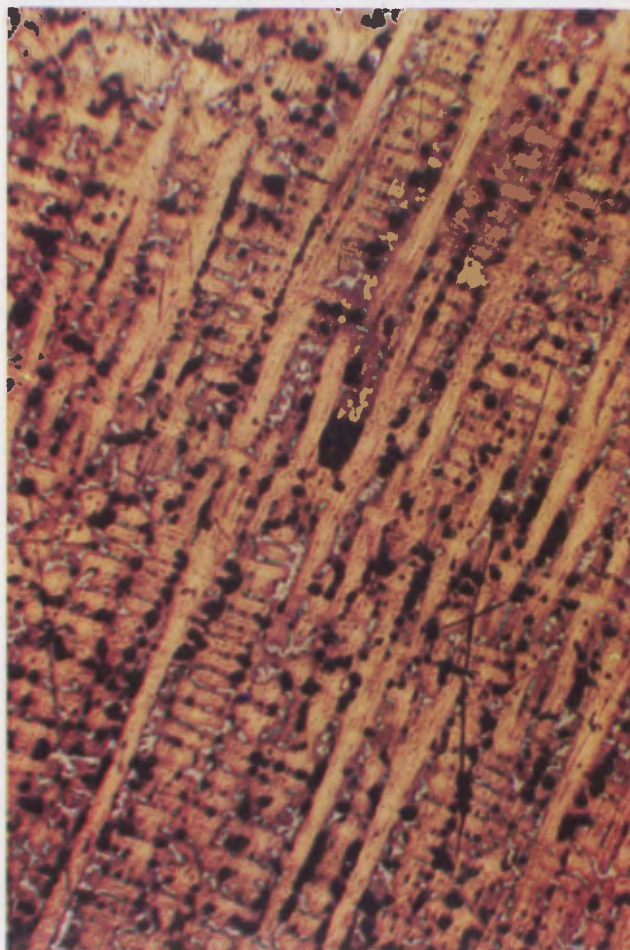


Fig. 16: Même objet. Section faite dans le plan vertical soit perpendiculairement à la section précédente. $\times 100$.

Fig. 16: The same object. Section taken in the vertical plane, perpendicular to the preceding section. Magnified 100 $\times$.

1. General remarks concerning metals and their alloys

2. Structure of metals and alloys

3. Ancient metals

4. Conclusions

2.4.

● MODIFICATIONS IN THE SHAPE AND DIMENSIONS OF GRAINS THROUGH THERMAL OR MECHANICAL TREATMENT

The thermal treatment to which a metal has been subjected can modify the arrangement, shape and dimensions of the grains. These modifications are dependent on the temperatures involved and the rapidity of cooling. (Figs. 17-28). (continued on page 24)

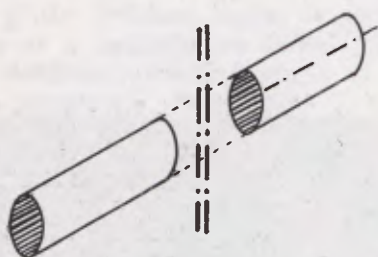


Fig. 17: Transverse section of a pure copper rod.

Fig. 17: Section transversale d'une tige de cuivre pur.

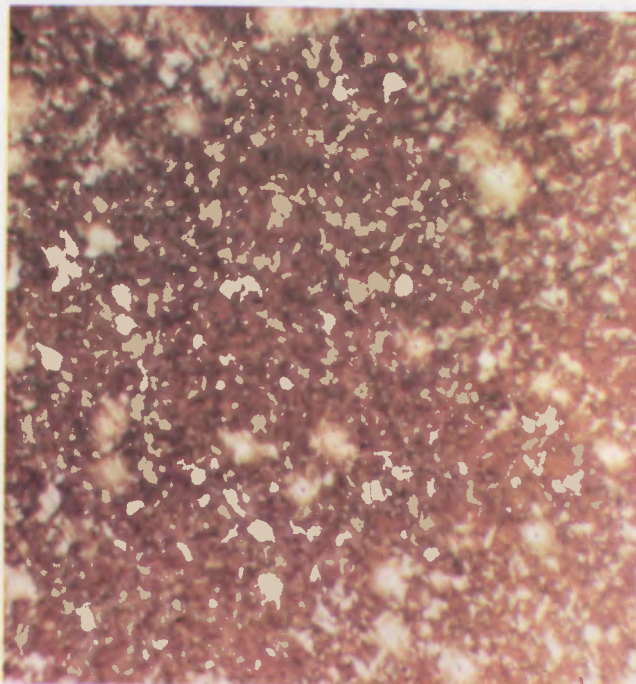


Fig. 18: After drawing, non-discernible grains. Magnified 100 $\times$.

Fig. 18: Après étirage: pas de grains discernables. $\times$ 100.



Fig. 19: Reheated until red hot and then left to cool. The grains appear. Magnified 100 $\times$.

Fig. 19: Recuit, chauffé au rouge vif et refroidi à l'air. Les grains apparaissent. $\times$ 100.

1. Généralités sur les métaux et alliages

2. Structure des métaux et des alliages

3. Les métaux anciens

4. Conclusions

2.4

● MODIFICATION DE LA FORME ET DES DIMENSIONS DES GRAINS PAR TRAITEMENT THERMIQUE OU MECANIQUE

L'arrangement, la forme et la dimension des grains sont modifiés par les traitements thermiques subis par l'objet. Ces modifications dépendent de la température plus ou moins élevée et de la vitesse de refroidissement, plus ou moins rapide (Figs. 17 à 28). (suite page 25)

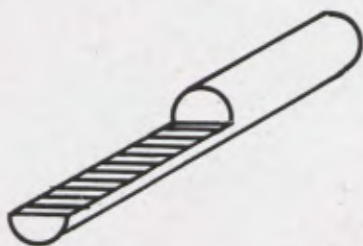


Fig. 20: Pure copper rod cold drawn. Horizontal section.
Fig. 20: Tige de cuivre pur étirée à froid. Section horizontale.



Fig. 21: The elongated grains can be seen lying in the same direction as that in which the metal was drawn. Magnified 100 x.

Fig. 21: On reconnaît les grains allongés dans le sens de l'étirage. $\times 100$.



Fig. 22: Same section after reheating. The structure of the drawing has disappeared. Magnified 100 x.

Fig. 22: Même section après recuit. La structure d'étirage a disparu. $\times 100$.

1. General remarks concerning metals and their alloys

2. Structure of metals and alloys

3. Ancient metals

4. Conclusions

2.5.

● MODIFICATIONS IN THE SHAPE AND DIMENSION OF GRAINS THROUGH THERMAL OR MECHANICAL TREATMENT (continued)

Such treatments are the cause of changes in the microscopic structure and in the mechanical properties of the metal: hardness, brittleness, ductility.

Moreover, any high temperature imposed on an ancient object by the original artist or years later by the restorer (welding, kiln treatment, reheating whilst remodelling) tends to modify the original crystalline structure of the object and may cause valuable information to be lost.

Also if a metal has been deformed by compression, traction or flexion, whether intentional (hammering, rolling, drawing, ...) or accidental (crushing, ...), the arrangement, shape and dimensions of the grains are modified.

For example, hammering causes the grains to become distorted and elongated in shape.

These modifications in the grains cause a change in the mechanical properties of the metal.

Important: During hammering the grains are crushed and this has two consequences:

- 1) the metal becomes harder, more brittle;
- 2) it is now more difficult for corrosion to penetrate to the heart of the metal. A hammered vessel is usually less corroded than a cast statue.

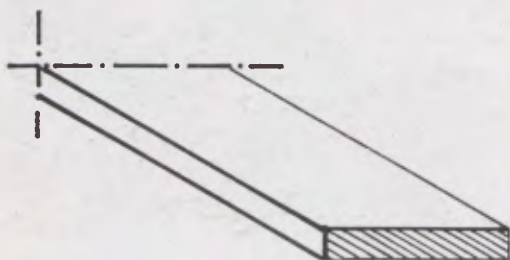


Fig. 23: Pure copper rod reheated and then cold flattened. Transverse section.

Fig. 23: Tige de cuivre pur recuite puis aplatie à froid. Section transversale.



Fig. 24: Flattening of the grains in the direction of the hammering. Magnified 100 $\times$.

Fig. 24: Applatissage des grains dans le sens du martelage. $\times 100$.



Fig. 25: Same section after reheating, the deformation in the shape of the grains has disappeared. Magnified 100 $\times$.

Fig. 25: Môme section après recuit, disparition de la déformation des grains. $\times 100$.

1. Généralités sur les métaux et alliages

2. Structure des métaux et des alliages

3. Les métaux anciens

4. Conclusions

2.5.

● MODIFICATION DE LA FORME ET DES DIMENSIONS DES GRAINS PAR TRAITEMENT THERMIQUE OU MECANIQUE (suite)

Ces traitements entraînent des changements des propriétés mécaniques du métal: dureté, fragilité, ductilité.

Par ailleurs, toute forte élévation de température imposée à un objet ancien (soudure, traitement au four, recuit lors d'une remise en forme) modifie sa structure cristalline initiale. Ceci entraîne la perte d'informations possible.

De même si un objet métallique subit une déformation par compression, traction, flexion, soit voulue (martelage, laminage, étirage, ...), soit accidentelle (écrasement, ...), l'arrangement, la forme et la dimension des grains sont modifiés. Par exemple, sous l'effet du martelage, les grains prennent une forme allongée.

Ces modifications des grains entraînent le changement des propriétés mécaniques du métal.

Important: Lors d'un martelage, les grains sont écrasés; ce traitement se traduit par deux conséquences:

- 1) le métal devient plus dur, plus cassant, plus élastique;
- 2) la corrosion aura plus de difficulté pour pénétrer à coeur du métal. Un chaudron martelé est, en général, moins profondément corrodé qu'une statue obtenue par coulée.

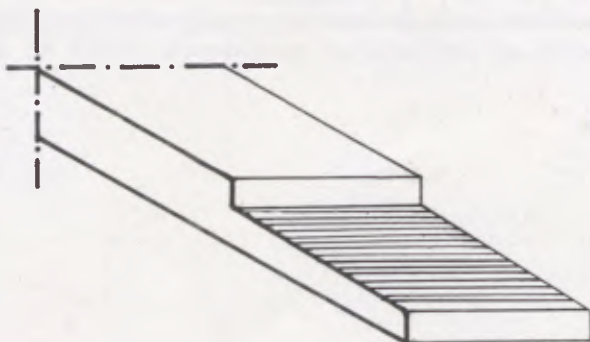


Fig. 26: Pure copper rod reheated and flattened by cold hammering. Horizontal section.

Fig. 26: Tige de cuivre pur recuite et aplatie à froid par martelage. Section horizontale.



Fig. 27: The elongation of the grains is visible. Magnified 100 x.

Fig. 27: On voit l'allongement des grains. $\times 100$.

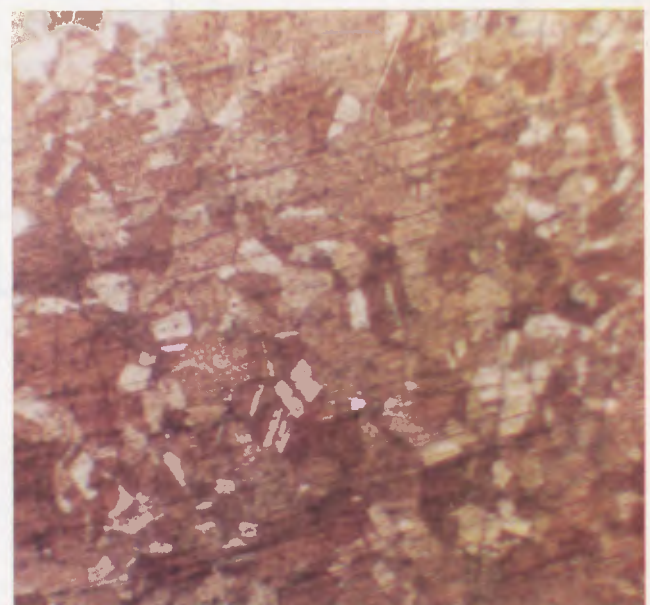


Fig. 28: Same section after reheating. The elongated form has disappeared and the grains have been regenerated. Magnified 100 x.

Fig. 28: Même section après recuit. Disparition de la structure allongée et régénération des grains. $\times 100$.

1. General remarks concerning metals and their alloys
2. Structure of metals and alloys
3. Ancient metals
4. Conclusions

3.

● ANCIENT METALS

It is fairly hazardous to attempt to draw up a chronological table of the appearance and diffusion of metals in the ancient world. Leaving aside the use of small quantities of native metals in the Neolithic era, the origins of metallurgy date to between the fourth millenium and the end of the second millenium B.C. All the techniques were discovered during this period and remained unchanged until the end of the Middle Ages. Coming from the Middle East, metallurgy spread to the western world. The areas involved stretched from northern Iran to Asia Minor, from the

Mediterranean basin to western and northern Europe, and by the end of the first millenium B.C. the diffusion of metallurgy was almost completed. Until relatively recently, towards the end of the 15th century, man knew of only seven metals: gold, silver, copper, tin, lead, iron and mercury. The first six constitute the metals found by archaeologists and are those under consideration here.

Rarely used in a pure form, they are usually found as alloys. Alloys are called binary (2 metals) or ternary (3 metals). In antiquity, the following characteristics were understood: colour, hardness, density, ductility, resonance, resistance to corrosion and certain "affinities" such as magnetism.

	Native Copper	Melted Copper	Bronze	Iron
Egypt	—	5000 B.C.	3000 B.C.	1000 B.C.
Mesopotamia	7000 B.C.	4000 B.C.	3000 B.C.	1200 B.C.
Anatolia	—	—	—	1700 B.C.
Western Europe	—	3000 B.C.	2000 B.C.	800 B.C.
Asia	—	—	1500 B.C.	—
Africa	—	—	—	500 B.C.
South America	—	700 A.D.	1000 A.D.	—

Fig. 29: Chronological table of the appearance of metals.

1. Généralités sur les métaux et alliages

2. Structure des métaux et des alliages

3. Les métaux anciens

4. Conclusions

3.

● LES METAUX ANCIENS

Il est assez aléatoire de tenter de dresser un tableau chronologique de l'apparition et de la diffusion des métaux dans le monde antique. Mis à part l'emploi de petites quantités de métaux natifs à l'époque néolithique, les origines de la métallurgie s'échelonnent du 4^e au 2^e millénaire avant J.C. Durant cette période, tous les procédés sont découverts et demeureront inchangés jusqu'à la fin du Moyen Age. Issues du Moyen Orient les métallurgies gagnent le monde occidental. Les régions concernées vont du nord de l'Iran à l'Asie Mineure, du bassin méditerranéen

à l'Europe occidentale et septentrionale et la diffusion des métallurgies est pratiquement terminée à la fin du premier millénaire.

Jusqu'à des temps relativement récents, vers la fin du XV^e siècle, l'homme n'a connu que sept métaux: l'or, l'argent, le cuivre, l'étain, le plomb, le fer et le mercure. Les six premiers constituent les métaux connus des archéologues et seront les seuls que nous considérerons ici.

Rarement utilisés purs, ils se trouvent généralement sous forme d'alliage. Les alliages sont dits binaires (2 métaux), ternaires (3 métaux). Dans l'antiquité on en connaissait la couleur, la dureté, la densité, la ductilité, la sonorité, la résistance à la corrosion et certaines « affinités » comme le magnétisme.

	Cuivre natif	Cuivre fondu	Bronze	Fer
Egypte	—	5000 Av. J.C.	3000 Av. J.C.	1000 Av. J.C.
Mésopotamie	7000 Av. J.C.	4000 Av. J.C.	3000 Av. J.C.	1200 Av. J.C.
Anatolie	—	—	—	1700 Av. J.C.
Europe Occidentale	—	3000 Av. J.C.	2000 Av. J.C.	800 Av. J.C.
Asie	—	—	1500 Av. J.C.	—
Afrique	—	—	—	500 Av. J.C.
Amérique du Sud	—	700 Ap. J.C.	1000 Ap. J.C.	—

Fig. 29: Tableau chronologique de l'apparition des métaux.

-
1. General remarks concerning metals and their alloys
 2. Structure of metals and alloys
 3. Ancient metals
 4. Conclusions
-

3.1.

● GOLD

Gold, symbol Au, melting-point 1063°C , density 19.3, atomic weight 197.2.

Gold was one of the first metals to be used by man for it can be found in a native state in auriferous sands, or as nuggets in the rock. Its high density permits it to be easily separated from the soil by washing. It was possible to melt small quantities of it in primitive furnaces.

Gold is very ductile and can be made into very fine leaves ($1/10.000$ mm thick). It is almost completely unalterable and does not corrode. When, as frequently, it is alloyed with copper and with silver the resultant metal exhibits a change in colour, hardness and melting point.

Two pieces of gold may be joined together by applying at the junction between them a foreign metal which induces localised alloying and a local lowering of the melting-point. This is called soldering. A special case is found in the use of a metallic salt which liberates metal on decomposition to form the soldering alloy (e.g. copper carbonate) in presence of a reducing agent. Gold can also be soldered by using prefabricated solders (gold, silver or copper alloys) which have a different, and often very low, melting-point. Gold is often found mixed with copper. Alloyed to silver it is called electrum.

From earliest antiquity gold has been worked to perfection by jewellers.

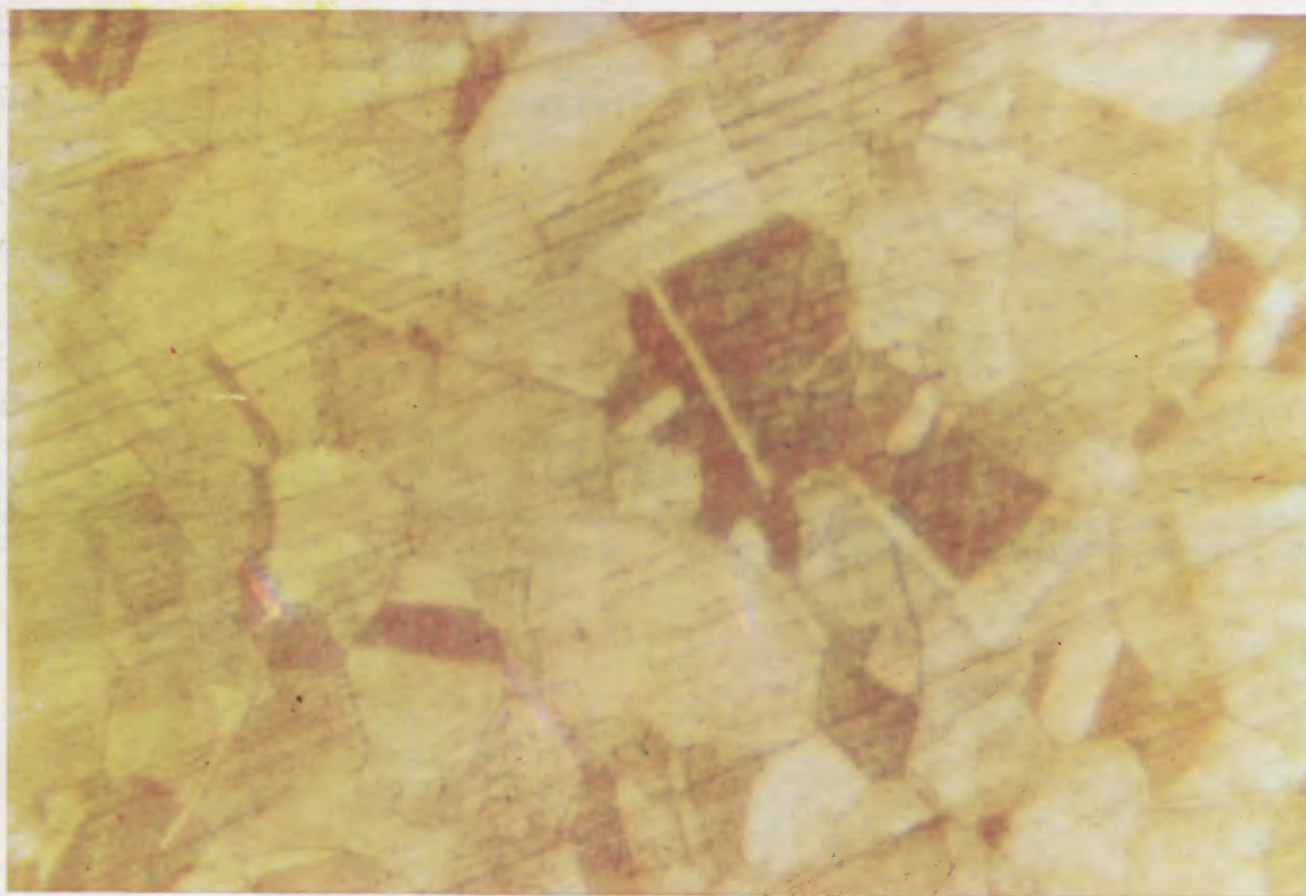


Fig. 30: Fine 24 carat gold. Cubic crystals, large regular grains. Reheated metal. Magnified $200\times$.

Fig. 30: Or fin 24 carats. Cristaux cubiques, gros grains réguliers. Métal recuit. $\times 200$.

1. Généralités sur les métaux et alliages

2. Structure des métaux et des alliages

3. Les métaux anciens

4. Conclusions

3.1.

● L'OR

L'or: symbole Au, point de fusion 1063° , densité 19,3, poids atomique 197,2.

L'or est un des premiers métaux utilisés par l'homme car il se trouve à l'état natif sous forme de petites particules dans les sables aurifères ou de pépites dans des roches. Sa densité élevée permet de le séparer facilement des terres par lavage. Il était possible d'en fondre de petites masses dans des fourneaux primitifs.

L'or est très ductile et peut être réduit en feuilles extrêmement minces (1/10.000 de m/m d'épaisseur). Il est pratiquement inaltérable et ne se corrode pas. L'or est souvent allié au cuivre et

à l'argent, ce qui modifie sa couleur, sa dureté et son point de fusion. Il peut être soudé à lui-même par apport à l'endroit de la soudure d'un métal permettant d'abaisser localement le point de fusion ou d'un sel métallique libérant ce métal (carbonate de cuivre). Ceci permet des soudures très fines comme les granulations.

On soude aussi l'or au moyen de soudures (alliages or, argent, cuivre) ayant des points de fusion assez variés et souvent très bas.

L'or est avec le cuivre le seul métal n'ayant pas la couleur blanche. D'ailleurs on le trouve souvent mélangé au cuivre. Allié à l'argent il prend le nom d'électrum.

Dès l'antiquité la plus reculée, l'or a été travaillé à la perfection par les orfèvres.

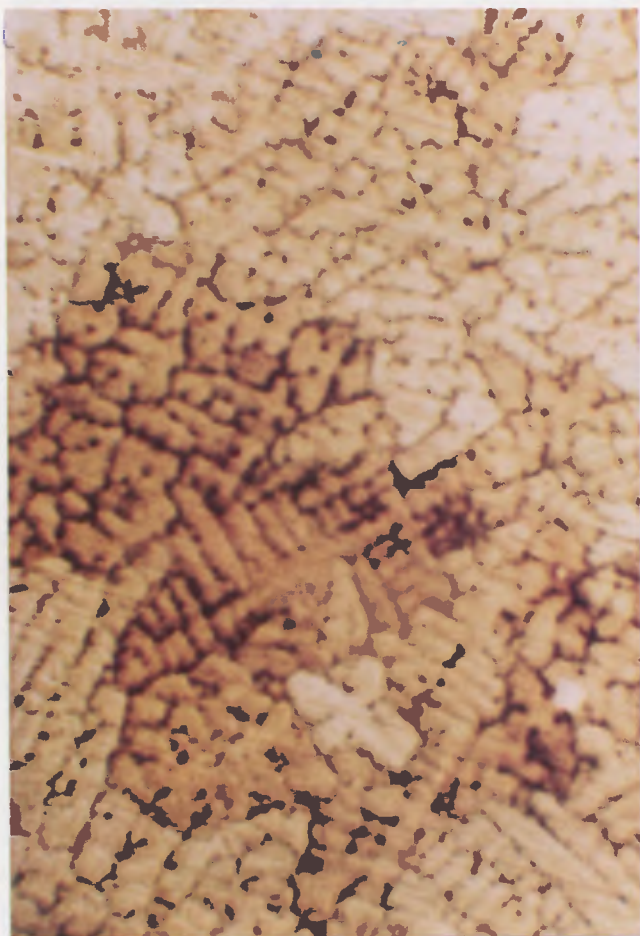


Fig. 31: Or fin 24 carats coulé refroidi à l'air. Les grains forment des dendrites. $\times 100$.

Fig. 31: Fine 24 carat cast gold cooled naturally. The grains have formed dendrites. Magnified 100 $\times$.



Fig. 32: Or fin recuit puis martelé à froid. On constate la déformation des grains due à l'écrasement et des fissures dans les grains. $\times 100$.

Fig. 32: Fine gold reheated and then cold hammered. Deformation of the grains due to crushing, and fractures in the grains, are visible. Magnified 100 $\times$.

1. General remarks concerning metals and their alloys

2. Structure of metals and alloys

3. Ancient metals

4. Conclusions

3.2.

● SILVER

Silver, symbol Ag, melting-point 960°C, density 10.5, atomic weight 107.8.

Silver rarely exists in a native state, but is normally extracted from ores which often contain lead (galena) and from which it is separated by a fairly complex metallurgical process; for this reason, its production in pure condition is more recent in date than that of gold and copper. Originally it was more precious than gold. Al-

though it has a low melting-point it is difficult to cast. Quite ductile and fairly soft, it was often purposely alloyed with copper to make it harder; alloys containing up to 50 % copper remain quite white, hence "silver objects" which survive to our era are often greatly changed in appearance by mineralization of the copper constituent.

Sometimes, when gold is alloyed with silver, the metal becomes paler.

Silver is fairly resistant to corrosion but it is prey to sulphur and chlorine.

Its main use in antiquity was for coinage.



Fig. 33: Pure silver, cubic crystals, reheated metal with large grains. Magnified 200 ×.

Fig. 33: Argent pur, cristaux cubiques, métal recuit à gros grains. × 200.

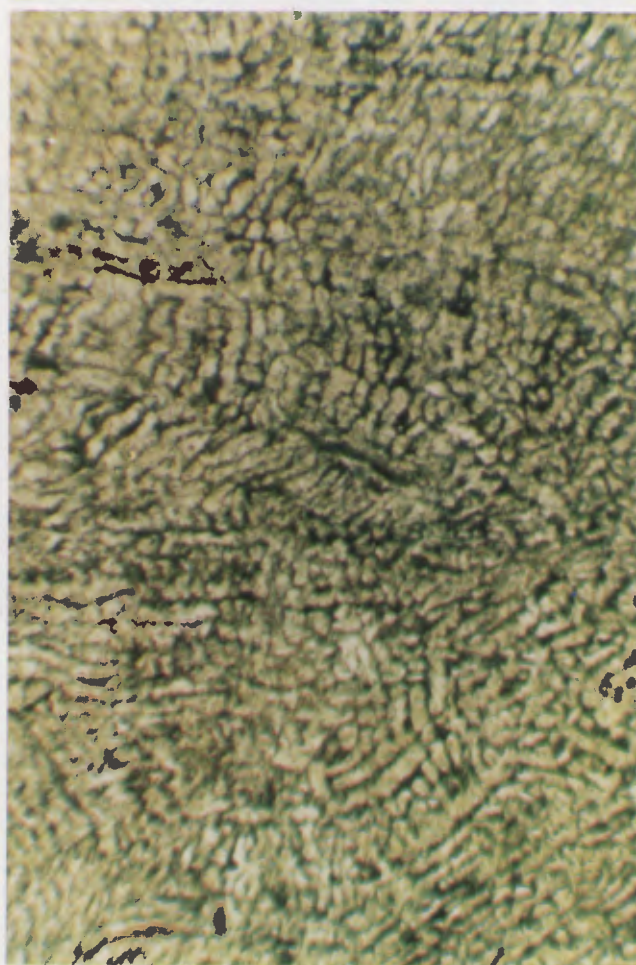


Fig. 34: Ancient silver coin, transverse section. Cast and beaten metal, the dendritic structure can still be distinguished. Magnified 200 ×.

Fig. 34: Monnaie d'argent ancienne, section transversale. Métal coulé et frappé. On distingue encore la structure dendritique. × 200.

1. Généralités sur les métaux et alliages
2. Structure des métaux et des alliages
3. Les métaux anciens
4. Conclusions

3.2.

● L'ARGENT

L'argent: symbole Ag, point de fusion 960° , densité 10,5, poids atomique 107,8.

L'argent existe rarement à l'état natif, mais plus généralement il est extrait de minerais qui contiennent souvent du plomb (galène), dont il est séparé au cours d'opérations métallurgiques assez complexes, ce qui fait que sa production est plus récente que celles de l'or et du cuivre. A l'origine, il est plus précieux que l'or. Bien que

son point de fusion soit assez bas, il se coule mal. Assez ductile et assez tendre il a souvent été allié au cuivre pour le durcir.

Les alliages contenant jusqu'à 50 % de cuivre restent assez blancs, ce qui fait que « les objets d'argent » nous parviennent souvent très altérés en apparence par la corrosion du cuivre qui couvrira et englobera l'objet en argent.

Parfois allié à l'or il rend ce métal plus pâle.

L'argent résiste assez bien à la corrosion, il est cependant attaqué par le soufre et le chlore. Son principal emploi dans l'antiquité a été le monnayage.



Fig. 35: Monnaie d'argent moderne, faux d'Agrigente. Les grains sont allongés, le métal est écrasé et non frappé après recuit. $\times 100$.

Fig. 35: Modern silver coin, counterfeit from Agrigento. The grains are elongated, the metal has been crushed and not beaten after reheating. Magnified $100\times$.

1. General remarks concerning metals and their alloys
2. Structure of metals and alloys
3. Ancient metals
4. Conclusions

3.3.

● COPPER

Copper, symbol Cu, melting-point 1083°C, density 8.9, atomic weight 63.54.

Copper exists in a native state in small quantities and it was in this form that it was first used. It was the first metal to be extracted from its ores. These latter are fairly numerous in the form of oxides, sulphates or carbonates. Their metallurgy involves various methods of roasting, melting and refining.

Being very plastic, copper hardens rapidly under hammering, becoming brittle, and must be reheated before it can be reworked.

At first copper was used in its pure form. Then for personal adornment it was alloyed with the

precious metals, gold and silver, and for domestic wear and accoutrements, principally with tin to obtain bronze.

Pure copper is difficult to cast. Its mechanical properties are improved by the presence of arsenic and phosphorus. This remained to be discovered at a later date. Even though these substances were not isolated in antiquity, it is possible that by chance arsenic and phosphorus ores were used.

Copper was soon alloyed with another metal, tin, to form bronze and its conjunction with tin and latterly with zinc was copper's primary use in antiquity.

As in the case of gold and silver, copper and its alloys bronze and brass were much used in coinage.

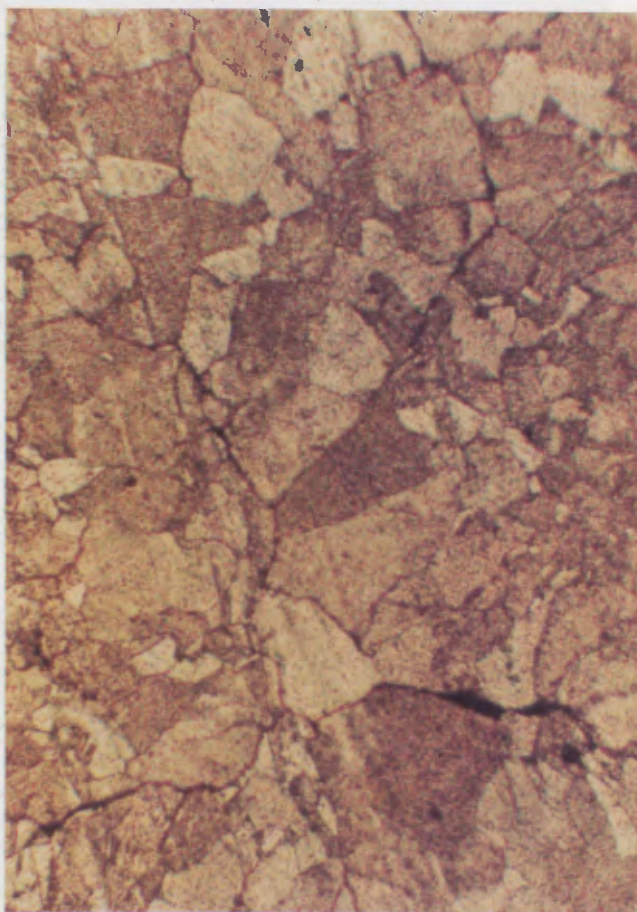


Fig. 36: Native copper from Arizona, irregular grains, absence of oxide inclusions. Magnified 200 ×.

Fig. 36: Cuivre natif, Arizona, grains irréguliers, absence d'inclusion et d'oxydes. × 200.

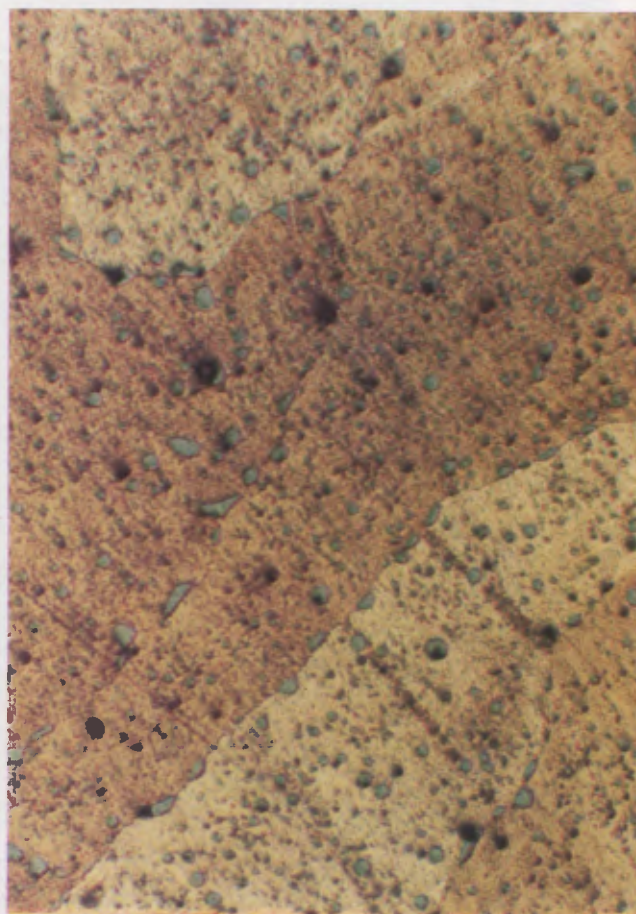


Fig. 37: Protohistoric copper ingot extracted from an ore, found in a shipwreck. Large regular grains, numerous inclusions of slag and oxides (blue). Magnified 200 ×.

Fig. 37: Cuivre protohistorique obtenu à partir de minerais. Lingot trouvé dans une épave. Gros grains réguliers très nombreuses inclusions de scories et d'oxydes (bleu). × 200.

1. Généralités sur les métaux et alliages

2. Structure des métaux et des alliages

3. Les métaux anciens

4. Conclusions

3.3.

● LE CUIVRE

Le cuivre: symbole Cu, point de fusion 1083°, densité 8,9, poids atomique 63,54.

Le cuivre existe en petites quantités à l'état natif, et c'est sous cette forme qu'il a été utilisé en premier. Il est le premier métal extrait de ses minerais. Ils sont assez nombreux, sous forme d'oxydes, de sulfures ou de carbonates. Leur métallurgie comprend diverses opérations de grillage, de fusion, et d'affinage.

Très plastique, le cuivre s'écrouit (se durcit) rapidement au martelage. Il devient cassant et il doit être recuit pour pouvoir se travailler à nouveau.

A l'origine le cuivre a été utilisé pur, puis allié aux métaux précieux or et argent mais surtout allié à l'étain pour former le bronze.

Le cuivre se coule mal. Ses qualités mécaniques se trouvent améliorées par la présence d'arsenic et de phosphore bien que ces corps n'aient pas été isolés dans l'antiquité, il est possible que des minerais arsénieux ou phosphoriques aient été jadis utilisés.

Très rapidement le cuivre a été allié à un autre métal, l'étain, pour former un alliage, le bronze. C'est surtout incorporé à ce nouveau métal que le cuivre sera utilisé dans l'antiquité.

De même que l'or et l'argent, le cuivre et ses alliages furent beaucoup utilisés pour le monnayage.

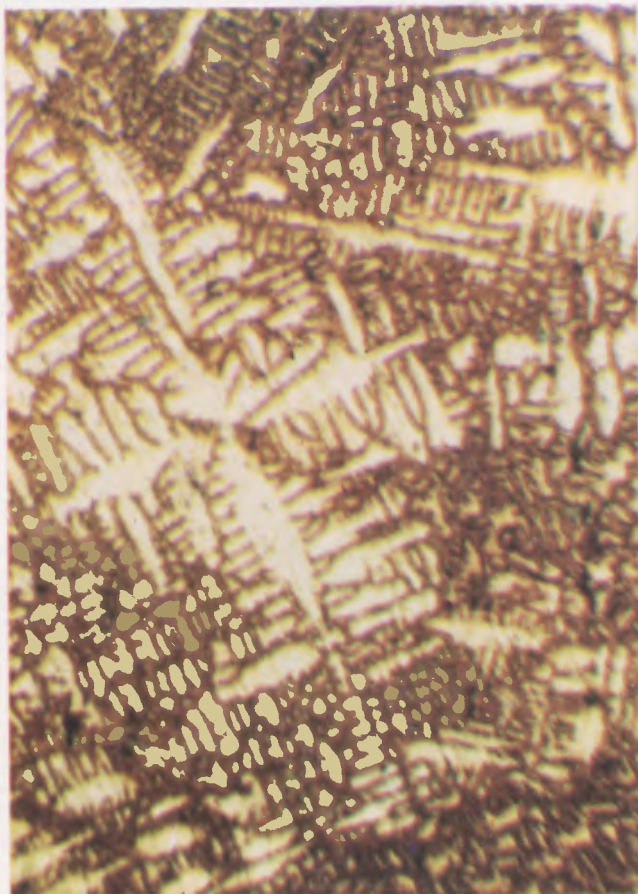


Fig. 38: Cuivre coulé, $\times 100$. Les grains sont assemblés en dendrites.

Fig. 38: Cast copper. The grains are grouped in dendrites. Magnified 100 $\times$.

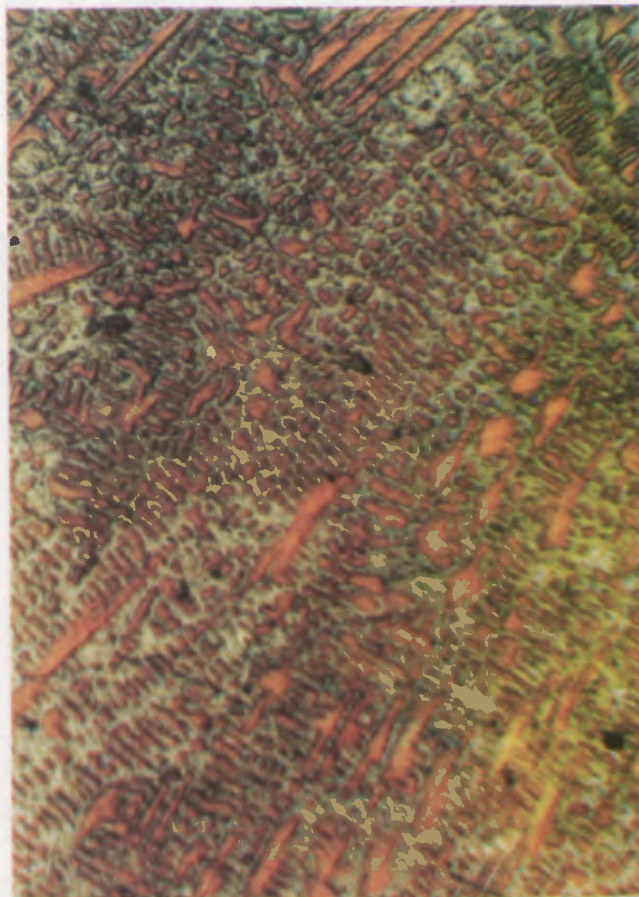


Fig. 39: Cuivre coulé, $\times 100$. Une préparation différente de l'échantillon fait ressortir en rouge l'oxyde cuivreux.

Fig. 39: Cast copper. A different preparation of the sample highlights the copper oxide in red. Magnified 100 $\times$.

-
1. General remarks concerning metals and their alloys
 2. Structure of metals and alloys
 3. Ancient metals
 4. Conclusions
-

3.4.

● TIN

Tin, symbol Sn, melting-point 232°C, density 7.3, atomic weight 118.70.

Tin exists in very small quantities in a native state and its principal ore is cassiterite, tin dioxide. It also exists as a sulphate, stannite. The metal is obtained from its ores by reducing the oxides by wood charcoal and by refining. It is a very soft metal which takes a good polish. The extraction and trading of tin played an important role in antiquity for it is indispensable to the production of bronze. Its low melting-point was of significance in the fabrication of solders and it was used also to cover copper and bronze objects by tinning, thus providing a surface that was non-corroding. Little used in a pure form in remote antiquity, it was later employed in the fabrication of metallic cooking vessels and in ceramics, glass and glazes.

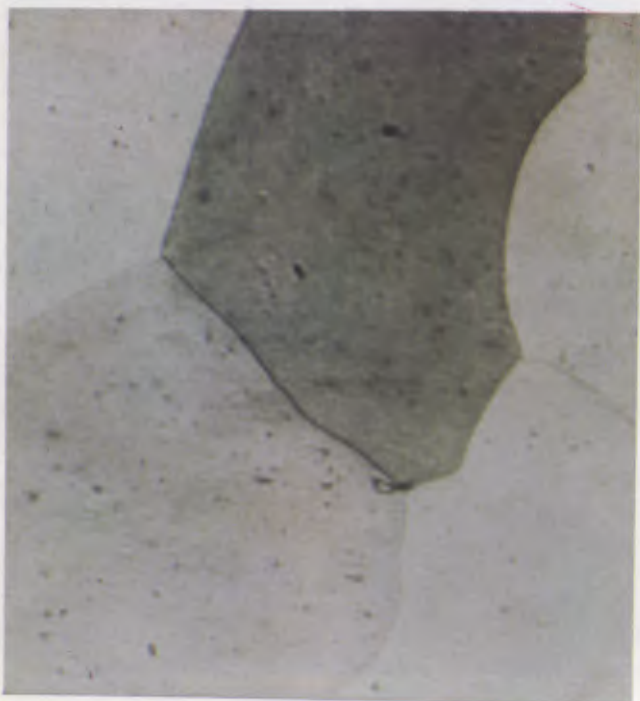


Fig. 40: Very pure tin with large equiaxial grains. Magnified 100 ×.

Fig. 40: Étain très pur, gros grains equiaxiaux. × 100.

1. Généralités sur les métaux et alliages

2. Structure des métaux et des alliages

3. Les métaux anciens

4. Conclusions

3.4.

● L'ÉTAIN

L'étain: symbole Sn, point de fusion 232°, densité 7,3, poids atomique 118,70.

L'étain existe en très faibles quantités à l'état natif mais son principal minéral est un oxyde, la cassitérite. Il existe aussi à l'état de sulfure, la stannite. Il est obtenu par réduction des oxydes par le charbon de bois et affiné. C'est un métal très tendre qui se polit bien. Sa production et son commerce ont joué un grand rôle dans l'antiquité, car il est indispensable à la fabrication du bronze. En effet, son point de fusion très bas, permet de baisser le point de fusion du métal issu de cet alliage.

Il sert aussi à recouvrir des objets ou récipients en cuivre et en bronze par étamage.

Peu employé pur dans l'antiquité, il a servi plus tard à la confection de vaisselle et de poterie.

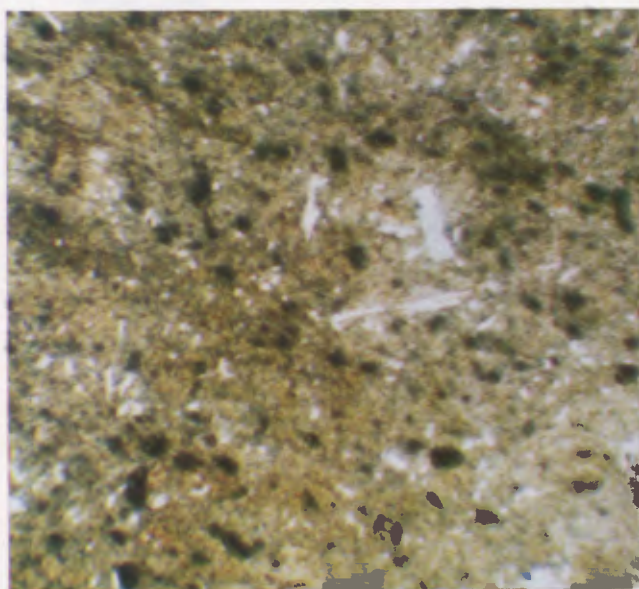


Fig. 41: Étain allié d'un plat du XVI^e s. Structure hétérogène d'un métal dont on ne distingue pas le grain. Inclusions nombreuses de plomb (en noir), de cuivre (en blanc). $\times 200$.

Fig. 41: Tin alloy from a 16th century plate. Heterogeneous metal structure with no discernible grains. Numerous black and white inclusions, respectively lead and copper. Magnified 200 $\times$.

1. General remarks concerning metals and their alloys

2. Structure of metals and alloys

3. Ancient metals

4. Conclusions

3.5.

● LEAD

Lead, symbol Pb, melting-point 327°C, density 11.3, atomic weight 207.

Lead is extracted from sulphates or carbonates. It is often associated with silver. It is a very

malleable metal possessing no mechanical resistance whatsoever. It was largely used in antiquity for pipes and water conduits and also in the building of sarcophagi. It sometimes partially replaced tin in bronzes where it is to be found associated with copper and tin. It is fairly resistant to corrosion under normal conditions.

1. Généralités sur les métaux et alliages

2. Structure des métaux et des alliages

3. Les métaux anciens

4. Conclusions

3.5.

● LE PLOMB

Le plomb: symbole Pb, point de fusion 327°, densité 11,3, poids atomique 207.

Le plomb se tire de minerais sulfurés ou oxydés (carbonates, sulfates). Il est souvent associé à

l'argent. Ce métal est très malléable et ne possède aucune résistance mécanique. Il a été utilisé largement dans l'antiquité pour les tuyauteries et les adductions d'eau, ainsi que pour la fabrication de sarcophages. Il remplace parfois l'étain dans les bronzes ou se trouve associé au cuivre et à l'étain. Il résiste assez bien à la corrosion.



Fig. 42: Section d'un petit lingot de plomb très pur (99,99%). Gros grains equiaxiaux, leur grande taille est due à l'absence d'impuretés qui constituent des germes de grains. Photo American Society for Metals. x 6.

Fig. 42: Section through a small very pure lead ingot (99.99 %). Large equiaxial grains, their large size is due to the absence of impurities which inhibit grain growth. Photo: American Society for Metals. Magnified 6 ×.

1. General remarks concerning metals and their alloys

2. Structure of metals and alloys

3. Ancient metals

4. Conclusions

3.6.

● BRONZES

The name of bronze is given to a certain number of alloys having a copper base. Modern industry uses numerous bronzes. The metal that is the product of the alloy copper-tin, and which is sometimes associated with lead, is the only one included in this study. The melting-point, mechanical properties and colour of the alloy vary according to the percentage of tin present.

The graphs below (Figs. 43 and 44) sum up these properties. These had not eluded the ancient metallurgists who knew very well how to adapt the alloys to their needs. However, bronze objects were very often made from recast objects and the use of precise amounts of each base metal was not always possible; hence, analyses sometimes produce results of little significance.

The mechanical properties of bronzes are greatly affected by any thermal or mechanical treatment used in their fabrication. The cast metal presents certain structures which will be modified by reheating. Hammered bronze is stressed and hardens; reheating restores its ductility.

Bronze had innumerable uses in antiquity. From the 2nd century A.D. lead often partially or wholly replaced tin giving alloys of lesser quality since the lead remained in the form of small globules in the alloy.

The micrographic structures of bronzes vary so much according to the composition and treatment undergone by the metal that only a few characteristic examples are given here (Figs. 45-53). There are several solid solutions of copper-tin which can be identified in micrographs and which are called α , β , γ , δ , and η , according to their tin content and cooling speed. Solution α is low in tin, β and γ solutions only exist at high temperatures, δ is a solution containing about 25 % tin, η is similar to the combination Cu Sn. Thus, a bronze object made by casting the same alloy may, on analysis, present different proportions of Cu: Sn at different points of the object and may depend on the speed at which the various parts of the object cooled in its mould. (continued on page 40)

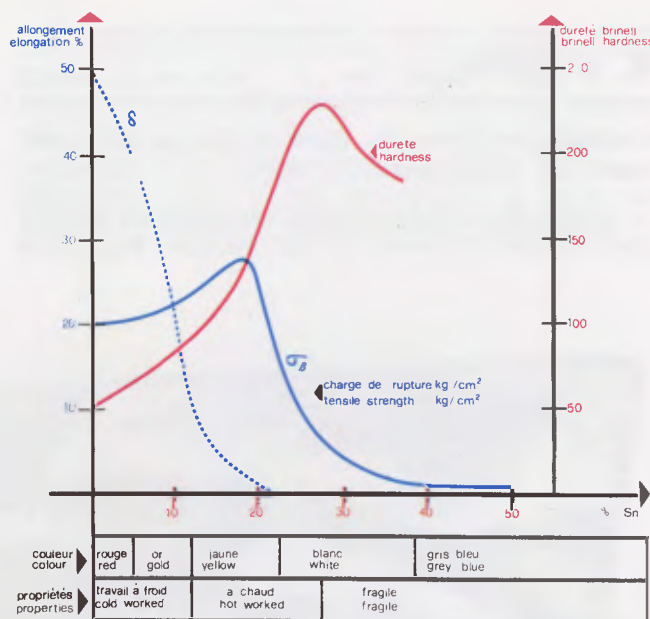


Fig. 43: Property of copper-tin bronzes.

Fig. 43: Propriétés des bronzes cuivre-étain.

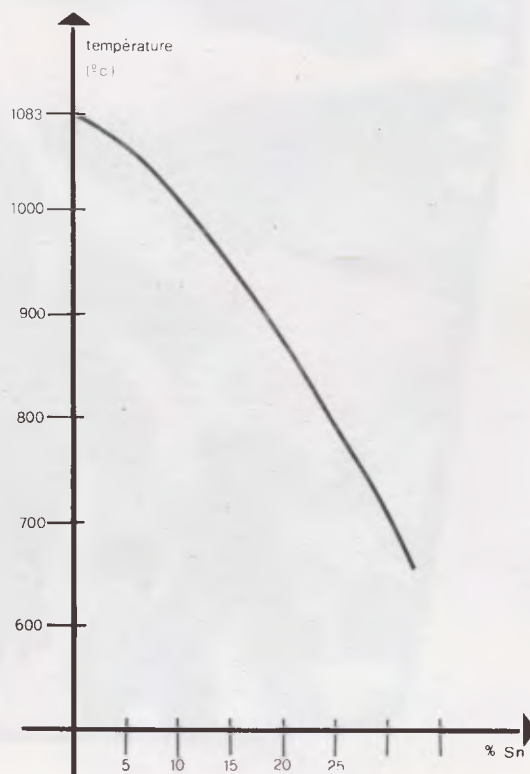


Fig. 44: Lowering of the melting-point of copper-tin bronzes.

Fig. 44: Abaissement du point de fusion des bronzes cuivre-étain.

1. Généralités sur les métaux et alliages

2. Structure des métaux et des alliages

3. Les métaux anciens

4. Conclusions

3.6.

● LES BRONZES

Le nom de bronze est donné à un certain nombre d'alliages de métaux dont la base est le cuivre. L'industrie actuelle emploie de nombreux bronzes. Nous ne considérerons ici que le métal issu de l'alliage cuivre-étain, parfois associé au plomb. Le point de fusion, les propriétés mécaniques et la couleur de l'alliage varient avec le pourcentage d'étain.

Les graphiques ci-contre résument ces propriétés (Figs. 43 & 44). Ceci n'avait pas échappé à l'attention des métallurgistes anciens qui ont très bien su adapter les alliages au but recherché. Cependant, les objets de bronze sont souvent faits à partir d'objets refondus, et les dosages précis n'étaient pas possible. Aussi les analyses font parfois ressortir des résultats peu significatifs. Les qualités mécaniques des bronzes sont très affectées par les traitements mécaniques et thermiques subis par les objets. Le métal coulé présente certaines structures qui seront modifiées par des recuits. Le bronze martelé

s'écrouit et se durcit, un recuit le rend ductile. Les emplois du bronze dans l'antiquité sont innombrables. A partir du 2^e siècle de notre ère on a progressivement remplacé en partie ou totalement l'étain par du plomb, ce qui donne un alliage de moins bonne qualité, le plomb restant dans l'alliage sous forme de petits globules.

Les structures micrographiques des bronzes sont si variées en fonction de leur composition et des traitements subis, qu'il n'est possible ici que de donner quelques exemples caractéristiques (Figs. 45 à 53).

En fonction des teneurs en étain et des vitesses de refroidissement il existe plusieurs solutions solides cuivre-étain appelées α , β , γ , δ , η , que l'on peut reconnaître sur les micrographies. La solution α est riche en cuivre, β et γ n'existent qu'à température élevée, δ est une solution de la combinaison Cu_3Sn , η est voisine de la combinaison Cu-Sn .

C'est ainsi qu'un objet de bronze produit par la coulée d'un même alliage peut, à l'analyse, présenter des rapports Cu/Sn variables d'un endroit à l'autre en fonction de la vitesse de refroidissement de l'objet dans son moule. (suite page 41)



Fig. 45: Fragment de torque, Hallstatt final. Structure de coulée, dendrites non déformées. L'objet n'a pas été coulé dans sa forme définitive. Teneur en étain de l'ordre de 10 %. $\times 100$.

Fig. 45: Fragment of a torque from final Hallstatt period. Cast structure, the dendrites are not distorted. The object has not been reheated or worked cold. It was cast in its definitive form. Content of tin circa 10 %. Magnified 100 $\times$.

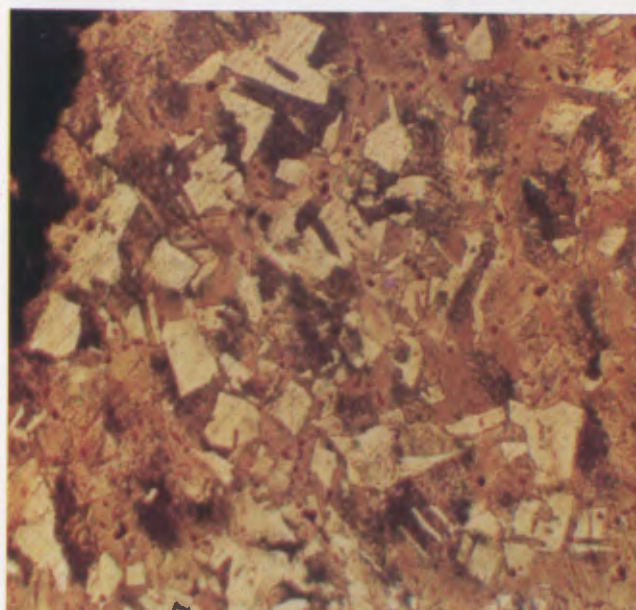


Fig. 46: Ciseau égyptien. Bronze à très faible teneur en étain, moins de 5 %. Le métal coulé a été recuit et martelé. Faible corrosion, structure analogue à celle d'un cuivre. $\times 200$.

Fig. 46: Egyptian chisel. Bronze with a very low tin content, less than 5 %. The cast metal has been reheated and hammered. Slight corrosion, structure analogous to that of copper. Magnified 200 $\times$.

1. General remarks concerning metals and their alloys

2. Structure of metals and alloys

3. Ancient metals

4. Conclusions

3.6.

● BRONZES (continued)

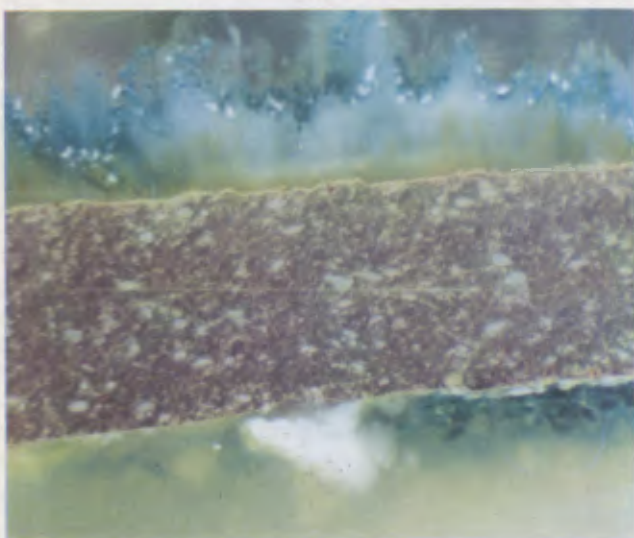


Fig. 47: Provincial Roman coin. Transverse section. Bronze formed with lead, elongation of the lead globules in the direction in which it was struck. Magnified 10 x.

Fig. 47: Monnaie coloniale romaine. Section transversale. Bronze au plomb, allongement des globules de plomb dans le sens de la frappe. $\times 10$.



Fig. 48: The same coin. Large black globules of lead distorted by hammering. The blue is phase δ . Composition c. 8 % Sn, c. 10 % Pb. Magnified 100 $\times$.

Fig. 48: Môme monnaie. Gros globules de plomb en noir, déformés par la frappe. En bleu, phase δ . Composition Sn 8% environ et Pb 10% environ. $\times 100$.

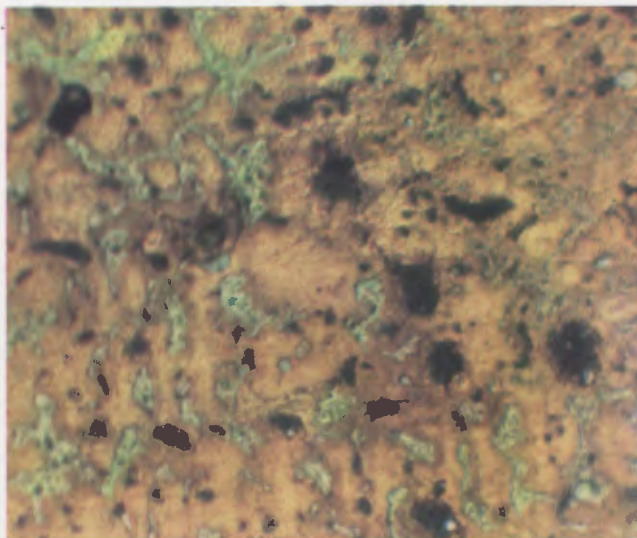


Fig. 49: Protohistoric ingot. Cast structure still visible. Globules of lead which have not combined show up in black; in the yellow, the eutectoid $\alpha + \delta$ in blue, the compound δ . Composition, 12-15% Sn. 5-6% Pb. Magnified 200 $\times$.

Fig. 49: Lingot protohistorique. Structure de coulée encore visible. En noir, globules de plomb non combiné. En jaune l'eutectoïde $\alpha + \delta$. En bleu le composé δ . Composition, Sn 12-15 %, Pb 5-6 %. $\times 200$.

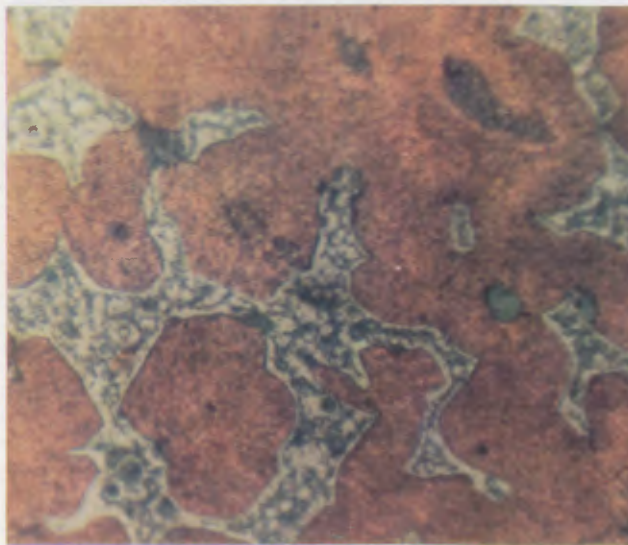


Fig. 50: The same sample, details of the structure of the δ phase. Magnified 800 $\times$.

Fig. 50: Môme échantillon, détail de la structure de la phase δ . $\times 800$.

1. Généralités sur les métaux et alliages

2. Structure des métaux et des alliages

3. Les métaux anciens

4. Conclusions

3.6.

● LES BRONZES (SUITE)

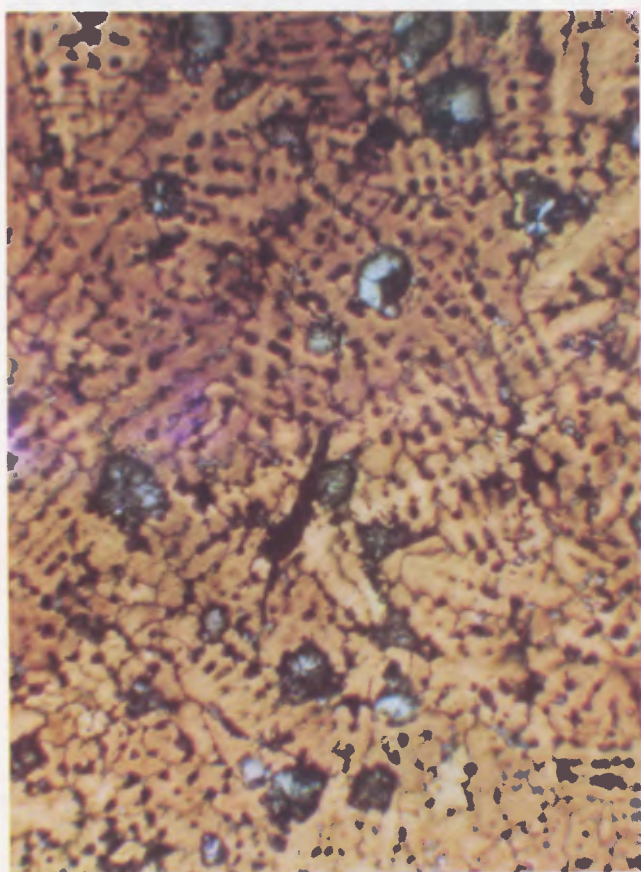


Fig. 51: Bracelet protohistorique, bronze final. Métal coulé, non recuit. Gros globules de plomb, phase corrodée. Analyse: Cu 77,5 %; Sn 13 %; Pb 6,6 %; Fe 0,6 %; Zn 0,8 %.
× 100.

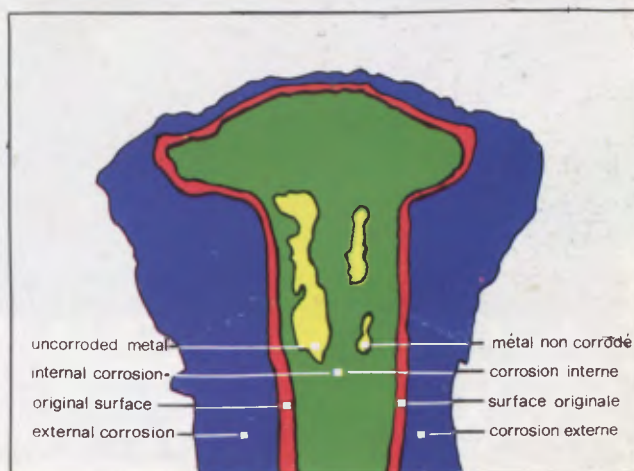
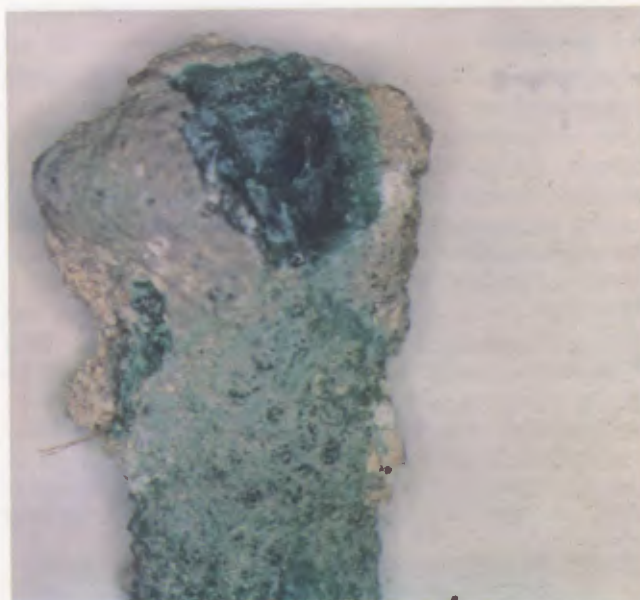
Fig. 52: Clou de cuivre provenant d'une épave du 5^e siècle avant notre ère.

Fig. 53: Section de la tête du même clou. Très peu de métal est encore intact. La forme originale du clou se voit parfaitement encore au milieu des produits de corrosion. Le schéma ci-contre montre bien la corrosion externe, la forme originale, la corrosion interne et ce qui reste du métal.

Fig. 51: Protohistoric bracelet of the Late Bronze Age. Cast metal, not reheated. Large globules of lead, corroded phase. Analysis: 77.5 % Cu, 13 % Sn, 6.6 % Pb, 0.6 % Fe, 0.8 % Zn. Magnified 100 ×.

Fig. 52: Copper nail from a 5th century B.C. shipwreck.

Fig. 53: Section of the head of the same nail. Very little metal is still intact. The nail's original form can still be seen in the midst of corrosion products. The diagram opposite clearly shows external corrosion, the original form, internal corrosion, and what is left of the metal.



1. General remarks concerning metals and their alloys

2. Structure of metals and alloys

3. Ancient metals

4. Conclusions

3.7.

● BRASSES

Brasses are alloys of copper-zinc.

Zinc, symbol Zn, melting-point 419°C, density 7.14, atomic weight 65.38. It was not known in a metallic form in antiquity. However, certain ores mixed with copper or copper ores through cementation formed a copper-zinc alloy containing up to 30 % Zn.

Although there are examples of brasses dating from the end of the first millenium, it was in the Augustan era that zinc appeared systematically in the coinage. This metal is called orichalcum because of its appearance, colour and polish which resemble those of gold.

The content of zinc in orichalcum was relatively high at the beginning but began to diminish

gradually until the end of the 2nd century. Tin and sometimes lead are also found in these brasses.

In later times brasses were often preferred to bronzes because of their colour and also because they cast more easily.

For this reason we recognise today that many archaeological fakes were formerly made of brass simulating bronze. Our knowledge of the origins of brass and its use in antiquity are still incomplete due to a lack of systematic analyses.

A copper-zinc alloy forms six solutions according to the proportion of the components and the cooling speed. The melting-point of the alloy descends to 1000°C when there is 20 % Zn, to 833°C when there is 60 % Zn. Ancient brasses have melting-points similar to those of Cu-Sn bronzes.

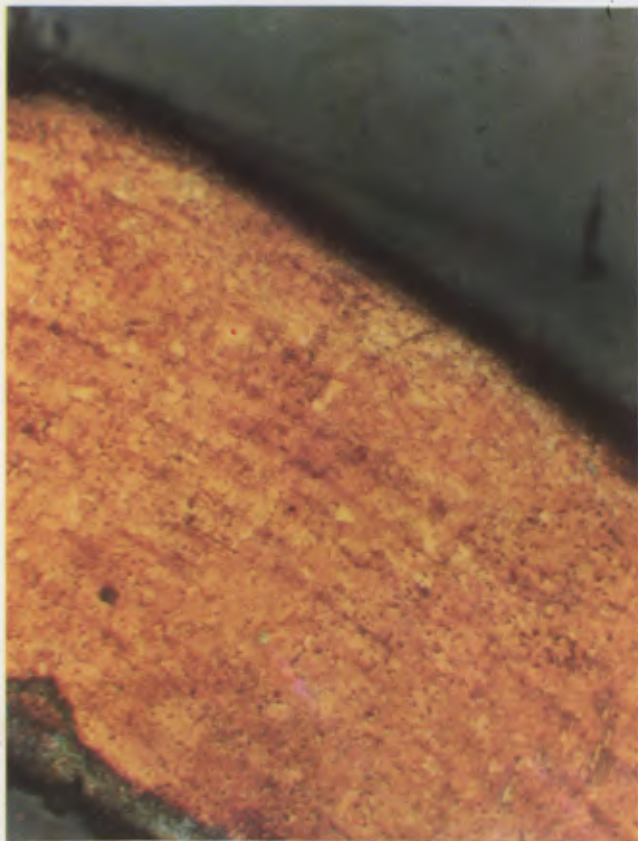


Fig. 54: Brass from a Romano-gallic ornament. Hammered sheet, grains orientated in the direction of the flattening. Curved whilst cold. A single phase: alpha, ca. 15 % Zn. Magnified 200 ×.

Fig. 54: Laiton provenant d'un ornement gallo-romain. Tôle martelée, grains orientés dans le sens de l'aplatissement. Cintré à froid. Une seule phase alpha. Zn environ 15 %. × 200.

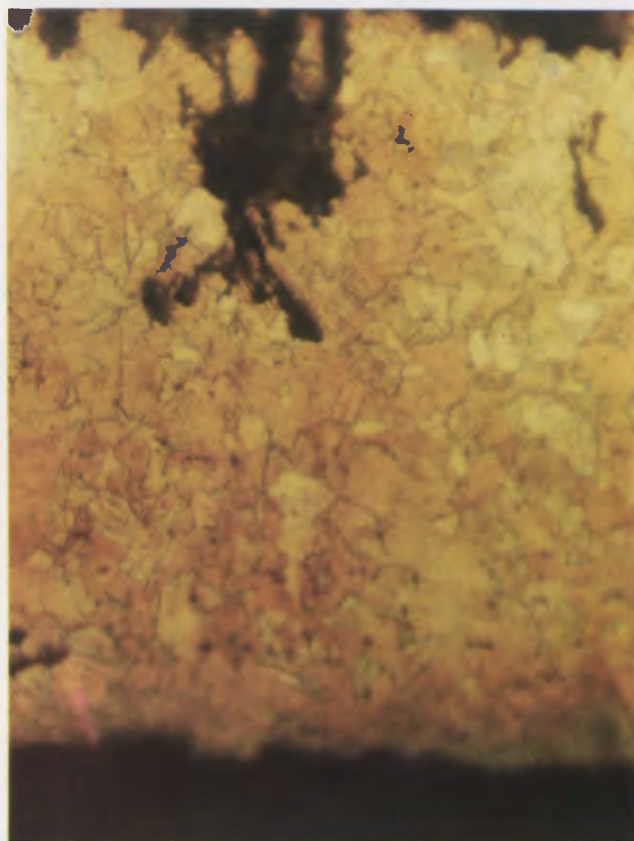


Fig. 55: Brass sheeting from a Romano-gallic vase, very fine grain. Fatigue fracture due to excessive cold-hammering. Circa 10 % Zn, 5 % Sn; A single phase: alpha. Magnified 400 ×.

Fig. 55: Tôle de laiton d'un vase gallo-romain. Grain très fin. Fissure de fatigue due à un écouissage trop poussé. Environ 10 % Zn; 5 % Sn. Une seule phase: alpha. × 400.

1. Généralités sur les métaux et alliages
2. Structure des métaux et des alliages
3. Les métaux anciens
4. Conclusions

3.7.

● LES LAITONS

Les laitons sont des alliages Cuivre-Zinc.

Le zinc (symbole Zn, point de fusion 419° , densité 7,14, poids atomique 65,38) n'était pas connu dans l'antiquité sous forme métallique. Mais certains minerais mêlés au cuivre ou à ses minerais permettaient par cémentation d'obtenir un alliage cuivre-zinc contenant jusqu'à 30 % de Zn. Si on trouve quelques exemples de laitons à la fin du 1^{er} millénaire, ce n'est que sous le règne d'Auguste que le zinc apparaît systématiquement dans le monnayage. On appelait ce métal aurichalque à cause de son aspect, sa couleur et son poli qui le font ressembler à l'or. Les teneurs en Zn de l'aurichalque, assez élevées au début, diminuent progressivement jusqu'à la fin du 2^e siècle

après J.C. On trouve également dans ces laitons, de l'étain et parfois du plomb.

Plus tard les laitons ont été souvent préférés aux bronzes à cause de leur couleur, et aussi parce qu'ils se coulent beaucoup plus facilement. C'est pour cette raison que de nombreux faux archéologiques ont été faits jadis en laiton. Notre connaissance des origines du laiton et de son emploi dans l'antiquité est encore très incomplète du fait de l'absence d'analyses systématiques.

L'alliage cuivre-zinc forme six solutions solides en fonction des concentrations des composants et de la vitesse de refroidissement. La température de fusion de l'alliage descend de 1000° pour 20 % Zn, à 833° pour 60 % Zn. Les laitons anciens ont des températures de fusion comparables à celles de bronzes Cu-Sn.

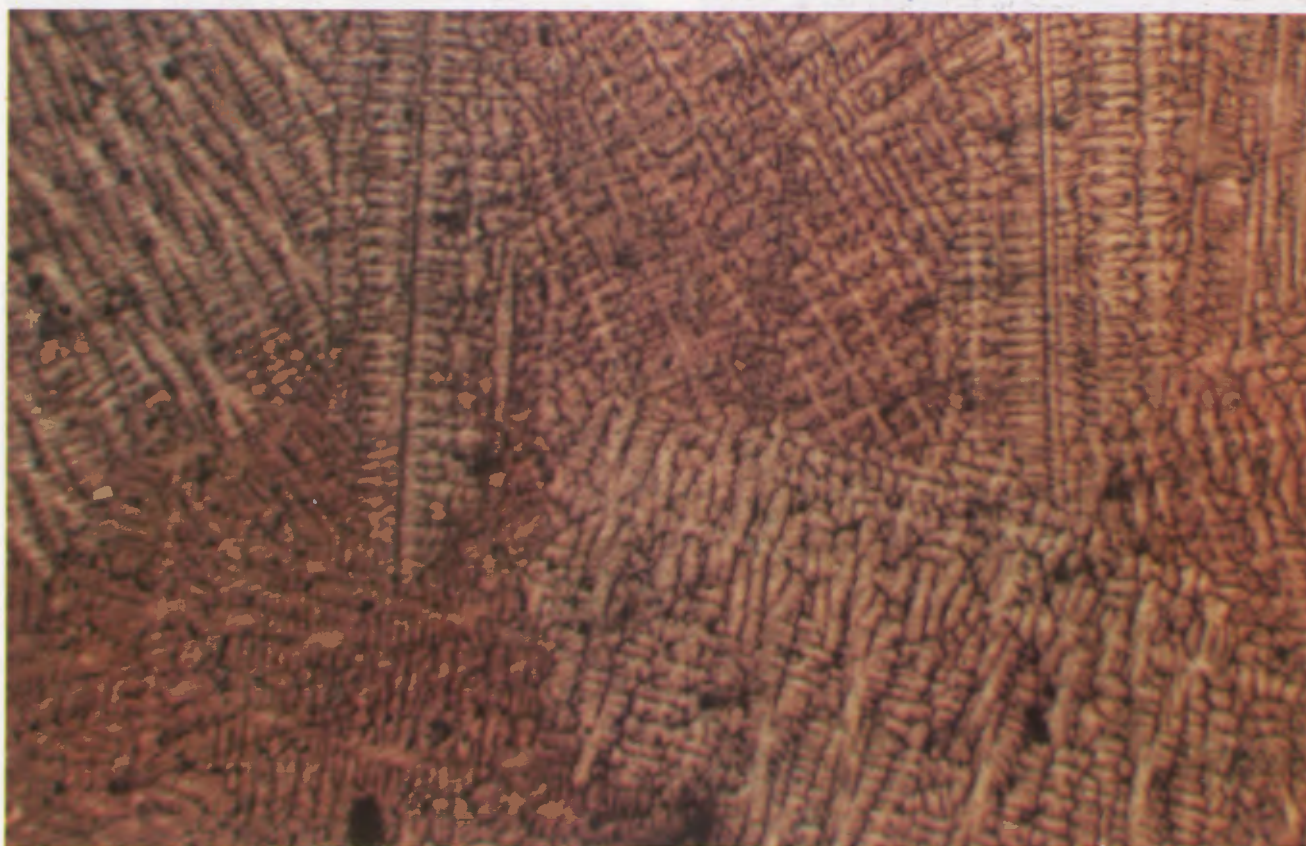


Fig. 56: Laiton moderne. Structure de coulée, dendrites 65 % Cu; 35 % Zn; deux phases: dendrites d'alpha dans du beta. Alpha et beta sont deux des six solutions solides possibles dans l'alliage Cu-Zn en fonction des concentrations et des vitesses de refroidissement. $\times 100$.

Fig. 56: Modern brass, cast structure, dendrites 65 % Cu, 35 % Zn, two phases: alpha dendrites in a beta phase. Alpha and beta are two of the six possible solid solutions in a Cu-Zn alloy which depend on the concentration of the elements and the speed of cooling. Magnified $100 \times$.

1. General remarks concerning metals and their alloys
2. Structure of metals and alloys
3. Ancient metals
4. Conclusions

3.8.

● IRON

Iron, symbol Fe, melting-point 1535°C , density 7.87, atomic weight 55.85.

Iron does not exist in a native state. However, some meteorites are found containing iron which is frequently associated with nickel. That meteoric iron was used by man is certain, but it cannot be said that all the earlier iron used by man came from meteorites.

Iron is extracted from its ores, mainly oxides and carbonates, which are found in abundance on the earth's surface, but, because of its high melting-point, its extraction requires good furnaces reaching the elevated temperatures and necessary amounts of heat required for reducing the ores. This is the reason for the relatively late appearance of iron (mid-2nd millenium B.C.) in the areas south of the Caucasus (Anatolia). The rapid development of its production caused considerable changes in the technologies and conduct of industrial societies.

In antiquity, from the beginning to the 14th century in Europe, iron was obtained by the so-called direct method: the ore is transformed into metal by reduction in a small furnace fired by wood or charcoal. Combustion was encouraged either by natural or by forced ventilation (hand-operated

bellows). With temperatures in the region of 1200°C , a partial fusion will allow the separation of the non-metallic matters (slags) from the more or less completely heterogeneous metallic residue of crude iron which must later be refined. Iron combines with carbon (symbol C) to form some very important alloys, called carbides, which are classed according to the different amounts of this element contained in irons, steels and cast irons. These different metals were distinguished by their properties in antiquity, while their true natures remained unknown. A metal that has a weak content of carbon, up to 0.02 %, is called iron.

The presence of carbon considerably modifies the properties of ferrous alloys, their melting-point, hardness etc.

Iron, especially in antiquity, usually contains some impurities in the form of inclusions and slags (phosphor, silica, manganese, sulphur etc.) which modify the qualities of the metal. Of all the metals used in antiquity, iron possesses the best mechanical properties. On the other hand, it is very prone to corrosion. Pure irons resist better than carburized irons.

An important property of iron is its ability to be soldered by simple contact when it is heated to a sufficient temperature (white hot).

According to the arrangement of atoms in a ferrous crystal, it is classed as an α iron or a γ iron.

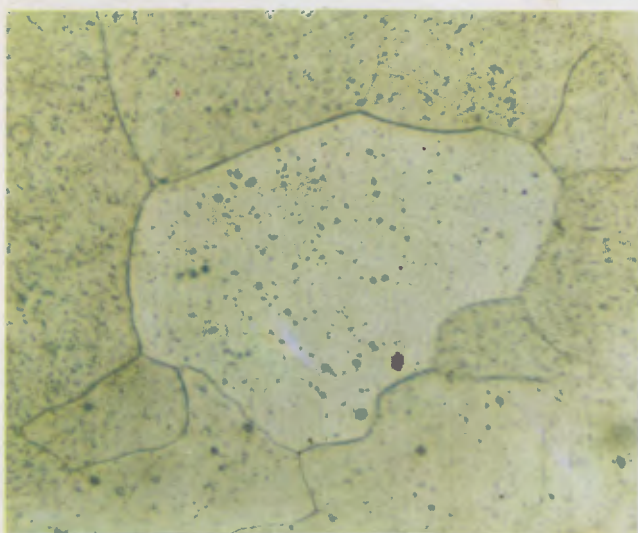


Fig. 57: Pure ancient iron (Luristan). Large regular grains of ferrite. Magnified 400 $\times$.

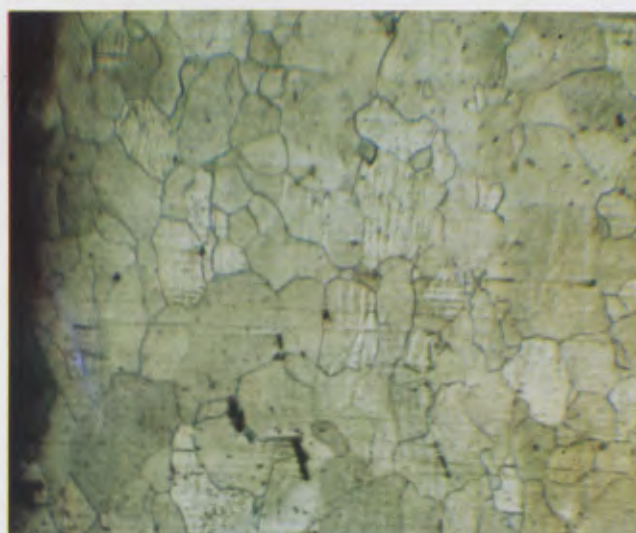


Fig. 58: Ancient iron (Luristan). Grains elongated in the direction of the deformation of the metal caused by forging. Some elongated slags lying in the same direction. Magnified 100 $\times$.

Fig. 57: Fer ancien (Luristan) pur. Gros grains réguliers de ferrite. $\times$ 400.

Fig. 58: Fer ancien (Luristan). Grains allongés dans le sens de la déformation du métal au forgeage. Quelques scories allongées dans le même sens. $\times$ 100.

1. Généralités sur les métaux et alliages

2. Structure des métaux et des alliages

3. Les métaux anciens

4. Conclusions

3.8.

● LE FER

Le fer: symbole Fe, point de fusion 1535°, densité 7,87, poids atomique 55,85.

Le fer n'existe pas à l'état natif. On trouve cependant quelques météorites contenant du fer parfois allié au nickel. Leur utilisation par l'homme est certaine mais il est imprudent de dire que le premier fer utilisé par l'homme ait été celui des météorites.

Le fer est donc tiré de ses minerais, principalement oxydes et carbonates, qui sont très abondants à la surface de la terre. Mais du fait de son point de fusion élevé, son extraction nécessite de bons fourneaux permettant les températures et quantités de chaleur nécessaires à la réduction des minerais. C'est pourquoi, le fer apparaît relativement tardivement (milieu du 2^e millénaire avant notre ère) dans les régions sud du Caucase (Anatolie). Le développement rapide de sa production a entraîné des bouleversements considérables dans la technologie et conduit aux sociétés industrielles.

Dans la période ancienne, des origines au XIV^e siècle pour l'Europe, le fer est obtenu par la méthode dite directe: transformation du minerai en métal par réduction des minerais dans un petit fourneau au moyen de bois ou de charbon de bois. La combustion est activée soit par tirage direct soit par des soufflets à main. Avec des températures de l'ordre de 1200°, une fusion partielle permet de séparer les matières non métalliques (scories ou laitiers) d'une masse métallique totalement hétérogène qu'il faut ensuite affiner.

Le fer s'allie au carbone (symbole C) pour donner des alliages très importants, dits carburés, que l'on classe d'après la teneur croissante de cet élément, en fers, aciers et fontes. Ces divers métaux étaient différenciés dans l'antiquité d'après leurs propriétés, bien que leur nature exacte ait été inconnue. On appelle fer un métal qui peut renfermer une faible teneur en carbone, jusqu'à 0,02 % environ.

La présence du carbone modifie considérablement les propriétés des alliages ferreux: point de fusion, dureté etc...

Les fers, surtout anciens renferment également des impuretés, sous forme d'inclusions et de scories (phosphore, silice, manganèse, soufre etc...) qui modifient également les qualités de ces métaux.

De tous les métaux utilisés dans l'antiquité, c'est le fer qui possède les meilleures qualités mécaniques. Par contre il est très sensible à la corrosion. Les fers purs résistent cependant mieux que les fers carburés.

Une propriété importante du fer est de pouvoir se souder par simple contact quand il est porté à une température suffisante (blanc soudant).

Selon l'arrangement des atomes dans le cristal de fer, on définit le fer α ou le fer γ .



Fig. 59: Fer ancien (Luristan). Fer légèrement carburé. Les grains foncés sont constitués de perlite qui contient 0,88 % de carbone. Les grains clairs sont de la ferrite. La proportion des deux constituants permet de déterminer la teneur en carbone, ici 0,2 %. $\times 100$.

Fig. 59: Ancient iron (Luristan). Lightly carburized iron. The dark grains are made up of pearlite which contains 0.88 % carbon, the light grains are ferrite. The proportions of the two constituents allow the determination of the amount of carbon, here 0.2 %. Magnified 100 $\times$.

1. General remarks concerning metals and their alloys

2. Structure of metals and alloys

3. Ancient metals

4. Conclusions

3.9.

● CAST IRONS

Cast irons are alloys of iron and carbon containing more than 2 % carbon together with other elements, silica, manganese and impurities like sulphur and phosphorus. For reasons already given, cast iron was slow to be used in antiquity in the West, although in China it preceded iron. In Europe, cast iron was produced accidentally in small quantities in primitive furnaces. It was only towards the end of the Middle Ages, following the improvement of bellows, that iron ore was

reduced in blast furnaces and changed into cast iron.

Cast irons were either used as such for casting, or refined to produce iron after the elimination of excess carbon. All the irons and steels used before the 19th century were produced by refining cast iron. The melting-points of cast irons range from 1100°C to 1200°C. They are classed as white, grey and mixed or flecked. They contain 2 to 3.5 % carbon or more.

Contrary to malleable or wrought-iron, cast iron is brittle, it cannot be forged and, until this century, could not be soldered.



Fig. 60: Cast iron containing 2.93 % carbon; ferrite and carbon in the form of graphite and arranged in rosette patterns are in a pearlitic matrix. Magnified 200 ×.

Fig. 60: Fonte à 2,93 % de carbone. Dans une matrice perlitique se trouve de la ferrite et du carbone sous forme de graphite disposé en rosettes. × 200.

1. Généralités sur les métaux et alliages

2. Structure des métaux et des alliages

3. Les métaux anciens

4. Conclusions

3.9.

● LES FONTES

Les fontes sont des alliages de fer et de carbone qui contiennent plus de 2 % de carbone uni à d'autres éléments, silicium, manganèse, et des impuretés telles que le soufre et le phosphore. La fonte n'a pas été utilisée dans l'antiquité classique, par contre en Chine la fonte a précédé le fer.

En Europe, jusqu'au Moyen Age, elle fut produite accidentellement en petites quantités dans les fourneaux primitifs. Ce n'est qu'à partir de la fin du Moyen Age, par suite de l'amélioration des souffleries, que le minerai de fer réduit dans les hauts fourneaux a été transformé en fonte.

Les fontes sont, soit utilisées telles qu'elles pour le moulage, soit affinées pour produire du fer après élimination du carbone en excès. Jusqu'au XIX^e siècle tous les fers et aciers utilisés étaient produits à partir de l'affinage de la fonte.

La température de fusion des fontes s'échelonne entre 1100° et 1200°. On classe les fontes en fontes blanches, grises et mixtes ou truitées. Elles contiennent de 2 à 3,5 % de carbone et plus. A l'inverse du fer, la fonte est cassante, ne peut se forger et jusqu'à ce siècle ne pouvait être soudée.

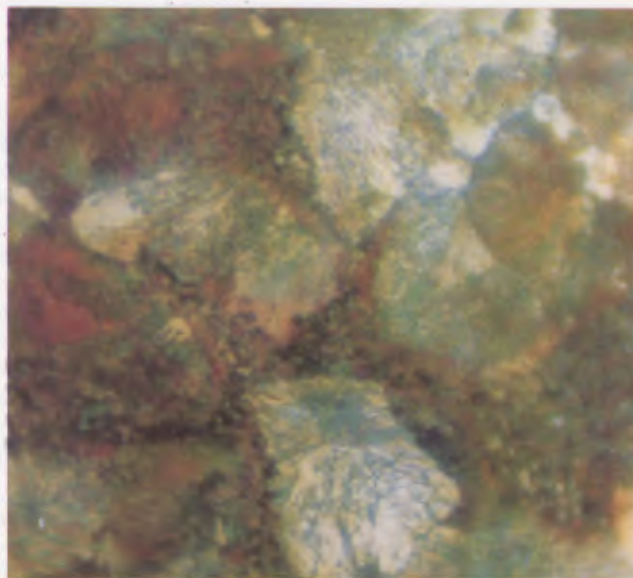


Fig. 61: Fonte à 2,22 % de carbone. Le carbure de fer est dispersé en petites particules. La matrice est perlitique ferrite associée au graphite en fines lamelles. $\times 400$.

Fig. 61: Cast iron containing 2.22 % carbon, the iron carbide is dispersed in small particles. The matrix is pearlitic ferrite combined with graphite in fine laminas. Magnified 400 $\times$.

1. General remarks concerning metals and their alloys
2. Structure of metals and alloys
3. Ancient metals
4. Conclusions

3.10.

● STEELS

Steels are iron-carbon alloys containing from 0.05 % to 1.70 % carbon. In antiquity steel was distinguished from iron by its mechanical properties. It was produced either directly in a simple furnace, when in certain cases the iron contained, by chance, the right proportions of carbon and other appropriate minerals, or through the cementation of iron heated in a closed container in the midst of a mass of "cement" rich in carbon, or through the fusion of iron in cast iron. Since the end of the 19th century the role of carbon has been established and steel metallurgy has been normalised. Nowadays steel is produced by the decarburizing of cast iron.

For the archaeologist it is important to recognise those steels which were produced and used intentionally and those irons which, due to their

heterogeneous nature, contain an amount of carbon that, at times, is quite considerable.

The carbon content modifies the mechanical qualities of steel. The components (iron + C) vary according to the percentages and the rapidity with which the alloy is cooled.

Cooled quickly, steel becomes very hard, even brittle; tempering by reheating at a given temperature and then cooling slowly reduces the brittleness. The nature of the components of steel and their variation under different thermal treatments constitutes a fairly complex field of metallography.

Steels are less resistant to corrosion than irons. Steels weld in the same way as irons although, the higher the carbon content, the harder they are to solder.

The structure of steel varies greatly according to the carbon content and the thermal treatment to which it is subjected.

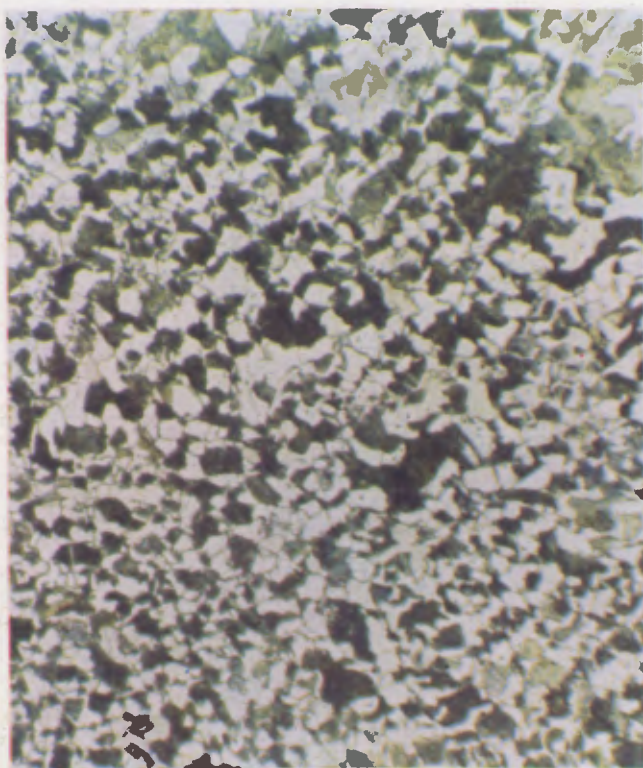


Fig. 62: Steel containing 0,35% carbon. Dark ferrite plates form the grains, against a pearlitic background. Magnified 200 $\times$.

Fig. 62: Acier à 0,35 % de carbone. Plages de ferrite foncées sur un fond de perlite formant des grains. $\times 200$.



Fig. 63: The same steel heated to 870°C and then tempered in water. The structure has changed, it is now martensite, a very hard needle-structured component, a super-saturated solution of iron carbide in α iron. Magnified $\times$.

Fig. 63: Chauffé à 870° et trempé à l'eau. La structure est modifiée. C'est de la martensite, constituant très dur en aiguilles, solution sursaturée de carbure de fer dans le fer α . $\times 200$.

1. Généralités sur les métaux et alliages

2. Structure des métaux et des alliages

3. Les métaux anciens

4. Conclusions

3.10.

● LES ACIERS

Les aciers sont des alliages fer-carbone contenant de 0,05 à 1,70 % de carbone.

Dans l'antiquité l'acier était distingué du fer d'après ses propriétés mécaniques. Il était produit soit directement au bas foyer lorsque, dans certains cas et avec des minerais adéquats, le fer contenait par hasard la proportion convenable de carbone, soit par cémentation du fer chauffé dans un vase clos au milieu d'une masse de « ciment » riche en carbone, soit par fusion du fer dans de la fonte. Depuis la fin du XIX^e siècle le rôle du carbone a été établi et la métallurgie de l'acier a été normalisée. De nos jours l'acier est produit par décarburation de la fonte.

Pour les archéologues, il est important de reconnaître les aciers produits et utilisés volontairement, des fers qui peuvent par suite de leur

hétérogénéité, renfermer localement une teneur en carbone même assez forte.

La teneur en carbone modifie les qualités mécaniques de l'acier. Les composants fer+carbone sont variables en fonction des teneurs et des vitesses de refroidissement de l'alliage. Refroidi brusquement, un acier devient très dur, voire cassant. C'est la trempe, on réduit cette dureté par un revenu, réchauffage à une température donnée suivi d'un refroidissement lent. La nature des composants de l'acier et leurs variations en fonction des traitements thermiques constituent un domaine assez complexe connu par la métallographie.

Les aciers résistent moins bien à la corrosion que les fers.

Les aciers se forgent comme le fer, cependant plus la teneur en carbone est élevée, plus ils sont difficiles à souder.

Les structures de l'acier sont très différentes en fonction de la teneur en carbone et des traitements thermiques.



Fig. 64: Même acier que le précédent, mais revenu 2 heures à 600°. Petites particules de carbure de fer dans une masse de ferrite aciculaire. $\times 200$.

Fig. 64: The same steel as in the preceding figure, here tempered for two hours at 600°C. Small particles of iron carbide in a mass of needle-shaped ferrite. Magnified 200 $\times$.



Fig. 65: Acier avec 0,80 % de carbone. Essentiellement perlite avec 5 % de ferrite en petites plages. $\times 400$.

Fig. 65: Steel containing 0.80 % carbon. Mainly pearlite with 5 % ferrite in small plate formations. Magnified 400 $\times$.

1. General remarks concerning metals and their alloys

2. Structure of metals and alloys

3. Ancient metals

4. Conclusions

3.11.

● PATTERN-WELDED AND OTHER STEELS

Since the mechanical properties of iron were fairly limited and the steels difficult to manufacture with certainty, the metal workers of antiquity from an early date strove to produce weapons of ferrous metals combined in such a way that the mechanical properties of these arms were the best possible.

They began by soldering carburized iron (steel) points and cutting edges to iron weapons. They also attempted, by cementation, to harden all or part of the weapon, point or cutting edge.

Certain techniques were indeed remarkable and were employed to confer specific physical properties to the alloys or to enhance their appearance. These are either pattern-welding (damas par soudure, Wurmbunt), (Figs. 66, 67 & 68), or damascening (Wootz, bulat, pulad), (Figs. 69, 70 & 71).

Pattern welding is obtained by welding together parts of pure iron and lightly carburized iron; the alternating fibres give an effect of interwoven layers and consolidate the structure of the metal while enhancing it decoratively.

Wootz, on the other hand is a steel rich in carbon, i.e. containing 1 % or more, and because of this it is difficult to forge. This steel was either produced in a crucible or by melting iron and cast iron together. High quality weapons, like the Japanese sabres, are products of these techniques. These structures can easily be discerned by a superficial examination of the blades if they are in a good state of preservation, or by radiography or metallographic examination.

Fig. 66: A 7th century Merovingian blade. Superficial view of the polished and etched blade. Width 55 mm. The central part is pattern welded, iron carbide has been added to the cutting edges. Actual size.

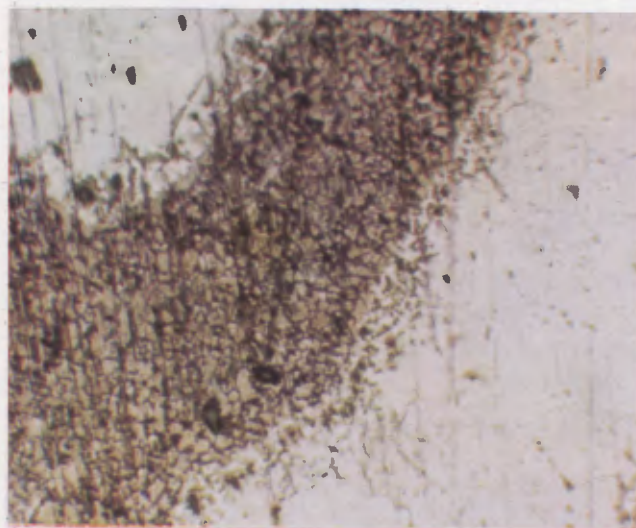
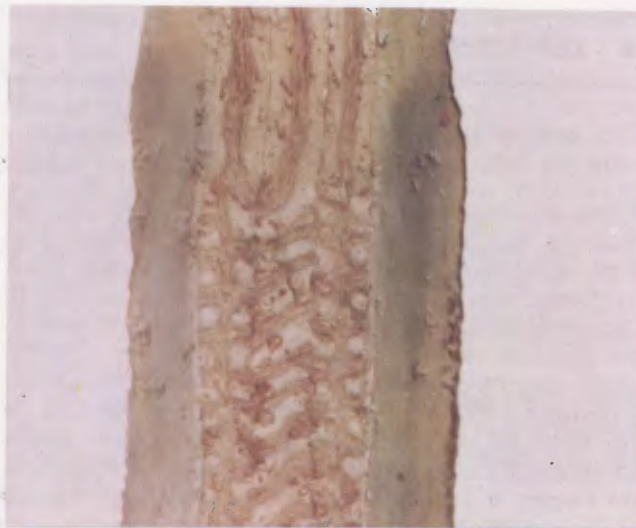
Fig. 67: Detail of a section of the central part. Bands of carburized iron, cemented steel, containing 0.03 % C, alternating with bands of pure iron. Note the decarburization at the point of soldering. Magnified 100 ×.

Fig. 68: Detail of part of the pure iron. Iron with large regular grains containing numerous slag inclusions orientated in the direction of the forging. Magnified 200 ×.

Fig. 66: Lame « damassée » mérovingienne, VII^e siècle. Vue superficielle d'une lame polie et attaquée. Largeur 55 mm. La partie centrale est en damas soudé, les tranchants rapportés en fer carburé. × 1.

Fig. 67: Détail d'une section de la partie centrale. Bandes de fer carburé, acier cimenté à 0,30 % de Carbone alternant avec des bandes de fer pur. Noter la décarburation au niveau des soudures. × 100.

Fig. 68: Détail dans une zone de fer pur. Fer à gros grains réguliers contenant de nombreuses inclusions de scories orientées dans le sens du forgeage. × 200.



1. Généralités sur les métaux et alliages

2. Structure des métaux et des alliages

3. Les métaux anciens

4. Conclusions

3.11.

● LES ACIERS DAMASSES ET AUTRES

Les qualités mécaniques du fer étant assez limitées et les aciers difficiles à produire d'une manière sûre, les forgerons de l'antiquité se sont efforcés très tôt de produire des armes en métaux ferreux associés de telle manière que les qualités mécaniques de ces armes soient les meilleures possibles.

On a commencé par souder sur des armes de fer, des pointes ou des tranchants de fer carburé (acier). On a aussi tenté de durcir par cémentation tout ou partie d'une arme, pointe ou tranchant.

Certaines techniques ont été particulièrement remarquables. Il s'agit soit du damas par soudure — pattern welding, Wurmbunt — (Figs. 66,

67 & 68), soit de l'acier damas — Wootz bulat, pulad — (Figs. 69, 70 & 71).

Le damas par soudure est réalisé par soudure de parties de fer pur et de fer légèrement carburé permettant de donner par l'alternance des fibres un effet de contre-plaqué qui donne une meilleure résistance aux lames et leur confère en même temps un certain effet décoratif.

Le Wootz, par contre est un acier très riche en carbone 1 % et plus, de ce fait difficile à forger. Cet acier était produit soit au creuset, soit par co-fusion de fer et de fonte. De ces techniques sont issues des armes de grande qualité comme les sabres japonais. Ces structures sont facilement discernables par observation superficielle des lames si elles sont en bon état. Dans le cas contraire il faudra faire un examen métallographique ou une radiographie.

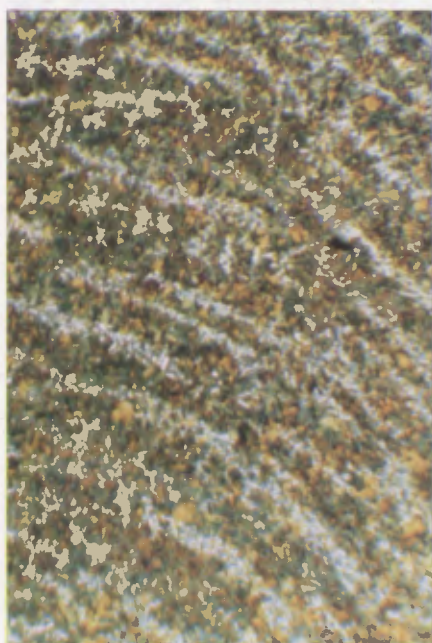


Fig. 69: Section d'une lame « Wootz » Perse, XVIII^e siècle. Couches de grains de carbure de fer très dur dans une masse d'acier dur contenant environ 0,8 % de carbone. $\times 100$.

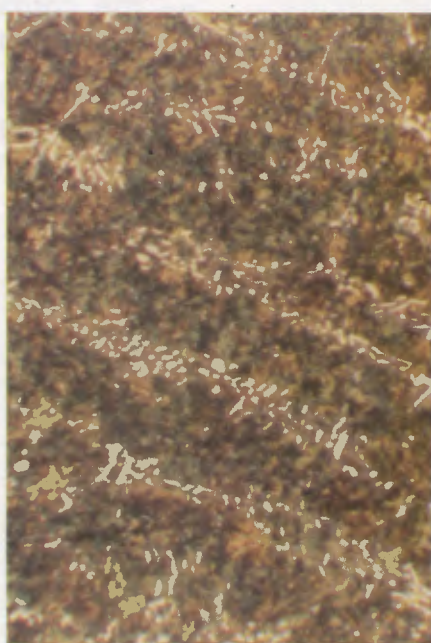


Fig. 70: Même section sous un plus fort grossissement. La structure est plus lisible (nécessité de grossissements adaptés au cas étudié). $\times 200$.

Fig. 71: Section de la même lame sous un grossissement de $\times 800$, le maximum autorisé avec un matériel simple. Les grains blancs de carbure de fer sont parfaitement définis ainsi que la matrice d'acier hyper eutectoïde dans laquelle ils sont inclus. $\times 800$.

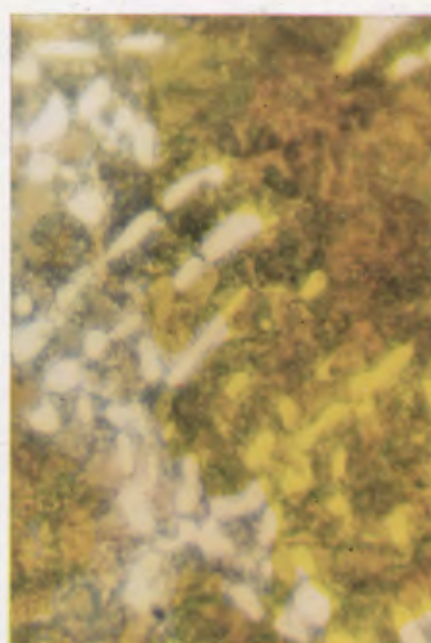


Fig. 69: Section of an 18th century Persian "Wootz" blade. Layers of very hard iron carbide grains in a mass of hard steel containing 0.8 % carbon. Magnified 100 $\times$.

Fig. 70: An enlargement of the same section. The structure can be understood more easily (an example of the necessity of using an enlargement suited to the case under study). Magnified 200 $\times$.

Fig. 71: A still greater enlargement, the largest possible with simple equipment, of the same section of the blade. The white grains of iron carbide, like the hyper-eutectic steel matrix in which they are enclosed, are easily discernable. Magnified 800 $\times$.

-
1. General remarks concerning metals and their alloys
 2. Structure of metals and alloys
 3. Ancient metals
 4. Conclusions
-

4.

● CONCLUSIONS

A detailed study of a metal object requires a metallographic examination which will give us the composition and structure of the metal or alloy.

Moreover, it can provide information concerning:

- how the object was made;
- the origin and authenticity of the object;
- the vicissitudes to which the object has been subjected;
- the state of conservation of the object;
- the type and degree of corrosion;
- the course of treatment required for conservation of the object.

This examination is therefore, if not more important, at least complementary to an analysis of the metal by physical or chemical methods.

1. Généralités sur les métaux et alliages

2. Structure des métaux et des alliages

3. Les métaux anciens

4. Conclusions

4.

● CONCLUSIONS

L'étude détaillée d'un objet métallique implique un examen métallographique qui nous renseigne sur la composition et la structure du métal.

De plus, ceci nous renseigne sur:

- la méthode de fabrication de l'objet;
- l'origine et l'authenticité de l'objet;
- les vicissitudes subies par l'objet;
- l'état de conservation de l'objet;
- le type et l'importance de la corrosion;
- les traitements dont l'objet a besoin.

Cet examen est donc, sinon plus important, du moins absolument complémentaire à une analyse du métal par des méthodes physiques ou chimiques.

● APPENDIX 1: WHAT IS METALLOGRAPHY?

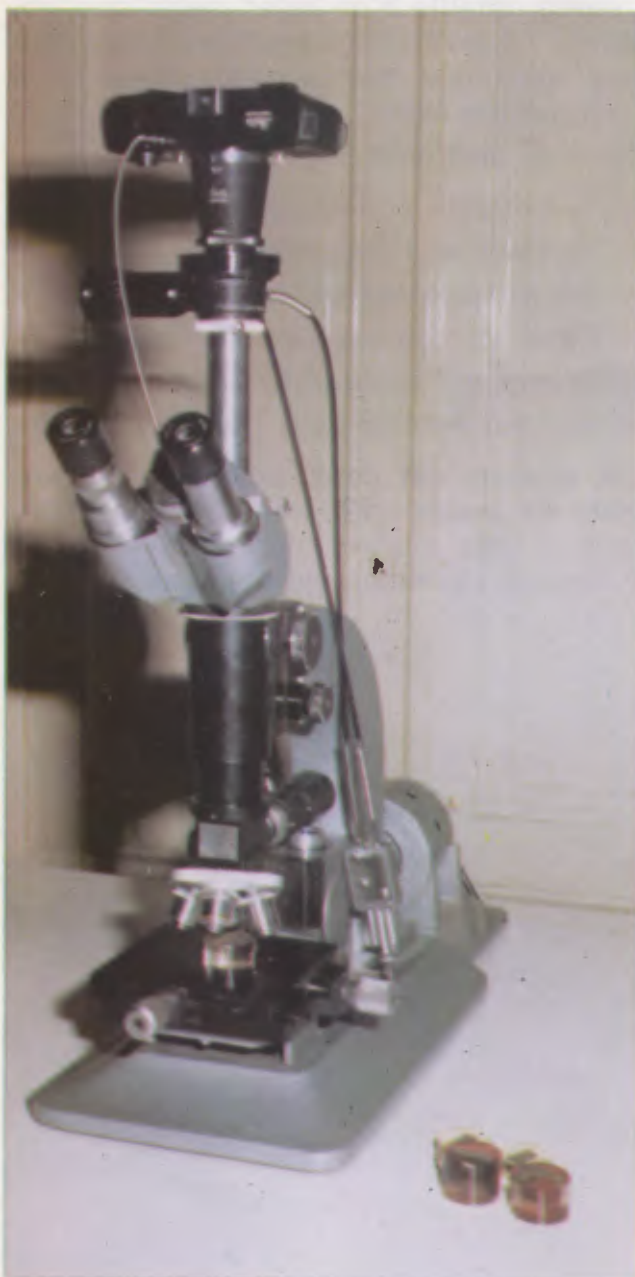


Fig. 72: A small metallographic microscope equipped to take photographs. All the micrographs and observations in this study were carried out with this equipment. To the right of the microscope are two samples.

Fig. 72: Petit microscope métallographique équipé pour la photo. Toutes les observations et les microphotographies de ce recueil ont été réalisées avec cet appareil. À droite se trouvent deux échantillons.

Metallography is the study of the structure and properties of metals and their alloys. The study is carried out by metallographic examinations, amongst others. The principle is simple: a very small sample is prepared to enable its texture to be observed by an optical (Fig. 72 and 73) or electronic microscope in order to reveal the nature of the metal, its composition, if it is a pure metal or an alloy, and the treatments to which it has been subjected during its manufacture. The information furnished is more complete than that resulting from chemical and physical analyses. Moreover, metallographic microscopes may be used in conjunction with microwave analysers (Fig. 74) allowing an exact analysis to be obtained from a very restricted area.

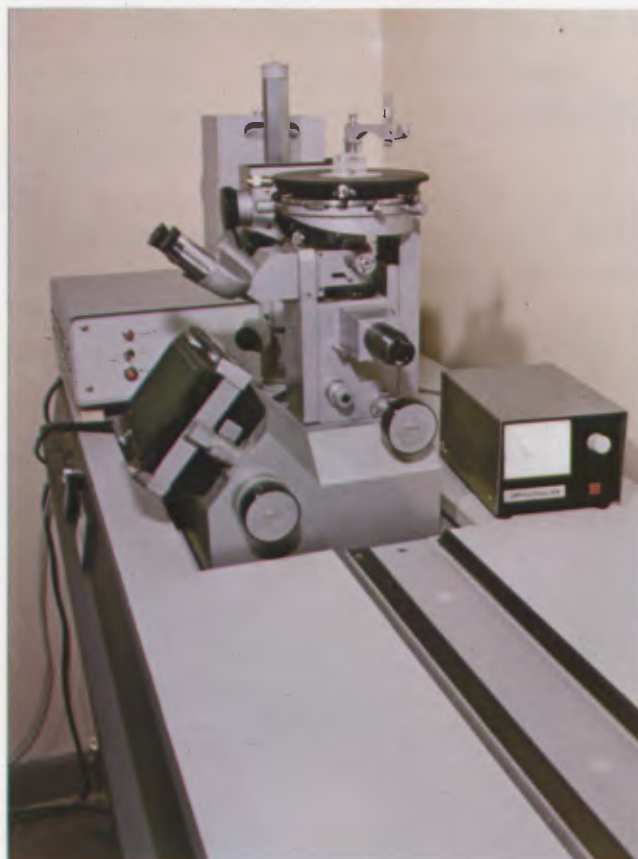


Fig. 73: Microscope métallographique avec lampe à halogène à basse tension et lampe au xénon. Appareil monté sur banc optique avec cellule automatique pour reprise photographique. Agrandissement maximum $\times 1200$.

Fig. 73: Metallographic microscope with low-tension halogen lamp and xenon lamp. Apparatus mounted on optical bench with automatic cell for taking photos. Maximum enlargement, 1200 $\times$.

● ANNEXE N° 1: QU'EST-CE QUE LA METALLOGRAPHIE?

La métallographie est l'étude de la structure et des propriétés des métaux et de leurs alliages. Cette étude se fait entre autres par des examens métallographiques. Le principe en est simple: un très petit échantillon est préparé pour que sa texture puisse être observée au microscope optique (Figs. 72 et 73) ou électronique de manière à révéler la nature du métal, sa composition, qu'il s'agisse d'un métal pur ou d'un alliage, et les traitements qu'il a subis au cours de l'élaboration de l'objet. Les renseignements ainsi fournis sont infiniment plus complets que ceux résultant des analyses chimiques et physiques. En outre, les microscopes métallographiques peuvent être associés à des analyseurs — microsondes — (Fig. 74) permettant une analyse ponctuelle en un point extrêmement réduit.

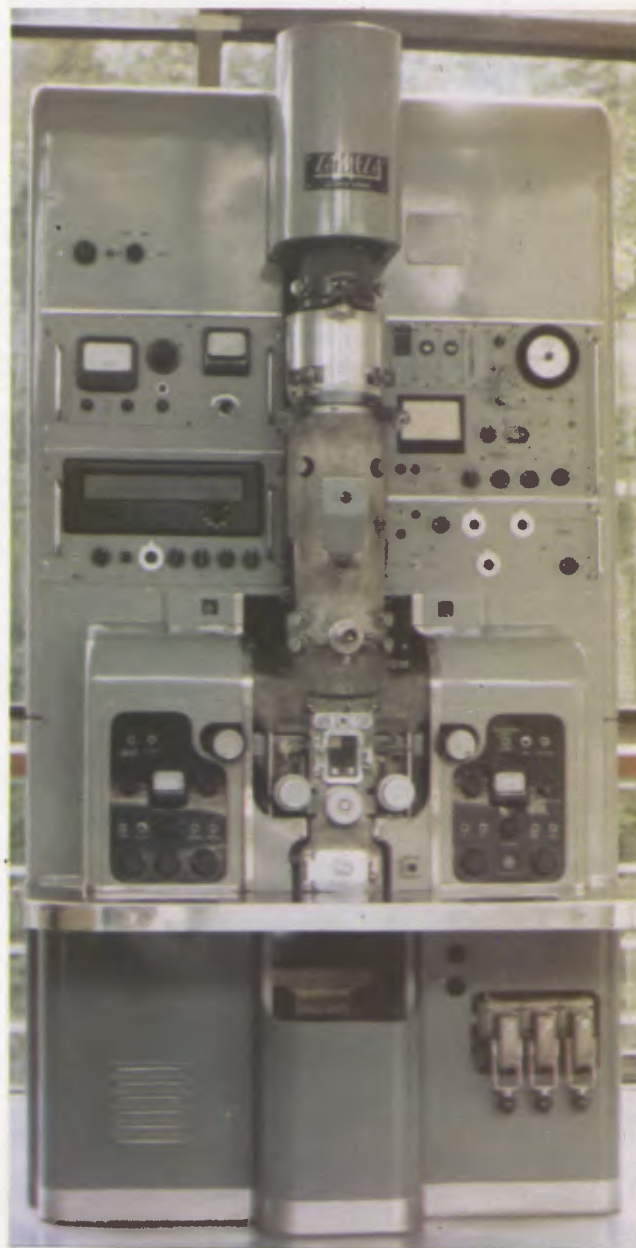


Fig. 74: Microsonde.

Fig. 74: Micro-probe.

● **APPENDIX 2: IS A METALLOGRAPHIC EXAMINATION A NECESSARY ADJUNCT TO CONSERVATION WORK?**

To study or treat most objects it is not usually necessary to resort to a metallographic examination as a means of research.

However, when a specific study of an object, or series of objects, is required from a historical point of view (a study of ancient techniques), or for conservation, then the information supplied by a metallographic examination is essential.

The importance of the knowledge of ancient techniques demands the detailed study, and justifies the partial destruction of metal material in the form of fragments of no aesthetic or typological value usually available in abundance in excavation or museum storerooms.

It should be added that the current practice of metallography requires basic equipment of a certain cost (around \$6,000), and experience in the reliable interpretation of the results requires serious training and considerable practice.

● **ANNEXE N° 2: DE LA NECESSITE DE FAIRE
UN EXAMEN METALLOGRAPHIQUE POUR
LA CONNAISSANCE D'UN OBJET ANCIEN**

L'examen métallographique est un moyen de recherche auquel il n'est généralement pas nécessaire d'avoir recours pour l'étude ou traitement de la plupart des objets.

Cependant, quand l'étude spécifique d'un objet ou d'une série d'objets est nécessaire, soit du point de vue historique (étude des techniques anciennes) soit pour la conservation, les données fournies par l'examen métallographique sont essentielles.

Par ailleurs, la connaissance des techniques anciennes autorise l'étude approfondie et partiellement destructive de matériel métallique à l'état de fragments sans intérêt esthétique ni typologique que l'on trouve en abondance dans les dépôts de fouilles ou dans les réserves des musées. Cependant si la pratique de la métallographie courante ne nécessite qu'un matériel simple et d'un coût limité (au maximum \$ 6,000), l'interprétation des images nécessite une formation sérieuse et une bonne pratique.

● APPENDIX 3: HOW IS A METALLOGRAPHIC EXAMINATION CARRIED OUT?

A metallographic examination is the study of metals and their alloys by optical means.

It is carried out by: macrography, examination with the naked eye, with a magnifying glass (magnified $10\times$), with a simple microscope (magnified $50\times$); micrography, examination with a reflecting microscope (magnified up to $1,000\times$). Depending on the equipment, it is sometimes possible to take photographs of the metals under study.

The study is carried out on a perfectly polished piece of the object. The surface must be at least 0.5 mm^2 . There are three methods of obtaining such a surface:

- 1) **directly from the object** - An already existing break, or a spot where the metal is exposed or can be exposed, must be located (Figs. 75, 76 & 77);
- 2) **from a sample** - A very small sample is taken from the object and placed in a block of plastic to facilitate handling (Figs. 5, 6, 7 & 8);
- 3) **from a transparent replica** - The replica is obtained by taking a fine moulding of the prepared surface of the object under consideration.

The surface to be studied must be polished and then, if necessary, etched with an appropriate chemical product which reveals the structure by etching in various ways the different component parts, or by highlighting the direction in which the grains are orientated.



Fig. 75: Direct examination. A small surface area has been removed and several millimetres polished. Magnified $3\times$.

Fig. 75: Examen direct: une petite surface a été décapée et polie sur quelques millimètres. $\times 3$.

● ANNEXE N° 3: COMMENT REALISER UN EXAMEN METALLOGRAPHIQUE?

L'examen métallographique est l'étude des métaux et de leurs alliages par des moyens optiques. Il se fait par macrographie: examen à l'oeil nu, à la loupe ($\times 10$) ou au microscope simple ($\times 50$); par micrographie, examen avec un microscope par réflexion (jusqu'à $\times 1000$).

Suivant les appareils, il est possible de prendre des photographies des métaux observés.

L'observation se fait sur une surface parfaitement polie de l'objet. Cette surface doit avoir au minimum $0,5 \text{ mm} \times 0,5 \text{ mm}$. Il y a trois méthodes pour obtenir cette surface:

- 1) **sur l'objet** - Il faut trouver, soit une cassure existant déjà, soit un endroit où le métal est à nu ou peut être mis à nu (Figs. 75, 76 & 77);
- 2) **sur un échantillon** - Un très petit échantillon est prélevé sur l'objet et monté dans un bloc de plastique pour en faciliter la manipulation (Figs. 5, 6, 7 & 8);
- 3) **sur réplique transparente** - Cette réplique est obtenue par moulage pelliculaire de la surface préparée de l'objet considéré.

La surface à étudier sera polie puis, si nécessaire, attaquée par un produit chimique approprié destiné à révéler la structure en attaquant d'une façon différente tel ou tel constituant ou en faisant ressortir les sens d'orientation des grains.



Fig. 76: Les dimensions réduites de l'objet permettent de le placer sur la platine du microscope métallographique.

Fig. 76: The small dimensions of the object allow it to fit in its entirety under the metallographic microscope.

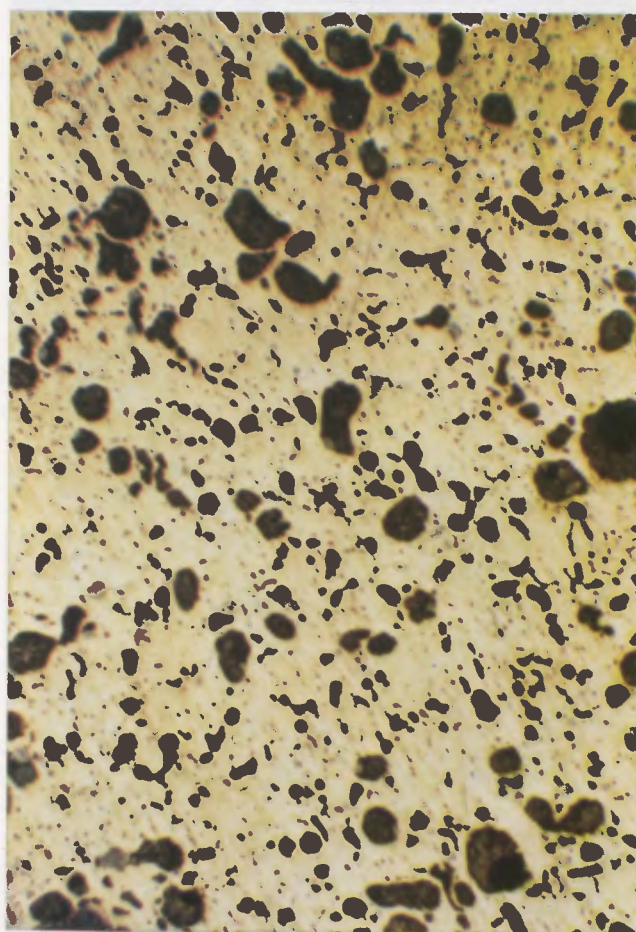


Fig. 77: La micrographie de cette plage révèle la structure et la nature du métal. Bronze pauvre en étain, coulé et non recuit, forte teneur en plomb, moins de 5 % d'étain. $\times 120$.

Fig. 77: Micrography of this area reveals the structure and nature of the metal. Bronze with a low tin content, cast and not reheated, high lead content, less than 5 % tin. Magnified $120 \times$.

● APPENDIX 4: RADIOGRAPHY

Metals are, to a certain extent, penetrable by X-rays (Röntgen).

Therefore, a radiographic examination is sometimes useful for a knowledge of metal objects.

The presence of different metals (incrustations), soldered joints, and the state of corrosion can be ascertained by this method.

This examination can also prove indispensable in certain cases like the study and treatment of heavily corroded metal objects; the three photos of a Merovingian belt plaque made of iron inlaid with silver illustrate such a case.



Fig. 78: Before treatment the decoration is covered by a thick layer of corrosive products.

Fig. 78: Avant traitement, le décor est recouvert par une couche épaisse de produits de corrosion.

● ANNEXE N° 4: RADIOGRAPHIE

Les métaux sont plus ou moins pénétrables par les rayons X (Röntgen).

L'examen radiographique est donc parfois utile pour la connaissance des objets métalliques.

On décèle ainsi la présence de métaux divers (incrustations), les assemblages et soudures, l'état de la corrosion.

Cet examen peut se révéler indispensable dans certains cas comme par exemple l'étude et le traitement des objets métalliques fortement corrodés illustrés ici par 3 photos d'une plaque de ceinture mérovingienne en fer incrusté d'argent.

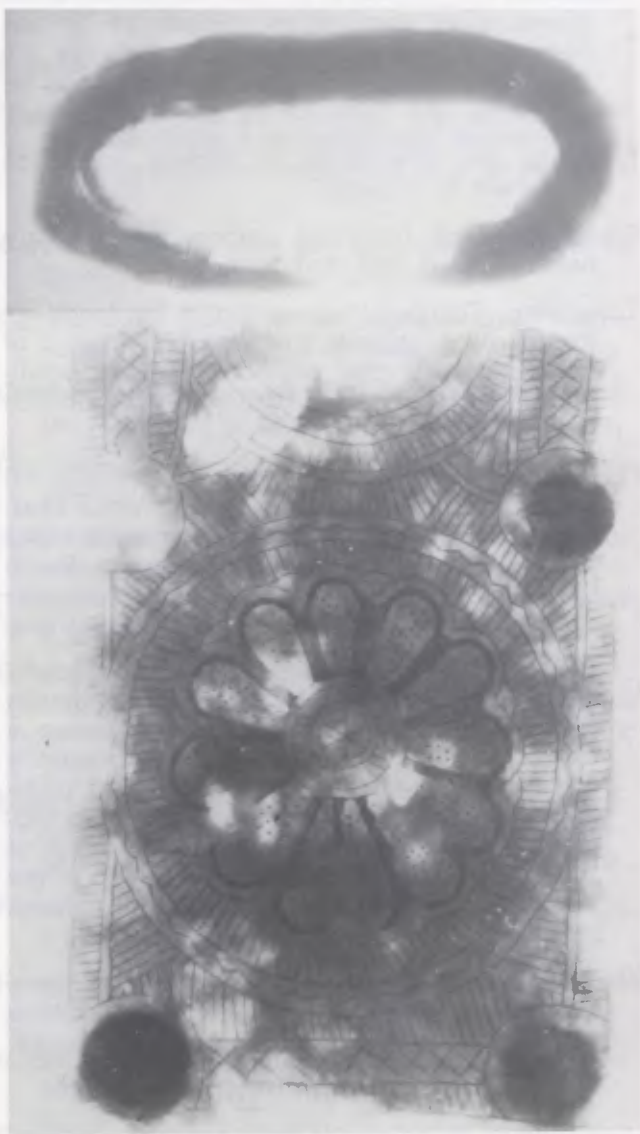


Fig. 79: Radiographie, le fer et les oxydes sont plus perméables aux rayons X que l'argent qui est cependant très mince.

Fig. 79: X-ray; the iron and the oxides are more receptive to the X-rays than the silver, even though the latter is very thin.



Fig. 80: Après traitement par enlèvement mécanique (décapage) des produits de corrosion, le décor apparaît intact.

Fig. 80: After the corrosion has been treated and mechanically removed, the embellishment appears intact.

● GLOSSARY

Alloy: Association of metals to a dominant metal of which they are then characteristic.

Annealing: Heating a metal to a fairly high temperature and then cooling it slowly. This restores to a metal the properties lost as a result of thermal or mechanical treatment.

Brass: Alloy of copper and zinc.

Bronze: Alloy of copper and tin.

Carat: Unit of weight for precious stones equal to two decigrammes. An amount of pure gold in an alloy equal 1/24 of the total mass.

Carburized: Used of iron containing a little carbon.

Cast Iron: Iron and carbon containing between 2% and 6,7% carbon.

Cementation: Operation by which some carbon is superficially incorporated in an iron.

Cementite: Component of cast irons containing iron and 6.67% carbon.

Corrosion: The effect of chemical reactions on the structure of metals.

Eutectic: Heterogeneous component of alloys, formed by two or more solid phases which solidify simultaneously at a constant temperature.

Eutectoid: Of structure identical to that of an eutectic, produced at a lower temperature form a solid solution.

Ferrite: Alpha iron dissolves very little carbon, less than 0.02%.

Grain: Crystalline polyhedron which forms when metals of alloys solidify.

Graphite: Free crystalline carbon forming cast irons the properties of which are determined by its form and distribution.

Hardening: Thermal treatment which consists of heating an alloy to a high temperature and then cooling it rapidly in a determined environment.

Martensite: Extremely hard component of steels which forms following rapid cooling (hardening). It is a super-saturated solution of iron carbide in iron.

Pearlite: Component of iron-carbon alloys, composed of 87% ferrite and 13% cementite, a total of 88% carbon.

Phase: Homogeneous component of a physical system having a determined chemical composition and showing no separation surface. A pure metal has only one phase, an alloy usually has two or three.

Reduction: Elimination of oxygen and certain other elements by combination. Reduction is carried out at a high temperature with the addition of carbon to liberate a metal from its ore.

Refining: The elimination of certain impurities contained in a metal.

Steel: Alloy of iron and carbon, intermediate between cast iron and iron.

Tempering: Thermal treatment of a hardened alloy to return it from a state which is out of equilibrium to the physico-chemical equilibrium. Tempering of a hardened steel makes it less fragile.

Thermal Treatment: Operations during which metal pieces are subjected to thermal cycles: heating or cooling, always in a solid state, in order to modify the properties of the metals. These treatments do not change the chemical composition of an alloy but provoke physico-chemical or structural modifications.

Welding: Processes which allow two metal pieces to be closely joined either by the simultaneous fusion of the surfaces of two pieces of the same metal (welding iron at the forge) or by introducing a more fusible metal (welding copper to tin) or by lowering the melting point of a metal by introducing a metallic salt to the part to be welded which, on heating, produces an alloy with a lower melting point.

Work-hardening: Modification in the properties of a metal or an alloy following crystalline deformation caused by mechanical cold working, for example, hammering.

Most of these definitions are extracts from the Dictionnaire de Métallurgie by O. BADER et M. THERET cited in the bibliography.

● GLOSSAIRE

Acier: Alliage fer-carbone, intermédiaire entre la fonte et le fer.

Affinage: Élimination de certaines impuretés contenues dans un métal.

Alliage: Association de métaux à un métal dominant qui le caractérise.

Bronze: Alliage cuivre-étain.

Carat: Unité de poids pour les pierres précieuses valant 2 décigrammes. Partie d'or fin dans un alliage représentant 1/24 de la masse totale.

Carburé: Se dit d'un fer contenant un peu de carbone.

Cémentation: Opération par laquelle on incorpore superficiellement du carbone à un fer.

Cémentite: Constituant des fontes composé de fer et de 6,67% de carbone.

Corrosion: Effet de réactions chimiques sur la structure des métaux.

Ecrouissage: Modification des propriétés d'un métal ou d'un alliage à la suite d'une déformation cristalline due à un travail mécanique à froid, comme le martelage.

Eutectique: Constituant hétérogène des alliages, formé de deux ou plusieurs phases solides qui se solidifient simultanément à température constante.

Eutectoïde: Structure identique à celle d'un eutectique, qui se produit à une température plus basse, à partir d'une solution solide.

Ferrite: Fer alpha dissolvant très peu de carbone, moins de 0,02%.

Fonte: Alliage de fer et de carbone contenant de 2 à 6,7% de C.

Grain: Polyèdres cristallins qui se forment à la solidification des métaux et alliages.

Graphite: Carbone libre et cristallisé, constituant des fontes dont il détermine les propriétés par sa forme et sa répartition.

Laiton: Alliage de cuivre et de zinc.

Martensite: Constituant très dur des aciers qui se forme lors d'un refroidissement rapide

(trempe). C'est une solution sursaturée de carbure de fer dans le fer.

Perlite: Constituant des alliages fer-carbone, composé de 87% de ferrite et 13% de cémentite, soit en tout 0,88% de C.

Phase: Constituant homogène d'un système physique ayant une composition chimique déterminée et ne présentant aucune surface de séparation. Un métal pur ne contient qu'une seule phase, un alliage en contient en général 2 ou 3.

Recuit: Chauffage d'un métal à une température plus ou moins élevée suivi d'un refroidissement lent. Il rend au métal ses propriétés perdues à la suite de traitements thermiques ou mécaniques.

Réduction: Élimination dans une combinaison de l'oxygène et de certains éléments. La réduction se fait à haute température et en ajoutant du carbone afin de libérer un métal de son minerai.

Revenu: Traitement thermique d'un alliage trempé destiné à ramener près de l'équilibre physico-chimique un état hors équilibre. Le revenu d'un acier trempé le rend moins fragile.

Soudure: Procédés permettant d'assembler intimement deux pièces métalliques soit par fusion simultanée des surfaces de deux pièces d'un même métal: soudure à la forge du fer, soit par apport d'un métal plus fusible: soudure à l'étain du cuivre, soit par abaissement ponctuel du point de fusion d'un métal par apport d'un sel métallique produisant au chauffage un alliage à plus bas point de fusion.

Traitement thermique: Opérations au cours desquelles des pièces métalliques sont soumises à des cycles thermiques: chauffage ou refroidissement pour modifier leurs propriétés sans quitter l'état solide. Ces traitements ne changent pas la composition chimique d'un alliage mais provoquent des modifications physico-chimiques ou structurales.

Trempe: Traitement thermique qui consiste à chauffer un alliage à une température élevée puis à la refroidir rapidement dans un milieu déterminé.

Ces définitions sont en général extraites du Dictionnaire de Métallurgie de O. BADER et M. THERET mentionné dans la bibliographie.

● **SOME ADDRESSES OF MANUFACTURERS
AND SUPPLIERS**

BARBIER-BENARD & TURENNE
82 rue Curial
75940 Paris Cedex 19
France
Telephone: (331) 203 94 90
Telex: 670 804 BBT F
Cable: Faros Paris 076

BUEHLER LTD.
2120 Greenwood Street
P.O. Box 1459
Evanston, IL 60204
U.S.A.
Telephone: 312-475-2500
Telex: 72 44 04
Cable: Buehlermet

BUEHLER-MET A.G.
Hochstrasse 100
Postfach
4018 Basel
Switzerland
Telephone: (061) 50 03 03
Telex: 62084

F.P. DUJARDIN & CO.
Wiesenstr. 16
2111 Düsseldorf
Federal Republic of Germany
Telephone: (2111) 501141

FISHER SCIENTIFIC
International Division
52 Fadem Road
Springfield NJ 07081
U.S.A.
Telephone: (201) 379 1400
Telex: 138 287
Cable: Fishersci, Springfield N.J.
with branch offices in Zurich; Munich;
Mexico City and Puerto Rico

ERNST LEITZ WETZLAR GmbH
Postfach 2020
6330 Wetzlar
Federal Republic of Germany
Telephone: (6441) 291
Telex: 483 849

METALLURGICAL SERVICES Laboratories Ltd.
Reliant Works
Brockham
Betchworth
Surrey RH3 7HW
United Kingdom
Telephone: (73784) 2461
Telex: 28333

NACHET
106 rue Chaptal
92306 Levallois
France
Telephone: (331) 757 31 05
Telex: 620111 Sopelem

W. PABISCH S.p.A.
Via Fogazzaro, 36
20134 Milan
Italy
Telephone: (02) 5491
Telex: 32 12 19 Wipami I

REICHERT A.G.
Hernalser Hauptstrasse 219
1170 Vienna
Austria
Telephone: (22) 46 16 410
Telex: 74 872 CRA
Cable: Reichertwerke - Vienna

SEIWA Optical
12-17, Yayoi-cho, 4-Chome
Nakano-ku
Tokyo 164
Japan
Telephone: 03 (383) 6301
Telex: 232 40 69 Seiwa G
Cable: Suzuseioptic Tokyo

UNION Optical
20-à, Simura 2-Chome
Itabashi-ku
Tokyo 174
Japan
Telephone: 03 (966) 2201
Telex: 27 22 043 Uniopt G

Samples of metal cross sections prepared and
described at:

F.P. Dujardin & Co.
Metallurgical Services
Nachet

● **QUELQUES FOURNISSEURS ET FABRICANTS**

BARBIER-BENARD & TURENNE

82 rue Curial
75940 Paris Cedex 19
France
Téléphone: (331) 203 94 90
Télex: 670 804 BBT F
Cable: Faros Paris 076

BUEHLER LTD.

2120 Greenwood Street
P.O. Box 1459
Evanston, IL 60204
U.S.A.
Téléphone: 312-475-2500
Télex: 72 44 04
Cable: Buehlermet

BUEHLER-MET A.G.

Hochstrasse 100
Postfach
4018 Bâle
Suisse
Téléphone: 061/50.03.03
Télex: 62084

F.P. DUJARDIN & CO.

Wiesenstr. 16
2111 Düsseldorf
République fédérale d'Allemagne
Téléphone: (2111) 501141

FISHER SCIENTIFIC

International Division
52 Fadem Road
Springfield, NJ 07081
U.S.A.
Téléphone: (201) 379 1400
Télex: 138 287
Cable: Fishersci, Springfield N.J.
avec succursales à Zurich, Munich, Mexico
et Puerto Rico

ERNST LEITZ WETZLAR GmbH

Postfach 2020
6330 Wetzlar
République fédérale d'Allemagne
Téléphone: (6441) 291
Télex: 483 849

METALLURGICAL SERVICES Laboratories Ltd.

Reliant Works
Brockham
Betchworth
Surrey RH3 7HW
Grande Bretagne
Téléphone: (73784) 2461
Télex 28333

NACHET

106 rue Chaptal
92306 Levallois
France
Téléphone: (331) 757 31 05
Télex: 620111 Sopelem

W. PABISCH S.p.A.

Via Fogazzaro, 36
20135 Milan
Italie
Téléphone: (02) 5491
Télex: 32 12 19 Wipami I

REICHERT A.G.

Hernalser Hauptstrasse 219
1170 Vienne
Autriche
Téléphone: (222) 46.16.410
Télex: 74 872 CRA
Cable: Reichertwerke - Vienne

SEIWA Optical

12-17, Yayoi-Cho, 4-Chome
Nakano-ku
Tokyo 164
Japon
Téléphone: 03 (383) 6301
Télex: 232 40 69 Seiwa G
Cable: Suzuseioptic - Tokyo

UNION Optical

20-9, Shimura 2-Chome
Itabashi-ku
Tokyo 174
Japon
Téléphone: 03 (966) 2201
Télex: 27 22 043 Uniopt G

Echantillons préparés et commentés chez:
F.P. Dujardin & Co.
Metallurgical Services
Nachet

● BIBLIOGRAPHIE - BIBLIOGRAPHY

- Aitchison, L. *A History of Metals*, 2 vol., New York, 1960.
- Altmayer, M., Guillet, L. *Métallurgie du cuivre et des alliages de cuivre*, Paris, 1925.
- Bader, O. Theret, M. *Dictionnaire de métallurgie*, Paris, 1961.
- Biek, L. *Archaeology and the Microscope*, London, 1963.
- Caley, E.R. *Analysis of Ancient Metals*, Oxford, 1964.
- Caley, E.R. *Orichalcum and Related Ancient Alloys*, New York, 1964.
- C.E.C.A. *De ferri metallographia*, 3 vol., Bruxelles, Dusseldorf, Paris, 1966-67.
- Chalmers, B. *Métallurgie physique*, Paris, 1963.
- Forbes, R.J. *Metallurgy in Antiquity*, Leiden, 1950.
- Forbes, R.J. *Studies in Ancient Technology*, Leiden 1966.
- Greaves, R.H. and Wrighton, H. *Practical Microscopical Metallography*, London, 1967.
- Mehl, R.F. *Atlas of Microstructures*, Metal Handbook, vol. 7, American Society for Metals 1972.
- Mullins, W.W. and Shaw, M.C. *Metal Transformations*, New York, 1968.
- Nutting, J. and Baker, R.G. *The Microstructure of Metals*, London, 1965.
- Pariselle, H. *Cours de chimie*, T. 2 Métaux, Paris, 1956.
- Rickard, T. *Man and Metals*, 2 vol., New York, 1933.
- Rost, A. *Métaux usuels*, Lausanne, 1961.
- Rostoker, W. and Dvorak, J.R. *Interpretation of Metallographic Structures*, New York, 1965.
- Smith, C.S. *A History of Metallography*, Chicago, 1960.
- Tylote, R.F. *A History of metallurgy*, The Metals Society, London, 1976.
- Tylecote, R.F. *Metallurgy in Archaeology*, London, 1962.



Iccrom's Technical Cards

Ancient Metals: Structure and Characteristics
by Albert France-Lanord

Climate in Museums: Measurement
by Gaël de Guichen

Fiches techniques de l'Iccrom

Métaux anciens: Structure et caractéristiques
par Albert France-Lanord

Climat dans les musées: mesures
par Gaël de Guichen

XIX
FRANCE-LANORD N. B 167
Métaux Anciens, Fiches techniques



