

## Recherches techniques sur des bronzes de Gaule romaine

Maurice Picon, Stéphanie Boucher, Jeanne Condamin

---

**Citer ce document / Cite this document :**

Picon Maurice, Boucher Stéphanie, Condamin Jeanne. Recherches techniques sur des bronzes de Gaule romaine. In: Gallia, tome 24, fascicule 1, 1966. pp. 189-215;

doi : 10.3406/galia.1966.2441

[http://www.persee.fr/doc/galia\\_0016-4119\\_1966\\_num\\_24\\_1\\_2441](http://www.persee.fr/doc/galia_0016-4119_1966_num_24_1_2441)

---

Document généré le 22/03/2016

# RECHERCHES TECHNIQUES SUR DES BRONZES DE GAULE ROMAINE

par M. PICON, S. BOUCHER, J. CONDAMIN

Les recherches sur la technique antique des bronzes ont été jusqu'ici restreintes par le fait que l'on a souvent hésité à soumettre des objets considérés à divers titres comme précieux à des examens qui pouvaient en compromettre l'intégrité. Les méthodes modernes permettent de réduire au maximum les risques dans ce domaine, et les analyses de bronzes antiques se sont multipliées ces dernières années. Mais la dissémination de ces études, d'une part, leur limitation à de très petits groupes d'objets, d'autre part, ont réduit la portée des constatations que seule une étude de quelque ampleur peut proposer.

D'heureuses circonstances nous ont permis d'envisager une telle étude : M. J. Ruf, Conservateur du Musée de Vienne et M. A. Audin, Conservateur du Musée gallo-romain de Fourvière ont bien voulu mettre à notre disposition le matériel antique dont ils disposaient. Il nous a été possible, grâce à eux, d'analyser une centaine d'objets, dont certains ont été soumis à plusieurs prélèvements. Les résultats, pour positifs qu'ils soient, ne sont encore qu'un point de départ pour des études plus vastes. Toutes les questions qui se sont présentées ne sont pas abordées ici, pas plus que ne peuvent être encore résolus tous les problèmes qui se posent. Cette étude est donc une première étude, que d'autres résultats viendront enrichir et compléter.

Les bronzes antiques analysés ont été choisis dans des registres aussi variés que possible : statues, statuettes, vases, patères, miroirs, etc. Le matériel dont disposent les musées de Vienne et de Fourvière comprend un certain nombre d'objets étrusques d'importation antique ou moderne ; quelques-uns ont été examinés ; ils couvrent dans le temps une vaste période, puisque le plus ancien date du VII<sup>e</sup> siècle avant J.-C. et le plus récent du II<sup>e</sup> siècle. Mais c'est aux objets romains et gallo-romains que nous nous sommes jusqu'ici plus particulièrement intéressés ; ils sont également dispersés dans le temps mais datent pour la plupart des II<sup>e</sup> et III<sup>e</sup> siècles après J.-C. Parmi eux se trouvent quelques pièces inspirées des créations gréco-alexandrines mais très probablement dues à des artistes italiens.

L'origine des objets d'époque romaine pose un problème important. Ont-ils été fabriqués en Gaule et plus précisément dans la région de Vienne-Lyon ? Dans ce cas, ils pourraient correspondre à des techniques locales différentes des techniques italiennes.

En fait, pour beaucoup d'entre eux, l'origine est incertaine ou inconnue ; il est évident aussi que la plupart ont été soit importés d'Italie (dans l'Antiquité ou récemment), soit fabriqués en Gaule selon des procédés techniques et artistiques empruntés aux artistes italiens ou même employés sur place par ces derniers. Aucun des objets de bronze examinés ici n'est sûrement gaulois ; aucun d'entre eux n'apparaît non plus comme d'une technique absolument étrangère à celle des autres. Nous considérerons donc, jusqu'à nouvel ordre, que cette étude concerne des bronzes que l'on peut qualifier de romains et qui apparaissent très homogènes à l'analyse.

### I. — Propriétés générales des bronzes et alliages de cuivre.

Nous groupons ici, non seulement les bronzes proprement dits, alliages de cuivre et d'étain, mais tous les alliages dont le constituant principal est le cuivre, associé ou non à un ou plusieurs des éléments suivants : étain, plomb, zinc. Ces alliages n'ont été que rarement distingués des bronzes véritables dans le domaine archéologique et il est certain qu'ils relèvent tous de l'art du bronzier. Pourtant nous essayerons de montrer qu'il existe à l'époque romaine une différenciation des alliages de cuivre, suivant le travail auquel doit être soumis le métal en vue de la fabrication des objets, ou suivant la nature de ces derniers.

Nous rappellerons d'abord les propriétés essentielles des divers groupes d'alliages, en insistant sur les plus importants.

A. BRONZES VRAIS : CUIVRE-ÉTAÏN. — Au point de vue structural, on distingue deux groupes :

1° *Les bronzes ayant moins de 13 % d'étain, constitués d'une solution solide cuivre-étain, dite phase  $\alpha$ .* Cette phase  $\alpha$  est malléable à froid, elle l'est également à chaud si les constituants de l'alliage sont suffisamment purs<sup>1</sup>. Les propriétés mécaniques : charge à la rupture, limite élastique, allongement et dureté<sup>2</sup>, augmentent régulièrement avec le pourcentage d'étain jusqu'aux environs de 10 % de ce métal, titre au-delà duquel les variations semblent devenir plus faibles. Au-delà de 13 %, ces caractéristiques se modifient très rapidement.

L'aptitude des bronzes à être coulés aisément est bien connue : cette aptitude augmente avec la proportion d'étain et s'oppose nettement aux propriétés du cuivre, particulièrement mauvaises sur ce point. La température de fusion décroît quand le pourcentage d'étain augmente. La fusion

(1) Cette restriction touche surtout les bronzes  $\alpha$  les plus riches en étain. Le plomb est, de loin, la plus importante des impuretés dans les bronzes étudiés.

(2) La charge de rupture, la limite élastique et l'allongement sont les caractéristiques mécaniques les plus couramment déterminées sur les métaux et alliages. Elles sont obtenues par essais de traction, effectués sur éprouvettes cylindriques calibrées. La première correspond sensiblement à la tension maximale supportée par l'éprouvette sans se rompre. La seconde représente la limite des efforts à ne pas dépasser sous peine de voir se produire des déformations permanentes et la dernière, la déformation plastique que le métal peut subir avant rupture. Au-delà de 13 % d'étain, ces caractéristiques sont difficiles à déterminer par suite de la fragilité consécutive à l'apparition de la phase  $\delta$ . Notons enfin que la résistance aux chocs diminue progressivement lorsque le taux d'étain s'élève de 0 à 13 %, sans qu'il y ait rien de commun avec ce que l'on observe quand se développe la phase  $\delta$ , au-delà de 13 %.

est complète aux environs de 1 025°C pour l'alliage à 10 % d'étain, à moins de 900°C pour celui à 20 %, alors que le cuivre fond seulement à 1 083°C<sup>3</sup>. Quant à la couleur de l'alliage, franchement rose pour les taux inférieurs à 5 %, elle passe progressivement au jaune-brun quand la proportion d'étain augmente.

2° Les bronzes ayant plus de 13 % et moins de 33 % d'étain<sup>4</sup>, constitués de la solution solide  $\alpha$  associée à une phase particulière cuivre-étain, dite phase  $\delta$ . La proportion de phase  $\delta$  augmente avec la concentration en étain, cette phase formant la quasi-totalité de l'alliage au voisinage des 33 % d'étain. La phase  $\delta$ , dure et fragile, n'est pas malléable. Les bronzes constitués de  $\alpha + \delta$ , en principe non malléables à froid, peuvent être forgés à chaud (à température supérieure à 600°C), la phase  $\delta$  ne subsistant pas à température élevée. Ils peuvent être également martelés à froid, après chauffage entre 600 et 800°C suivi d'une trempe rapide évitant la formation de la phase  $\delta$ . Notons cependant que l'effet de cette trempe paraît s'atténuer considérablement pour les taux d'étain supérieurs à 25 %<sup>5</sup>.

Les propriétés mécaniques les plus notables de ces alliages : dureté, fragilité, sonorité, augmentent avec le pourcentage d'étain. Ces bronzes ont en outre d'excellentes qualités de fonderie dues à leur taux d'étain élevé. La température à partir de laquelle la fusion est complète (que nous avons signalée comme déjà inférieure à 900° pour un taux d'étain de 20 %) n'est plus que de 760°C à 30 %. Notons enfin que la couleur jaune-brun de l'alliage s'éclaircit nettement au-delà de 15 % d'étain pour devenir presque blanche aux taux supérieurs à 25 %.

B. LAITONS : CUIVRE-ZINC. — Jusqu'à près de 40 % de zinc, les laitons sont constitués d'une solution solide cuivre-zinc, dite phase  $\alpha$ <sup>6</sup>. Cette phase  $\alpha$  est malléable à froid, elle l'est également à chaud si les constituants de l'alliage sont suffisamment purs<sup>7</sup>. L'influence de l'addition de zinc sur les propriétés mécaniques n'a pas l'importance de celle due à l'étain, surtout lorsque le pourcentage de zinc est inférieur à 20 %. Dans ce domaine de concentrations, les laitons ont des propriétés mécaniques qui rappellent celles du cuivre dont ils possèdent la malléabilité, supérieure à celle des bronzes. Les laitons ont de bonnes qualités de fonderie, surtout pour les alliages à plus de 25 % de zinc. La température de la fusion décroît quand le pourcentage de zinc augmente. La fusion est complète aux environs de 1 050°C pour l'alliage à 20 % et à 950°C pour celui à 30 %<sup>8</sup>. Ici la couleur a une importance toute spéciale ; elle reste proche de celle du cuivre jusqu'aux environs de 10 % de zinc<sup>9</sup>, vire progressivement à une teinte or, entre 15 et 20 %, pour prendre ensuite une coloration or-vert à 25 % et revenir à une teinte or, plus claire, aux environs de 40 %.

C. BRONZES ET LAITONS AU PLOMB. — Il s'agit des deux alliages précédents, bronzes vrais et laitons, avec addition d'une quantité de plomb qui dépasse rarement 30 % du poids total de l'alliage, plomb compris. Cette limitation est imposée par la difficulté d'éviter la ségrégation du

(3) G. V. RAYNOR, Inst. Metals (London), *Diagram Series*, n° 2, 1944.

(4) Les valeurs exactes de ces limites peuvent être discutées mais cela présente peu d'intérêt. En effet, l'état structural des bronzes à la température ordinaire est en faux équilibre et dépend de la vitesse de refroidissement ainsi que nous l'indiquerons en quelques cas (voir, par exemple, la question de la trempe, et note 22).

Quelques bronzes à plus de 33 % d'étain ont été signalés dans les fabrications antiques (miroirs). Nous n'avons pas rencontré de taux aussi élevés et n'avons donc pas cru nécessaire de résumer les propriétés de tels alliages.

(5) La question de la trempe des bronzes anciens est importante et sera discutée plus loin. Voir *infra*, p. 197.

(6) On rappelle que le laiton semble n'avoir jamais été fabriqué dans l'Antiquité en alliant directement le cuivre et le zinc, ce dernier métal paraissant inconnu. Cf. R. J. FORBES, *Studies in ancient technology*, VIII (Leiden, Brill, 1964). Une des conséquences de l'élaboration particulière des laitons dans l'Antiquité est leur taux de zinc toujours faible, qui dépasse rarement 20 à 25 %.

(7) Remarques analogues à celles de la note 1, p. 190.

(8) G. V. RAYNOR, Inst. Metals (London), *Diagram Series*, n° 3, 1944.

(9) Nous montrerons plus loin (v. l'Appendice) que les laitons ayant moins de 10 % de zinc ont été introduits dans les alliages exactement de la même manière que le cuivre, dont ils n'ont sans doute pas été distingués.

plomb<sup>10</sup>, difficulté qui croît avec le pourcentage de cet élément. En première approximation, on peut admettre que la structure des bronzes et des laitons n'est pas perturbée par l'addition de plomb, ce métal gardant sa personnalité dans l'alliage, où il s'isole dans la masse, à l'état de globules, au cours de la solidification (fig. 1). Jusqu'à 2 ou 3 % de plomb, les propriétés mécaniques : charge à la rupture, limite élastique, allongement, varient peu. La malléabilité à froid des solutions solides  $\alpha$  change également peu, par contre leur malléabilité à chaud n'existe plus guère que pour les alliages les plus voisins du cuivre. Au-delà de 2 ou 3 % de plomb, les propriétés mécaniques s'altèrent rapidement. L'alliage résiste mal aux efforts de traction, de même qu'aux flexions et aux torsions. La malléabilité à froid des solutions solides  $\alpha$  est très réduite, leur malléabilité à chaud disparaît pratiquement<sup>11</sup>.

À l'encontre des effets précédents, qui enlèvent aux alliages un certain nombre de qualités, l'addition de plomb leur confère deux propriétés particulièrement intéressantes :

la température de fusion est notablement abaissée lorsque le pourcentage de plomb s'élève. Par exemple, si on ajoute à un bronze ayant 9 % d'étain le cinquième de son poids de plomb, la température du début de solidification de l'alliage décroît de près d'une centaine de degrés. Il en résulte des facilités de coulage très grandes mais en contrepartie la nécessité d'obtenir un refroidissement suffisant pour que les phénomènes de ségrégation restent peu développés :

l'aspect sans doute le plus intéressant des effets dus au plomb, réside dans la facilité de travail de ces alliages par toutes les méthodes qui procèdent par arrachement de métal : travail à la lime et au burin, perçage, sciage, etc. ; le phénomène est probablement lié à la texture discontinue de l'alliage où les grains de plomb forment une succession de zones faibles qui favorisent l'arrachement<sup>12</sup>.

La couleur des alliages est modifiée, elle aussi, par adjonction de plomb : elle s'éclaircit progressivement en prenant une teinte grisâtre lorsque le pourcentage de ce métal augmente.

D. ALLIAGES COMPLEXES DE CUIVRE. — Les seuls alliages de ce type que nous ayons rencontrés contiennent à la fois de l'étain et du zinc, ainsi que du plomb<sup>13</sup>. Il n'est pas question de résumer ici les propriétés de ces alliages, qui sont trop variées. Indiquons seulement que l'étain associé au zinc dans les alliages cuivreux a généralement une importance structurale supérieure à celle de ce deuxième élément. Par exemple, les alliages ayant plus de 10 % de zinc et de 5 à 10 % d'étain sont tous plus proches des bronzes que des laitons. D'une manière générale, il y a peu de

(10) À l'état liquide, le plomb est dissous dans la masse de l'alliage, qui est donc homogène (cette homogénéité dans la phase liquide disparaît elle-même si l'on continue à augmenter la quantité de plomb ; c'est le cas par exemple, au-delà de 40 %, pour l'alliage cuivre-plomb). Au moment où l'alliage commence à se solidifier, entre 800 et 1000° C. par exemple, les premiers cristaux formés, riches en cuivre, ne contiennent pratiquement pas de plomb. Si la vitesse de refroidissement n'est pas suffisante, les cristaux et le liquide restants peuvent se séparer par différence de densité ; l'alliage se trouvera ainsi enrichi localement en plomb : on dit qu'il y a ségrégation. Le phénomène est important dans les alliages antiques, particulièrement dans les grands bronzes. Voir p. 199 et p. 207.

(11) Les alliages riches en plomb, particulièrement les bronzes architecturaux et les grands bronzes, résistent très mal à une élévation de température de quelques centaines de degrés. Cela résulte essentiellement des ségrégations locales de plomb, fréquentes dans ces ouvrages. Dès 327°C, le plomb entre en fusion et l'alliage perd progressivement toute cohésion dans les régions où la ségrégation est importante. Beaucoup de destructions partielles de bronzes antiques par incendie paraissent s'être produites de la sorte.

(12) Un caractère comme la facilité de travail par arrachement de métal a d'autant plus d'importance que l'outillage de l'époque est plus primitif. À cet égard, l'emploi de bronzes à teneur en plomb élevée constitue dans l'Antiquité un exemple remarquable d'adaptation de la composition des alliages aux techniques de fabrication (v. p. 205).

(13) En dehors des quatre éléments constitutifs : cuivre, étain, plomb, zinc, les autres métaux présents dans les différents alliages étudiés le sont toujours dans des proportions suffisamment faibles pour qu'on puisse les considérer comme de simples impuretés. Il n'est pas impossible, par contre, que certaines de ces impuretés naturelles puissent correspondre à quelques-unes des variétés de cuivre distinguées dans l'Antiquité (PLINE, *Hist. nat.*, XXXIV, 2 à 5) mais la seule méthode qui pourrait fournir des certitudes en ce domaine serait une recherche systématique effectuée sur les lingots antiques.

différence entre les bronzes vrais et ceux dans lesquels une partie du cuivre (jusqu'à près de 20 %) est remplacée par le zinc<sup>14</sup>. Enfin le plomb joue quant à lui un rôle identique à celui qui a été signalé à propos de son introduction dans les bronzes vrais et les laitons.

## II. — Techniques de travail des bronzes et alliages de cuivre. Principes fondamentaux et méthodes d'étude.

Les techniques dont il va être question concernent les différentes manières de travailler le bronze et non la fabrication des objets. Ces deux domaines s'imbriquent étroitement et nous aurons l'occasion de signaler ici ou là quelques aspects touchant au second, mais en principe nous parlerons surtout des critères qui permettent de reconnaître le travail auquel a été soumis le métal : simple fusion, martelage etc. Il ne peut être question de les étudier avec quelque développement ; les méthodes qui permettent de reconnaître à quel travail un métal a été soumis sont actuellement très diversifiées et ne pourraient être résumées que difficilement<sup>15</sup>. Nous ne donnerons donc que les indications strictement indispensables à la lecture de cette étude et nous marquerons surtout la différence entre ce qui peut être prouvé par des méthodes de laboratoire et ce qui relève d'interprétations subjectives.

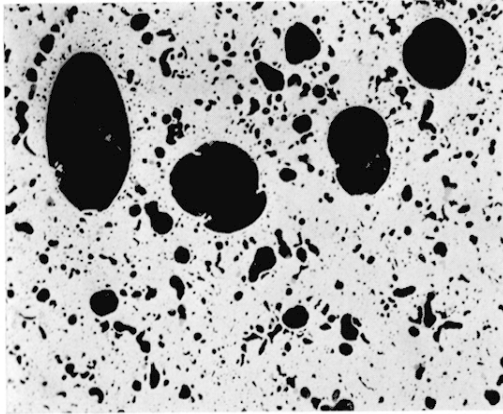
A. STRUCTURE DENDRITIQUE DES BRONZES ET ALLIAGES DE CUIVRE. — Lorsqu'on refroidit un bronze en fusion (et cela vaut aussi pour les laitons), il se forme d'abord des cristaux de la solution solide  $\alpha$ , dont la teneur en cuivre est supérieure à celle du reste de l'alliage<sup>16</sup>. Ces cristaux ont une forme ramifiée très caractéristique, dite forme dendritique (fig. 2). Le refroidissement se poursuivant, ils grossissent tout en s'enrichissant progressivement en étain et finissent par occuper tout l'espace disponible, si le bronze n'est constitué que de la solution solide  $\alpha$ . Si la phase  $\delta$  est présente, elle sera localisée sous forme d'eutectoïde ( $\alpha$ - $\delta$ )<sup>17</sup> entre les cristaux de la phase  $\alpha$  (fig. 3). — Le fait important est que la phase  $\alpha$  possède ainsi une structure hétérogène ; si l'on dispose d'un réactif qui colore en sombre les parties les plus riches en cuivre, on pourra faire apparaître sur une section polie du bronze la forme des cristaux dendritiques du début de la cristallisation : c'est le cas de la figure 2.

(14) Tous les alliages complexes de cuivre, rencontrés parmi les bronzes qui font l'objet de ce travail, seront étudiés ensemble à propos des laitons (v. l'Appendice), étant donné la présence constante de zinc dans ces alliages. Nous montrerons qu'un certain nombre d'entre eux sont probablement accidentels et n'ont sans doute pas été voulus, ni même reconnus, par le métallurgiste antique. C'est une raison supplémentaire pour expliquer le peu de développement donné aux propriétés particulières de ces alliages.

(15) Un travail de synthèse serait d'ailleurs nécessaire dans ce domaine. Certains laboratoires continuent à employer des méthodes qui ne répondent plus aux nécessités actuelles ou même dont on a démontré depuis longtemps qu'elles sont sans valeur.

(16) Ce schéma de cristallisation est celui des bronzes ayant moins de 25 % d'étain. Parmi les bronzes antiques, seuls quelques miroirs, que nous étudierons plus loin, n'entrent pas dans cette catégorie.

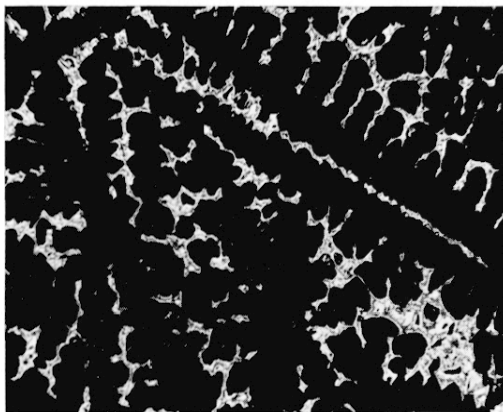
(17) Ce terme désigne une association particulière de microcristaux de la solution solide  $\alpha$ , inclus dans une matrice constituée par la phase  $\delta$ . Ces microcristaux de la phase  $\alpha$  sont de taille bien plus petite que ceux à croissance dendritique dont il vient d'être question. La proportion de phase  $\alpha$  incluse dans l'eutectoïde ( $\alpha$ - $\delta$ ), négligeable au voisinage de 13 % d'étain, augmente au détriment de la phase  $\alpha$  dendritique quand le taux d'étain s'élève ; elle finit par constituer la totalité de la phase  $\alpha$  présente dans l'alliage, au-delà de 25 %.



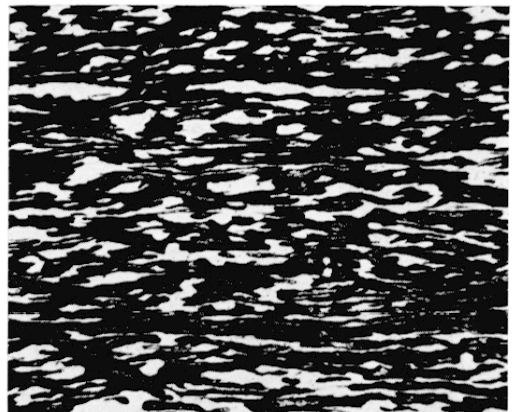
1. Structure interne du miroir n° 27. Sans attaque métallographique. Grossissement 63. On aperçoit les nombreux globules de plomb, dont la taille et la répartition ne sont pas homogènes. Ce manque d'homogénéité est encore beaucoup plus marqué dans les bronzes statuaires au plomb.



2. Structure dendritique d'un bronze coulé à 8 % d'étain. Réactif au chlorure cupro-ammoniacal. Grossissement 63.



3. Structure dendritique d'un bronze coulé à 15 % d'étain. Réactif au perchlorure de fer. Grossissement 190. On observe en blanc l'entectoïde ( $\alpha$ - $\delta$ ) qui s'isole entre les dendrites de la phase  $\alpha$  en noir.



4. Structure du bronze de la figure 2, après martelage à froid, sans recuit. Réactif au chlorure cupro-ammoniacal. Grossissement 190. (On notera que le grossissement est plus élevé que celui de la figure 2).

A chaud, la structure dendritique disparaît progressivement, selon un processus que nous indiquerons plus loin, auquel s'associe toujours une recristallisation si le métal a été travaillé. En restant au voisinage de la température ordinaire, si l'on fait subir au métal une quelconque déformation, on déforme également les dendrites : leur aspect révèle ainsi l'importance du travail à froid auquel a été soumis le métal (fig. 4).

La présence de dendrites, plus ou moins allongées sous l'effet du martelage et l'absence de recristallisation, caractérisent donc un travail du métal très primitif, sans recuit et *a fortiori*, sans trempe<sup>18</sup>. Un métal présentant les caractéristiques précédentes sans la déformation des dendrites peut être considéré comme brut de coulée.

(18) Parmi les bronzes et laitons étudiés, aucun des 18 exemplaires se présentant sous la forme d'une mince feuille de métal obtenue par martelage ne montre de structure dendritique : toutes les structures observées dans ce

B. ÉCROUISSAGE ET RECUIT. -- Au cours du martelage à froid, la résistance opposée par le métal augmente presque toujours, au fur et à mesure de la progression du travail. Tout se passe comme si le métal acquérait au façonnage des propriétés nouvelles qui lui permettent de mieux résister aux déformations qu'on lui impose. Ainsi la dureté, la charge à la rupture, la limite élastique augmentent, alors que diminue l'allongement. On dit qu'il y a écouissage du métal ; l'importance de l'écrouissage est directement liée à celle des déformations permanentes subies par le métal mais elle diminue à mesure que s'élève la température à laquelle est effectuée cette déformation.

Si l'écrouissage confère au métal des qualités fréquemment recherchées<sup>19</sup>, il en rend par contre le travail fort difficile. Les opérations de martelage, en particulier, deviennent de plus en plus délicates à mesure que diminue l'épaisseur du métal, celui-ci devenant en outre plus fragile une fois écroui. Il est donc souvent intéressant de pouvoir rendre au métal ses qualités primitives de malléabilité, notamment si l'on désire poursuivre avec plus de facilité les opérations de martelage. A cette fin on pratique un recuit, généralement aux environs de 600°C pour les bronzes et parfois à température légèrement supérieure pour les laitons. La malléabilité se trouve alors régénérée en même temps que se produisent, dans la structure de l'alliage, les modifications que voici<sup>20</sup>.

C. STRUCTURE DE RECUIT DES BRONZES ET ALLIAGES DE CUIVRE. — Lorsqu'un alliage de structure dendritique (bronze ou laiton) est porté à une température élevée, peu inférieure à sa température de fusion commençante, la phase  $\alpha$  tend à s'homogénéiser et les dendrites s'estompent en conséquence<sup>21</sup>. Cette homogénéisation est beaucoup plus lente à s'établir lorsque cette température reste très inférieure à la température de fin de solidification de l'alliage. Aussi les restes d'une ancienne structure dendritique se superposent-ils fréquemment à une structure nouvelle, qui peut résulter, entre autres, d'un recuit après écouissage. En effet, lorsqu'un métal fortement écroui, dont les cristaux sont alors dans un état de fragmentation extrême, est porté à une température élevée, il se produit une recristallisation qui donne naissance à une structure particulière très différente de la structure primitive ; elle est formée de cristaux grossièrement polyédriques et fréquemment maclés (fig. 5 et 6)<sup>22</sup>. De nombreux facteurs peuvent influencer la taille des cristaux de la nouvelle structure. On peut retenir, d'une manière très sommaire, que l'augmentation de la

groupe sont des structures de recuit (cf. même chap. : C). A des époques plus anciennes, par contre, les structures dendritiques paraissent très fréquentes, sinon même seules représentées. -- L'introduction de la technique du recuit dans le travail des bronzes constitue l'un des progrès majeurs de la métallurgie antique ; nous y reviendrons en différentes occasions.

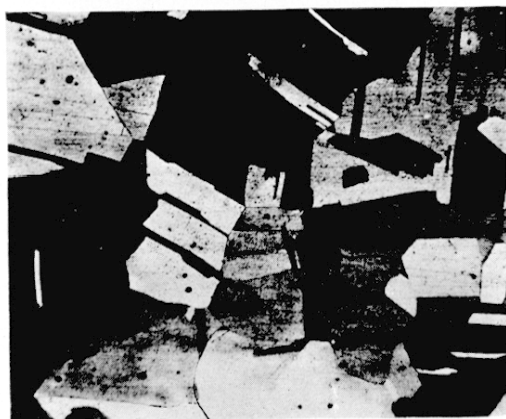
(19) Par martelage, le bronze (et le cuivre à un degré moindre) peut acquérir une assez grande dureté, techniquement suffisante pour la réalisation, à une époque où le fer était inconnu, de bien des travaux à propos desquels on avait cru pouvoir imaginer quelque mystérieux traitement de l'alliage. -- Il semble naturel que les propriétés des métaux écrouis aient été parmi les premières acquisitions de la métallurgie antique mais cela reste encore à étudier. A des époques plus tardives, ce sont les propriétés élastiques et la résistance à la fatigue qui, plus que l'augmentation de dureté devenue peu intéressante après l'introduction du fer, paraissent avoir été les qualités recherchées par écouissage (ressorts de fibules par exemple). Là aussi, une étude systématique serait souhaitable.

(20) Il faudrait distinguer plusieurs étapes dans l'adoucissement d'un métal au cours du recuit mais dans le domaine archéologique cela n'est guère possible, vu l'ignorance où l'on est généralement de l'hérédité du métal. De plus, certaines de ces étapes pourraient s'être produites spontanément à la température ordinaire, au cours du temps. Cette hypothèse a été souvent formulée à l'occasion de phénomènes divers, observés dans les alliages antiques et dont l'étude n'est pas achevée.

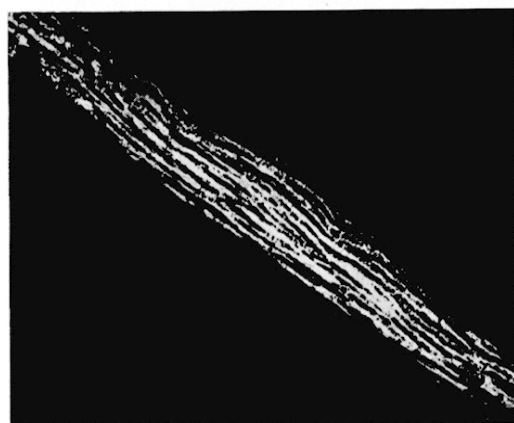
(21) On comprend aisément que la structure hétérogène de la phase  $\alpha$  peut être responsable de l'apparition dans les bronzes coulés d'une certaine quantité de phase  $\delta$ , même si les taux d'étain restent inférieurs à 13 %. Cette valeur se rapporte en effet à des bronzes supposés homogènes. Si les cristaux premiers formés sont riches en cuivre, la fraction restante de l'alliage se comporte comme un bronze dont le taux d'étain est supérieur au titre moyen de l'alliage. Pratiquement, la phase  $\delta$  apparaît dans les bronzes coulés dès que les pourcentages d'étain dépassent 8 %.

(22) On dit qu'un cristal est maclé quand certaines de ses parties ont une orientation cristalline qui diffère de celle des autres selon des lois définies. A l'examen microscopique, un cristal maclé se reconnaît par l'existence d'une ligne ou de plusieurs lignes parallèles qui délimitent à l'intérieur du cristal des domaines qui se colorent différemment (fig. 5 et 6).





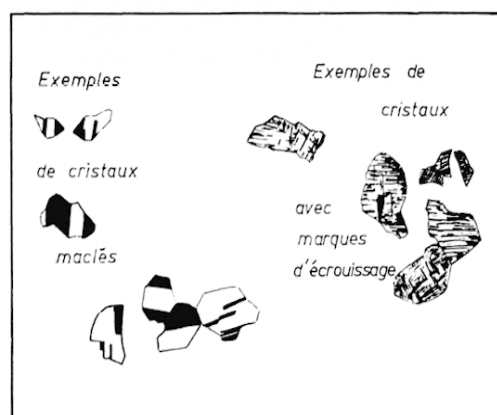
5. Structure de recuit du vase n° 1. Réactif au perchlorure de fer. Grossissement 190. On notera les cristaux maclés, de forme grossièrement polyédrique.



7. Structure macrographique du vase n° 1. Réactif au chlorure cupro-ammoniacal. Grossissement 32. Il s'agit de la structure d'ensemble caractéristique de tous les bronzes martelés, qui apparaît à une plus grande échelle que la structure de la figure 5. Sur cette figure 5, dans la partie inférieure droite, on devine d'ailleurs la structure en bandes, seule visible sur la figure 7.



a



b

6. Structure de recuit du vase n° 11. Réactif au perchlorure de fer. Grossissement 190. On notera les marques d'écroissage visibles à l'intérieur des grains et la taille de ces derniers plus réduite que celle des grains de la figure 5.

température du recuit, celle de sa durée, ainsi qu'une importance plus grande de l'écroissage, accentuent la recristallisation. Une structure qui rappelle beaucoup la précédente apparaît lorsque le métal, au lieu d'avoir été travaillé à froid et recuit, a été travaillé à chaud ; la distinction de ces deux structures n'est pas toujours très facile. On peut noter cependant que la taille des cristaux est généralement très inférieure à celle que l'on observe au recuit, après un travail à froid. Par ailleurs, un certain nombre d'indications peuvent être déduites de l'observation des marques d'écroissage.

D. STRUCTURE D'ÉCROISSAGE DES BRONZES ET ALLIAGES DE CUIVRE. — Soumis à un travail à froid, les bronzes et alliages de cuivre présentent des modifications structurales progressives, liées à l'importance des déformations subies. D'une manière très schématique, les premiers stades de l'écroissage se traduisent par l'apparition, à l'intérieur des cristaux du métal, de bandes de glissement<sup>23</sup>. Celles-ci se révèlent à l'examen métallographique par de très nombreuses stries parallèles

<sup>23</sup> Il existe une incertitude à propos de la dénomination exacte de ces bandes de glissement qui correspondent aux « slip bands » des auteurs de langue anglaise. Le phénomène est, quant à lui, très bien connu de tous ceux qui ont étudié les bronzes antiques, étant donné la mise en relief très fréquente de ces bandes par oxydation au cours du temps.

dans les grains de l'alliage (fig. 6). A un stade plus avancé, les stries et les grains se déforment, puis il y a fragmentation des cristaux, cette fragmentation pouvant aller jusqu'à la disparition totale de toute structure micrographique.

L'observation des marques d'écroissage apporte des renseignements précieux sur la technique de travail du métal. Elle permet d'apprécier l'importance du travail à froid, l'écroissage diminuant rapidement à chaud, ainsi que nous l'avons signalé. Cependant, il est bien évident que le métal se refroidit souvent au cours du travail ; aussi n'est-il pas rare que des marques d'écroissage apparaissent également dans le cas du travail à chaud. A l'opposé, le travail à froid, suivi d'un recuit trop accentué, peut faire disparaître la quasi-totalité des traces d'écroissage. Ces deux exemples montrent combien il peut être hasardeux de vouloir déterminer une technique de travail à partir d'un nombre d'objets trop réduit. Les fluctuations qui tiennent aux facteurs humains ne peuvent sérieusement être distinguées de l'essentiel qu'à partir d'un grand nombre d'observations<sup>24</sup>.

On confond trop souvent les structures que nous avons définies ici, structure dendritique et structure de recuit, avec l'aspect rubanné que présentent tous les bronzes martelés (fig. 7). Il est absolument indispensable de préciser quelles ont été les observations faites en métallographie, la seule indication d'une structure formée de bandes allongées ne prouvant absolument rien, ni que le métal a été recuit, ni qu'il ne l'a pas été<sup>25</sup>.

E. LE PROBLÈME DE LA TREMPÉ DES BRONZES. — La trempe des bronzes a été souvent présentée comme une technique courante de la métallurgie antique. Deux méthodes peuvent être suivies pour aborder une telle étude : on peut se référer aux procédés actuels et les transposer dans l'Antiquité<sup>26</sup> ; cette méthode, pratiquée d'une façon habituelle, est responsable de la plupart des erreurs répandues sur les techniques anciennes ; — une autre consiste à étudier les répercussions de l'opération de trempe sur la structure. La trempe a, entre autres effets, celui d'empêcher la formation de la phase  $\delta$  : or les bronzes martelés ayant plus de 10 % d'étain, étudiés ici, ont souvent des restes de phase  $\delta$  (voir note 22, p. 195). Par ailleurs il n'apparaît aucune distinction, du point de vue technique, entre les bronzes martelés ayant plus de 10 % d'étain et les bronzes martelés en ayant moins.

Pour le moment, nous ne possédons aucun argument qui permette d'affirmer que la trempe du bronze était connue dans l'Antiquité. En outre, il faut prendre garde au fait que la trempe peut être accidentelle pour un exemplaire et il faudrait qu'on pût l'observer sur une série d'objets pour être en droit de conclure à une véritable technique.

### III. — Problèmes d'analyse des bronzes et alliages de cuivre anciens.

Les techniques d'analyse utilisables pour les recherches sur les alliages antiques ne diffèrent pas de celles employées pour l'étude des alliages modernes<sup>27</sup> ; il y a simplement une préférence marquée envers les méthodes qui causent le moins de dommage aux pièces

(24) Il est bien entendu que les examens métallographiques ne peuvent suffire à résoudre, à eux seuls, les problèmes que posent les techniques antiques. Les études aux rayons X sont irremplaçables dans ce domaine. Cf. J. CONDAMIN, J. GUEY et M. PICON, dans *Rev. numismatique*, 1965, p. 123-133.

(25) La seule notation d'une structure en bande signifie que le métal a été martelé, ce dont on pouvait se douter. On a beaucoup discuté de la nature des bandes du type de celles qui apparaissent sur la figure 7 : hérédité laissée par la structure dendritique, anisotropie des tensions créées par l'écroissage ? Il semble bien que le phénomène soit lié aux tensions produites par le martelage à froid.

(26) La trempe des bronzes a été découverte au XIX<sup>e</sup> siècle. Dans l'industrie, les bronzes ayant plus de 10 % d'étain sont trempés avant laminage.

(27) Il faut cependant noter les difficultés qui tiennent aux compositions extrêmement variables de certains alliages antiques. Pour les bronzes, par exemple, le plomb varie couramment de 0 à 35 %, l'étain de 0 à 25 %. Comme la composition approximative des objets antiques n'est pas toujours très facile à prévoir, il faut presque nécessairement recourir à des méthodes d'analyse qui puissent couvrir un très large intervalle de concentration.

étudiées. Au cours des analyses d'alliages modernes, on a très rarement à tenir compte de phénomènes qui ont une importance capitale dans toute recherche sur les objets antiques : ce sont, d'une part, les causes particulières de non homogénéité, dues aux procédés métallurgiques de l'époque ; d'autre part, les variations de composition des alliages au cours du temps, sous l'influence du milieu extérieur.

A. INFLUENCE DES PROCÉDÉS MÉTALLURGIQUES ANCIENS. — Les procédés métallurgiques de l'Antiquité sont responsables d'un manque d'homogénéité, particulièrement marqué dans les objets de fonderie. Nous citerons à titre d'exemple le cas de trois appliques en bronze d'une quinzaine de centimètres de hauteur, sur lesquelles une série d'analyses a été faite, afin d'en déterminer l'homogénéité.

L'analyse des prélèvements en 21 points différents<sup>28</sup> a donné des résultats très dispersés, qui ne peuvent être imputés à la méthode suivie<sup>29</sup>. Pour chacune des appliques nous donnerons deux compositions parmi celles qui s'écartent le plus des valeurs moyennes.

	Cu	Sn	Pb
Buste de Jupiter <sup>30</sup> .....	83,7	5,4	10,9
	75,2	6,2	18,6
Buste de Neptune.....	81,7	5,4	12,9
	76,9	6,4	16,7
Buste de Mars.....	82,0	6,6	11,4
	73,7	8,2	18,1

Citons également le cas d'une statue de grande dimension (« Pacatianus » du musée de Vienne, analyses n<sup>os</sup> 81 à 83), où 3 prélèvements, faits en des endroits différents de la draperie, ont donné les résultats suivants :

Cu	Sn	Pb
71,0	8,1	20,9
60,6	9,4	30,0
60,4	6,8	32,8

La cause principale des écarts observés ici, comme en de nombreux autres cas, tient manifestement à l'habitude, fréquente dans l'Antiquité, de fondre l'alliage en petits creusets par suite des possibilités restreintes des fours de l'époque. Même lorsque les pièces antiques n'ont pas été fondues en plusieurs parties, on retrouve facilement la trace des coulées successives qui se sont mal mélangées et qui accusent des différences notables dans leur composition. Souvent, d'ailleurs, les reprises sont très visibles et témoignent d'un refroidissement important de la coulée précédente, ce qui revient pratiquement à isoler les différentes coulées les unes des autres. A moins de pouvoir faire des analyses en de très nombreux points, ce qui n'est pas toujours réalisable, il faut se résigner à ne pas accorder de signification trop précise aux résultats de l'analyse. En fait, cela n'a pas une importance extrême car nous verrons que les grandes catégories de bronze utilisées dans l'Antiquité sont faciles à identifier, mais ne peuvent en aucun cas être définies à quelques pour-cent près.

(28) Les prélèvements sont au nombre de 9 pour le n<sup>o</sup> 51, 5 pour le n<sup>o</sup> 54 et 7 pour le n<sup>o</sup> 57. Les numéros renvoient au tableau, en fin d'article.

(29) V. *supra*, p. 201. En chaque point, 3 analyses ont été effectuées sur la portion de métal prélevée dans l'alliage. Les résultats de ces 3 analyses, très groupés, ont servi à calculer une valeur moyenne de la concentration pour le point considéré.

(30) Dans le reste de l'article, seules les valeurs entières les plus proches des chiffres donnés par l'analyse seront conservées (pour les raisons qui justifient une telle présentation des résultats, voir p. 201).

Des problèmes du même ordre se posent pour les statues faites de parties rapportées : celles-ci ont rarement la même composition et l'alliage qui assure la liaison des parties en diffère fréquemment. Il ne faut pas sous-estimer non plus l'importance des réparations destinées à faire disparaître les défauts de coulée visibles en surface. Beaucoup de ces réparations, qui couvrent parfois une fraction importante de la surface, sont très difficiles à distinguer sous la patine. Or nous avons pu constater, en quelques cas, de grandes différences de composition entre ces parties rapportées et le corps de la statue.

Enfin, les phénomènes de ségrégation dans les alliages contenant du plomb jouent également un très grand rôle<sup>31</sup>. La technique des coulées successives a fréquemment réduit l'ampleur de ces phénomènes mais ceux-ci restent cependant visibles au simple examen métallographique, à l'intérieur d'une même coulée. Il en résulte que les pourcentages de plomb ne peuvent pas être, à partir d'un prélèvement unique, définis à 1 % près dans les cas les plus favorables ; pour la plupart des bronzes romains, les fluctuations dépassent largement cette valeur.

On doit souligner cependant que l'homogénéité des objets antiques est d'une manière générale d'autant moins influencée par les facteurs précédents, liés aux procédés techniques de l'époque, que ces objets sont de taille plus réduite et moins massifs ; mais ils risquent alors d'avoir été beaucoup plus touchés par les facteurs qui dépendent du milieu extérieur.

**B. INFLUENCE DU MILIEU DE CONSERVATION.** — Au cours du temps, l'action des agents extérieurs modifie souvent d'une manière considérable la composition des bronzes et alliages de cuivre. Il est indispensable que puissent être prévus les cas où ces modifications de composition risquent d'être les plus importantes, afin de ne pas effectuer d'analyses sans signification. Or, si la patine est une réalité à laquelle on est habitué, les phénomènes d'oxydation préférentielle et de corrosion en profondeur, qui sont très difficiles à déceler sans le concours des examens métallographiques, risquent d'échapper à l'analyste.

La modification la plus fréquente que subissent, sous nos climats, les alliages antiques, consiste en une diffusion de l'oxygène vers l'intérieur du métal, accompagnée d'une diffusion d'atomes métalliques en sens inverse. Cette dernière migration, vers l'extérieur, joue un rôle primordial dans la formation de la patine<sup>32</sup>.

Du point de vue analytique, deux cas sont à considérer :

1° lorsque les analyses sont effectuées sur la surface de la patine, il faut pouvoir postuler que sa composition est identique à celle du métal sous-jacent ou qu'il existe une relation définie entre les deux compositions. En réalité, une telle relation n'a jamais été mise en évidence<sup>33</sup>. Au contraire, il a été fréquemment prouvé que la patine des bronzes présente un enrichissement tantôt en étain, tantôt en cuivre<sup>34</sup>. Aussi doit-on actuellement considérer comme périmées toutes les méthodes

(31) Voir n. 11, p. 192.

(32) Il ressort des études que nous poursuivons sur la structure des patines, que les phénomènes de diffusion, particulièrement celle des impuretés, paraissent actuellement fournir les meilleurs critères de détermination de l'ancienneté des objets métalliques. Les distinctions habituelles, basées sur l'aspect micrographique des patines, ne paraissent guère utilisables, sauf cas exceptionnels. La diffusion des impuretés a également une incidence très importante pour de nombreux problèmes concernant les techniques de fabrication ; par exemple l'étude des dorures, des argentures et celle des procédés de saucage dans l'Antiquité ont donné lieu à d'innombrables erreurs dues au fait qu'on a négligé les phénomènes de diffusion. Par ailleurs, le rôle possible des diffusions doit rendre prudente toute comparaison entre les impuretés de bronzes dont les techniques de travail diffèrent totalement, par exemple : bronzes coulés et bronzes martelés.

(33) Exception faite pour les alliages antiques argent-cuivre : cf. J. CONDAMIN et M. PICON, dans *Rev. Numismatique*, 1964, p. 69-89.

(34) Nous l'avons vérifié nous-mêmes en de multiples cas. Pour les études sur la patine, on pourra se référer à : R. J. GETTENS, *Advances in Conservation*, 1963, p. 89-92 ; R. M. ORGAN, *The Scientist and Archaeology*, 1964, p. 141-167.

d'analyses en surface et, comme très douteux, tous les résultats obtenus selon ces méthodes ; ces dernières gardent cependant un certain intérêt qualitatif ;

2<sup>o</sup> lorsque l'analyse est effectuée après décapage de la patine superficielle, il est indispensable de s'assurer que la modification de concentration ne s'étend pas en profondeur. C'est l'oxydation interne qui est principalement responsable des modifications de concentration ; cette oxydation interne atteint de préférence les régions les plus riches en étain dans les bronzes et les plus riches en zinc dans les laitons. Dans le cas des bronzes où la phase  $\delta$ , riche en étain, est présente, celle-ci s'oxyde de préférence et la composition trouvée à l'analyse pourra être assez éloignée de celle qui existait à l'origine. Toutefois, il n'est pas nécessaire que la phase  $\delta$  soit présente pour qu'une oxydation préférentielle se produise ; une telle oxydation s'observe fréquemment dans les bronzes à structure dendritique, où les dendrites moins riches en étain apparaissent souvent isolées au milieu de zones oxydées (fig. 8).

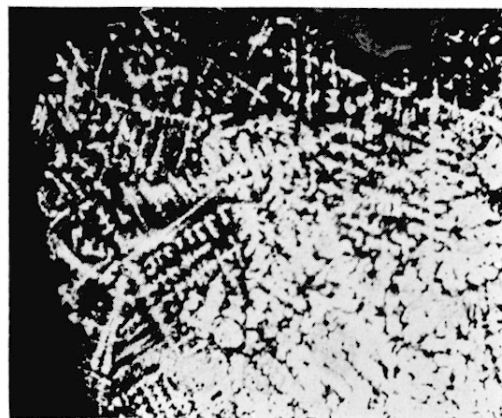
La variation de composition résulte du fait que, la transformation en oxyde ayant lieu avec augmentation de volume, il y a diffusion vers l'extérieur d'une fraction des atomes de la région oxydée. Ces phénomènes sont particulièrement à redouter dans le cas des échantillons minces qui peuvent être atteints dans toute leur épaisseur. D'autres mécanismes d'attaque préférentielle sont possibles, mais ils sont moins fréquents.

#### C. ANALYSE DES CONSTITUANTS MAJEURS. ANALYSE DES IMPURETÉS. —

L'étude des impuretés dans les alliages anciens peut être entreprise en vue de résoudre des problèmes très divers. On a déjà signalé l'intérêt particulier que présentent les traces métalliques pour la connaissance des phénomènes de diffusion. On peut noter, de plus, les deux orientations qui suivent.

1<sup>o</sup> L'étude des traces métalliques peut servir à regrouper les objets de bronze d'une région donnée en diverses familles définies par une origine commune des métaux employés. Pour les bronzes romains, un tel travail paraît d'avance voué à l'échec<sup>35</sup>. Les alliages sont généralement des alliages ternaires, d'où trois sources d'impuretés au lieu de deux ; surtout, les refontes successives d'objets divers ont mélangé les données initiales. Cependant, un travail de ce genre pourrait être entrepris pour l'époque romaine et il fournirait sans doute de précieuses indications d'origine mais il devrait porter sur l'analyse des lingots et sur les objets en métal non allié.

2<sup>o</sup> Les impuretés jouent un rôle primordial dans les qualités mécaniques des alliages. Le degré d'épuration des métaux employés dans les diverses fabrications d'une époque



8. Oxydation de l'exemplaire n° 34. Pas d'attaque métallographique. Grossissement 63. Les dendrites, qui sont riches en cuivre, apparaissent isolées au milieu du reste de l'alliage, qui est oxydé. A une plus grande distance de la surface, seule la phase  $\delta$  est oxydée.

(35) Il a été conduit avec succès pour le Bronze ancien occidental et déjà plus difficilement pour le Bronze moyen.

présente un intérêt pour la connaissance du niveau technique de cette époque. Mais il faudrait que fût préalablement bien établie l'importance des phénomènes de diffusion dans l'alliage<sup>36</sup>, les concentrations superficielles en impuretés pouvant fausser les analyses faites dans la partie interne ; ces phénomènes sont encore à l'étude.

La méthode d'analyse employée (voir D, plus loin) peut ultérieurement permettre, sans qu'il soit nécessaire de procéder à une nouvelle prise de spectres, une étude quantitative des constituants mineurs : étude sommairement esquissée à ce jour. Ici, nous nous sommes intéressés particulièrement aux constituants majeurs. Étant donné qu'il est impossible d'attribuer telle ou telle impureté à l'un des constituants plutôt qu'à un autre, tous les résultats ont été déterminés sans tenir compte du taux global de ces impuretés.

D. MÉTHODE D'ANALYSE. — Les analyses qualitatives et quantitatives ont été faites par spectrographie, méthode qui ne réclame qu'une quantité très faible de substance.

Nous avons cherché un mode opératoire rapide et simple qui permette de faire aisément l'analyse de séries d'objets. Après différents essais, la technique de l'arc continu (220 V-9 A) entre électrodes de graphite a été adoptée<sup>37</sup>. Des prélèvements de très petites quantités de substance (quelques dizaines de mg) sont faits dans des parties peu visibles de l'objet. L'alliage à l'état de poudre fine est mélangé intimement à du graphite pur, en quantités égales, afin d'éviter la formation d'un globe métallique, cette formation entraînant généralement des phénomènes de distillation fractionnée. Les résultats se sont révélés reproductibles et ont été contrôlés par voie chimique lorsqu'un prélèvement suffisant de substance était possible. La concordance satisfaisante entre les deux modes d'analyse nous a fait accepter cette technique, qui a le grand avantage de présenter un nombre réduit d'opérations.

Des précautions très strictes sont indispensables : l'alliage doit être réduit à l'état de poudre à grains très fins car les résultats sont d'autant meilleurs que les grains sont plus fins ; d'autre part, lorsqu'il s'agit d'objets épais, il est nécessaire de faire un forage en profondeur pour éviter la patine et les régions qui pourraient être oxydées. Dans le cas des objets minces, un examen métallographique complémentaire a toujours eu lieu. Afin de limiter le rôle des ségrégations et de l'hétérogénéité, il est bon, lorsque cela est possible, d'effectuer des prélèvements en plusieurs points de l'objet et d'analyser le mélange ainsi obtenu. Pour éliminer les erreurs accidentelles, trois essais ont été faits sur chaque échantillon et les chiffres donnés en sont la moyenne.

Si l'on examine les différentes causes d'incertitude étudiées précédemment et liées à l'analyse des objets anciens : hétérogénéité, oxydation, etc., il paraît inutile de conserver aux résultats une précision illusoire ; aussi avons-nous systématiquement arrondi à l'unité la plus proche les pourcentages d'étain et de plomb.

(36) Voir note 32, p. 199.

(37) Parmi les différents modes opératoires possibles, nous avons éliminé la technique de l'étincelle condensée entre l'échantillon massif et une électrode de graphite, car c'est essentiellement une méthode d'analyse superficielle, dont les écueils ont été signalés plus haut.

Nous aurions pu utiliser la technique des solutions ou celle des poudres : cf. VAN DOORSELAER (M.), EECKOUT (J.), GILLIS (J.), dans *VIII<sup>e</sup> Congrès du GAMS, Paris 1949* ; ROUIR (EV.), VANBOKESTAL (A. M.), *Spectrochimica Acta 1951*, IV, p. 330-337 ; MILBOURN et HARTLEY, *Spectrochimica Acta 1948*, III, p. 320-326 ; VAN DOORSELAER (M.), KRUSE (J.), GILLIS (J.), *Spectrochimica Acta 1953*, V, p. 388-396. L'une et l'autre technique sont beaucoup plus lentes que celle que nous avons adoptée et, d'autre part elles ne sont pas à l'abri de certains inconvénients : dans la technique des solutions, il y a difficulté de solubilisation des alliages dans un même réactif, lorsque la composition des alliages varie (voir note 27, p. 197), PETIT (R.), dans *XIX<sup>e</sup> Congrès du GAMS, Paris 1956*, p. 111-113 ; dans la technique des poudres, il y a influence du facteur : état physique des oxydes, CONDAMIN (J.), thèse de Doctorat, chapitre VI (Lyon, 1960).

#### IV. — Composition des bronzes antiques et techniques de travail.

Nous cherchons ici à mettre en évidence les relations existant, à l'époque romaine, entre les techniques fondamentales de travail du bronze et la composition de l'alliage.

A. BRONZES RÉDUITS EN FEUILLES PAR MARTELAGE. — Nous avons déjà signalé (voir note 19, p. 194) qu'aucun des bronzes étudiés, se présentant sous la forme d'une mince feuille de métal obtenue par martelage, ne montre une structure uniquement dendritique. Tous ces bronzes ont une structure de recuit très caractérisée, qui indique que le métal fut soumis à une température élevée, à un moment ou à un autre, au cours du travail<sup>38</sup>. Cette température élevée peut aussi bien être celle d'un recuit proprement dit, entre deux martelages à froid, que celle d'un travail effectué entièrement à chaud.

Il paraît difficile qu'on ait pu marteler à chaud des objets dont l'épaisseur finale est inférieure au millimètre, étant donné le refroidissement très rapide d'un métal en feuille mince d'une part et, d'autre part, l'importance de l'oxydation dans ces conditions de travail. Le martelage à froid, interrompu de recuits périodiques, est la technique employée actuellement mais cela ne constitue pas une preuve en ce qui concerne les pratiques en cours dans l'Antiquité romaine. Il y a peu de déductions à tirer de la taille des grains du métal, qui varie beaucoup d'un échantillon à l'autre (fig. 5 et 6)<sup>39</sup>. Dans certains exemplaires, cependant, cette taille paraît trop importante pour résulter seulement d'un travail à chaud. En outre, la plupart des échantillons étudiés montrent à l'examen métallographique un écrouissage (bandes de glissement, cristaux déformés, etc.) qui indique clairement qu'un travail à froid, souvent important, fut effectué postérieurement à la dernière élévation de température.

Rien ne s'oppose donc, semble-t-il, à ce que la technique actuelle du travail à froid, interrompu de recuits, ait été celle de l'Antiquité romaine. Il n'est pas impossible qu'un travail préliminaire de dégrossissage à chaud ait pu être effectué mais cela paraît peu probable, étant donné l'importance apparemment minime de cette phase éventuelle du travail. En effet, dans beaucoup d'exemplaires, le pourcentage global des impuretés, dont le plomb est la principale, limite beaucoup les possibilités du travail à chaud. De plus, les restes d'une ancienne structure dendritique qui apparaissent dans quelques exemplaires — à vrai dire peu nombreux — (fig. 9 et 10) témoignent, dans ces cas-là, d'une homogénéisation peu poussée, difficilement compatible avec un travail à chaud de quelque importance (voir note 26, p. 197)<sup>40</sup>.

(38) Les exemplaires de ce type ayant moins d'un millimètre d'épaisseur sont au nombre de 18 (cf. tableau des analyses en fin d'article et diagrammes 1, p. 204). Ils se répartissent ainsi : 12 vases, 4 patères, 1 miroir et 1 strigile.

(39) Ces variations importantes sont normales, vu le grand nombre de facteurs qui ont une influence marquée sur la recristallisation du métal (cf. chap. II, C). Il ne semble pas cependant qu'il y ait là des raisons suffisantes pour reconnaître plusieurs techniques différentes de fabrication dans les exemplaires étudiés.

(40) La question du martelage à chaud des alliages de cuivre dans une première phase du travail trouverait

Pour les 18 exemplaires de bronze martelé en feuille de moins d'un millimètre d'épaisseur et qui présentent une structure de recuit, les deux diagrammes 1<sub>A</sub> et 1<sub>B</sub> donnent respectivement la répartition du nombre d'échantillons correspondant à chaque pourcentage d'étain et à chaque pourcentage de plomb.

La première constatation qui ressort immédiatement des diagrammes précédents est celle qui a trait au pourcentage réduit du plomb dans l'alliage : seuls trois échantillons sur dix-huit ont plus de 0,5 % de cet élément<sup>(41)</sup>. Cette absence de plomb tient à des raisons techniques évidentes, signalées précédemment (cf. chap. I, C). Cependant il n'est pas rare d'observer dans les alliages antiques des taux actuels<sup>(42)</sup> d'impuretés supérieurs aux tolérances généralement admises, par exemple pour le laminage à froid des bronzes et des laitons ; le travail artisanal n'a pas toujours exactement les mêmes exigences que le travail mécanique moderne : les facteurs humains peuvent, en certains cas, partiellement compenser les déficiences de l'alliage<sup>(43)</sup>.

On comparera le diagramme du plomb dans les dix-huit exemplaires étudiés à ceux des bronzes coulés où l'absence de plomb est exceptionnelle (diagrammes 2<sub>B</sub> et 3<sub>B</sub>). Un fait surprenant est le taux relativement élevé de l'étain dans le groupe des bronzes martelés en feuilles<sup>(44)</sup>. En comparaison, les bronzes statuaire (diagramme 3<sub>A</sub>) montrent une proportion d'étain généralement faible, même si l'on tient compte de la présence du plomb<sup>(45)</sup>. Le pourcentage d'étain est proche de 10 %, ou supérieur, dans près de la moitié des bronzes martelés, alors qu'il n'atteint ces valeurs que dans moins d'un sixième des bronzes statuaire (plomb non déduit). Les raisons techniques qui peuvent être invoquées pour justifier ces taux élevés d'étain ne paraissent pas déterminantes. Il est, certes, possible qu'on ait cherché un alliage qui puisse être aisément fondu et surtout coulé en plaque en vue de faciliter l'ébauchage du travail<sup>(46)</sup>. Cela ne pouvait être obtenu qu'en élevant la proportion d'étain ; dans les bronzes statuaire, on a préféré augmenter la quantité de plomb, métal moins coûteux que l'étain. Il est également possible qu'on ait souhaité obtenir une qualité supérieure des produits finis, sans regarder aux difficultés du travail. Mais les facteurs qui relèvent des traditions peuvent avoir joué un rôle capital dans cette pratique curieuse des taux d'étain élevés dans les bronzes martelés. L'état des connaissances actuelles ne permet pas encore de faire une comparaison sûre avec des documents antérieurs. Cependant on peut noter que, dans le cas des miroirs, mieux connus que les bronzes martelés pour les époques antérieures à la période romaine, il y a une survivance étonnante dans la composition des alliages malgré une totale modification des techniques (cf. chap. V, C).

sans doute quelque éclaircissement, si l'on pouvait étudier la fabrication des *objets massifs travaillés au marteau*. Pour ceux-ci, en effet, le forgeage à chaud pourrait être prépondérant. Malheureusement, les objets de ce type sont rarement en bronze à l'époque romaine et il ne nous a pas été donné d'en étudier.

(41) Analyses n<sup>os</sup> 3, 9 et 15.

(42) Rappelons que, dans bien des cas, les conclusions tirées de l'étude des impuretés dans les alliages antiques resteront douteuses tant que nous n'aurons pas une meilleure connaissance des phénomènes de diffusion à la température ordinaire (cf. chap. III, C).

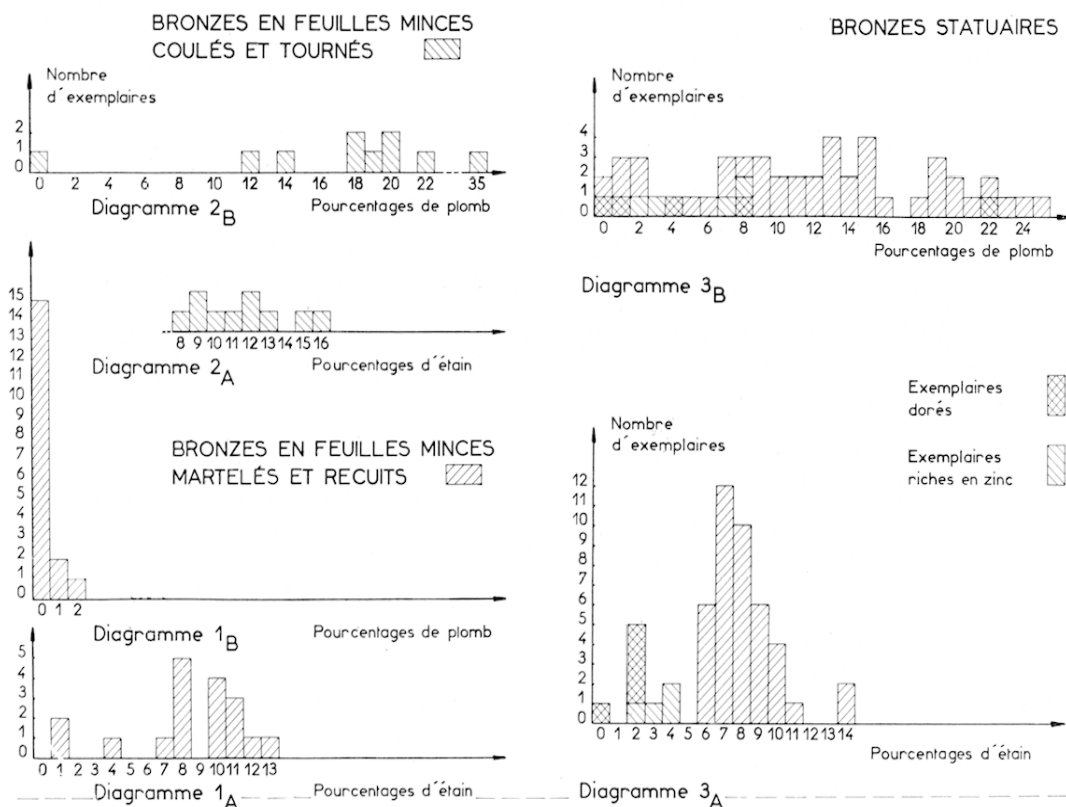
(43) Cela est manifestement le cas pour les alliages n<sup>os</sup> 22 et 38, qui sont extrêmement durs et où la phase  $\delta$  reste apparente malgré les recuits (voir note suivante). C'est aussi le cas de l'alliage n<sup>o</sup> 15, le plus riche en plomb dans le groupe des 18 bronzes étudiés ici et de quelques autres. Les tolérances deviennent encore plus larges dans les alliages antiques lorsque le martelage n'a pas été poussé à l'extrême. Par exemple, le n<sup>o</sup> 34, façonné grossièrement à froid et sans recuit, contient 4 % de plomb et une proportion de phase  $\delta$  non négligeable.

(44) Actuellement, dans l'industrie, les bronzes ayant plus de 10 % d'étain ne sont laminés qu'à température élevée ou après trempe mais cela ne constitue pas une preuve de l'utilisation de ces techniques à l'époque romaine. Une telle transposition des données modernes à l'Antiquité ne repose, par ailleurs, sur aucune observation précise (cf. chap. II, E).

(45) Le plomb ne jouant qu'un rôle passif dans l'alliage où il s'isole à l'état de globules (cf. chap. I, C), on peut caractériser un bronze au plomb par son pourcentage d'étain, calculé sur la somme  $Cu + Sn$ . Ce pourcentage est donc un peu supérieur à celui rapporté à la totalité de l'alliage, lorsque la proportion de plomb est importante. Cette manière de procéder serait ici pleinement justifiée, au cas où l'on parviendrait à établir avec certitude que le bronze au plomb n'a été, pour le métallurgiste de l'Antiquité, qu'un bronze normal auquel du plomb était ajouté. Cela n'est pas établi.

(46) Voir note 48, p. 204.





On notera l'absence de cuivre martelé en feuille mince, dans le groupe étudié : les exemplaires les plus riches en cuivre ont encore un taux d'étain légèrement supérieur à 1 %. Cette faible proportion d'étain est sans doute intentionnelle, que ce métal provienne de bronzes usagés refondus avec du cuivre<sup>47</sup> ou de l'élaboration d'un alliage neuf à partir des métaux en lingots. Techniquement, il est possible que ce pourcentage d'étain corresponde au désir de remédier aux déficientes « propriétés de fonderie » du cuivre<sup>48</sup>, particulièrement gênantes pour le travail ultérieur du métal.

Signalons enfin l'existence d'un laiton martelé (n° 4) qui présente la même structure de recuit que les dix-huit autres bronzes précédemment étudiés. Sa proportion d'étain, relativement importante, le rapproche d'ailleurs des bronzes proprement dits.

**B. BRONZES RÉDUITS EN FEUILLES SANS MARTELAGE, BRONZES TOURNÉS.** — Parmi tous les fragments de bronze en feuilles minces de moins d'un millimètre d'épaisseur, étudiés ici, certains ne présentent pas la structure de recuit caractéristique du groupe précédent. L'examen métallographique montre que ces bronzes ont tous été coulés et n'ont subi aucun martelage important, ainsi qu'en témoigne la présence des dendrites non déformées. Tout au plus, un léger écouissage superficiel laisse-t-il parfois la possibilité d'un repoussage du métal, toujours très réduit cependant.

(47) C'est là une opération qui semble avoir été pratiquée systématiquement dans l'Antiquité. PLINIE, *Histoire Naturelle*, XXXIV, 97.

(48) Quelques défauts de coulée apparaissent déjà dans les deux exemplaires à bas pourcentage d'étain, alors qu'ils sont absents des 16 autres échantillons étudiés ici. Notons que ces deux exemplaires sont les seuls à être étamés, parmi les 14 vases martelés et coulés qui ont été examinés. Jusqu'à présent, seuls des clous (A.-R. WEILL, *Rev. Métall.*, 51, 1954, p. 459, 466 ; L. GRAMME et A.-R. WEILL, *Rev. Métall.*, 49, 1952, p. 521, 530) et des rivets (analyse n° 32) se sont révélés en cuivre pur, les premiers fortement écrouis, les autres soigneusement recuits. Par ailleurs, on verra que l'alliage à faible pourcentage d'étain semble avoir été préférentiellement utilisé dans la fabrication des statues dorées (cf. même chapitre, p. 208). Tout cela montre l'intérêt particulier qu'il y aurait à pouvoir effectuer des analyses et des examens plus nombreux dans ce groupe d'alliages proches du cuivre pur.

Celui-ci n'affecte en aucun cas les régions profondes ; d'ailleurs la composition de l'alliage ne permet pas, à une seule exception près (n° 21), un martelage poussé.

Étant donné la minceur des fragments (cf. tableaux en fin d'article), il semble peu probable que des pièces importantes, telles que les vases et patères ou même les miroirs, aient pu être coulées à des cotes très proches des cotes définitives de ces objets. Comme l'observation des surfaces, externes et internes, révèle sur la plupart des exemplaires de fines stries parallèles, caractéristiques d'un travail au tour<sup>49</sup>, on peut supposer que l'amincissement du métal résulte de l'application d'un tel procédé. Le travail au tour semble avoir été très largement répandu à l'époque romaine<sup>50</sup>, et nous indiquerons plus loin ce que la composition des bronzes tournés peut apporter à la connaissance de cette technique dans l'Antiquité.

Pour les dix exemplaires de bronze en feuilles minces de moins d'un millimètre d'épaisseur, sans structure de recuit, les diagrammes 2<sub>A</sub> et 2<sub>B</sub> donnent respectivement la répartition du nombre d'échantillons correspondant à chaque pourcentage d'étain et à chaque pourcentage de plomb<sup>51</sup>. Les pourcentages d'étain sont comparables à ceux rencontrés dans le groupe précédent, exception faite pour les numéros 29 et 30, qui se rapportent à des miroirs, objets qui ont traditionnellement des taux d'étain élevés.

D'une manière générale, la proportion moyenne de l'étain dans ce groupe, supérieure à celle des bronzes statuariques (ce qui était le cas, déjà, pour le groupe des bronzes martelés), se justifie pleinement ici. La coulée d'une ébauche de vase, de patère ou de miroir, qui ne soit pas trop épaisse, nécessite en effet des propriétés de fonderie supérieures à celles requises pour la fabrication d'une statuette et à plus forte raison d'une statue. Or ces propriétés de fonderie sont d'autant meilleures que le taux d'étain est plus élevé (cf. chap. I, A). On notera d'ailleurs que ces mêmes taux élevés d'étain se retrouvent dans des objets qui ont en commun avec ceux que nous étudions ici d'avoir été coulés en faible épaisseur : c'est le cas des deux cuillères n°s 35 et 37 et du n° 78 également. La présence du plomb contribue, elle aussi mais dans une proportion moindre que l'étain, à faciliter la coulée. Les risques de ségrégation ne sont pas considérables malgré les pourcentages souvent élevés de plomb (n° 19 par exemple) ; cela tient à la faible épaisseur des pièces, qui se refroidissent alors rapidement.

Mais l'intérêt majeur du plomb réside surtout dans la très grande facilité de travail que ce métal confère à l'alliage, lorsqu'on procède par arrachement de copeaux (cf. chap. I, C). Ainsi les compositions des bronzes tournés, portées sur les diagrammes 2, apparaissent-elles dans l'ensemble parfaitement adaptées à un outillage qu'on suppose assez primitif<sup>52</sup>.

Cependant il convient de noter, à propos de cet outillage, le cas du numéro 21<sup>53</sup>, où le plomb est absent et où le pourcentage élevé de l'étain est responsable d'un alliage déjà très dur, ce qui suppose une technique du tournage assez évoluée. Ce cas n'est d'ailleurs pas isolé ; le miroir n° 25 montre des reliefs très accentués qui ont été découpés dans une ébauche massive préparée par martelage et recuit (fig. 10). Le miroir n° 26 aminci par martelage, a été lui aussi rectifié et décoré de rainures au tour (fig. 9)<sup>54</sup>.

(49) H. MARYON, *Metal Working in the ancient World*, dans *American Journal of Archaeology*, 53, 1949, p. 93.

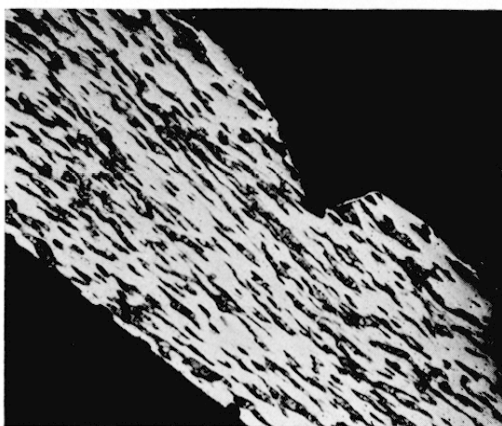
(50) Cela est attesté par le nombre considérable de miroirs et patères de cette époque qui présentent des reliefs tournés.

(51) Ces exemplaires se répartissent ainsi : 5 patères, 4 miroirs, 1 vase (v. le tableau des analyses, en fin d'article).

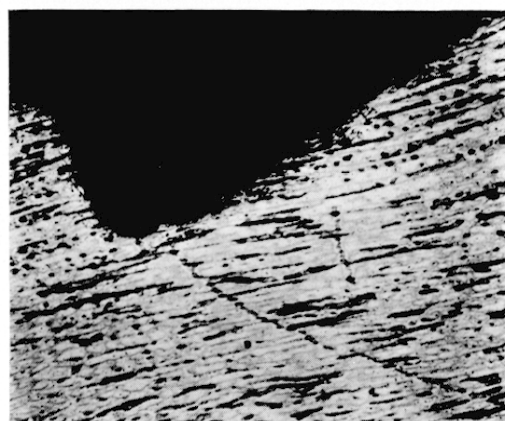
(52) La phase  $\delta$  est relativement abondante, les pourcentages d'étain calculés après déduction du plomb étant élevés et le métal ayant été simplement coulé et non recuit. Cette phase ne constitue pas cependant un obstacle très sérieux pour le travail de l'alliage par arrachement de métal au tour, au burin ou à la lime. Cette constatation due à l'expérience tient sans doute au fait que la phase  $\delta$  est disséminée dans l'alliage et, de plus, fréquemment associée aux globules de plomb qui forment des îlots de moindre résistance.

(53) Ici l'alliage, non martelé, semble avoir été soigneusement recuit avant tournage. Il n'est pas possible de décider, sur cet exemplaire unique dont les caractéristiques peuvent résulter de causes accidentelles, s'il s'agit là d'un mode de préparation intentionnel de l'ébauche.

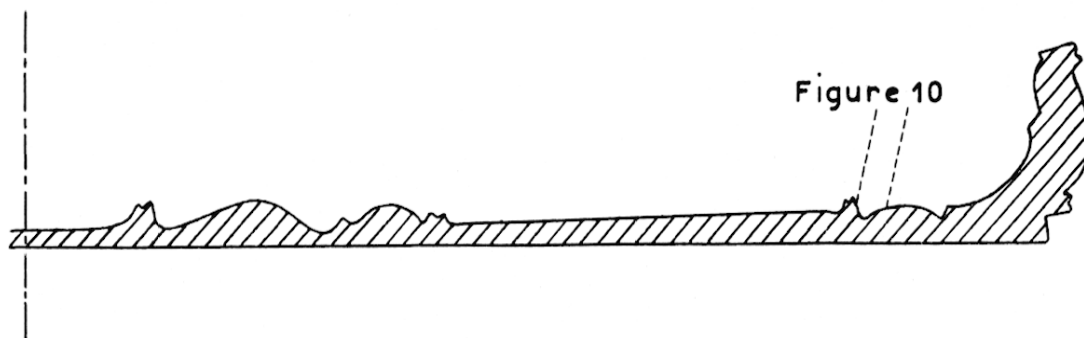
(54) Pour ces deux exemplaires, le travail par martelage et recuit a été moins poussé que dans les cas où l'obten-



9. Structure du miroir n° 26. Réactif au chlorure cupro-ammoniacal. Grossissement 32. Exemple de travail au tour après ébauchage au marteau. Au martelage, est due la formation des fibres du métal, qui apparaissent tranchées par le travail au tour.



10. Structure du miroir n° 25. Réactif au chlorure cupro-ammoniacal. Grossissement 32. Mêmes remarques que pour la figure 9.



11. Profil du miroir n° 25, figure 10 (à double grandeur).

Il faut donc distinguer, parmi les bronzes tournés, différentes catégories, suivant le mode de préparation de l'ébauche :

1° d'abord, ceux dont l'ébauche est obtenue directement par coulée et qui apparaissent formés jusqu'ici d'un alliage riche à la fois en étain et en plomb (cf. diagrammes 2)<sup>55</sup>. Des bronzes de cette catégorie mais qui seraient dépourvus de plomb n'ont pas encore été rencontrés ; peut-être ont-ils été, d'ailleurs, à la différence de ceux riches en plomb, systématiquement recuits avant tournage, ce qui pourrait être alors le cas du n° 21 (voir note 53, p. 205) ; — 2° dans une autre catégorie, l'ébauche est obtenue par martelage et recuit (nos 25 et 26). L'alliage est alors pratiquement dépourvu de plomb.

La technique du tournage a donc atteint, à l'époque romaine, un stade de diversifi-

tion de la forme définitive ne fait pas appel aux techniques du tour. Il en résulte que la structure dendritique de l'alliage est encore visible sous la structure de recuit, ce qui permet de se rendre compte de la forme de l'ébauche et du travail effectué par tournage (voir les fig. 9 et 10).

(55) L'exemplaire n° 10 possède une proportion notable de zinc mais son taux d'étain le rapproche des autres bronzes au plomb coulés et tournés (voir : l'Appendice).

cation très avancé, qui demanderait une étude plus générale et plus approfondie suivant les régions et les époques. Indiquons, pour illustrer l'intérêt d'une telle étude, qu'on ne peut manquer d'être frappé de la similitude qui existe entre ces techniques romaines et celles, beaucoup plus tardives, des « potiers d'étain ». Ces dernières sont peut-être les héritières lointaines des pratiques antiques, dont le cheminement au cours des âges reste à étudier<sup>56</sup>.

C. BRONZES COULÉS ÉPAIS. — Nous rangeons ici tous les bronzes et alliages de cuivre coulés ayant plus de 4 ou 5 mm d'épaisseur. A une ou deux exceptions près, ce groupe s'identifie à celui des bronzes statuaire ; pour ceux-ci les diagrammes 3A et 3B donnent respectivement la répartition du nombre d'échantillons correspondant à chaque pourcentage d'étain et à chaque pourcentage de plomb. Il n'apparaît donc pas nécessaire d'établir un diagramme particulier des bronzes coulés épais, étant donné la parfaite similitude qu'il présenterait avec celui des bronzes statuaire.

Les compositions des alliages coulés minces, qui sont celles reportées sur les diagrammes 2, auxquelles peuvent être jointes celles des nos 35, 37 et 78, diffèrent essentiellement des compositions du groupe étudié ici, par un taux d'étain plus élevé, de l'ordre de 11 à 12 % en moyenne, alors que celui des bronzes coulés épais oscille autour de 7 %. Par ailleurs, les pourcentages de plomb dans ce dernier groupe ne sont pas, en moyenne, aussi élevés que pour les bronzes coulés minces. Les différences relevées entre ces deux types de bronze tiennent sans doute simplement au fait que la coulée des objets minces exige des qualités de fonderie supérieures à celles requises pour les coulées de plus grande épaisseur. En outre, la ségrégation du plomb est moins à redouter dans le premier cas que dans le second.

Bien que peu d'exemplaires de bronzes coulés épais (une douzaine environ) aient pu être examinés métallographiquement au cours de cette étude, les phénomènes de ségrégation du plomb s'y présentent nombreux. Il est vraisemblable, cependant, étant donné le mode de coulée intermittent qui semble avoir été généralement employé dans l'Antiquité, que ces phénomènes se produisent surtout à l'intérieur des coulées partielles, dans le cas des statues de grandes dimensions. C'est du moins ce qui ressort des quelques examens métallographiques que nous avons pu effectuer sur des fragments de statues. Cela dit, on peut cependant supposer que les phénomènes de ségrégation ont peut-être limité à certaines époques l'emploi du plomb dans les bronzes statuaire, malgré l'intérêt évident de cette adjonction lors du travail de finition à la lime ou au burin<sup>57</sup>. Rappelons enfin l'influence de la ségrégation dans l'étude des problèmes d'analyse des objets anciens (cf. chapitre III, A).

Par suite du nombre réduit des examens métallographiques, il n'a pas été possible

(56) La vaisselle dite « copte », qui apparaît au VII<sup>e</sup> siècle (cf. E. SALIN, *La Civilisation mérovingienne*, III, 1957, p. 153), semble un héritage direct de la technique de fabrication des patères de l'époque romaine. Il faudrait reprendre d'ailleurs, dans une telle perspective, toute l'étude du bronze à l'époque mérovingienne, celle des importations comme celle des fabrications locales.

(57) L'étude technique, par macrographie, des reprises de coulées, fondamentale pour la compréhension des problèmes de la statuaire antique, est encore à faire. Souhaitons que cette étude devienne le complément habituel de toute restauration de grands bronzes antiques.

d'apprécier, en observant les défauts internes de l'alliage, si dans l'ensemble les conditions effectives de la coulée étaient voisines des conditions optimales ; ces dernières varient notablement suivant les proportions relatives des constituants de l'alliage. Il paraît vraisemblable d'ailleurs qu'à l'époque romaine l'importance attachée aux défauts de coulée dut être quelque peu secondaire. Les exigences mécaniques réduites, demandées aux pièces métalliques (généralement de faible volume), s'accommodaient de la présence de défauts internes. Quant à ceux visibles en surface, ils paraissent représenter peu de chose à l'égard des défauts dont sont responsables les reprises de coulée<sup>58</sup>. Malgré cela, on peut constater, tant sur les exemplaires des bronzes coulés étudiés que sur ceux des bronzes minces précédents, que les conditions de la coulée sont dans l'ensemble très satisfaisantes.

Une catégorie particulière de bronzes coulés épais est celle des bronzes dorés, qui présentent une composition tout à fait spéciale, caractérisée par un taux d'étain très faible, inférieur à 2 % pour tous les exemplaires analysés<sup>59</sup> (cf. diagramme 3A). Les pourcentages de plomb varient considérablement : de 0 à 22 %. L'étude de ces bronzes est inséparable de celle de la dorure dans l'Antiquité, qui est très mal connue<sup>60</sup>. Il apparaît cependant que la faible proportion d'étain doit être mise en relation avec la technique de la dorure par « placage sur rayures »<sup>61</sup>. Il fallait, pour que l'opération fût réussie, que la malléabilité du support de la dorure ne différât pas trop de celle de la feuille d'or.

Signalons enfin, parmi les bronzes coulés épais, la présence de quelques exemplaires contenant du zinc en proportion variable : l'étude particulière en sera faite plus loin (voir l'*Appendice*)<sup>62</sup>.

D. BRONZES DE TECHNIQUES DIVERSES. — A chacune des techniques fondamentales de travail du bronze qui viennent d'être étudiées en liaison avec la composition des alliages, se rattachent des variantes mineures très faciles à regrouper autour des types fondamentaux précédents.

Par exemple, appartiennent au groupe des bronzes martelés en feuilles minces les techniques de fabrication des aiguilles, épingles, ressorts de fibule (objets martelés à froid et recuits), dont la composition, elle aussi, présente les mêmes caractères. Cela ne pose pas de problèmes particuliers ; aussi ne citerons-nous ici que les techniques qui ne peuvent être regroupées dans les catégories précédentes. Le cas des bronzes massifs martelés, déjà signalé (voir note 40, p. 202), reste à étudier. Ces objets sont très peu nombreux, mais peut-être convient-il de leur rattacher les clous et rivets non ferreux, beaucoup plus abondants (voir note 48, p. 204). Le groupe des bronzes monétaires constitue à lui seul un matériel très mal connu, qui semble avoir eu ses propres exigences techniques : la plupart des analyses anciennes sont à reprendre dans ce domaine.

(58) Les défauts dus aux reprises de coulée comptent pour beaucoup parmi les pièces rapportées, si fréquentes dans les statues antiques.

(59) Exemplaires nos 39 à 43.

(60) Étude que nous poursuivons parallèlement à celle des bronzes, avec celle de l'étamage et de l'argenture dans l'Antiquité.

(61) PLIN L'ANCIEN, *Histoire Naturelle*, XXXIV, 63.

(62) Exemplaires nos 44 à 47, 62, 70 et n° 39 qui est doré et ne possède de l'étain qu'en traces.

### V. Observations sur les différents groupes d'objets.

La composition des bronzes d'une catégorie d'objets est généralement déterminée par les nécessités techniques de fabrication mais certains caractères propres de tels groupes d'objets peuvent tenir à la tradition (c'est probablement le cas des miroirs) ou même à la mode. Pour chaque ensemble d'objets — exception faite pour le groupe des bronzes statuaires —, les indications statistiques qu'on pourrait être tenté de rechercher dans les tableaux ci-après n'ont qu'une valeur restreinte, du fait que le choix a dû se porter principalement sur des objets fragmentaires et donc très minces, du fait aussi que ces fragments n'ont pas été pris au hasard mais ont été retenus en raison de leur intérêt technique.

Les échantillons étudiés appartiennent, pour l'ensemble, à l'un des groupes suivants : vases, patères, miroirs, bronzes statuaires.

A. VASES. — Ils se rattachent à deux types : vases *martelés et recuits*, vases *coulés et tournés*. La technique du martelage avec recuit, à l'époque romaine, paraît très voisine de celle de nos jours alors qu'elle diffère de la technique du martelage sans recuit, beaucoup plus archaïque ; il serait intéressant de situer le moment à partir duquel ce procédé avec recuit fut employé de manière systématique. La seconde technique étudiée ici — celle des bronzes coulés et tournés — pouvait être utilisée facilement pour les vases largement ouverts ainsi que pour les patères qui leur sont apparentées ; au contraire, pour les vases minces à col étroit, le martelage était habituel. Il serait utile de préciser l'époque où débuta l'usage du tour dans le travail du bronze. Les exigences techniques ne sont pas les mêmes pour les vases proprement dits et pour leurs anses. La différenciation des bronzes, assez poussée à l'époque romaine, a permis l'utilisation d'alliages répondant à ces diverses exigences et cela explique que le corps et l'anse d'un vase puissent avoir des compositions différentes même s'ils proviennent d'un atelier unique. De même, les fonds et les appliques rapportés sont souvent d'un bronze non identique à celui du reste du vase.

B. PATÈRES. — Les patères examinées sont de types différents : patères *martelées*, patères *coulées*. Nous n'avons pas étudié ici de patères épaisses et il serait intéressant de vérifier s'il existe, au point de vue de la composition, la même différence entre patères minces et patères épaisses qu'entre bronzes coulés minces et bronzes coulés épais (bronzes statuaires, par exemple).

C. MIROIRS. — On trouve pour ces derniers toutes les techniques rencontrées à propos des vases et des patères : martelage et recuit, coulage. Si l'on excepte les miroirs martelés, on relève un taux d'étain très élevé (11 à 23 %). Ce fait est bien connu, tant pour les miroirs romains que pour les miroirs étrusques<sup>63</sup>. Lorsque les miroirs sont étamés — ce qui est le cas pour tous les miroirs coulés étudiés —, un tel taux d'étain apparaît

(63) PANSERI (C.) et LEONI (M.), dans *Sibirium*, III, 1956-57, p. 179-184 et dans *Studi Etruschi*, 1957-25, p. 35 et s.

plutôt comme le résultat d'une tradition que comme une nécessité. En effet, lorsque les miroirs n'étaient pas étamés, il fallait, pour augmenter leurs qualités réfléchissantes, un alliage très dur se polissant facilement et de couleur claire, donc un alliage riche en étain ; or de telles conditions ne semblent plus nécessaires lorsqu'il y a étamage. Il serait intéressant, là encore, de pouvoir préciser, en étudiant un plus grand nombre d'objets, le moment où l'étamage est devenu habituel.

D. BRONZES STATUAIRES. — Remarquons d'abord que le taux d'étain est relativement faible dans les bronzes statuaire antiques (moyenne 7 %), alors que les bronzes martelés en comportent en moyenne 10 %. Pour le bronze statuaire, cette faiblesse peut répondre simplement à des raisons d'économie.

Les diagrammes 3A et 3B donnent respectivement la répartition du nombre d'échantillons correspondant à chaque pourcentage d'étain et à chaque pourcentage de plomb.

Les proportions de plomb sont très variables (1 à 33 %). Il faut isoler le cas des grands bronzes, qui présentent une grande quantité de plomb, si l'on en exclut toutefois certains bronzes dorés. Il ne semble pas qu'il y ait de rapport défini, dans un même objet, entre la quantité du plomb et celle de l'étain. Il est probable, ainsi que nous l'avons déjà dit, que la présence du plomb a facilité le travail de retouche et de finissage.

Deux appliques dionysiaques, probablement d'époque romaine, trouvées à *Volubilis* (Maroc)<sup>64</sup>, ne comportent qu'une très faible proportion de plomb, et les analyses d'objets trouvés en Grèce<sup>65</sup> amènent, dans la mesure où l'on peut ajouter foi à des informations souvent anciennes, aux mêmes constatations. Il semblerait donc que puisse exister une technique romaine du bronze au plomb, face à des techniques (grecques ou autres) qui seraient différentes. Rappelons que les bronzes étrusques sont fréquemment des bronzes au plomb<sup>66</sup> : la question se pose alors de savoir si ce procédé n'est pas d'origine étrusque<sup>67</sup>.

Le problème des laitons doit aussi être examiné (voir l'*Appendice*). Ils sont de deux sortes : les uns comportent une forte proportion de zinc et peu d'étain, les autres ont plus d'étain que les précédents et peu de zinc. Dans chacun de ces groupes, réduits ici à quelques exemplaires, les compositions sont homogènes et sont assez différentes des alliages couramment utilisés aujourd'hui. Deux statuettes, douteuses du point de vue stylistique, appartiennent à cet ensemble de laitons. L'une d'entre elles (n° 70) comporte 19 % de plomb, ce qui est le fait d'un alliage apparemment antique. La seconde (n° 44) ne possède que 2 % de plomb et cet alliage est plus proche des laitons modernes, sans toutefois trancher nettement sur les laitons du groupe antique auquel il appartient.

Ce problème des faux doit être repris. Des renseignements importants pourraient être fournis par des études ultérieures sur les patines et les phénomènes de diffusion dans les bronzes.

Maurice PICON, Stéphanie BOUCHER, Jeanne CONDAMIN.

(64) PICCOT-BOUBE (M.), dans *Bulletin d'Archéologie marocaine*, IV, p. 236.

(65) CALEY (E. R.), *The Ohio Journal of Science*, 51, 1951, p. 6-12 ; J. CHARBONNEAUX, *Les bronzes grecs*, p. 6.

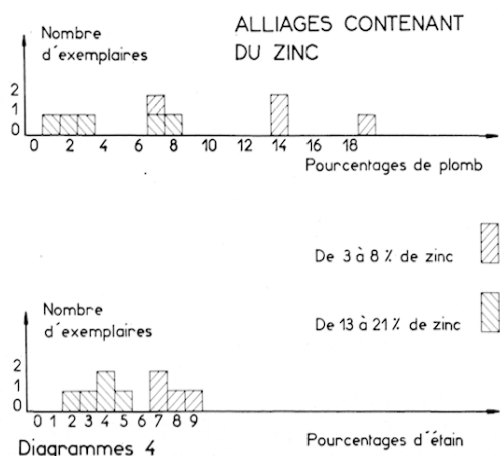
(66) Voir le tableau p. 214.

(67) Les bronzes en plomb apparaissent en Egypte à des époques beaucoup plus anciennes, mais les données analytiques sont insuffisantes pour qu'il soit possible d'en apprécier l'importance (cf. A. LUCAS, *Ancient Egyptian Materials and Industries*).

## APPENDICE

**LAITONS.** — Parmi les objets et fragments étudiés, il en est dix qui présentent une proportion notable de zinc (nos 4, 10, 39, 44 à 47, 62, 70, 87). Si l'on élimine le cas du n° 39, qui est un bronze doré et en présente les caractéristiques (étain absent ou en très faible pourcentage), les 9 autres échantillons se classent en deux catégories bien distinctes (diagramme 4).

Il y a, d'une part, les alliages qui ont, ici, 13 % de zinc ou plus. Leur taux d'étain ne dépasse pas 5 % ; il est donc anormalement bas par rapport à l'ensemble des bronzes (voir les diagrammes précédents). Les pourcentages de plomb sont également très faibles pour les exemplaires coulés et, bien entendu, pour le seul exemplaire martelé n° 4. La faible proportion de plomb correspond sans doute au désir de ne pas altérer la couleur de l'alliage ; quant aux pourcentages d'étain peu élevés, qui peuvent être dûs aux mêmes causes, ils signifient aussi que les propriétés essentielles des laitons n'étaient pas ignorées. Cependant, il faut remarquer qu'aucun des exemplaires n'est ici dépourvu d'étain ; le cas du n° 4 est assez caractéristique à cet égard. Tout se passe comme si le métallurgiste antique avait eu quelque réticence à employer le laiton sans étain, remarque que nous avons déjà faite à propos du cuivre (p. 204). Cela apparaît d'autant mieux qu'on



retrouve le laiton (mais avec un pourcentage d'étain négligeable) parmi les alliages monétaires, domaine où les techniques sont différentes.

A côté, existe un autre groupe d'alliages contenant du zinc mais en proportion moindre que 8 %. Les taux d'étain et de plomb sont ceux de la moyenne des bronzes coulés. Il s'agit donc d'alliages qui ont été traités comme des bronzes par le métallurgiste de l'Antiquité. Il est possible que la couleur de l'alliage naturel : cuivre-zinc — rose pour des concentrations de zinc inférieures à 10 % — ait incité à le considérer et à le traiter comme une simple variété de cuivre, peut-être un peu plus précieuse que le cuivre ordinaire.

## Symboles et abréviations utilisés dans les Tableaux.

V : objets portant un numéro au Catalogue des bronzes du Musée de Vienne (Isère).

F : objets du Musée gallo-romain de Fourvière à Lyon (non catalogués).

Les nos 45 et 99 correspondent à des objets provenant d'autres collections.

S : statues.

s : statuettes.

Les analyses de vases et patères d'époque romaine concernent exclusivement les « panses » des objets. Les manches et poignées sont examinés sous la rubrique « divers ».

C : bronzes coulés.

R : bronzes martelés et recuits.

\* : analyses vérifiées par voie chimique.



## BRONZES ROMAINS

## VASES

NUMÉRO D'ANALYSE	COMPOSITION				Épaisseur en mm	Diagr.	Structures	Désignation
	Cu	Sn	Pb	Zn				
1	99	1	—	—	0,4	1	R	F
2	99	1	—	—	0,3	1	R	F
3	95	4	1	—	0,3	1	R	F
* 4	77	5	1	17	0,3	4	R	F
5	93	7	—	—	0,6	1	R	F
6	92	8	—	—	0,5	1	R	F
7	92	8	—	—	0,5	1	R	F
8	92	8	—	—	0,4	1	R	F
9	91	8	1	—	0,9	1	R	F
* 10	72	8	14	6	0,9	2 4	C	F
11	90	10	—	—	0,8	1	R	F
12	90	10	—	—	0,7	1	R	F
13	89	11	—	—	0,4	1	R	F
14	89	11	—	—	0,4	1	R	F

## PATÈRES

15	90	8	2	—	0,3	1	R	F
16	69	9	22	—	0,4	2	C	F
17	73	9	18	—	0,7	2	C	F
18	90	10	—	—	0,6	1	R	F
19	55	10	35	—	0,3	2	C	F
20	89	11	—	—	0,4	1	R	F
21	88	12	—	—	0,5	2	C	F
22	87	13	—	—	0,5	1	R	F
23	70	12	18	—	0,5	2	C	F

## MIROIRS

24	92	8	—	—	1,3		R	F
25	90	10	—	—	1,5		R	F
26	90	10	—	—	0,9	1	R	F
27	69	11	20	—	0,7	2	C	F
28	68	13	19	—	0,9	2	C	F
29	65	15	20	—	0,5	2	C	F
30	72	16	12	—	0,7	2	C	F
* 31	70	23	7	—	2,2		C	F

DIVERS

NUMÉRO D'ANALYSE	COMPOSITION				Épaisseur en mm	Diagr.	Structures	Désignation
	Cu	Sn	Pb	Zn				
32	100	—	—	—			R	V Rivet du placage n° 41
* 33	83	10	7	—		3	C	F Anse à tête de Gorgone.
34	85	11	4	—			martelé sans recuit	F Poucier de vase
35	75	11	14	—			C	F Cuillère.
36	88	12	—	—	0,6	1	R	F Strigile.
37	67	12	21	—			C	F Cuillère.
38	87	13	—	—	1,8		R	F Manche de patère.

STATUES ET STATUETTES

NUMÉRO D'ANALYSE	COMPOSITION				Diagr.	DÉSIGNATION
	Cu	Sn	Pb	Zn		
39	96	—	—	4	3	F. Aviron (manche), doré
40	97	2	1	—	3	F. Aviron (pale), doré
41	94	2	4	—	3	V 83. Dauphin (placage), doré
* 42	90	2	8	—	3	V 83. Dauphin (corps), doré
* 43	76	2	22	—	3	F. Patte d'animal, doré
44	81	2	2	15	3 4	V 16. Mercure (s)
45	73	3	3	21	3 4	Grotesque (s), type alexandrin
46	76	4	7	13	3 4	V 25. Hercule (s)
47	73	4	8	15	3 4	V 26. Hercule (s)
48	92	6	2	—	3	V 21. Hercule enfant (s)
49	85	6	9	—	3	V 3. Neptune (s)
50	84	6	10	—	3	V 4. Buste de Neptune (s)
51	84	5	11	—		F. Buste de Jupiter (applique)
52	75	6	19	—		F. <i>Idem</i> , autre région analysée
53	79	6	15	—	3	F. <i>Idem</i> , moyenne des 9 régions analysées
54	82	5	13	—		F. Buste de Neptune (applique)
55	77	6	17	—		F. <i>Idem</i> , autre région analysée
56	79	6	15	—	3	F. <i>Idem</i> , moy. des 5 régions analysées
57	82	7	11	—		F. Buste de Mars (applique)
58	74	8	18	—		F. <i>Idem</i> , autre région analysée
59	78	7	15	—	3	F. <i>Idem</i> , moy. des 7 régions analysées
* 60	70	6	24	—	3	V. Débris de statue 2 (S)
61	91	7	2	—	3	V 7. Apollon (s)
62	83	7	7	3	3 4	V 19. Mercure (s)
63	85	7	8	—	3	V 15. Mercure (s)
64	84	7	9	—	3	F. Sanglier 1 (poids)

NUMÉRO D'ANALYSE	COMPOSITION				Diagr.	DÉSIGNATION
	Cu	Sn	Fb	Zn		
65	81	7	12	—	3	V 32. Silvain (s)
66	80	7	13	—	3	V 12. Vénus (s)
67	87	8	5	—	3	V 12. Socle
68	77	7	16	—	3	V 2. Jupiter (s)
69	82	7	11	—	3	V 2. Socle
70	70	7	19	4	3 4	V 6. Mars (s)
71	74	7	19	—	3	V 13. Tutéla (s)
* 72	73	7	20	—	3	V. Débris de statue 3 (S)
73	92	8	—	—	3	F. Sanglier 3 (poids)
74	86	8	6	—	3	V 29. Lare (s)
75	82	8	10	—	3	V 43. Buste de bacchante (peson)
76	81	8	11	—	3	V 8. Apollon (s)
77	80	8	12	—	3	V 22. Hercule (s)
78	66	14	20	—	3	V 22. Peau de lion (s)
* 79	79	8	13	—	3	V. Débris de statue 1 (S)
80	77	8	15	—	3	V 38. Vieillard, type alexandrin (s)
* 81	71	8	21	—	3	V 47. « Pacatianus », draperie (S)
82	61	9	30	—		V 47. <i>Idem</i> , autre région analysée (S)
83	60	7	33	—		V 47. <i>Idem</i> , autre région analysée (S)
84	66	9	25	—	3	V 46. « Pacatianus », tête (S)
85	78	9	13	—	3	V 11. Vénus (s)
86	79	8	13	—	3	V 11. Socle
87	69	9	14	8	3 4	F. Grottesque, type alexandrin (s)
* 88	77	9	14	—	3	F. Statue colossale, placage (S)
89	69	9	22	—	3	F. Statue colossale (S)
90	68	9	23	—	3	V 45. Tête (S)
91	89	10	1	—	3	F. Sanglier 2 (poids)
92	89	10	1	—	3	V 30. Lare(s)
93	72	10	18	—	3	V 23. Hercule (s)
94	67	14	19	—	3	V 35. Atlas (s)
95	80	11	9	—	3	V 35. Socle.

## BRONZES ÉTRUSQUES

96	89	6	5	—	V 34. Discophore, II <sup>e</sup> siècle (s)
97	87	7	6	—	V 33. Orant, II <sup>e</sup> (s)
98	82	7	11	—	V 258. Anse d'oenoché rhodienne, VII <sup>e</sup> s. Imitation étrusque?
99	89	8	3	—	Tête de taureau, VII <sup>e</sup> s. (s)
100	82	8	10	—	V 24. Hercule, IV <sup>e</sup> -III <sup>e</sup> s. (s)
101	81	8	11	—	V 269. Anse d'oenoché, V <sup>e</sup> s.
102	91	9	—	—	V 304. Rebord de bassin, IV <sup>e</sup> s.
103	78	11	11	—	V 304. Poignée
104	82	10	8	—	V 267. Anse d'oenoché, V <sup>e</sup> s.
105	74	11	15	—	V 294. Poignée de stamnos, V <sup>e</sup> -IV <sup>e</sup> s.
106	85	15	—	—	V 296. Poignée de stamnos, V <sup>e</sup> -IV <sup>e</sup> s.