

XX<sup>e</sup> RENCONTRES INTERNATIONALES D'ARCHÉOLOGIE ET D'HISTOIRE D'ANTIBES

# *Arts du feu et productions artisanales*

---

*ACTES DES RENCONTRES*  
*21 - 22 - 23 octobre 1999*

---

***Édités par***

*Pierre PÉTREQUIN, Philippe FLUZIN,  
Jacques THIRIOT, Paul BENOIT*

***Avec le concours***

*du Centre national de la recherche scientifique  
du Centre de recherches archéologiques  
de la ville d'Antibes  
du ministère de la Culture et de la Communication  
et de l'université de Provence*

Éditions APDCA – Antibes – 2000

**ASSOCIATION POUR LA PROMOTION ET LA DIFFUSION  
DES CONNAISSANCES ARCHÉOLOGIQUES**

14 avenue Robert Soleau  
F-06600 Antibes

*Secrétariat d'édition et maquette :*  
Monique CLATOT  
avec la participation de Simone ATIENZA

*Illustrations :*  
Chantal PERROT

***Pour toute information relative à la diffusion de nos ouvrages,  
merci de bien vouloir contacter :***

LIBRAIRIE ARCHÉOLOGIQUE  
BP 10, F-34530 Montagnac  
Téléphone : 04 67 24 02 48 - Télécopie : 04 67 24 14 39

© APDCA, Antibes, 2000

ISBN 2-904110-30-5

## Comparaison d'études destructives et non destructives sur une enclume gallo-romaine : l'apport de la tomographie gamma

*Jacques REBIÈRE\**, *Jean-Luc PETTIER\*\**,  
*Philippe DILLMANN\*\*\**, *Paul BENOIT\*\*\*\**

### RÉSUMÉ

Une enclume-tas gallo-romaine, représentative de celles inventoriées en France – ou figurant dans l'iconographie – a été étudiée par prélèvement d'un quart dans le sens longitudinal (M. = 5 kg, L = 21 cm, l = 3 à 5 cm). Chaque face interne de l'échantillon a été préparée en vue d'un examen métallographique.

Une récente coopération avec le Commissariat à l'énergie atomique (Cadarache) a permis d'examiner le prélèvement par tomodensitométrie gamma. Deux images localisent les diverses densités de métal à des niveaux situés respectivement à 1 et à 3 cm sous le plan étudié en métallographie. Elles mettent en évidence une similitude d'informations de manière non destructive. Cette technique permettra d'examiner, sans les détruire, les autres enclumes-tas du corpus et d'en comparer la mise en forme.

### ABSTRACT

A Gallo-Roman anvil, representative of those inventoried in France or found in the iconography have been studied by sampling a quarter in the longitudinal sense (M. = 5 kg, L = 21 cm, l = 3 to 5 cm). Every internal face of the sample has been prepared for metallographic examinations.

---

\* Laboratoire de conservation, restauration et recherches (CÉPAM-CNRS), Centre archéologique du Var, 19, rue Frédéric- Mireur, 83300 Draguignan, France.

\*\* DESD-SCCD-LECD, Bât. 326, CEA-Cadarache, 13108 Saint-Paul-Lez-Durance, France.

\*\*\* Laboratoire Pierre-Süe, Commissariat à l'énergie atomique-CNRS, CE Saclay, 91191 Gif-sur-Yvette cedex, France.

\*\*\*\* Université de Paris I, Équipe d'histoire des mines et de la métallurgie, 9, rue Mahler, 75004 Paris, France.

A recent cooperation with the Commissariat à l'énergie atomique (Cadarache) permitted to examine the sample by gamma tomodensitometry. Two pictures allow us to localize the various densities of metal to levels situated respectively to 1 and 3 cm under the surfaces studied by metallographic examinations. The information obtained with the two techniques are in good agreement. Tomodensitometry will permit to examine in further studies, without destroying them, the other anvils of the corpus and to compare the different manufacturing methods.

---

## Introduction

La volonté de mieux connaître les techniques de mise en forme d'objets métalliques massifs – comme des enclumes – et le légitime souci de leur conservation ont pu entraîner des approches contradictoires. Le respect de leur intégrité ne permettait pas jusqu'ici d'envisager le tronçonnage systématique de toutes les enclumes. À l'issue d'une étude métallographique destinée à déduire de l'examen des micro- et macrostructures internes le mode d'élaboration d'une enclume-tas gallo-romaine, nous avons cherché à mettre en correspondance ces informations avec d'autres, devenues récemment accessibles, et non destructives.

Une comparaison entre les informations précédemment obtenues et celles fournies par tomodensitométrie gamma est présentée ici.

## Technique d'examen

L'objet examiné correspond à un quart d'enclume prélevé dans le sens de la hauteur, soit une pièce en fer de 21 cm de longueur sur 3 à 5 cm de largeur et d'une masse de 5 kg environ. Cette pièce a été disposée sur le plateau du tomographe de sorte que la partie à étudier en priorité soit horizontale. À ce stade de nos investigations, nous nous sommes limités à l'étude d'une seule face de l'échantillon.

L'échantillon soumis aux essais était d'une taille très en deçà des paramètres maximaux autorisés, l'appareil sollicité acceptant des échantillons d'un diamètre allant jusqu'à 600 mm et d'une masse de 500 kg. Outre l'ensemble mécanique autorisant le déplacement des objets, le tomographe se composait au moment de l'expérience d'un ensemble d'irradiation-détection gamma fixe et d'une électronique de comptage permettant une reconstruction d'images tomographiques, de visualisation et de traitement. À la date de l'examen (13 décembre 1995), l'activité de la source était de 255 GBq.

Un premier examen a été réalisé à 10 mm sous la surface polie lors de l'étude métallographique, un second à 30 mm sous cette même surface. Les différences de densités enregistrées ont été codées en niveaux de gris ou en fausses couleurs. Bien

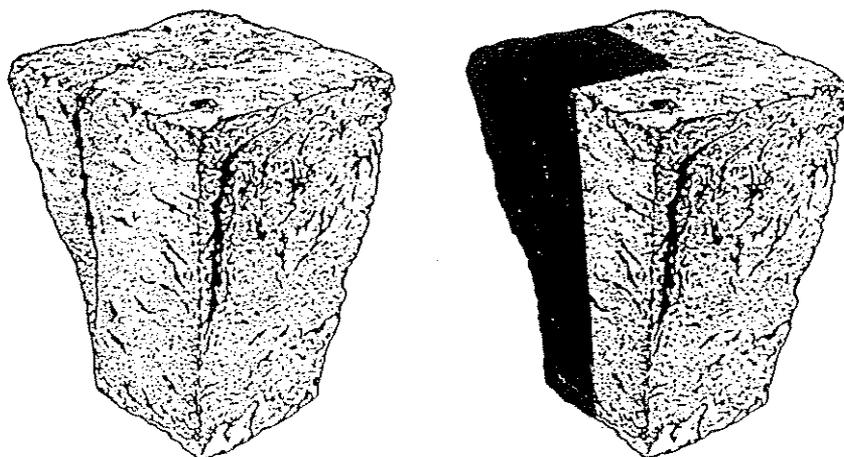


Fig. 1. Enclume entière et localisation du prélèvement.

que ces dernières eussent offert une vision plus complète, des considérations techniques ne nous ont pas permis de les reproduire ; seules les premières ont donc pu être présentées ici. Par ailleurs, les hétérogénéités internes à l'échantillon ont été mises en évidence quand leurs dimensions étaient supérieures à la résolution géométrique de l'appareil (2,34 mm) et quand leur densité s'écartait suffisamment de la densité environnante.

### Interprétation des images tomographiques

Une base de comparaison nous est fournie sur la figure 1 qui représente le dessin de l'enclume-tas étudiée avant découpe et l'emplacement du prélèvement (en sombre). La figure 2a rappelle la répartition des porosités et de la fissure, telles qu'elles ont été observées lors de la précédente étude. Les autres figures 2b et 2c localisent en noir et blanc les variations de densités mesurées par tomodensitométrie gamma, respectivement à 10 et 30 mm sous la surface étudiée précédemment.

La figure 2b montre le « plan » situé à 10 mm sous la surface schématisée en 2a (moitié droite). Les densités inférieures à 3,97 sont en noir, tandis que celles qui sont supérieures à 7,04 sont en blanc. Cette image met en évidence la fissure et de nombreuses porosités. Par comparaison avec la figure 2a, on note un trajet différent parcouru par cette fissure. Elle paraît plus large sous la table de frappe et présente dans la partie haute de l'enclume une cavité auparavant insoupçonnable. De même, une tache noire, parallèle à la fissure principale en son milieu, révèle une autre zone de faible densité : assurément une fissure secondaire.

La comparaison de la figure 2c avec les figures 2a et 2b confirme l'emplacement des fissures et des principales porosités. L'image a ici été « traitée » de sorte que l'on

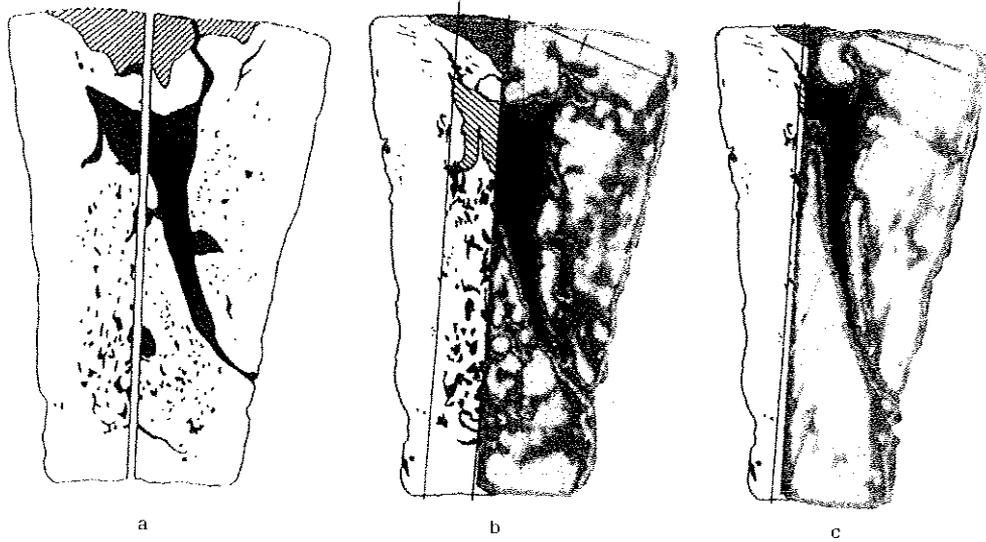


Fig. 2. Comparaisons des données obtenues par tomographie gamma et par métallographie. a. Faces observées par analyse métallographique. b. Image obtenue par tomographie 10 mm sous une des surfaces polies. c. Image obtenue par tomographie 30 mm sous une des surfaces polies.

puisse représenter en noir les zones de densités inférieures à 0 et, en blanc, celles de densité supérieure à 9,4. Cette image confirme l'emplacement des zones de fortes densités déjà illustrées par la figure 2b. Les zones les plus denses sont situées sous la surface de frappe, jusqu'à 40 mm sous cette surface, puis sous la petite base jusqu'à 10 mm à partir de cette surface. Le bord paraît de densité homogène.

### Corrélation avec les examens obtenus par voie métallographique traditionnelle

Les observations métallographiques permettent d'obtenir des informations sur la structure du métal (répartition des hétérogénéités, écrouissage), ainsi que sur sa composition (taux de carbone). Pour cette enclume, les observations ont été publiées dans l'étude précédente (1995). Résumons-les brièvement : le corps de l'enclume est constitué de ferrite à gros grains avec présence de quelques macles sous la table de frappe. Des inclusions non métalliques ont été identifiées. Leur concentration, très faible sur les bords de l'enclume, est très importante à cœur où un grand nombre de porosités apparaissent également. Ce corps pourrait avoir été obtenu directement à partir d'une loupe non épurée. La surface de frappe (fig. 2a) est constituée d'un acier eutectoïde à structure perlitique. Il n'y a pas de trace de microstructures hors équilibre. Cette table d'acier semble avoir été soudée sur le corps en fer.

La comparaison de la répartition des porosités illustrée, d'une part, par les tomographies gamma obtenues à 10 et 30 mm de profondeur, d'autre part, après le polissage préalable à l'analyse métallographique révèle une parfaite corrélation. Ces porosités, mises en évidence à la suite des observations macro- et micrographiques, peuvent donc être suivies à l'intérieur de l'objet. Cependant, les détails de section inférieure à 2 mm<sup>2</sup> demeurant invisibles par tomodensitométrie, le nombre des inclusions ne peut être précisé. On observera néanmoins que les endroits de forte concentration inclusionnaire semblent être associés, sur les tomographies, à des zones de moindre densité. Par ailleurs, la structure du métal (écrouissage éventuel) ainsi que sa teneur en carbone ne peuvent être appréhendées par la tomographie.

## Conclusion

Outre l'utilisation gamma pour la restauration d'objets d'art, l'investigation non destructive par tomographie gamma peut également apporter des renseignements utiles sur les procédés d'élaboration d'objets métalliques anciens. Malgré une dynamique de comptage du tomographe gamma insuffisante pour ce type d'objet dense et une résolution spatiale autorisant la détection de détails dont les dimensions sont supérieures à 13 mm<sup>3</sup> sur des coupes transversales de 2 mm de hauteur, nous avons réalisé deux examens tomographiques sur un quart d'enclume gallo-romaine de Jouars-Pontchartrain. Cette démarche a mis en évidence la structure macroscopique interne de l'objet. En dépit des artefacts liés à un rapport signal/bruit faible pour certaines projections, les images reconstruites montrent une coupe située à 30 mm sous la surface polie beaucoup plus dense et homogène que la coupe située à 10 mm sous cette même surface. Les images correspondantes permettent de suivre l'évolution des fissures, ainsi que la localisation de nombreuses porosités.

Cependant, si les informations obtenues en utilisant la tomographie gamma sont importantes et ont l'immense avantage d'être non destructives, elles ne permettent pas d'obtenir une répartition précise des petites porosités et des inclusions non métalliques ; la structure du métal (écrouissage) et la teneur en carbone restent indéterminées. Ces informations demeurant pourtant fondamentales pour la compréhension de la mise en forme des objets, il nous faut donc envisager le recours à d'autres examens complémentaires.

Un mode opératoire *ad hoc* pour l'étude d'objets de grande valeur muséographique ne pouvant être découpés pourrait donc combiner tomographie et métallographie d'une manière non destructive. En effet, un polissage de surface, en plusieurs endroits judicieusement choisis, de l'objet à étudier déterminerait la propriété inclusionnaire, la structure du métal et la teneur en carbone. La tomographie gamma, quant à elle, détecterait les principales hétérogénéités en profondeur de l'objet. De la sorte, la mise en forme de l'enclume-tas examinée dans cet article (corps ferritique sur lequel a été soudée une table de frappe en acier, grosses poro-

sités au centre de l'enclume laissant penser à l'utilisation brute d'une loupe pour la réalisation du corps) aurait pu être déduite aisément, la démarche suivie jusqu'ici ayant eu le mérite d'offrir un élément fiable de comparaisons.

Cette stratégie inspirera les futures investigations sur le reste du corpus d'enclumes.

#### *Remerciements*

Les auteurs tiennent ici à remercier tout particulièrement M. François Zuber, inventeur de l'enclume-tas de Jouars-Pontchartrain pour sa constante coopération lors de cette étude. Nous remercions également M. Bruno Dufaÿ, archéologue départemental des Yvelines. Par ailleurs, ce travail n'aurait pas été possible sans l'aide du Service de caractérisation et contrôle des déchets (SCCD) et de la Section d'expertise et de caractérisation (SEC) de l'établissement du CEA de Cadarache, notamment de MM. Bonifay, Chabalier et Elluard. Enfin, la conception même de notre protocole d'essais repose en partie sur des observations effectuées auprès des entreprises SGS Qualitest (13) pour diverses images gammagraphiques et Krautkammer (69) pour des essais de contrôle non destructif (C-Scan).

#### **Bibliographie**

- PETTIER (J.-L.), 1996.- *Compte rendu d'imagerie gamma active sur un objet dense. Application : tomographies gamma d'une enclume gallo-romaine*. Rapport SEC CR - 175 SEC/SCCD/DESD/DCC/CEA. Cadarache, 13 p.
- REBIÈRE (J.), RÉMY (P.), GUILLOT (I.), BENOIT (P.), 1995.- Les enclumes-tas gallo-romaines : le cas de Jouars-Pontchartrain. *In* : P. Benoit, P. Fluzin (Dir.), *Paléoméallurgie du fer et cultures*. Actes du Symposium international du comité pour la sidérurgie ancienne de l'Union internationale des sciences préhistoriques et protohistoriques, 1990. Belfort-Sévenans, Éd. Vulcan, p. 501-508.