

REVUE BELGE
DE
NUMISMATIQUE
ET DE SIGILLOGRAPHIE
BELGISCH TIJDSCHRIFT
VOOR NUMISMATIEK EN ZEGELKUNDE

PUBLIÉE

SOUS LE HAUT PATRONAGE
DE S. M. LE ROI

PAR LA

SOCIÉTÉ ROYALE
DE NUMISMATIQUE DE BELGIQUE

AVEC L'AIDE FINANCIÈRE DU
MINISTÈRE VAN DE VLAAMSE GEMEENSCHAP

UITGEGEVEN

ONDER DE HOGE BESCHERMING
VAN Z. M. DE KONING

DOOR HET

KONINKLIJK BELGISCH
GENOOTSCHAP VOOR NUMISMATIEK

MET DE FINANCIËLE HULP VAN HET
MINISTÈRE VAN DE VLAAMSE GEMEENSCHAP

DIRECTEURS :

PAUL NASTER, TONY HACKENS,
MAURICE COLAERT, PATRICK MARCHETTI

CXXXIII - 1987

BRUXELLES

BRUSSEL

FRANÇOISE MICHAUX-VAN DER MERSCH (*)
FRANÇOIS DELAMARE (**)

ÉVOLUTION DE LA TECHNIQUE DE FRAPPE DES STATÈRES ÉGINÉTIQUES

Étude numismatique et simulation de la frappe
sur pâte à modeler

(Planches I-VII)

1. INTRODUCTION

L'« apparente monotonie » ⁽¹⁾ des monnaies archaïques d'Égine explique, sans doute, que les numismates n'en aient jamais proposé de monographie caractérisocopique. En 1960, M. Holloway, sans prétendre à l'exhaustivité, a présenté un catalogue de plus de 1000 exemplaires disséminés dans de nombreuses collections ⁽²⁾.

(*) Aspirant au Fonds National de la Recherche Scientifique (F.N.R.S.). Séminaire Marcel Hoc, Université Catholique de Louvain (Belgique).

(**) Centre de Mise en Forme des Matériaux. École des Mines de Paris, Sophia Antipolis (06565 Valbonne Cedex, France).

Toutes les expériences qui sont décrites ont été réalisées au Centre de Mise en Forme des Matériaux de l'École des Mines de Paris (Sophia Antipolis). Elles n'auraient pu l'être sans l'active et constante collaboration de Madame S. Jacomet à qui nous adressons nos remerciements sincères. Notre reconnaissance va également à Monsieur P. Montmitonnet qui a toujours témoigné d'un vif intérêt pour les techniques monétaires. Les figures ont été dessinées à Louvain-la-Neuve par M^{me} van Noorbeek.

(1) H. NICOLET-PIERRE, *Remarques sur le monnayage d'Égine au V^e et au I V^e s. d'après la trouvaille de Mégapolis*, dans *Frappe et ateliers monétaires dans l'Antiquité et au Moyen Âge*, Belgrade 1975, Belgrade, 1976, p. 5.

(2) R. R. HOLLOWAY, *The elder turtles of Aigina*, Princeton University Ph. D., 1960. History and Archaeology.

La publication du trésor de Matala ⁽³⁾ lui a donné l'occasion de parfaire le classement chronologique des monnaies, complété ensuite par M. Price et M^{me} Waggoner ⁽⁴⁾, M^{me} Nicolet-Pierre et, enfin, M. Kroll et M^{me} Waggoner ⁽⁵⁾.

Ces classements reposent sur deux critères principaux : les types de droit et l'évolution du carré creux des revers, qui permettent de sérier les groupes les plus importants de la production monétaire archaïque d'Égine [Tableau I]. Nous nous proposons de chercher quelques critères supplémentaires : de nature technique, ils sont liés à la frappe des monnaies. L'impact de chacun d'entre eux, son importance, seront évalués de manière quantitative grâce à la possibilité de simuler la frappe des statères d'Égine sur pâte à modeler.

1.1. ÉTAT DE LA QUESTION

1.1.1. L'évolution du type de droit

La tortue figurée au droit des monnaies est d'abord tortue de mer (les anglophones parlent de *Turtle*), tortue de terre ensuite (*Tortoise*). L'ensemble des tortues de mer se subdivise en deux groupes suivant que :

- la carapace est ornée d'une seule rangée verticale de globules ;
- outre cette rangée, de deux globules supplémentaires disposés de part et d'autre de cette dernière : il s'agit de la *T-back Turtle* [pl. I].

Entre les monnaies sur lesquelles on ne distingue aucun globule et celles sur lesquelles ils sont parfaitement imprimés, les variantes sont nombreuses : soit que les globules sont mal venus ou simplement ébauchés, soit que tous n'apparaissent pas. Si l'on prend l'exemple de quelques trésors de monnaies éginétiques publiés récemment ⁽⁶⁾, l'on remarque que la proportion de « belles » pièces,

(3) R. R. HOLLOWAY, *An archaic hoard from Crete and the early Aeginetan coinage*, dans *ANS MN*, 17, 1971, p. 1-22, pl. I-VIII.

(4) M. PRICE, M. WAGGONER, *Archaic Greek silver coinage. The « Asyut » hoard*, Londres, 1975.

(5) J. H. KROLL, N. WAGGONER, *Dating the earliest coins of Athens, Corinth and Aegina*, dans *AJA*, 88, 1984, p. 325-340.

(6) Trésors de Matala 1943 (*IGCH* 1 : cfr R. R. HOLLOWAY [1971]), de Babes (*Coin Hoards*, II, 13), d'Eirini (*Coin Hoards*, II, 24 : cfr S. GRUNAUER — VON HOERSCHELMANN, *Zwei Schatzfunde archaischer Statere von Aigina*, dans *Chiron*, 5, 1975, p. 13-16, pl. 11-16, de Myrina 1970 (*Coin Hoards* III, 12 : cfr M. CARAMESSINI, *Deux trésors de statères éginètes du Cabinet des Médailles d'Athènes*, dans *SM* 30, 1980, p. 81-90).

TABLEAU I

HOLLOWAY (1971)	PRICE-WAGGONER (1975)	KROLL-WAGGONER (1984)
I. Dr. Tortue de mer Rv. Carré creux de type ionien	I. Dr. Groupes I et II A, B et C de Holloway Rv. Union Jack	I. Dr. Tortue de mer Rv. - Carré creux de type ionien - Carré creux sans subdivision - Union Jack
I.-III. <i>Période I</i> Dr. A : Proto heavy collar turtle B : Proto trefoil collar turtle C : Proto tortoise Rv. Union Jack	II. Dr. Thin collar Rv. a : Union Jack b : Évolution vers les 5 triangles	II. a. Dr. Thin collar Rv. - Union Jack - 5 triangles - Ailes de moulin
<i>Période II</i> Dr. D : Thin collar turtle Rv. - Union Jack - 5 triangles - ailes de moulin	III. Dr. a : Thin collar b : Heavy collar Rv. 5 triangles	b. Dr. - Thin collar - Heavy collar - Trefoil collar - Proto tortoise
<i>Période III</i> Dr. E : Heavy collar turtle F : Trefoil collar turtle	IV. Dr. a : Thin collar b : Heavy collar c : Trefoil collar Rv. Ailes de moulin	Rv. - 5 triangles - Ailes de moulin - Proto skew
Rv. Analogues	V. Dr. Proto tortoise trefoil collar Rv. Ailes de moulin	c. Dr. Analogues Rv. Small skew
IV. Dr. Analogues Rv. Early skew	VI. Dr. a : Thin collar b : Heavy collar c : Late thin collar Rv. Proto skew	III. Dr. T-back turtle Rv. Large skew
V. Dr. Large T-back turtle Rv. Large skew	VII. Dr. a : Late thin collar b : Heavy collar Rv. Small skew	

c'est-à-dire de pièces dont le type de droit est parfaitement imprimé, est relativement faible. Cette particularité a donné lieu à des remarques multiples. S'agit-il d'une caractéristique *typologique*, donc propre à chaque coin ? C'est ce qu'ont estimé les numismates qui, jusqu'à la parution du travail de M. Holloway, distinguaient les tortues à carapace lisse de celles dont la carapace est ornée d'une rangée de globules, les premières étant considérées comme antérieures aux secondes. D'autre part, certains ont vu dans l'absence de globules, ou tout au moins dans leur mauvaise impression, la preuve de l'usure des pièces, donc de leur longue circulation (7). Mais, ne pourrait-on penser que les globules manquent pour une raison technique ? C'est ce que nous voudrions vérifier dans ce travail.

1.1.2. *Évolution du carré creux de revers*

Dès 1906, H. B. Earle Fox (8) avait reconnu les principaux types de carré creux éginétique : son travail a servi de base aux numismates qui lui ont succédé et l'ont complété. Actuellement, on distingue les classes suivantes (9) :

1. carré creux analogue à celui des monnaies asiatiques d'électrum, orné de fines lignes qui s'entrecroisent irrégulièrement ;

2. carré creux au type du drapeau anglais (*Union Jack*) dont les champs sont souvent remplis de métal [pl. I n° 1-3]. De facture négligée, il évolue rapidement vers :

3. a carré creux en *ailes de moulin à vent* [pl. I n° 4] ;

b un carré qui présente cinq champs triangulaires creux sur huit. Suivant la disposition de ces champs, M^{me} Nicolet-Pierre (10) définit les types A, pour lequel on distingue deux variantes [pl. I n° 5-6], et B [pl. I n° 7], lequel serait à l'origine du :

4. *early skew reverse* [pl. I n° 8] ou type C (11) auquel ont succédé les :

5. *small skew* [pl. I n° 10] et *large skew* [pl. I n° 11]

(7) H. NICOLET-PIERRE (1976), p. 8 et 11.

(8) H. B. EARLE FOX, *The early coinages of European Greece*, in *Corolla Numismatica*, Londres, New York, 1906, p. 34-46, pl. I.

(9) R. R. HOLLOWAY (1971), p. 16. — M. PRICE, N. WAGGONER (1975), p. 76. — H. NICOLET-PIERRE (1976), p. 7-9. — J. H. KROLL, N. WAGGONER (1984), p. 336.

(10) H. NICOLET-PIERRE (1976), p. 8, fig. 1-2.

(11) H. NICOLET-PIERRE (1976), p. 9, fig. 3.

1.2. CRITÈRES TECHNIQUES POUR ÉTABLIR UNE CHRONOLOGIE

Outre ces types, diverses caractéristiques techniques de ce monnayage évoluent au cours des émissions de l'époque archaïque. Il est intéressant de les étudier, d'autant plus qu'il s'agit de jalonner les étapes du perfectionnement technique dans le temps.

1.2.1. *La forme du flan*

La forme du flan permet de sérier la production archaïque d'Égine. Les groupes ainsi définis présentent une distribution que nous superposons aux classements typologiques du droit et du revers :

1. La tortue de mer avec la seule rangée verticale de globules apparaît sur deux types de flan :

— dans un premier groupe, les flans sont épais et présentent une forme allongée particulièrement irrégulière, décrite comme *allongée en amande* ⁽¹²⁾ ou *bohnen- oder tropfenartige Form* ⁽¹³⁾. Le type de droit est imprimé le long du grand axe (quelques rares exceptions mises à part), sur une surface bombée et le carré creux est très souvent incomplet [pl. I, 2 et II] ;

— dans un second groupe, les flans sont toujours épais mais de forme globulaire beaucoup plus régulière [pl. I n° 3]. Ces deux types de flan sont associés à toutes les variantes de carré creux décrites ci-dessus, jusques et y compris le type C ou *early skew*.

2. En revanche, les pièces au type de la *T-back Turtle*, dont le revers est orné du *large skew* qui recouvre une surface importante, sont produites avec des flans circulaires et réguliers ⁽¹⁴⁾, aplatis autour du type de droit [pl. I n° 11]. Le passage à cette forme de flan est déjà annoncé lorsque ce même type de droit est associé au *early skew reverse* et au *small skew* ⁽¹⁵⁾.

3. Enfin, M^{me} Nicolet-Pierre ⁽¹⁶⁾ a signalé déjà le changement de la forme des flans qui coïncide avec le début de la production des

(12) H. NICOLET-PIERRE (1976), p. 10.

(13) S. GRUNAUER - VON HOERSCHELMANN, (1975), p. 13-16, pl. 11-16.

(14) Le diamètre moyen de ces pièces est de 2 cm contre 1,5 cm pour les pièces du groupe précédent.

(15) H. NICOLET-PIERRE (1976), p. 10. — M. CARAMESSINI (1979), p. 230.

(16) H. NICOLET-PIERRE (1976), p. 10.

tortues de terre. Plus massives que précédemment, les pièces présentent une tranche « droite épaisse et irrégulière ». La technique de fabrication a dû changer : du moulage, les artisans semblent être passés au débitage (17).

1.2.2. *La surface du revers*

L'étude du revers des monnaies éginétiques nous fournit également un critère technique de classement : le champ qui entoure l'empreinte carrée creuse peut, en effet, être bombé ou aplati, totalement ou partiellement. En fait, on peut se demander si l'on n'observe pas dans cette caractéristique les traces d'une innovation technique qui se serait imposée à une certaine époque, constituée par le passage de l'emploi d'un poinçon comme trousseau à celui d'un coin.

La forme du trousseau : poinçon ou coin.

Depuis le début du siècle, les numismates appellent *poinçon* le trousseau au type du carré creux ; mais le poinçon n'a jamais été nettement différencié du coin. Dans le cas du poinçon, le trousseau présente une surface de frappe exactement égale à celle de l'empreinte à obtenir et, par là, plus petite que la superficie du flan : son apposition dans ce flan s'accompagne de la formation d'un bourrelet de matière dans les surfaces libres avoisinant l'empreinte creuse [pl. II]. Une partie du métal, chassée par la pénétration du poinçon, remonte vers la surface, formant ce champ bombé. Dans le cas du coin, l'outil présente une surface de frappe au moins égale à la superficie du flan : elle constitue comme un champ autour de l'empreinte carrée. Étant enserré entre les deux coins, le métal est alors aplati au fur et à mesure qu'il s'écoule.

Il convient, pour vérifier ces hypothèses, d'apprendre à mieux lire les monnaies en étudiant en détail la frappe. C'est ce que nous avons cherché à faire en frappant de manière contrôlée des pièces semblables aux statères éginétiques, mais réalisées en pâte à modeler.

(17) H. CONSOLAKI, T. HACKENS, *Un atelier monétaire dans un temple argien ?*, dans *BCH. Suppl. VI : Études argiennes*, 1980, p. 279-294 ; spéc. p. 284-294, fig. 11-14.

2. UNE MÉTHODE D'ÉTUDE DE LA FRAPPE : LA SIMULATION SUR PÂTE À MODELER

2.1. LES FONDEMENTS DE LA MÉTHODE

La frappe d'une monnaie est généralement conçue comme une opération quasi-instantanée au cours de laquelle les types ornant les coins s'impriment sur le flan. En fait, frapper une monnaie, c'est appliquer sur le flan à l'aide des coins un champ de contraintes complexe, d'un niveau tel qu'il provoque l'écoulement du métal monétaire. La frappe est une opération de *mise en forme d'un matériau à volume constant et par déformation plastique* (18). À ce titre, elle est soumise au premier chef aux lois de la mécanique des solides (notamment de la plasticité) avant de l'être à celles de la métallurgie.

Aborder les problèmes de frappe par la métallurgie conduit à l'observation puis à l'expérimentation sur des matériaux identiques à ceux utilisés par les monnayeurs (19). Cette démarche, désormais classique en archéologie expérimentale, fournit des résultats très parlants mais qui restent spécifiques des matériaux utilisés.

L'approche mécanique, elle, est plus générale : elle permet d'aborder le calcul de l'écoulement du métal pour en tirer des données globales et locales. Données globales comme l'énergie consommée par la frappe ou la géométrie du flan (20) ; données locales car les

(18) Les bases de mécanique, indispensables à la compréhension de ce qui suit, sont exposées par : F. DELAMARE, P. MONTMITONNET, *Introduction à une étude mécanique de la frappe des monnaies*, dans *Journées de Paléoméallurgie. Compiègne, 22-23 février 1983*. — F. DELAMARE, P. MONTMITONNET, C. MORRISSON, *Une approche mécanique de la frappe des monnaies. Application à l'étude de l'évolution de la forme du solidus byzantin*, dans *RN*, VI, 26, 1984, p. 7-39, pl. I.

(19) D. G. SELLWOOD, *Some experiments in Greek minting techniques*, dans *NC VII*, 3, 1963, p. 217-231, pl. XXIII-XXV. — ID., *Techniques de la frappe monétaire dans l'Antiquité*, in *BSFN* 35, 9, 1980, p. 767-769. — L. BEER, *Results of coin striking to simulate the mint of Aegina*, in *ACIN Berne 1979*, Luxembourg, Louvain-la-Neuve, 1982, p. 47-51, pl. 4-5.

(20) F. DELAMARE, P. MONTMITONNET, C. MORRISSON (1984), p. 10, 13-15. — F. DELAMARE, P. MONTMITONNET, *A mechanical analysis of coin striking : application to the study of byzantine gold solidi minted in Constantinople and*

possibilités actuelles qu'offrent les grands codes de calculs par éléments finis permettent de tracer des cartes de contraintes, de déformation ou de vitesse d'écoulement dans l'ensemble de la pièce ⁽²¹⁾. Parce qu'elle fournit un modèle de l'opération, l'approche mécanique permet également de réaliser des pièces d'étude dans des conditions contrôlées de similitude avec la frappe réelle et offre la possibilité de le faire en ne faisant varier qu'un seul paramètre à la fois. C'est ce dernier point qui retiendra notre attention.

La frappe peut se résumer à un contact entre deux corps élastoplastiques. Au niveau de contrainte requis, le plus mou s'écoule plastiquement tandis que le plus dur (le coin en l'occurrence) travaille dans son domaine élastique. Rien n'empêche donc d'abaisser le niveau général des contraintes en choisissant des matériaux plus mous, du moment que l'on respecte cette dualité de comportements. C'est ce que font les graveurs de coins lorsqu'ils contrôlent l'avancement de leur travail en frappant le plomb ou l'étain ; c'est ce que nous faisons en substituant à l'alliage monétaire une pâte à modeler, c'est-à-dire une argile dont l'eau a été remplacée par un corps gras. De tels matériaux sélectionnés avec soin, voire spécialement élaborés, sont couramment utilisés à cet effet par les laboratoires industriels ou universitaires, une fois mesurées les composantes élastique, plastique et visqueuse de leur comportement rhéologique ⁽²²⁾.

2.2. AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS

La simulation de la frappe monétaire sur pâte à modeler présente trois types d'avantages. Elle accroît tout d'abord les possibilités d'expérimentation en simplifiant la préparation des flans, des coins

Carthage, in *Journal of Mechanical Working Technology*, 10, 1984, p. 253-271.

— ID., *Evolution of coin striking processes : a mechanical survey. I. Hammer striking*, dans *Journal of Mechanical Working Technology*, 11, 1985, p. 37-52.

(21) NUMIFORM 86 : K. MATTIASSON et ALII (éd.), *Numerical Methods in Industrial Forming Processes*, Rotterdam, Boston, 1986.

(22) P. MONTMITONNET, J. MSTOWSKI, *Manufacture of bi-layered plain bearings by bimetallic cold backward extrusion. I : Experimental study : simulation by plasticine*, dans *Journal of Mechanical Working Technology*, 8, 1983, p. 327-336.

— E. FELDER, *Méthodes expérimentales d'étude des phénomènes de déformation plastique*, dans *Revue Française de Mécanique*, 1, 1984, p. 21-40.

et, si la frappe ne se fait pas au marteau, des machines utilisées. Dans tous les domaines, la diminution des coûts est spectaculaire et permet d'augmenter le nombre de frappes d'étude. Elle permet ensuite d'utiliser un certain nombre d'artifices destinés à faciliter l'observation. Parmi ceux-ci :

— *l'agrandissement de la pièce* est le plus facile à réaliser. On joue alors sur le volume du matériau qui subira la déformation plastique. Du fait de la faible dureté de ce matériau, une augmentation considérable du diamètre reste compatible avec la frappe au marteau ;

— *le ralentissement de l'écoulement* est obtenu en déformant la pâte à la presse hydraulique. On diminue ainsi la vitesse de déformation ;

— *l'arrêt de l'écoulement* peut être pratiqué à tout moment. Il permet d'observer la forme de la pièce et la déformation du matériau de surface si celui-ci a été préalablement marqué d'un réseau régulier. Il permet également l'observation des écoulements internes en coupant en deux les pièces réalisées à partir de flans spécialement préparés, alternant régulièrement des pâtes à modeler de même rhéologie mais de couleurs différentes [pl. VII].

Enfin, la simulation sur pâte à modeler permet d'aborder le domaine du *quantitatif*. C'est d'ailleurs la principale raison de l'emploi de la méthode par les laboratoires de recherche spécialisés. La mesure simultanée de l'effort d'enfoncement, ou force de frappe, et du déplacement du coin mobile permet de connaître à chaque instant l'énergie dépensée. Un calcul tenant compte des différences de loi d'écoulement (dureté) entre la pâte à modeler et l'alliage monétaire aux températures d'emploi, des volumes respectifs des matériaux et des vitesses de déformation, permet de déterminer l'énergie dépensée pour frapper la pièce réelle [Annexe II].

La simulation de la frappe sur pâte à modeler est donc une méthode riche de possibilités ; elle n'en présente pas moins quelques inconvénients. Parmi ceux-ci, le plus contraignant est certainement le soin extrême qui doit présider au choix des pâtes à modeler et à la détermination de leur rhéologie. L'influence de la température doit être soigneusement prise en compte et les expériences menées dans des salles climatisées. En outre, la réalisation des blocs polychromes (cfr supra) nécessite également une somme de travail importante et des tours de main particuliers.

2.3. LA TECHNIQUE EXPÉRIMENTALE

Les frappes sur pâte à modeler ont été réalisées au marteau et, surtout, à la presse hydraulique instrumentée, qui seule permet une étude détaillée de la frappe. La suite des opérations à réaliser est la suivante : le flan et les coins sont d'abord légèrement lubrifiés, puis le coin de droit est placé sur le plateau inférieur de la presse. Le flan est posé au centre du coin : son grand axe, s'il est ovoïde, est confondu avec l'axe de la tortue. Le trousseau est disposé délicatement sur le flan et tenu à la main, tandis que l'on fait doucement descendre à son contact la traverse qui exercera l'effort [pl. III, n° 1] : cet état constitue l'état initial du système (enfoncement du trousseau : $x = 0$). La presse est enclenchée : la traverse descend à une vitesse constante (50 mm/min). Le flan commence à se déformer. L'effort d'enfoncement (F) est enregistré en continu en fonction de l'enfoncement (x) tandis que la pâte s'écoule. La presse est arrêtée ; la traverse est relevée. La pièce est alors dégagée, ce qui ne va pas sans problèmes aux grandes déformations et lorsque le lubrifiant est un gel aqueux. Toutes les pièces sont numérotées, photographiées et les coins, particulièrement les globules, sont nettoyés.

Pour matérialiser les différentes étapes de la frappe et pour interpréter la courbe $F(x)$, on procède de la manière suivante : à géométrie de flan, type de trousseau et lubrifiant donnés, on réalise une série de frappes illustrant les différentes étapes de la déformation. La première est réalisée avec enfoncement maximal du trousseau : elle donne l'allure de la courbe $F(x)$ qui présente en général une cassure [Figure 1]. Quelques frappes permettent de vérifier que le changement de pente coïncide avec la fin du remplissage des globules. Une dizaine de pièces est ensuite frappée de façon à illustrer les étapes intermédiaires. La même procédure est observée pour réaliser d'autres séries correspondant à la modification d'une des variables (géométrie du flan, type de trousseau ou lubrification). Les étapes intermédiaires étant toutes réalisées pour les mêmes enfoncements de trousseau dans toutes les séries, les pièces homologues dans chaque série peuvent être directement comparées,

3. APPLICATION À L'ÉTUDE DE LA FRAPPE D'UN STATÈRE ÉGINÉTIQUE

Compte tenu des hypothèses d'évolution technique définies ci-dessus, nous avons étudié par simulation sur pâte à modeler l'influence de la géométrie du flan et du trousseau (poinçon ou coin) sur la forme de la pièce, le remplissage des gravures en creux du coin d'enclume, l'écoulement plastique et la consommation d'énergie. Par ailleurs, il nous a aussi semblé nécessaire d'étudier l'effet d'une éventuelle lubrification. On trouvera en annexe I la description des coins et poinçon employés.

3.1. INFLUENCE DE LA FORME DU FLAN

La forme du flan influe sur celle de la pièce et, nous l'avons dit par ailleurs, on peut imaginer dans certains cas la forme du flan en partant de la pièce. M. Delamare et Montmitonnet (23) ont montré que s'il est possible de *calculer* une géométrie « idéale » de flan à partir de celle de la pièce pour un flan cylindrique, on ne peut, en revanche, le faire pour remonter à la géométrie d'un flan sphérique, lenticulaire ou ovoïde. Nous avons donc frappé, dans des conditions identiques (poinçon de revers et flan légèrement talqués), des flans de même poids présentant quatre formes différentes :

- ovoïde, ou plus exactement ellipsoïdale (grand axe : 69 mm ; petit axe : 45 mm) ;
- sphérique (diamètre : 55 mm) ;
- lenticulaire (diamètre : 57 mm ; épaisseur maximale : 40 mm) ;
- cylindrique (diamètre : 60 mm ; hauteur : 31 mm). Ces proportions correspondent à celles du flan idéal déterminées par le calcul (24) :

de façon à observer et comparer les écoulements et les pièces obtenues.

3.1.1. *Sur la forme de la pièce*

La planche IV montre les pièces correspondant à la fin du remplissage des globules du sommet de la rangée. Pour une frappe effectuée verticalement et centrée, la forme de la pièce (examen du droit et du profil) est caractéristique de celle du flan :

(23) F. DELAMARE, P. MONTMITONNET (1984), p. 261-263.

(24) Cfr note 23.

— l'observation des droits montre que, sauf lorsque la déformation est trop forte, seules les pièces issues de flans ovoïdes conservent la forme allongée [pl. IV B] ;

— parmi les pièces montrant une symétrie de révolution, l'examen des profils permet de différencier celles qui sont issues de flans cylindriques [pl. IV C] : elles sont les seules qui présentent une arête vive au raccordement des champs de droit et de revers avec la tranche. Restent à distinguer les pièces issues des flans sphériques et lenticulaires, ce qu'il n'est guère possible de faire avec la pâte à modeler. Toutefois, l'observation des pièces réelles a mis en évidence sur les pièces issues de flans sphériques des marques diamétrales, restes des bavures de fonderie ⁽²⁵⁾.

En outre, l'observation des quatre séries de pièces obtenues à partir des quatre formes de flan montre que :

— le couple « poinçon-flan cylindrique » est inacceptable [pl. III, pièce 19] ;

— les pièces obtenues en frappant les flans ovoïdes ressemblent aux statères oblongs [Pl. III, pièce 18] ;

— les pièces frappées avec le poinçon sur les flans sphériques ou lenticulaires sont assez semblables aux statères de forme circulaire.

3.1.2. Sur le remplissage des gravures du coin d'enclume

Nous disposons de séries de frappes illustrant pour chaque jeu de paramètres choisis la formation progressive des types. Celle-ci dépend fortement de la géométrie des flans et, en particulier, de l'aire initiale de contact entre le flan et le trousseau. Nous décrivons ici les diverses séquences de formation de la tortue de mer, plus facile à observer que celle du carré creux. Chacune d'elles reflète à sa manière la compétition qui existe entre :

— un écoulement de la pâte qui est d'abord *centrifuge* et qui tend ensuite à se recourber vers le haut pour remonter le long du poinçon (c'est cet écoulement qui donne sa forme générale à la pièce), et

— un écoulement *axial* qui tend à remplir les gravures.

Les deux cas les plus dissemblables sont fournis par la frappe des flans cylindriques et sphériques.

(25) P. NASTER, *Frappes défectueuses de monnaies classiques de Sicile*, dans *RBN*, 104, 1958, p. 149-153,

■ Dès le départ, l'ensemble de la surface du *flan cylindrique* est en contact avec le coin (ou le serait si celui-ci était plan). On observe la séquence suivante [pl. V C] :

* ébauche du corps complet de la tortue (sorte de plateau découpé en forme de tortue), à l'exception des griffes des pattes arrière ;

* la carapace se forme et devient convexe. Formation du globule de queue du grand axe et des trois globules de la barre du T, d'une patte arrière ;

* la carapace est complètement formée ; les pattes avant et la tête sont terminées. Formation de l'avant-dernier globule et de la deuxième patte arrière ;

* ébauche des premiers globules du grand axe ;

* formation de ces globules. Les pattes arrière se déforment par écoulement centrifuge et des rayures apparaissent dans l'axe.

■ Avec les *flans sphériques*, la séquence est différente [pl. V A] :

* formation du bord de la carapace jouxtant le cou, carapace qui, pour le reste, est vaguement ébauchée ;

* formation de la carapace et des pattes arrière. Tous les globules sont esquissés ; ébauche du cou et du début des pattes avant ;

* l'ensemble des globules continue à se former, tous de la même façon. Esquisse de la tête et des griffes des pattes avant ;

* tous les globules sont terminés, la tête et les pattes avant sont formées ;

* la périphérie de la pièce décolle du coin de droit, ce qui provoque la déformation centrifuge des parties les plus externes de la gravure. Successivement, l'extrémité des pattes arrière, celles des pattes avant et, enfin, le sommet de la tête disparaissent, donnant naissance à des traces rayonnantes.

■ Pour les *flans lenticulaires*, la séquence est à peu près la même, mais la tête et les pattes se forment en même temps que le reste du corps.

■ Il en va de même pour les *flans ovoïdes* [pl. V B et VI], à condition que la tortue soit disposée suivant le grand axe. Sinon, le remplissage des gravures ressemble plutôt à celui du flan sphérique.

Dans tous les cas, une déformation excessive se traduit par l'apparition de rayures axiales et une déformation des griffes des pattes arrière identique à celle que l'on peut observer sur certains exemplaires [pl. II].

3.1.3. Sur l'énergie consommée

Nous avons dit que nous mesurons l'évolution de la force nécessaire à la frappe durant l'enfoncement du coin de revers. La figure 1 permet de relier la forme de la courbe à l'écoulement et au remplissage des gravures, et la figure 2 montre quelques-unes des courbes enregistrées lors des expériences interrompues pour les quatre formes de flans. On peut faire deux observations :

— on constate une assez bonne reproductibilité des expériences qui n'est, en fait, affectée que par les légères variations de forme existant entre les flans d'une même série et par les différences de positionnement du flan sur le coin d'enclume : ces écarts sont donc instructifs puisqu'ils représentent des problèmes réellement rencontrés par les monnayeurs ;

— la forme générale de la courbe dépend de la forme du flan. La figure 3 permet de mieux en juger : on y a recalé les quatre courbes par rapport à la pièce finie. Plus le flan est épais, plus il faut enfoncer le coin de revers pour arriver au résultat final. La parenté des courbes relatives aux flans sphérique, lenticulaire et

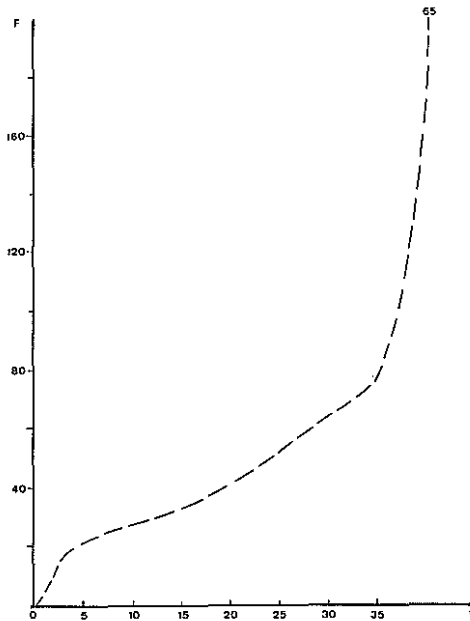


Fig. 1

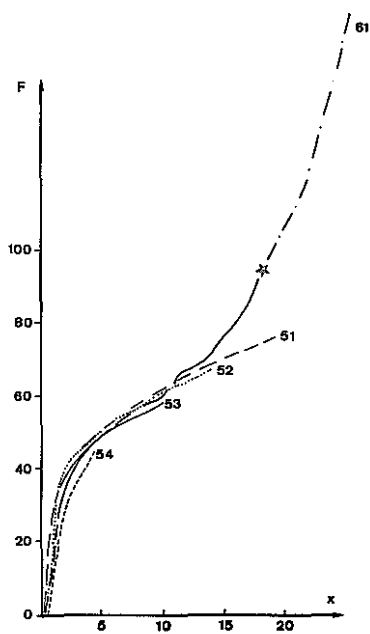
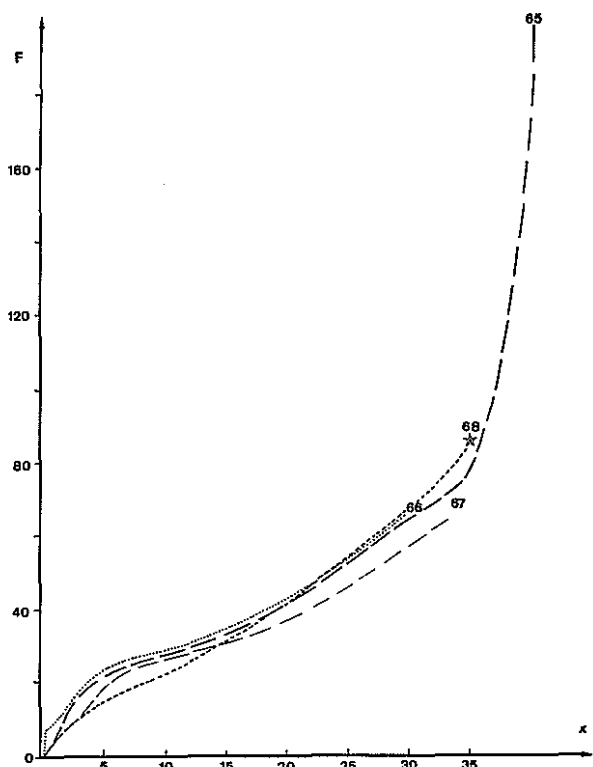


Fig. 2 A et B

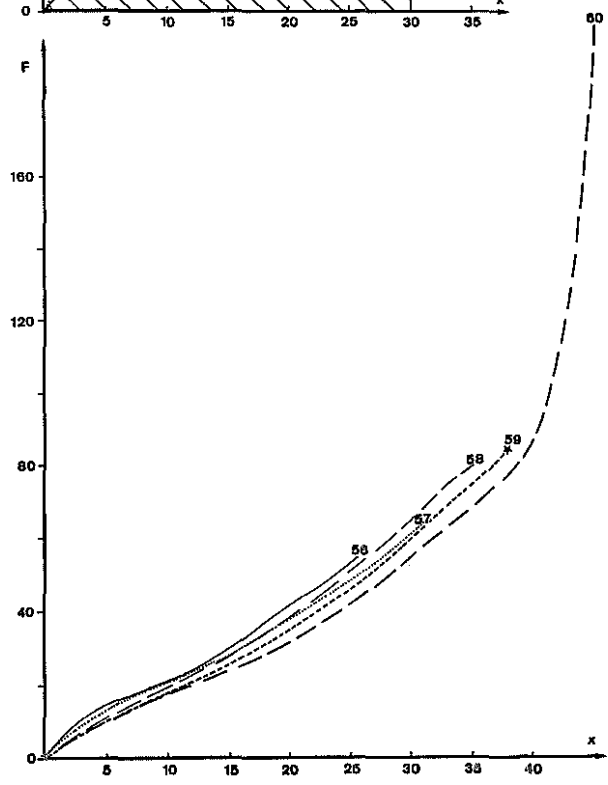
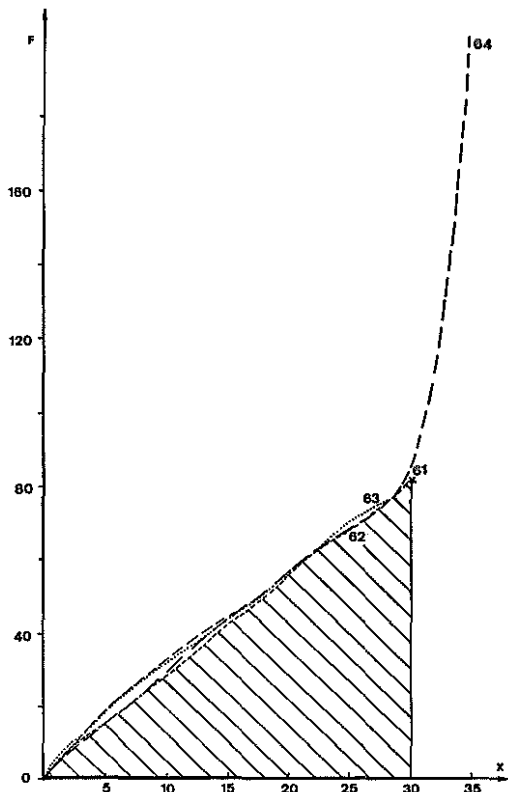


Fig. 2 C et D

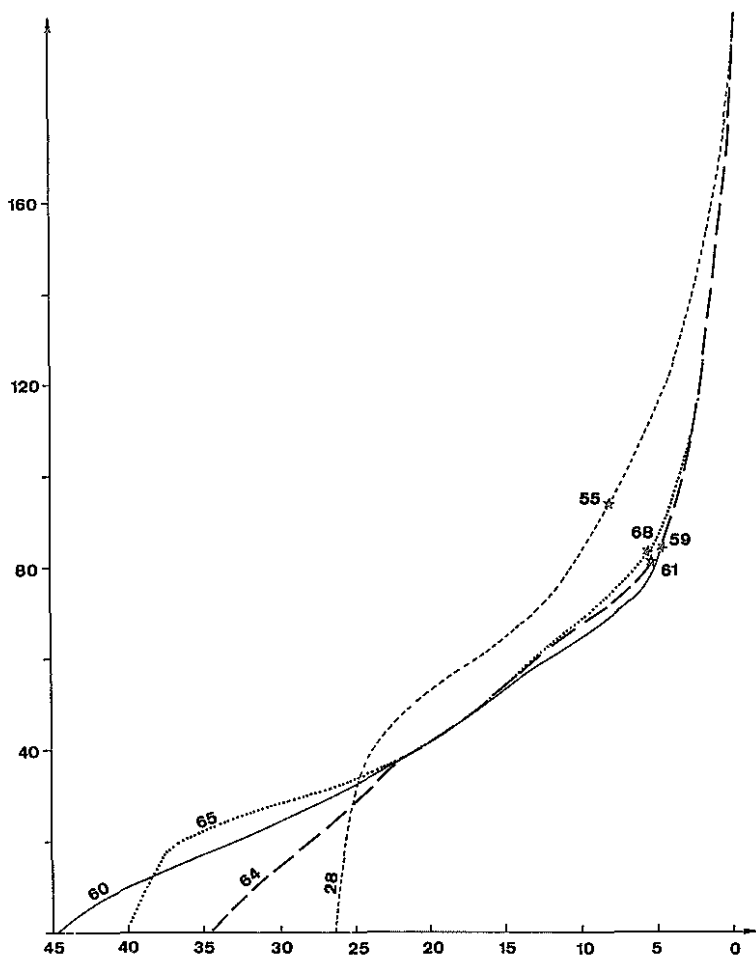


Fig. 3

ovoïde apparaît clairement. Elle laisse présager des similitudes d'écoulement.

Si la géométrie du flan a une influence marquée sur l'évolution de l'effort de frappe, en va-t-il de même pour l'énergie dépensée ? À chaque instant, l'énergie consommée par l'opération est égale au produit de l'effort de frappe par le déplacement du trousseau : elle est donc représentée par l'aire comprise entre la courbe $F = f(x)$, l'axe des abscisses et une verticale d'abscisse x [Figure 2 C]. Le problème est donc de déterminer cette dernière. Sur les courbes des figures 2 et 3, un astérisque marque le point où les globules som-

mitaux arrivent en fin de remplissage et le tableau II montre les dépenses d'énergie correspondantes.

Forme du flan	Énergie consommée (joules)			Nombre de coups de marteau (30 joules)	
	Mesurée : Pâte à modeler	Calculée :			
	21° C	25°	700°	25°	700°
Ovoïde	14,1	138	75	4,6	2,5
Sphérique	14,2	140	76	4,7	2,5
Lenticulaire	13,7	135	73	4,5	2,4
Cylindrique	10,6	104	56	3,5	1,9

Tableau II

De ce point de vue énergétique, la frappe des flans ovoïdes, sphériques ou lenticulaires est équivalente. En revanche, la frappe d'un flan cylindrique permet d'économiser 25% de l'énergie que l'on dépenserait en frappant un flan ovoïde. À partir de ces données, il est possible de calculer l'énergie qui serait consommée pour la frappe de statères d'argent réels dont les globules seraient parfaitement formés [Annexe II]. Nous avons effectué les calculs dans le cas d'une frappe à froid (25° C) ou à chaud (700° C) et avons évalué le nombre de coups de marteau moyen ⁽²⁶⁾ nécessaire à la frappe. Le tableau II montre que :

- frapper à chaud ne divise l'énergie de frappe que par 2 ;
- les énergies de frappe obtenues sont anormalement élevées par rapport aux valeurs théoriques calculées dans des cas voisins. En effet, M. Delamare et Montmitonnet ⁽²⁷⁾ calculent qu'à la température ambiante, la frappe d'un tétradrachme de Vespasien (d'un poids équivalent, mais d'un alliage deux fois plus dur) ne consomme que 65 joules.

La méthode de calcul ayant fait ses preuves et les mesures effectuées ici étant correctes, d'où peut provenir cette différence? Elle tient vraisemblablement au critère choisi pour comparer les pièces issues de flans de géométries différentes : la fin du rem-

(26) F. DELAMARE, P. MONTMITONNET, C. MORRISSON (1984), p. 10 : 30 joules pour un coup de marteau « moyen ».

(27) F. DELAMARE, P. MONTMITONNET (1985), p. 44, 46-48, fig. 7.

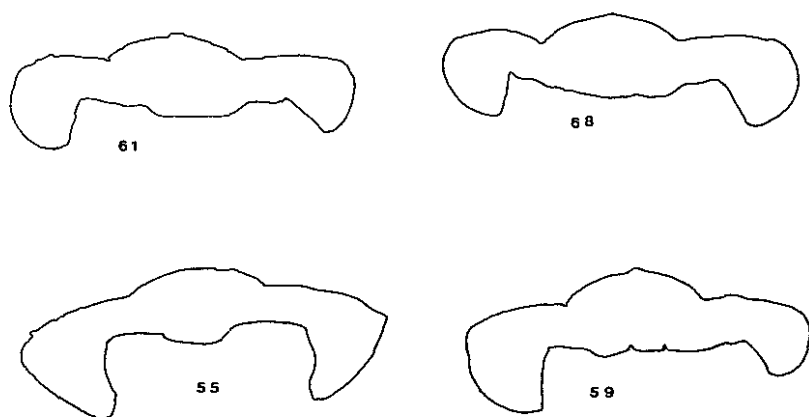


Fig. 4

plissage des globules sommitaux. Ce remplissage constitue effectivement une opération coûteuse en énergie, opération qu'il n'y avait probablement pas lieu, dans la pratique, de mener à son terme. L'observation de la figure 4 qui représente la vue en coupe des pièces correspondantes nous conforte dans cette opinion : on note en effet que l'enfoncement du carré creux de revers y est beaucoup plus prononcé qu'il ne l'est dans le monnayage réel. Le critère que nous avons retenu n'est donc pas réaliste : il conduit à surestimer l'énergie de frappe.

Essayons une autre méthode. L'observation des statères éginétiques archaïques de bon poids montre l'existence d'une certaine dispersion dans le degré d'achèvement du type de droit, traduisant en fait une dispersion dans le degré d'enfoncement du trousseau. Nous avons recherché dans la série des pièces frappées sur les flans ovoïdes en pâte à modeler celles qui constituent les bornes d'une dispersion similaire. Pour ce faire, nous avons considéré non seulement l'état d'achèvement des globules, mais aussi le développement du champ du droit et l'élancement de la pièce (rapport de son épaisseur à son grand axe). Nous connaissons les enfoncements (x) de trousseau de ces pièces et pouvons donc déterminer les fourchettes d'énergie correspondantes. Partant de là, nous calculons l'énergie consommée par la frappe des statères réels, soit de 68 à 118 joules à 20° C, et de 36 à 64 joules à 700° C. On constate que :

— les valeurs trouvées par cette méthode semblent plus réalistes, comparées aux valeurs trouvées précédemment (cfr Tableau II) ;

— elles mettent en évidence le coût énergétique très important de la finition de ce type de statère (+ 40 ou 50% par rapport aux valeurs moyennes ; + 100% par rapport aux valeurs basses). C'est ce coût énergétique qui explique pourquoi tant de statères de bon poids ne présentent que des esquisses de globules ou bien n'en présentent point du tout ;

— le nombre de coups de marteau nécessaire est, pour les valeurs moyennes, de 3 à la température ambiante et de 1 ou 2 à 700° C ;

— il semble donc que le gain de productivité à la frappe qui résulterait du passage d'une frappe à 20° C à celle à 700° C serait annulé par le coût des installations de chauffe et l'incommodité de frapper à chaud.

3.2. INFLUENCE DE LA FORME DU TROUSSEAU : POINÇON OU COIN

Une série de flans ovoïdes a été frappée dans les mêmes conditions que précédemment, mais tantôt avec un poinçon de revers, tantôt avec un coin [Pl. III, 2, B-C]. Les deux *types* de carré creux ornant ces trousseaux diffèrent du point de vue formel, mais sont de surfaces à peu près équivalentes.

L'écrasement. Il est possible de distinguer deux régimes d'écoulement en fonction desquels l'influence de la géométrie du trousseau se définit bien (Fig. 5) :

— Au début de l'écrasement, tant que la pâte à modeler n'est en contact, au revers, qu'avec l'empreinte carrée, l'écoulement plastique de la matière est identique, qu'il s'agisse du poinçon ou du coin. Il en résulte qu'on obtient les mêmes objets monétaires, le même remplissage des gravures et, bien sûr, la même portion de courbe $F(x)$. Au stade le plus avancé, au droit le corps de la tortue est bien formé avec un champ réduit au minimum, et le carré creux de revers occupe toute la largeur de la pièce. À ce stade précis pourtant, la pièce est trop épaisse pour pouvoir être comparée au monnayage réel [Pl. VI : pièces 84 et 88].

— Si l'on poursuit l'écrasement au-delà de ce point critique, dès que les renflements — qui se forment d'abord le long des côtés coupant le grand axe de l'ellipse — entrent en contact avec le champ du coin de revers, les deux écoulements prennent alors leur physionomie particulière. Avec le coin, toute remontée le long du

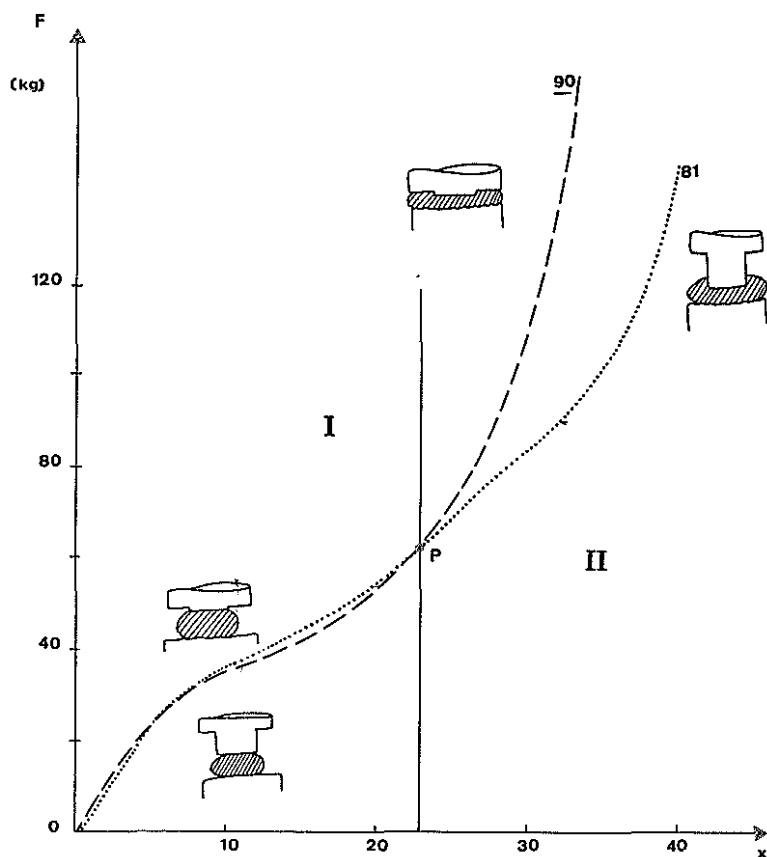


Fig. 5

trousseau ou décollement du coin de droit étant interdit (comme c'est le cas avec le poinçon), l'écoulement reste confiné entre les deux coins et s'effectue surtout de manière centrifuge.

On sait que, dans ce cas, l'entrave à l'écoulement que crée le frottement aux interfaces pièce/coins provoque un accroissement important du niveau des contraintes normales dans la zone centrale de la pièce : ceci favorise le remplissage des gravures centrales⁽²⁸⁾. Dans la compétition qui existe entre l'écoulement centrifuge et

(28) F. DELAMARE, P. MONTMITONNET (1984), p. 255-258. — F. DELAMARE, *Le frottement en mise en forme des métaux*, dans *Annales Chim. fr.*, 11, 1986, p. 195-211.

l'écoulement axial remplissant les gravures (cfr p. 16), le remplacement du poinçon par un coin favorise donc ce dernier. Mais, les volumes de gravures à remplir étant faibles, ce fait ne modifiera pratiquement pas le volume de matériau subissant l'écoulement centrifuge et seule la cinétique de remplissage s'en trouvera changée.

3.2.1. *Sur la forme de la pièce*

On constate dans le deuxième régime d'écoulement que les pièces frappées avec un coin différent, par leur forme, de celles qui sont frappées avec un poinçon [Pl. VI]. Par ailleurs, l'aspect allongé de la pièce s'estompe plus rapidement avec le coin qu'avec le poinçon : pour un enfoncement de trousseau identique, on obtient avec le coin une pièce de plus grand module, plus plane, plus circulaire et qui, en outre, se dégage des coins beaucoup plus aisément.

3.2.2. *Sur la forme du revers*

Le revers des pièces frappées avec un coin se caractérise à la fois par l'existence d'un champ plat et l'aspect des bords du carré creux. En frappe avec *poinçon*, l'écoulement tend à se faire le long du trousseau, d'où la difficulté de séparer la pièce du poinçon et la quasi-verticalité des bords du carré creux. En revanche, en frappe avec *coin*, l'écoulement plastique est centrifuge : il affecte les bords du carré creux qui tendent à s'écouler, d'autant plus qu'ils sont proches de la périphérie de la pièce et de la surface. La forme obtenue — en as de carreau — dégage les bords du carré creux du coin, ce qui explique que l'on sépare relativement aisément la pièce du coin.

3.2.3. *Sur le remplissage des gravures du coin d'enclume*

La forme du trousseau affecte-t-elle la cinétique de remplissage des gravures de droit? La planche VI permet de constater qu'à enfoncement de trousseau identique, avec le *coin*, les globules se forment plus rapidement dans la phase terminale de l'écrasement. On note que, la pâte ne pouvant plus décoller du coin de droit, un excès de déformation n'entraîne plus le « filage » rayonnant des extrémités des pattes de la tortue : le type est, en quelque

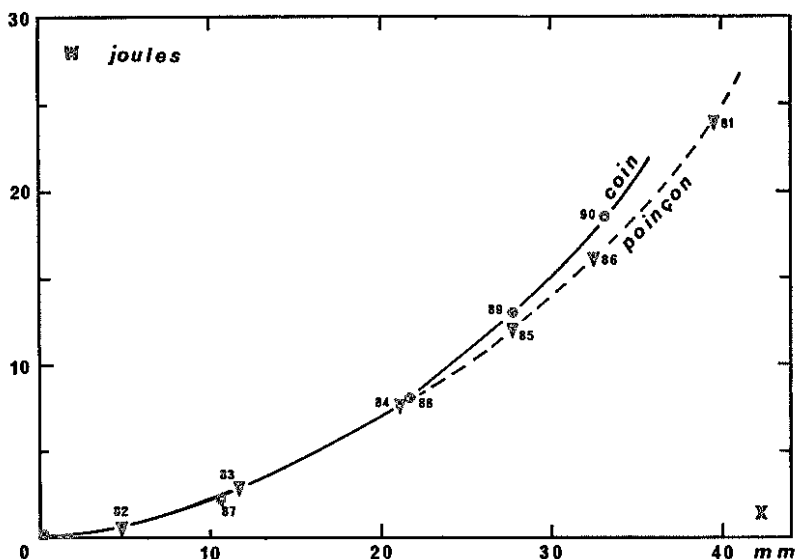


Fig. 6

sorte, stabilisé. De plus, les détails de la périphérie du coin de droit (une rainure en l'occurrence) viennent parfaitement, ce qui n'est pas le cas lorsqu'on utilise un poinçon. Si cette observation est sans conséquence dans le cas du monnayage archaïque d'Égine, elle montre cependant que **l'obtention d'un cercle de grènetis ou d'une légende au droit implique obligatoirement l'abandon de l'usage du poinçon pour le revers.**

3.2.4. Sur l'énergie consommée

Nous avons vu que la comparaison des deux courbes effort/enfoncement du trousseau met en évidence deux régimes d'écoulement [Figure 5]: le premier, indifférencié, et le second dans lequel se traduit la différence des écoulements. Il est clair qu'à enfoncement de trousseau égal, la frappe avec coin consomme un peu plus d'énergie, et ce d'autant plus que l'enfoncement croît [Figure 6]. Mais nous avons également vu qu'avec le coin, le type se forme plus rapidement, c'est-à-dire pour un enfoncement plus faible. Quel est donc le bilan énergétique de l'opération? Nous avons comparé deux séries de pièces frappées sur flans ovoïdes, l'une avec poinçon et l'autre avec coin de revers. En utilisant les critères de similitude déjà énoncés (globules sommitaux, étendue du champ du droit et élancement de la pièce),

nous avons recherché deux pièces semblables suffisamment formées pour correspondre à la partie divergente des courbes F (x). Les pièces 86 (poinçon) et 89 (coin) [Pl. VI; Figure 6] présentent une bonne similitude au regard de ces critères. Les énergies consommées correspondantes, directement comparables car relevées dans les mêmes conditions expérimentales, sont, dans l'ordre, 16,2 et 13,0 joules. **L'usage du coin permet donc d'économiser 20% de l'énergie de frappe par rapport à la frappe au poinçon.** L'économie est importante.

Le tableau III permet de comparer les différentes consommations d'énergie :

Nature du trousseau	Degré de formage	Énergie consommée (joules)		Nombre de coups de marteau	
		25° C	700° C	25° C	700°
		Poinçon	Achévé	138	75
Poinçon	Moyen	68-118	36-64	2-4	1-2
Coin	Moyen	54-94	29-51	2-3	1-2

Tableau III

Comparaison des énergies dépensées par la frappe d'un statère éginétique d'argent [Flan : ovoïde. — Frottement : $\bar{m} = 0,7$]. On y voit l'influence du degré de formage, de la température et de la géométrie du trousseau.

3.3. INFLUENCE DE LA LUBRIFICATION

La pratique industrielle montre que la mise en forme des métaux est difficile à réaliser sans lubrification des interfaces outils / produit. L'usage d'un lubrifiant réduit l'énergie consommée, permet des cadences élevées, diminue les risques de grippage et facilite l'éjection des pièces formées. De plus, dans les opérations de frappe ou de forge dans lesquelles il existe une compétition entre divers écoulements possibles, la lubrification joue un rôle supplémentaire : elle intervient dans la compétition entre écoulements et favorise les écoulements centrifuges au détriment du remplissage des gravures (29).

(29) F. DELAMARE (1986), p. 199.

La question se pose donc de savoir si la frappe au marteau requiert la lubrification du flan et /ou des coins. Elle se pose non seulement en ce qu'elle intéresse l'histoire des techniques, mais aussi parce qu'elle est essentielle, l'écoulement plastique du matériau monétaire dépendant fortement du frottement pièce/coins.

La frappe au marteau était-elle lubrifiée et, si oui, comment? Les textes et les représentations iconographiques restent muets à ce sujet jusqu'au XVIII^e s. (30). Panckoucke (1788) mentionne que, pour la frappe au balancier, « les flans ont été graissés à l'huile avant que d'être mis sur la matrice ». On notera que, de nos jours, les expérimentateurs qui ont frappé de l'argent à chaud sans lubrifier se sont plaints de ne pouvoir dégager la pièce du poinçon sans utiliser un outil d'éjection laissant des marques (31). Or, de telles marques n'ont jamais été observées sur les pièces antiques. Comme lubrifiant, on peut imaginer que les artisans aient, par exemple, utilisé une graisse animale ou de l'huile d'olive à froid (32) ou, à chaud, un composé soufré provoquant la formation de sulfure d'argent à la surface du flan.

Pour mettre en évidence l'effet de la lubrification, nous avons frappé des pièces en pâte à modeler en utilisant deux lubrifiants :

— un *talc* qui joue le rôle de film lubrifiant mince. Il assure un coefficient de frottement élevé ($\bar{m} = 0,7$), ce qui veut dire que le cisaillement à l'interface est égal à 70% du cisaillement maximal que peut supporter la pâte à modeler. Il simule bien un contact métal/métal non lubrifié ;

— un *gel aqueux* qui joue le rôle de film lubrifiant épais, et qui abaisse le niveau du frottement ($\bar{m} = 0,25$). Les coefficients de frottement \bar{m} sont mesurés à l'aide d'un essai mécanique spécifique de la frappe : l'écrasement de l'anneau (33).

Entre chaque frappe, le talc doit être éliminé des coins par un jet d'air comprimé et le gel par rinçage à l'eau.

(30) F. DELAMARE, P. MONTMITONNET, C. MORRISON (1984), p. 16 note 5.

(31) L. BEER (1979), p. 50.

(32) H. A. HARRIS, *Lubrication in Antiquity*, dans *Greece & Rome* II, 21, 1974, p. 32-36. — D. DOWSON, *History of tribology*, Londres, 1979, spéc. p. 46-66.

(33) A. T. MALE, M. C. COCKCROFT, *Methods for the determination of the coefficient of friction under the condition of bulk plastic deformation*, dans *Journal of the Institution of Metals*, 93, 1964-65, p. 38-46. — P. BAQUÉ et ALII, *Mise en forme des métaux. Calculs par plasticité*, Paris, 1973.

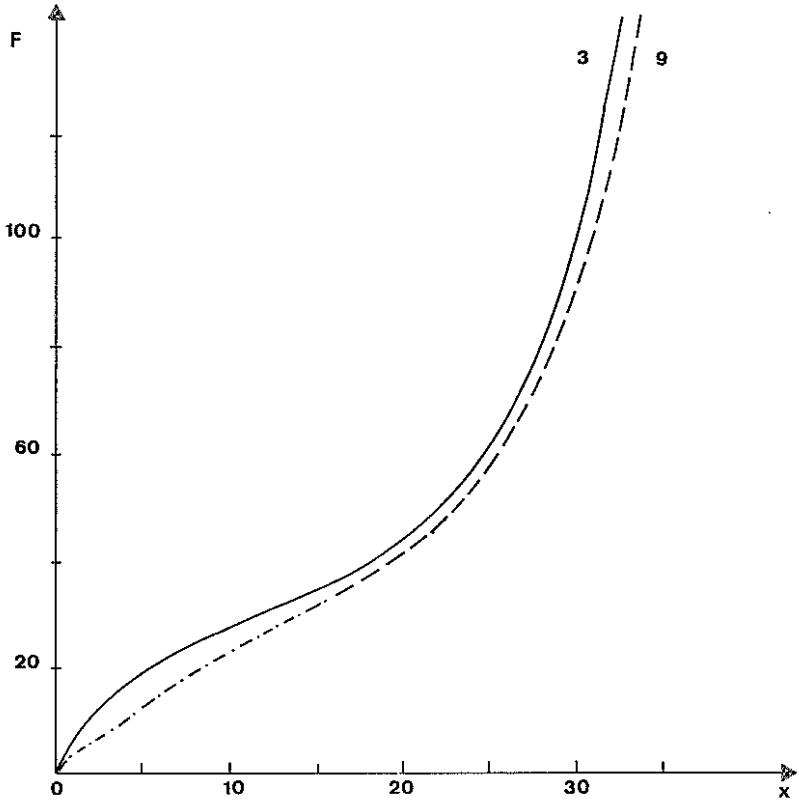


Fig. 7

3.3.1. Sur l'écoulement global

La figure 7 montre que l'effort de frappe décroît si l'on diminue le niveau du frottement pièce/outils. Ainsi, le passage du talc au gel diminue de 15 à 25% l'effort de frappe.

La planche VII, 1 permet de comparer la forme de deux statères réalisés avec le même enfoncement de poinçon dans un flan ovoïde. L'une des frappes a été lubrifiée au talc, l'autre au gel. On peut constater que la forme générale de ces pièces est la même, mais que l'écoulement de surface diffère. De même, le bombé de la tranche est plus accentué sur l'exemplaire frappé avec le plus fort niveau de frottement.

La planche VII, C-D montre la coupe de ces pièces, effectuée suivant le petit axe de l'ellipse. Au premier abord, ces coupes, qui font

voir les écoulements du matériau dans ce plan, sont semblables. Le matériau de la zone centrale a subi une très forte déformation due à son écrasement entre deux blocs rigides (ou zones mortes). Au droit, le bloc rigide est constitué par la tortue ; au revers, il se forme sous le poinçon. Par ailleurs, le matériau qui était au centre du flan subit un écoulement centrifuge. Ce type d'écoulement est tout à fait classique lors de l'écrasement d'un objet à surface lisse, relativement épais ou élancé comme un cylindre (34). On constate ici que la présence de forts reliefs dissymétriques centraux n'altère qu'assez peu ce type d'écoulement, ce qui s'explique par le fait qu'ils font partie des zones mortes. C'est d'ailleurs un écoulement semblable que décrit M. Naster à propos des flans sphériques siciliens. Il l'interprète par une frappe à chaud avec formation de deux calottes d'argent refroidies par contact avec les coins, donc durcies et peu déformées, écrasant le centre du flan resté chaud. Nous voyons ici qu'il n'est pas nécessaire d'invoquer une frappe à chaud pour observer cet écrasement par blocs rigides qui, répétons-le, est tout à fait classique. Une observation attentive de ces coupes montre que la dimension des zones mortes dépend du coefficient de frottement. Au droit, par exemple :

— avec le talc, la tortue, parfaitement formée, a une épaisseur qui représente 11% du petit axe ;

— avec le gel, l'épaisseur de la carapace, imparfaitement formée, n'est plus que de 7% du petit axe.

C'est là la conséquence de l'amélioration de la lubrification : l'écoulement centrifuge étant favorisé, le type se forme plus facilement. De plus, on a vu que l'écoulement centrifuge du matériau monétaire se faisait plus aisément selon le petit axe de l'ellipse que suivant le grand axe. Cette anisotropie d'écoulement augmente lorsque l'on abaisse le niveau de frottement. Il en résulte que lubrifier la frappe améliore la circularité des pièces obtenues à partir de flans ovoïdes.

La diminution du coefficient de frottement favorise donc l'écoulement centrifuge et, tout particulièrement, l'écoulement perpendiculaire à l'axe de la tortue, au détriment du remplissage des gravures. Ce phénomène est encore accentué par l'écoulement du gel vers l'axe de la carapace et de son « piégeage » dans les globules.

(34) F. DELAMARE, P. MONTMITONNET (1983), fig. 4.

La planche VII, A montre bien que l'abaissement du frottement a une grande importance sur la venue des détails du type de droit : avec le talc, les globules sont parfaitement formés alors qu'ils ne sont qu'esquissés avec le gel. L'examen du revers montre que l'exaltation de l'écoulement centrifuge par l'abaissement du coefficient de frottement modifie la forme du carré creux. Avec le coin, on constate une tendance plus accusée des sommets de « l'as de carreau » à un écoulement centrifuge et une inclinaison plus prononcée des parois du carré creux, qui ne peut que faciliter la séparation de la pièce des coins.

3.3.2. *Sur l'écoulement superficiel*

L'observation de la surface d'une monnaie constitue la principale source de renseignements immédiatement accessible au numismate qui y cherche d'abord l'identification de la monnaie, puis l'assurance de son authenticité. Son examen comporte alors l'observation méticuleuse de la surface à divers grossissements. Mais l'interprétation des observations est difficile car sur la surface examinée, aux traces caractéristiques du formage de la pièce et de sa circulation se superposent celles liées à son enfouissement et aux divers traitements de surface subis pour sa restauration et sa conservation. Dans cette perspective, l'observation des écoulements superficiels qui se produisent durant la frappe est d'une grande importance. Leur hétérogénéité se traduit, en effet, par l'existence de zones dans lesquelles on peut, juste après la frappe, observer des différences sensibles.

Prenons pour exemple le droit du statère éginétique. D'après la planche VII, A on peut conclure que la surface se compose de deux régions très différentes : une zone morte centrale entourée d'une zone qui a subi un écoulement. À la surface de la zone morte, le matériau monétaire ne subit aucune déformation. Imaginons qu'il y ait en surface ces réseaux quasi-réguliers décrits comme « granulations » ou « réticulations » par O. Ravel⁽³⁵⁾ et qui sont, en fait, des dendrites — arborescences cristallines — qui se forment à la solidification du flan. Ils resteront intacts. Le champ, lui, est zone d'écoulement centrifuge. La planche VII, A montre qu'il est modéré suivant le grand axe, mais très marqué suivant le petit.

(35) O. RAVEL, *Numismatique grecque. Falsifications : moyens pour les reconnaître*, Londres, 1946.

La déformation subie par un élément de surface du champ dépend donc très fortement de l'endroit observé. En outre, elle dépend fortement du niveau de frottement à l'interface pièce/coin. La planche VII, A montre, en effet, que :

— pour $\bar{m} = 0,7$ suivant le petit axe, le champ se forme par cisaillement superficiel d'une seule couche blanche (allongement dans cette direction : $\lambda = 5$), alors que :

— pour $\bar{m} = 0,25$, l'écoulement, plus aisé, du matériau fait que le champ est alors formé par l'émergence de trois couches (allongement $\lambda = 2$ pour la couche blanche externe).

Dans ces zones d'écoulement, les accidents de surface — dendrites ou éventuelles cavités microscopiques — sont déformés de telle manière qu'ils deviennent indiscernables.

4. SYNTHÈSE DES RÉSULTATS - CONCLUSION

La frappe des monnaies éginétiques a manifestement évolué durant la période archaïque, tantôt par de lents perfectionnements, tantôt par de brusques mutations. Nous nous sommes proposé — de suivre cette évolution et les différents aspects qu'elle présente : seule une étude numismatique approfondie nous permet de le faire en fonction des classements qui ont déjà été proposés, fondés sur des critères traditionnels ;

— d'expliquer ces différences : la simulation sur pâte à modeler nous y a amenés, nous permettant de situer les changements apportés à la technique par rapport à l'opération de frappe et nous fournissant des résultats chiffrés ;

— enfin, et par là même, de les évaluer : les résultats se traduisent soit en termes de qualité de production, soit en termes de productivité.

C'est en fonction de ces derniers que nous pouvons sélectionner parmi les caractéristiques techniques que présentent les monnaies celles qui constituent de réelles innovations, destinées à économiser l'énergie de frappe et augmenter la durée de vie des coins, et qui peuvent donc servir de critères de classement.

LA VALIDITÉ DES CRITÈRES TECHNIQUES DE CLASSEMENT

La forme des flans. Il est clair que l'observation des monnaies permet de déterminer la forme des flans qui ont été utilisés. De

ce point de vue, la simulation sur pâte à modeler confirme les observations numismatiques et nous amène à distinguer changement et rupture dans la forme des flans employés à Égine.

Dans un premier temps, les artisans d'Égine ont utilisé des flans épais et assez irréguliers : le changement se manifeste alors dans leur régularisation. La raison est à rechercher dans les opérations antérieures à la frappe elle-même, comme celle de la préparation des flans qui a pu, elle aussi, évoluer plus ou moins rapidement et de façon continue.

En revanche, l'utilisation de flans de forme quasi-cylindrique à la place des flans ovoïdes constitue une véritable rupture. Elle a pour conséquence majeure une économie d'énergie notable, de l'ordre de 25%. Par ailleurs, nous sommes en mesure de la situer assez précisément dans le temps : elle coïncide avec l'utilisation d'un nouveau type de carré creux, dit *Large skew*, qui couvre une partie importante de la surface du flan.

La géométrie du revers. L'observation attentive du revers des statères éginétiques permet de distinguer si l'artisan a utilisé un poinçon ou un coin comme trousseau. On peut ainsi confirmer le principal changement technique du monnayage archaïque d'Égine : le passage du poinçon comme trousseau au coin, qui constitue certainement une *innovation* remarquable. Elle permet d'économiser 20% de l'énergie consommée à la frappe mais, en plus, facilite le dégagement de la pièce du trousseau après la frappe. En outre, l'emploi d'un coin de revers améliore la planéité de la pièce et en stabilise le type qui ne risque plus les défauts de « filage » des pattes arrière. Enfin, cette innovation est riche de possibilités puisque ce n'est que grâce à elle que l'on pourra obtenir des grènetis ou des légendes.

Suivant la chronologie proposée par M. Holloway (36), l'emploi du poinçon caractérise les monnaies de la période I (ca 575 - ca 550) et d'une partie de la période II (ca 550 - ca 500). En revanche durant la période III (ca 500 - début des années 470), les mêmes types de carré creux sont entourés d'une surface de champ plane et résultent donc de l'apposition d'un coin. La transition se fait dans le courant de la période II ; toutefois on ne peut pas dire si l'usage du coin concurrence pendant un temps plus ou moins long celui du poinçon.

(36) R. R. HOLLOWAY (1971), p. 8 : classes 2 et 3.

La lubrification. L'abaissement du coefficient de frottement ⁽³⁷⁾ à l'interface pièce/coins a des conséquences multiples :

1. il améliore la circularité des pièces frappées sur flans oblongs ;
2. il diminue le bombé de la tranche ;
3. il gêne ou empêche la formation du type dans la zone centrale, mais la favorise dans la zone périphérique ;
4. dans le cas particulier des statères éginétiques à globules sommitaux, il s'accompagne du « piégeage » du lubrifiant dans ces globules. Le métal ne pouvant remplir ces volumes occupés par un fluide incompressible, les globules ne sont qu'esquissés ou ne se forment pas du tout ;
5. il aide à séparer la pièce des coins ;
6. il influence de manière complexe l'usure des coins, minimisant les contacts pièce/coins, diminuant les contraintes normales (la colline de frottement), mais augmentant les longueurs de glissement ⁽³⁸⁾.

Si les points 1 et 5 sont positifs et le point 2 indifférent, les points 3 et 4 sont, en revanche, extrêmement négatifs et rendent très improbable l'utilisation d'une lubrification dans ce type de frappe. Nous considérons donc comme représentatifs de la frappe réelle des monnaies ceux des essais effectués avec un coefficient de frottement élevé : $\bar{m} = 0,7$, représentatif d'un contact métal-métal non lubrifié. En réalité, la lubrification ne sera employée dans la frappe monétaire que bien plus tard, à une époque où les moyens de frappe augmentent de puissance (comme c'est le cas avec la frappe au balancier), et où des systèmes de confinement de l'écoulement centrifuge (comme la virolle brisée) font leur apparition. Elle permettra alors d'augmenter les cadences de production et la durée de vie des coins.

L'évaluation des coûts énergétiques de la frappe du statère éginétique apporte une contribution essentielle au débat, devenu traditionnel, sur la température de frappe des monnaies. En l'occurrence, chacun est en mesure de comparer les dépenses d'énergie correspondant à la frappe à froid ou à chaud, et donc de former son opinion. Il nous semble pour notre part que pour le type de pièces que nous étudions ici, l'avantage de la frappe à chaud n'apparaît pas clairement.

(37) F. DELAMARE, P. MONTMITONNET (1983), fig. 4.

(38) F. DELAMARE, P. MONTMITONNET, C. MORRISSON (1984), p. 10-11.

LES RÉSULTATS « QUALITATIFS »

L'étude des cinétiques de formation des types nous amène à réviser les critères caractérisques utilisés jusqu'ici par les numismates. En effet, nous avons vu que des différences « typologiques » peuvent aussi bien résulter des changements techniques que d'une frappe négligée (parce que hâtive?). Ainsi en est-il pour la présence ou, plutôt, l'absence de globules sur la carapace de la tortue qui ne constitue pas une caractéristique typologique du coin : ceci en diminue donc la valeur comme critère de classification.

Dans les études de technologie monétaire, le point de vue *mécanique* de la frappe n'a que très rarement été envisagé, à l'inverse de la métallurgie. Il est pourtant indispensable à une bonne compréhension de certaines des caractéristiques que présentent les monnaies. L'un de nous avait montré l'intérêt de la simulation numérique de la frappe monétaire. Il nous a paru important de souligner ici qu'à côté de ces méthodes complexes et coûteuses, il en existe d'autres, comme l'expérimentation sur matériau modèle, beaucoup plus accessibles, qui permettent également l'étude objective des techniques de monnayage.

Il va sans dire que ces moyens d'étude ne présentent d'intérêt réel pour la numismatique que dans la mesure où la problématique est définie par les numismates eux-mêmes.

L'expérience nous a montré qu'une telle étude demandait une collaboration étroite des deux disciplines.

ANNEXE I. *Description des coins*

Pile et trousseau [pl. III, n° 2] ont été réalisés dans des blocs de chêne de 90 mm de diamètre, en adoptant un grandissement linéaire de 4. De la tête à la queue, la tortue mesure 60 mm de long ; elle est entourée d'un cerclé creux qui se trouve à 7 mm du bord du coin. Notre choix s'est porté sur le type de la *T-back Turtle*.

Le poinçon est orné d'un carré creux de type *Union Jack* qui fait 48 mm de côté ; le coin, d'un carré creux quadripartite de 47 mm de côté. La différence de niveau entre les quatre petits champs carrés et la surface du champ est de 2 mm. L'occasion nous est donnée d'adresser tous nos remerciements à Monsieur L. Nassogne qui a eu la gentillesse de réaliser ces coins.

Un des lubrifiants utilisés étant un gel aqueux, les coins ont été polis et vernis afin d'éviter un gonflement du bois dû à l'eau, qui se traduit par une augmentation spectaculaire de la rugosité des coins et du coefficient de frottement.

* * *

ANNEXE II. *Calcul de l'énergie consommée par la frappe des statères d'argent*

L'énergie consommée par la frappe d'une pièce peut être décomposée en trois termes :

- un premier terme de dissipation homogène dans l'ensemble de la pièce ;
- un second de dissipations localisées aux endroits où il y a des discontinuités de vitesse d'écoulement ;
- un troisième, dû au frottement contre les coins.

La similitude des opérations de frappe menées sur pâte à modeler et sur argent entraîne la similitude du premier terme dans les deux opérations, de même que celle du second. Si l'on suppose que le coefficient de frottement est à peu près identique dans les deux cas, la valeur de l'énergie consommée par la frappe du statère d'argent s'obtient directement à partir de celle mesurée pour la pâte à modeler. Il suffit de tenir compte du rapport des volumes déformés, et des contraintes d'écoulement (dureté) des matériaux dans leurs conditions d'emploi, soit :

$$W_{Ag} = W_{p.m.} \frac{V_{Ag} \sigma_0 Ag}{V_{p.m.} \sigma_0 p.m.}$$

avec :

- * W = énergie consommée par la frappe, sur argent (Ag) ou sur pâte à modeler (p.m.) ;
- * V = volume des statères ($V_{Ag} = 1,14 \text{ cm}^3$; $V_{p.m.} = 87,2 \text{ cm}^3$) ;
- * σ_0 = contrainte d'écoulement du matériau monétaire :
 - à 25° C, $\sigma_{Ag} = 10,9 \text{ kg/mm}^2$ (ou 109 M Pa) ;
 - à 700° C, $\sigma_{Ag} = 5,9 \text{ kg/mm}^2$ (ou 59 M Pa) : valeurs estimées pour une très grande vitesse de déformation ($\epsilon = 10^3 \text{ s}^{-1}$), d'après DELAMARE, MONTMITONNET, 1985 ;
- * σ_0 pour la pâte A : $\sigma_{p.m.A} = 1,4 \text{ kg/cm}^2$ (ou 0,14 M Pa) à 21° C ;

pour la pâte B : $\sigma.mB = 2,3 \text{ kg/cm}^2$ (ou $0,23 \text{ M Pa}$) à $19,5^\circ \text{ C}$: mesures effectuées à la température des expériences et dans les mêmes conditions de faible vitesse de déformation.

La précision du résultat obtenu est limitée par le peu de données expérimentales sur la composition chimique des statères éginétiques (supposée ici à 95% d'argent) ⁽³⁹⁾, mais surtout sur le comportement rhéologique de ces alliages aux très grandes vitesses de déformation. Les données utilisées ici ont été choisies par analogie avec le comportement du cuivre ⁽⁴⁰⁾.

LISTE DES PLANCHES ET DES FIGURES

PLANCHES

I-II. *Chronologie relative du type de droit et du carré creux de revers*

Toutes les monnaies illustrées sont conservées au Cabinet des Médailles de Paris. **1** [n° 1286 : 12 g 20], **2** [n° 1293 : 12 g 29 : agrandie en pl. II], **3** [n° 1325 : 12 g 22], **4** [n° 1356 : 12 g 07], **5** [n° 1284A : 12 g 88], **6** [n° 1348 : 12 g 39], **7** [n° 1327 : 11 g 44], **8** [n° 1359 : 12 g 13], **9** [n° 1313 : 12 g 07], **10** [n° 2130, Collection de Luynes], **11** [n° 1361 : 12 g 38], **12** [n° 1403 : 12 g 18], **13** [n° 2125, Collection de Luynes], **14** [n° 1430A : 12 g 05]

III. 1. *Deux étapes de la frappe d'un flan ovoïde marqué sur la presse hydraulique entre le coin de droit et le poinçon de revers*

2. *Coins utilisés pour la simulation (Cfr Annexe I) :*

- a. Droit
- b. Revers – poinçon
– coin

3. *Influence de la forme du flan sur la forme de la pièce [Trousseau : Poinçon. - Lubrifiant : Talc]*

- Flan ovoïde (18)
- Flan cylindrique (19) : les flans sont préparés pour la mesure des déformations (Cfr supra p. 16)

(39) N. H. GALE, W. GENTNER, G. A. WAGNER, *Mineralogical and geographical silver sources of archaic Greek coinage*, dans D. M. METCALF, W. A. ODDY (éd.), *Metallurgy in numismatics*, Vol. I, Londres, 1980, p. 3-49.

(40) J.-C. GIANOTTA, *Comportement mécanique et évolution structurale de cuivres de haute pureté dans le domaine dynamique* (Thèse de doctorat en Sciences et Génie des Matériaux. École des Mines de Paris, 1986).

IV. Comparaison des formes de pièces (vues de dessus et de dessous, coupes) obtenues pour les quatre formes de flan après impression complète des globules [Trousseau : Poinçon. - Lubrifiant : Talc. - Pâte : $\sigma_0 = 0,14$ M Pa. - Température : 21° C]

- A. Flan sphérique
- B. Flan ovoïde
- C. Flan cylindrique
- D. Flan lenticulaire

V. *Cinétique de remplissage des gravures en fonction de la forme du flan* [Trousseau : Poinçon. - Lubrifiant : Talc]

- A. Flan sphérique
- B. Flan ovoïde
- C. Flan cylindrique

Remarquer le bombement de la pièce la plus déformée. Les zones abîmées avoisinant la carapace sont dues à des problèmes de séparation de la pièce du coin.

On peut compléter la séquence de la figure a par l'examen de la planche VII.

VI. *Influence de la géométrie du trousseau sur la forme de la pièce et sur la cinétique de remplissage* [Flan : Ovoïde. - Lubrifiant : Talc]

VII : Poinçon (83 à 86)

VIII : Coin (87 à 90)

Remarquer la similitude des pièces 86 et 89 ainsi que la venue de la rainure périphérique sur la pièce 90.

Les enfoncements de trousseau sont les mêmes pour les couples 84-88, 85-89 et 86-90.

VII. *Influence de la lubrification et visualisation des écoulements* [Lubrifiant : Talc (16). - Gel (21)]

1. Comparaison du flan et des statères lubrifiés. A remarquer : au revers, l'écoulement se fait perpendiculairement aux côtés du carré. La lubrification favorise l'inclinaison de la paroi du carré.

2. Coupe des pièces précédentes suivant le petit axe de la pièce. Noter l'écrasement de la partie centrale par les zones mortes supérieure et inférieure.

FIGURES

1. *Influence de l'enfoncement (x) du trousseau sur l'effort de frappe* [Trousseau : Poinçon. - Flan : Ovoïde. - Lubrifiant : Talc. - Pâte : $\sigma_0 = 0,14$ M Pa. - Température : 21° C]

2. *Influence de la géométrie du flan sur la courbe $F(x)$* [Trousseau : Poinçon. - Lubrifiant : Talc. - Pâte : $\sigma_0 = 0,14$ M Pa. - Température : 21° C].

L'astérisque correspond à la fin du remplissage des globules.

- A. Flan ovoïde ;
- B. Flan sphérique ;
- C. Flan lenticulaire : l'aire hachurée représente l'énergie (W) consommée par la frappe de la pièce 61 ;
- D. Flan cylindrique.

Noter une assez bonne reproductibilité des courbes.

3. *Influence de la géométrie du flan sur la courbe $F(x)$* [Trousseau : Poinçon. - Lubrifiant : Talc. - Pâte : $\sigma_0 = 0,14$ M Pa. - Température : 21° C]

Exceptionnellement, c'est l'enfoncement final du trousseau qui est pris pour origine des abscisses. Les astérisques marquent la fin du remplissage des globules (Figure 4)

- 65 : Flan ovoïde ;
- 60 : Flan sphérique ;
- 64 : Flan lenticulaire ;
- 28 : Flan cylindrique.

Noter la parenté des courbes correspondant aux flans sphériques, lenticulaires et ovoïdes.

4. *Comparaison des coupes des pièces obtenues après impression complète des globules* (Cfr astérisques sur les courbes de la figure 3).

- 68 : Flan ovoïde ;
- 59 : Flan sphérique ;
- 61 : Flan lenticulaire ;
- 55 : Flan cylindrique.

La courbure du champ du droit est due aux difficultés de séparer la pièce du coin.

5. *Influence de la forme du trousseau sur la courbe $F(x)$* [Flan : Ovoïde. - Lubrifiant : Talc. - Pâte : $\sigma_0 = 0,23$ M Pa. - Température : 19,5° C]

- 81 : Poinçon ;
- 90 : Coin.

Jusqu'au point P, les écoulements sont identiques dans les deux cas, les courbes le sont aussi. Au delà, le frottement contre le trousseau augmente l'effort de frappe.

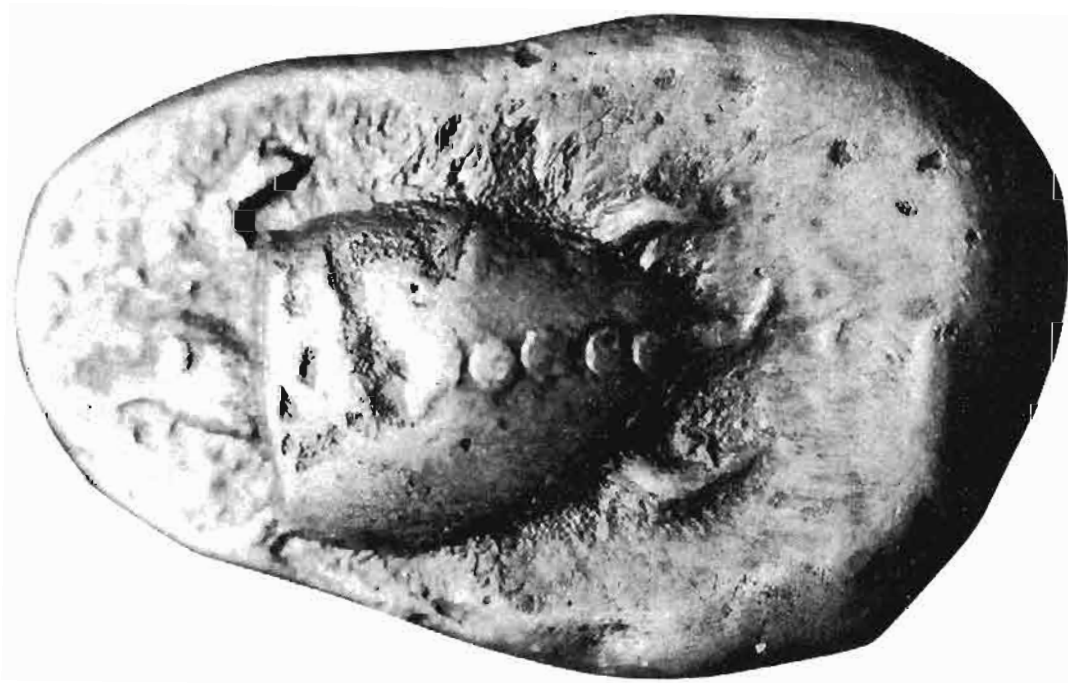
6. *Influence de la forme du trousseau et de son enfoncement sur l'énergie consommée par la frappe (W)* [Les données sont les mêmes que celles de la figure 5]

7. *Influence de la lubrification sur la courbe $F(x)$* [Trousseau : Poinçon. - Flan : Ovoïde. - Pâte : $\sigma_0 = 0,14$ M Pa. - Température : 19° C]

- 3. Talc ($m = 0,7$)
- 9. Gel ($m = 0,25$)



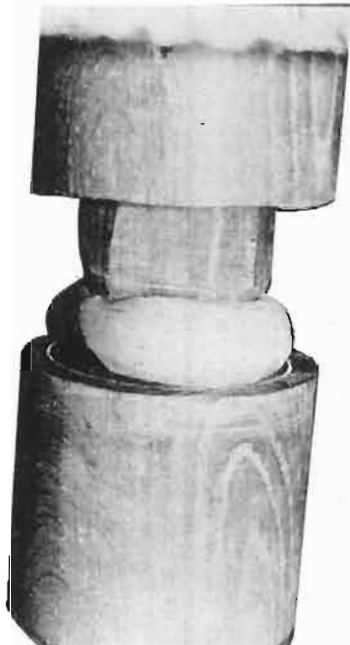
TECHNIQUE DE FRAPPE DES STATÈRES ÉGINÉTIQUES



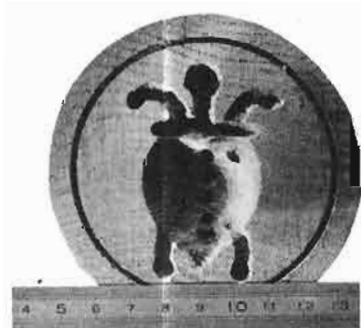
TECHNIQUE DE FRAPPE DES STATÈRES ÉGINÉTIQUES



1



2



A



B



C



18



A



19

3



B



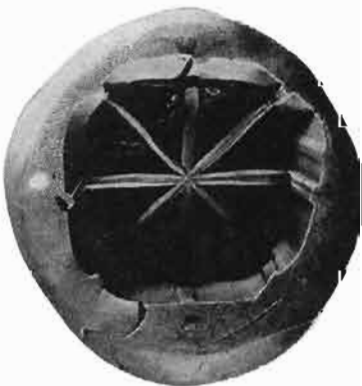
A



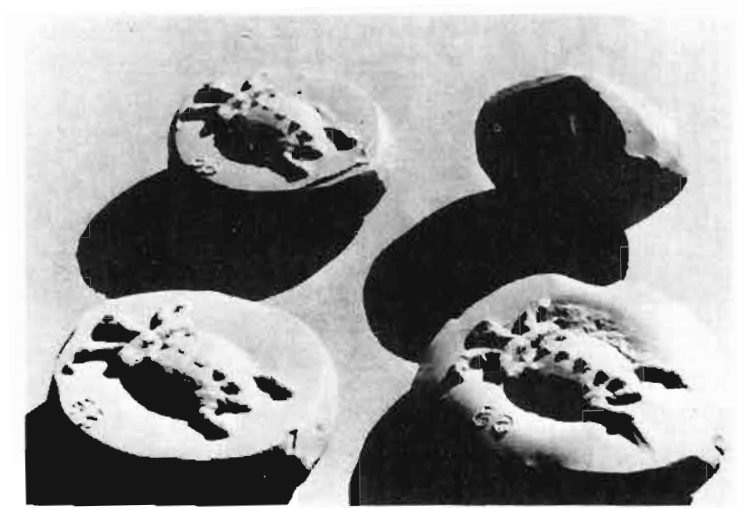
B



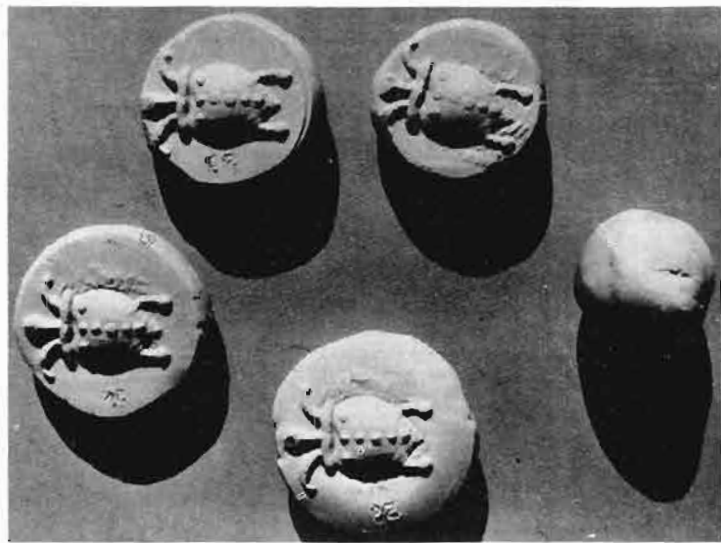
C



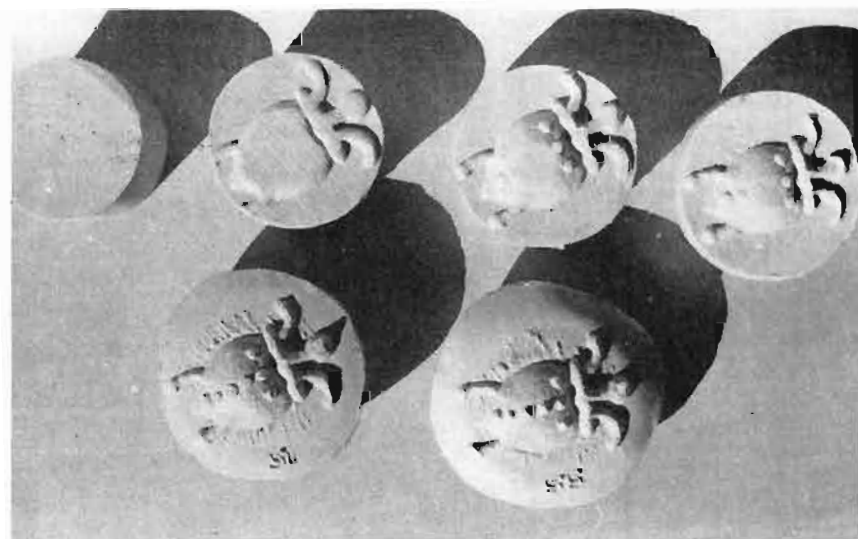
D



A



B



C



A



B



C

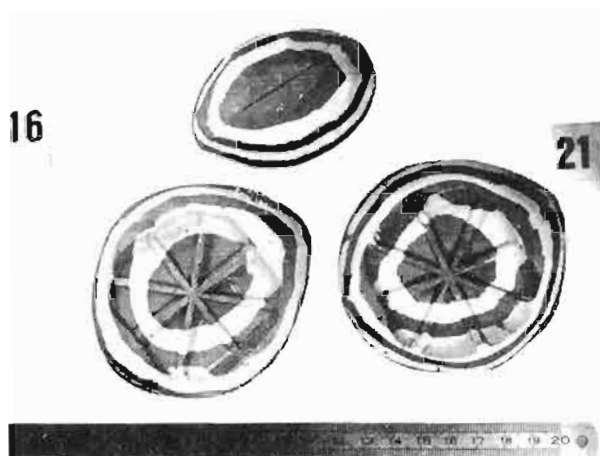


D





A



B



C



D