



HAL
open science

Technologies de fibules du Mont-Beuvray

Jean-Paul Guillaumet, Jean Dubost, Michel Pernod

► **To cite this version:**

Jean-Paul Guillaumet, Jean Dubost, Michel Pernod. Technologies de fibules du Mont-Beuvray. ROLLEY C. (éd.). Techniques antiques du bronze: faire un vase - faire un casque - faire une fibule, Centre de recherches sur les techniques gréco-romaines, p. 59-91, 9 fig., 4 tabl., 9 pl. (X-XVIII), 1988, (Publications du CRTG ; 12). hal-03366777

HAL Id: hal-03366777

<https://hal.science/hal-03366777>

Submitted on 18 Oct 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

**centre de recherches sur les
techniques gréco-romaines
c.n.r.s. - r.c.p. 670**

n° 12

**réalisation claudes aronovici
diffusion amis du c.r.t.g.r.**

**faculté des sciences humaines
2 bd gabriel 21100 dijon
bureau 412 - tél. 80.39.57.71**

**techniques antiques du bronze
faire un vase - faire un casque - faire une fibule**

**cl. rolley . r. boyer . w. mouret . p.h. blyth
m. pernot . j. dubos . j.-p. guillaumet**

sbn 2.900119.13.8

1988

TABLE DES MATIERES

Cl. Rolley. • Introduction : martelage et coulée	5
Notes	13
R. Boyer et W. Mourey. Le trépied à baguettes et l'hydrie en bronze archaïque du musée archéologique de Nîmes (pl. I à V)	15
Notes	43
P.H. Blyth. Métallurgie des armes de bronze (pl. VI à IX)	51
M. Pernot, J. Dubos et J.-P. Guillaumet. Technolo- gies de fibules du Mont-Beuvray (pl. X à XVIII)	59
Bibliographie	91
Planches	93

TECHNOLOGIES DE FIBULES

DU MONT-BEUVRAY

MICHEL PERNOT

C.N.R.S. - U.R.A. 34
Laboratoire de Recherche des Musées de France
Palais du Louvre
75041 Paris Cédex 01

JEAN DUBOS

Fondation Coubertin
Fonderie d'Art
78470 Saint-Rémy-les-Chevreuse

JEAN-PAUL GUILLAUMET

C.N.R.S. - U.P.R. 314
Laboratoire d'Archéologie
rue d'Ulm
75005 Paris

" ... si l'on veut reconstituer en toute certitude l'art industriel des anciens, il importe d'utiliser des sources de renseignements autres que les textes et d'aborder la voie expérimentale ... "

J.-G. BULLIOT

Mémoires de la Société Eduenne

1875 p.468

Problématique, méthodes et techniques d'étude

Problématique

Elle comportait deux aspects :

- en premier lieu, il s'agissait de vérifier la validité technologique de la typologie des fibules du Mont-Beuvray établie par J.-P. GUILLAUMET (1984) ;
- en second lieu, on cherchait à trouver le plus d'informations possible sur les pratiques des artisans bronziers, informations qui permettent une approche socio-économique d'une société par le biais de la technologie.

Pour le métallurgiste ces deux aspects relèvent de la même méthodologie - la lecture technologique de l'objet - dans la ligne de pensée développée plus particulièrement par les préhistoriens, et initiée, parmi d'autres auteurs, par LEROI-GOURHAN ; l'apprentissage de cette lecture passe le plus souvent par l'expérimentation.

Dans ce travail, nous tenterons d'apporter quelques éléments de compréhension de la phase pendant laquelle l'objet est fabriqué, cette phase étant intermédiaire entre la phase de réduction des minerais, ce qui conduit aux métaux, et la phase de diffusion des objets finis.

Rappelons qu'une technique comporte quatre éléments : des matières, des outils, des gestes et des savoirs, et que, par conséquent, la compréhension d'une technologie passe par la recherche, non seulement des échanges de matières premières ou d'objets, mais également des transferts de savoir-faire et des apprentissages de gestes, de regards, de concepts parfois très abstraits, dont les concepts esthétiques ou mathématiques.

Les fibules

Le choix des fibules se justifie par plusieurs raisons :

-- en premier lieu, il existe pour ces objets des typologies sans lesquelles l'étude serait hasardeuse, dont celle de J.-P. GUILLAUMET, que l'on peut qualifier de techno--typologie puisqu'elle repose sur des considérations technologiques et non stylistiques. Les fibules sont bien connues de l'archéologue qui les utilise souvent comme repères chronologiques.

-- en second lieu, cet objet est à la fois fonctionnel et décoratif ; il existe en très grand nombre, et il est ainsi intervenu très couramment dans les échanges entre les cultures ou les régions.

- enfin, l'objet fibule nous paraît être, à la Tène finale, représentatif de la technologie d'une société, car ce n'est ni un objet trop simple, ni un objet exceptionnel. L'objet très simple, l'anneau par exemple, peut être fabriqué par n'importe qui avec n'importe quel métal ou alliage ; au contraire l'objet exceptionnel, la grande statue par exemple ; requiert des compétences pour sa fabrication, mais son caractère unique, ou presque, fait que l'on n'a pas nécessairement cherché à y utiliser une "technologie de pointe". Au contraire, quand il doit fabriquer un objet en grande quantité, voire en série, l'artisan recherche les solutions les plus évoluées pour augmenter sa productivité. Dans le monde contemporain des pays industrialisés, l'équivalent pourrait être la montre qui change vite de mode, que chaque individu possède et qui utilise des technologies très avancées (aciers inoxydables, circuits intégrés etc.).

Le site du Mont-Beuvray

L'oppidum du Mont-Beuvray est l'un des plus grands, la capitale du

peuple des Eduens, et c'est un lieu de production artisanale, en particulier d'objets métalliques. Les fouilles anciennes ont mis au jour tous les vestiges d'une métallurgie de transformation du bronze, à savoir des moules, des creusets et des objets en cours de fabrication ; nous utiliserons pour ces derniers le mot *fabricat*, selon la terminologie introduite par J.-P. GUILLAUMET (1984). Aucune preuve de l'élaboration sur place des métaux intervenant dans les "bronzes" que nous dénommerons alliages base-cuivre, n'est connue à ce jour dans cet oppidum.

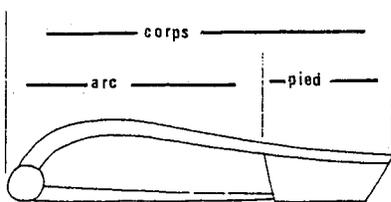
D'autre part, le site du Mont-Beuvray est une des références de base pour la chronologie de la fin de l'indépendance gauloise, soit le I^{er} siècle avant J.-C. Cette période correspond à une époque de transition sur presque tous les plans, en particulier technologique, politique et économique.

Dans le corpus des fibules mises au jour sur un site, on ignore a priori lesquelles sont de fabrication locale et lesquelles sont importées. Un des intérêts d'un site comme le Mont-Beuvray est l'existence d'objets en cours de fabrication, quel l'on peut donc supposer de production locale : ainsi, il devient possible de tenter de cerner ce qui caractérise, voire discrimine des autres ateliers, les productions des ateliers du site lui-même. En effet, les mêmes fibules existent dans tout le monde celtique de la Tène finale, et en très grand nombre, mais on ignore les lieux de fabrication et ainsi la distance à laquelle un atelier exporte. Autrement dit : y a-t-il beaucoup d'ateliers qui exportent à courte distance ou y a-t-il peu d'ateliers qui exportent à longue distance, ou bien encore les deux processus coexistent-ils ? D'où l'intérêt de rechercher le critère pertinent qui peut permettre de discriminer les différents ateliers.

La transition technologique

Le vocabulaire utilisé, pour les différentes parties de la fibule et les divers modes de fixation, sera celui de J.-P. GUILLAUMET : voir schéma J. et tableau J.

La transition technologique se situe donc dans l'évolution du système de fixation ; pour en rendre compte sans faire varier tous les paramètres, nous nous sommes limités à un seul genre : la forme trapézoïdale ininterrompue.



fixation , arduillon , porte_ardillon

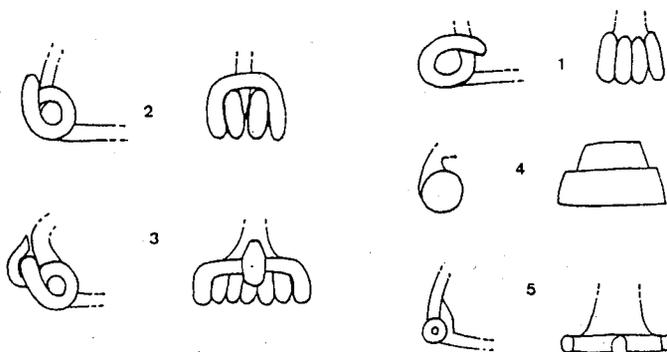


Schéma 1 - Les différentes parties de la fibule et les cinq modes de fixation (d'après Guillaumet)

- 1. ressort nu, corde interne ; 2. ressort nu, corde externe ;
- 3. ressort nu, corde externe et fixe-corde ; 4. ressort caché ;
- 5. charnière

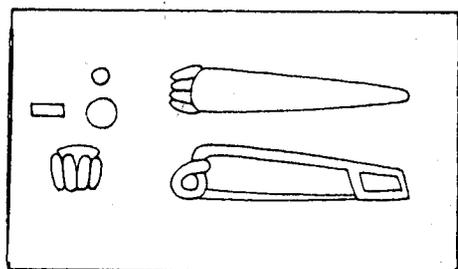
EMBRANCHEMENT	FAMILLE	GENRE	ESPECE	SOUS-ESPECE	VARIETE	SOUS-VARIETE	
Mécanisme de la fixation	Aspects du mécanisme de la fixation	Forme du corps vu du dessus	Section de l'arc	Position du pied	Ornement apport	Décor	
1. RESSORT	1. NU 11. Corde externe 12. Corde interne 13. Corde externe fixe-corde	01. Rectangulaire		1. Rectangulaire	1. En prolongement de l'arc 2. Retour sur l'arc	1. Ajout lors de la fabrication 2. Enlèvement 3. Martelage 4. Ajout et martelage	1. Gravé 2. Estampé 3. Ajouté 4. Gravé et estampé 5. Gravé, estampé et ajouté 6. Gravé et ajouté 7. Estampé et ajouté
		02. Trapézoïdale ininterrompue		2. Hémisphérique			
		03. Trapézoïdale interrompue		3. A facettes			
		04. Trapézoïdale et triangulaire ininterrompue		4. Variable			
		05. Trapézoïdale et triangulaire interrompue		5. Carrée			
		06. Ronde		6. Ronde			
		07. Ronde et trapézoïdale ininterrompue					
		08. Ronde et trapézoïdale interrompue					
		09. Losangique					
		10. En triangles opposés aux sommets					
		11. Zoomorphe					
		12. Zoomorphe et trapézoïdale					
		13. Triangulaire					
		14. En trapèzes opposés par le petit côté					
2. CHARNIERE	31. Mécanisme inclus (3 pièces) 32. Mécanisme ajouté (5 pièces)						

Tableau 1 - Classification des fibules (d'après Guillaumet)

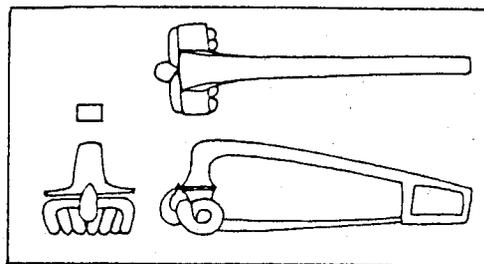
Quatre cas ont été retenus :

- type 1 : ressort nu, corde interne ;
- type 2 : ressort nu, corde externe et fixe-corde ;
- type 3 : ressort caché en deux pièces ;
- type 4 : charnière, mécanisme inclus.

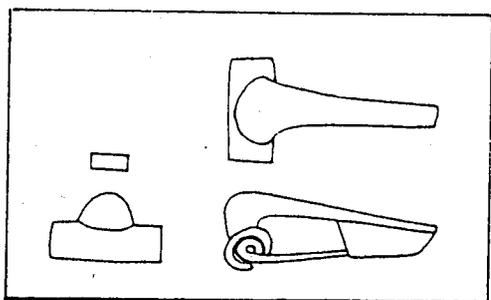
Les types 1 et 2 sont réalisés en une seule pièce, le type 3 en deux pièces et le type 4 au moins en trois pièces. Le schéma 2 présente les types choisis, le tableau 2 donne les correspondances avec quelques autres typologies.



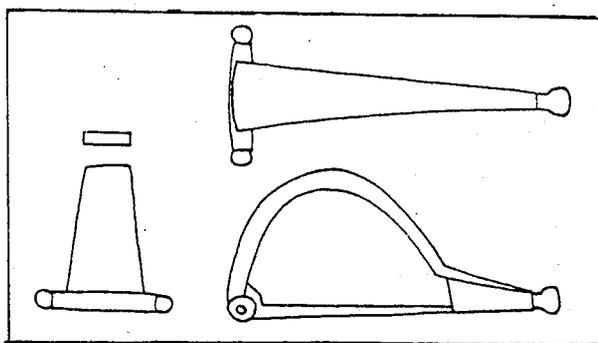
type 1



type 2



type 3



type 4

Schéma 2 - Les types de fibules (d'après Guillaumet)

Guillaumet	Présente étude	Ettlinger nom typologique	Almgren	Feugère
Ressort nu corde interne	type 1	1 Nauheim	3	5
ressort nu corde externe et fixe-corde	type 2	9	4	14a
ressort caché	type 3	20-23	7-8	14b
charnière mécanisme inclus	type 4	29 Aucissa	14	22b

Tableau 2 - Correspondance entre diverses typologies

Techniques d'étude

Les techniques d'étude sont d'une part l'analyse des compositions des alliages par spectrométrie d'émission dans l'U v., et d'autre part, la métallographie sur coupes polies pour l'observation des microstructures. La mise en oeuvre de cette technique d'analyse nécessite le prélèvement d'environ 1mm³ de métal sain par analyse, ce qui est réalisé en récupérant les copeaux obtenus par forage à l'aide d'un foret de 1mm de diamètre. A part quelques cas particuliers, un seul prélèvement par pièce suffit. L'atteinte aux objets archéologiques est négligeable, il n'y a donc pas de limitation introduite.

Lorsque cela s'est révélé nécessaire, des radiographies des objets ont été réalisées pour déterminer le nombre de pièces, afin que chacune soit analysée ; elles sont également utilisées pour localiser le métal sain.

L'étude métallographique nécessite une découpe de l'objet ; en effet, les phénomènes que l'on veut observer sont directionnels et dépendent de la géométrie de la pièce. Il faut observer divers endroits de la pièce, donc soit prélever plusieurs échantillons d'éléments de matière non perturbée, soit faire une découpe de tout l'objet. L'une ou l'autre solution a été adoptée selon le cas. La découpe a toujours été réalisée avec une tronçonneuse à vitesse lente équipée d'une lame diamantée circulaire. Les échantillons sont enrobés dans une résine, polis à la pâte diamantée, puis observés avec ou sans attaque chimique en microscopie optique et en microscopie électronique à balayage.

La métallographie requiert beaucoup de temps et porte atteinte à l'intégrité des objets archéologiques, sans qu'il y ait toutefois destruction, au sens de disparition, de l'objet. Le nombre d'objets ainsi examinés doit être limité à quelques unités. La méthode d'exploitation de l'observation de la microstructure a été développée dans une autre publication (PERNOT et HURTEL, 1987).

En tenant compte de ces considérations, nous avons donc établi les critères suivants pour le choix du corpus représentatif :

- si possible existence simultanée de fabricats et d'objets finis ;
- les fibules ne doivent pas être trop dégradées, puisque ce qui nous intéresse est le métal sain ;

--elles doivent être de "basse qualité" muséologique.

Nous avons ainsi retenu 20 objets pour les analyses : parmi ceux-ci, 8 ont été étudiés par métallographie pour un total de 15 coupes.

YJ)l	n° de catalogue Guillauroec *	tabo.	nombre de coupes rétales	fabricac	objAt :mi
1	55	164) 1			
1	65	16432			c
1	57	164))	J		c
1	7)	15815	1		c
2	98	15816	2		
2	115	15817	J		c
2	116	15818	1		c
2	125	15819	2		c
2	104	164)4			c
J	184	1581)		c	
J	150	15814		c	
J	152	16728		c	
J	15)	16729	1	c	
J	151	16594		c	
J	110	16595			c
J	166	164)7	2		c
J	157	16435			c
J	159	164)6			c
4	107	164)8			X
4	108	16439			c

Tableau 3 - Liste des fibules choisies

Composition des alliages

Pour chaque prélèvement, quatorze éléments chimiques ont été dosés par L.P. Hurtel ; dans le cadre de cette étude, seules les teneurs en trois éléments nous semblent interprétables : celles de l'étain, du zinc et du plomb, l'élément cuivre étant toujours largement majoritaire.

L'élément majeur d'addition de tous les alliages est soit l'étain, soit le zinc; nous sommes donc en présence dans le premier cas de bronzes, dans le second de laitons.

Le tableau 4 donne les résultats d'analyse. Le schéma 3 présente le diagramme binaire Sn-Zn ; deux groupes se séparent : les fibules du type 1 sont des bronzes vers 15% d'étain, les autres sont des laitons vers 20% de zinc.

type	n° objet	point	Sn	Zn	Pb
1	16431		14.4	.013	.28
1	16432		16.7	.084	.023
1	16433		14.4	.092	.61
1	15815		14.6	.27	<.009
2	15816		.28	18.9	.51
2	15817		.43	19.5	.40
2	15818		.32	19.5	.33
2	15819		.96	20.3	.52
2	16434		.83	20.0	.40
3	15813	1	1.0	20.8	.47
		2	.99	18.6	.49
		3	1.0	22.3	.49
		4	.93	20.1	.44
		5	.95	22.4	.47
		6	1.1	20.6	.49
		7	.94	22.7	.47
3	15814		1.98	20.0	.21
3	16728		1.17	15.0	.46
3	16729		3.65	20.3	.19
3	16594		2.65	18.8	.21
3	16595	arc éessori:	1.05 .36	19.8 22.1	.43 .47
3	16437	arc i:-essort	1.07 .36	18.0 17.1	1.26 .57
3	16435	arc i:-essort	.60 .28	19.4 22.4	.17 .10
3	16436	arc i:-essort	1.4 .16	19 23.0	2.3 .19
4	16438	arc ardillon perle perle	.31 .31 .31 .35	19.8 19.6 21.0 25.3	.17 .36 .17 .12
4	16439	arc ardillon axe perle sur arc	.26 .29 .28 .28	20.0 15.6 17.5 17.1	.63 .46 .67 .56

Tableau 4 - Résultats d'analyse élémentaire
 (pour l'objet 15813, grappe de coulée ratée, sept points ont été analysés ; la dispersion sur le Zinc est normale : dans les diagrammes nous ne porterons qu'un point à la valeur moyenne)

Parmi les laitons, les alliages des fibules du type 4 sont assez dispersés en zinc (de 15% à 25%), mais très groupés en étain (de 0,26% à 0,35%).

Le schéma 4 détaille le diagramme Sn/Zn pour les types 2 et 3. On remarque que les alliages des fibules du type 2 sont très groupés, par opposition à ceux des fibules du type 3. Sur le schéma 5, dans le même diagramme que pour le schéma 4, sont portés uniquement les résultats du type 3, mais en séparant les fabricats, et, dans les objets finis, le corps et le ressort. On remarque que les alliages des ressorts se distinguent par des teneurs en étain faibles, et que, si l'on élimine parmi les fabricats ceux qui sont ratés, on retrouve pour l'ensemble corps et fabricats un regroupement.

: Pour les bronzes, aucun autre élément que l'étain ne semble intentionnel ; par contre, dans les laitons, l'étain et/ou le plomb paraissent, l'être dans certains cas. Nous avons donc tracé sur le schéma 6, le diagramme binaire Pb/Sn pour tous les laitons. Les alliages du type 4 se retrouvent sur une verticale, c'est-à-dire que la dispersion en plomb paraît sans signification. Les alliages du type 2 sont toujours très groupés : il ne semble pas que le plomb soit ajouté intentionnellement. Pour le type 3, les alliages des ressorts se séparent en étain, comme cela avait également été noté sur le schéma 5 ; les points correspondant aux corps et fabricats sont dispersés ; les fabricats ratés ne se séparent pas. Il semble donc que pour les fibules du type 3, seule une addition d'étain dans les alliages des corps soit significative, la teneur en plomb paraissant ne pas être contrôlée précisément.

On connaît peu de choses sur la métallurgie pratiquée au Mont-Beuvray. PICON et CHAPOTAT (1967), puis PICON, CONDAMIN et BOUCHER (1968) ont analysé quelques objets, parmi lesquels ils rencontrent en proportion sensiblement égale des bronzes et des laitons. Ces auteurs supposent que le laiton n'est pas coulé au Mont-Beuvray, qu'il y est seulement martelé "à cause du caractère trop primitif des installations métallurgiques", qu'il est donc importé. Nous ne pouvons rien dire sur l'élaboration ou l'importation du laiton, mais il est certain qu'il était coulé au Beuvray, comme nous allons le vérifier par la suite.

Il est évident que la qualité des alliages indique qu'il s'agit de travaux de professionnels qui maîtrisent très bien la réalisation des alliages base-cuivre. Ces alliages sont certainement réalisés dans les ateliers du site.

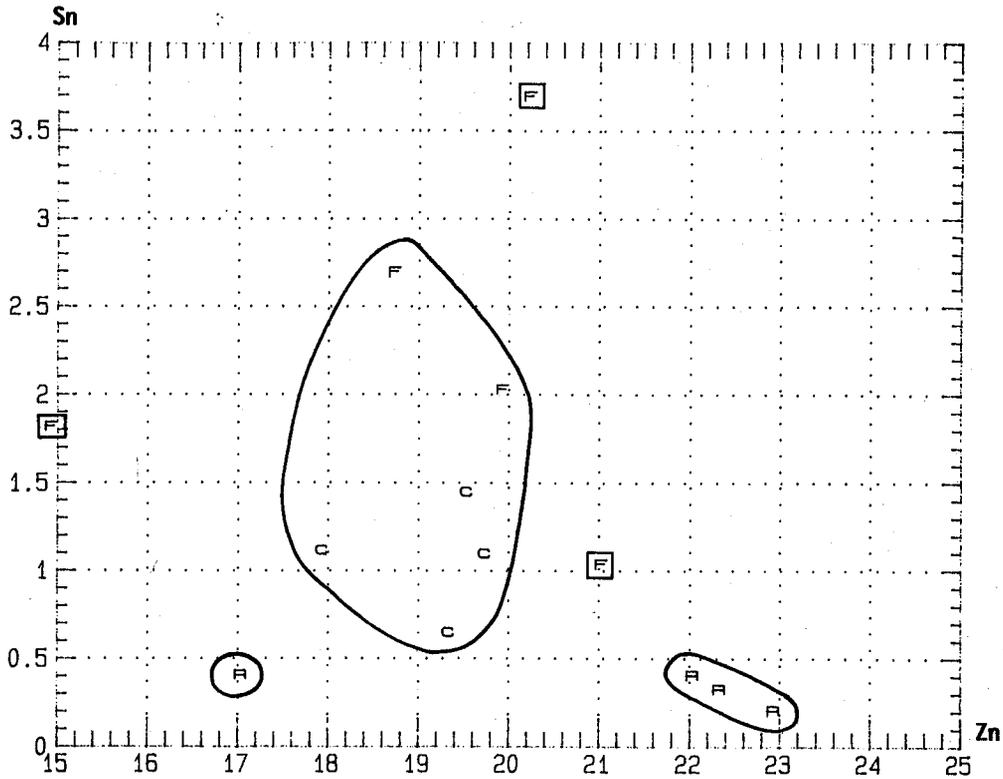


Schéma 5 - Type 3 ; diagramme Sn/Zn
 F = fabricat ; c = corps ; R = ressort ; \boxed{F} = fabricat raté

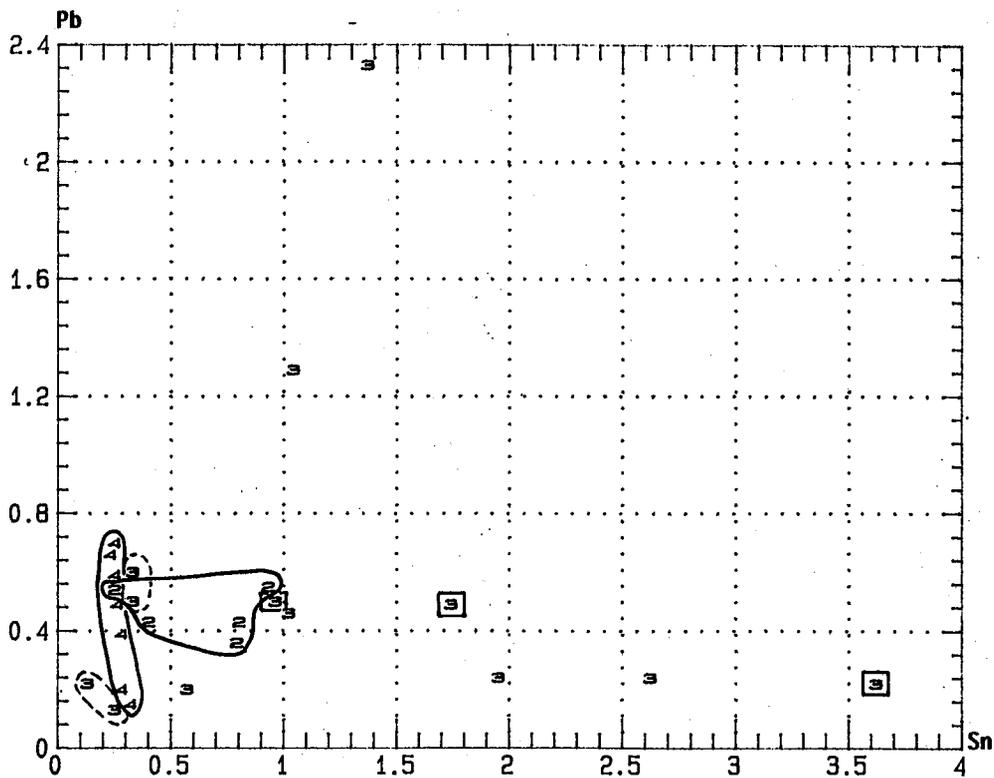


Schéma 6 - Types 2, 3 et 4 ; diagramme Pb/Sn
 $\boxed{3}$ = fabricat raté ; $\textcircled{3}$ = ressort type 3

Mise en forme

A la lumière des résultats précédents, il est clair que les deux catégories d'alliage séparent sans ambiguïté le type 1 des autres ; la technologie de la charnière distingue bien le type 4. Aussi nous sommes-nous particulièrement attachés, dans cette partie concernant la mise en forme, à comprendre les différences entre les types 2 et 3 puisque les alliages sont sensiblement les mêmes. En d'autres termes : quel est l'intérêt de la fibule en deux pièces par rapport à celle en une pièce ? Nous ferons cependant quelques remarques sur la mise en forme des fibules des types 4 et 1.

Type 4

La photo fig.22 présente deux fibules. Pour la fibule 16439 on note que l'articulation entre le corps et l'ardillon est réalisée par un axe aux extrémités duquel sont enfilées deux petites perles maintenues probablement par martelage de ces extrémités. La radiographie de la fibule 16438 montre l'existence d'une perle située au bout du pied ; celui-ci est terminé par un axe qui, martelé à son extrémité, maintient la perle. La présence de ces perles se justifie par des effets décoratifs de volume et non de couleurs, puisqu'il s'agit d'alliages de même composition. La fibule 16438 était articulée par un axe en fer dont il ne reste que des produits de corrosion, ce qui explique son absence sur l'image radiographique.

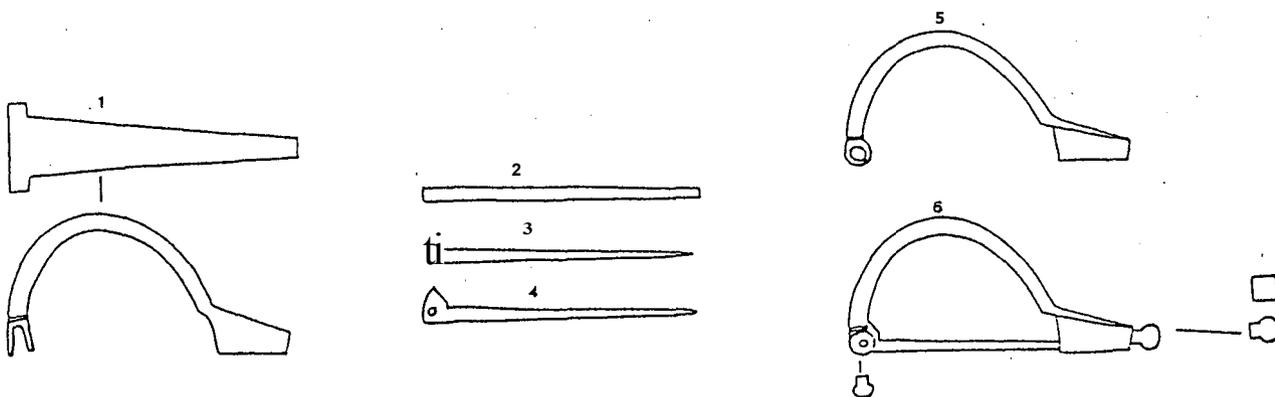


Schéma 7 - Fabrication d'une fibule du type 4 (d'après Guillaumet)

Le schéma de fabrication (schéma 7) proposé par précédemment est donc à modifier pour les petites pièces qui ont des perles, et non des boules. La partie du corps qui maintient l'axe semble, pour la fibule 16439, correspondre à un schéma de fabrication voisin de celui du schéma 7, mais avec une seule partie mince roulée vers l'intérieur et rien de deux parties formant pince. Pour la fibule 16438, la technique ne paraît pas être la même : ou bien une partie mince a été roulée -- mais dans l'autre sens, vers l'extérieur -- ou bien cette partie est massive, et il y a eu perçage ou réserve à la coulée. Seule une découpe permettrait de le préciser. Il serait également nécessaire d'examiner d'autres fibules de ce type, les dessins ne permettant pas d'obtenir cette information.

Type 1

Les alliages des fibules du type 1 sont de vrais bronzes avec environ 15% d'étain ; rappelons que la limite de solubilité de l'étain dans le cuivre est de 15,8% entre 500 et 600°C. Dans ce domaine de température l'alliage est donc monophasé alors qu'à la température ambiante il est normalement biphasé (eutecticoïde $ct+S$), et ainsi difficilement déformable.

Les coupes métallographiques réalisées dans deux des objets de ce type montrent que le métal est monophasé; les artisans pratiquaient donc un traitement thermique particulier pour maintenir à la température ambiante la microstructure monophasée. Les observations montrent également que l'on est en présence d'un état recristallisé avec une légère déformation, postérieure au dernier traitement de recristallisation. Pour l'état inclusionnaire on note que les nodules de plomb sont bien globulisés, ce qui est cohérent avec un état recristallisé faiblement déformé, et que les inclusions non métalliques, principalement des sulfures, ne sont pas fragmentés et peu allongés, excepté dans le porte-ardillon où elles sont fortement allongées.

FURGER--GUNTI (1977) a examiné quelques fibules de Nauheirri, ainsi que des fabricats ; il suppose que la technique de fabrication consiste à découper une ébauche dans une tôle, qu'il y a ensuite un travail de martelage à froid et une finition del 'ardillon par étirage au travers

d'une filière avec des recuits de recristallisation. Cette dernière hypothèse est appuyée sur l'observation de stries parallèles à l'axe de l'ardillon. Les compositions précises des alliages ne sont pas données, mais il est indiqué qu'il s'agit de bronze avec environ 13% d'étain ; une observation de microstructure présente un état recristallisé, l'état inclusionnaire n'est pas décrit.

La microstructure que nous observons ne correspond pas à ces hypothèses ; une ébauche découpée dans une tôle déjà fortement déformée conduirait à des inclusions très allongées, qu'elles soient fragmentées ou non. Nous observons des stries sur certains ardillons et ressorts, mais le calibrage irrégulier de la section ne semble pas correspondre à un étirage ; il pourrait s'agir de traces de polissage. La microstructure oriente plutôt vers l'hypothèse d'une ébauche coulée dans laquelle les formes sont proches de celles de l'objet fini ; cette ébauche serait reprise par un travail de martelages alternés de recuits. La déformation serait faible dans les parties arc et ardillon et plus importante dans le porte-ardillon, car ce dernier est la partie la plus mince ; ceci n'est pas en contradiction avec les observations de FURGER-GUNTI.

Il n'y a pas eu de recuit après la dernière passe de martelage, ce qui est cohérent avec l'utilisation de l'objet : en effet un état écroui présente un module d'élasticité plus bas qu'un état recristallisé, mais par contre, une limite d'élasticité plus haute, donc un domaine de déformation élastique plus grand. COGHLAN (1980), qui a examiné des coupes métallographiques de cinq fibules de l'Age du Bronze, fait la même observation, à savoir quel état final du métal est un état écroui.

GUNTHER (1983) a publié des fabricats mis au jour en Allemagne. Ceux-ci sont martelés, sans aucun doute, mais la composition des alliages n'a pas été déterminée, et le type de fibule ne paraît pas être comparable aux fibules du Beuvray ; il n'est donc pas possible d'utiliser comme élément d'information le procédé de fabrication de ces objets.

Une question se pose cependant : pourquoi les artisans utilisaient-ils un alliage qui présente des problèmes de formage puisqu'il faut le recuire dans des conditions très particulières ? La seule hypothèse qui semble réaliste est que la couleur de cet alliage est proche de celle de l'or.

Une étude est actuellement en cours pour déterminer les conditions de recuit d'un bronze à 15% qui permettent d'obtenir un alliage déformable. C'est nécessaire pour préciser le processus de fabrication de ces fibules.

Type 2

Le fabricant 15816 a été coupé dans la partie de l'arc ; le ressort a disparu. C'est certainement sa rupture qui a provoqué l'abandon de l'objet. La microstructure observée montre que le métal est dans un état faiblement écroui après recristallisation. Une section transversale met en évidence l'existence de porosités centrales axiales ; une section longitudinale montre que les inclusions non métalliques sont très allongées et fragmentées.

Deux fibules très dégradées (15817 et 15818) ont été découpées longitudinalement. On observe sur la vue d'ensemble (photo fig.23) que l'objet a été mis en forme par martelage à froid ; les inclusions non métalliques suivent les lignes d'écoulement du métal, précisant ainsi le champ de déformation. La microstructure de l'arc et du départ du fixe-corde est différente de celle du ressort et de la corde. Un axe est présent dans les spires du ressort, il s'agit peut-être d'une réparation du type de celles signalées par FEUGERE (1985), mais l'état de corrosion de l'objet ne permet pas de l'affirmer.

La microstructure de l'arc est bien recristallisée, sans aucun écrouissage additionnel (photo "fig.24) : les grains sont bien délimités par des joints formant sensiblement des polyèdres ; les grains sont équiaxes (mêmes dimensions dans toutes les directions), avec de nombreuses macles thermiques (larges bandes rectilignes dans les grains). La corde et les spires du ressort sont dans un état partiellement écroui (photo fig.25). Ceci est matérialisé par la présence de fines stries sur les grains (ce sont des macles mécaniques résultant de la déformation plastique du cristal), ainsi que par la distorsion des macles thermiques (ou de recristallisation) qui ne sont plus rectilignes.

On note la présence de porosités centrales bien visibles dans la section de la corde (photo fig.25) ainsi que dans la section perpendicu-

laire à l'axe des spires (photo fig.26). La photo fig.27 est un détail de la photo fig.26 après attaque chimique ; elle visualise le gradient de déformation. Au voisinage de l'axe du fil, donc de la fibre neutre de la déformation en flexion, les grains ne sont pas déformés ; les grains sont déformés en contraction circonférentielle dans la partie concave et dans la partie convexe en extension circonférentielle.

Une fibule d'un type voisin des précédents (15819, photo fig.28), qui présente un décor sur l'arc, a été découpée longitudinalement. L'ailette qui est visible en haut de la photo fig.29,a, a été formée par martelage ainsi que le départ de l'arc vers le pied (à gauche), mais la partie centrale de cette zone de décor n'a pas été déformée, comme le montre l'état inclusionnaire. La transition est détaillée sur la fig. 29,b. Les photos fig.30 et 31 montrent des détails de cette microstructure après attaque chimique. On note dans la zone non déformée que les inclusions non--métalliques ont des formes d'"amibes" que les nodules de plomb (blancs en MEB) sont organisés et dessinent certainement les anciens joints des dendrites ; dans les zones déformées les inclusions indiquent clairement la direction de l'écoulement du métal. Les grains des zones déformées et non déformées sont tous dans un état recristallisé avec une taille de grain de l'ordre de 100µm. La taille des grains du ressort et du fixe--corde est beaucoup plus fine, de l'ordre de 25µm.

A la lumière des observations précédentes, le procédé de mise en forme peut être précisé.

La première étape est la fabrication par coulée d'une ébauche où la répartition des volumes de matière est déjà probablement réalisée. La coulée d'une barre de section uniforme nécessiterait que sa section corresponde à la plus forte section de l'objet fini et demanderait donc une réduction de section très importante pour la partie ressort et ardillon. L'existence de cette ébauche est justifiée par la présence à coeur de porosités, et d'une structure inclusionnaire non déformée dans le décor à ailettes.

La seconde est la reprise par martelage de la quasi--totalité de l'objet, par travail à froid alternant avec des recuits de recristallisation de tout l'objet. Après le dernier traitement de recristallisation, le ressort est bobiné ; il est possible que la corde et l'ardillon

soient légèrement martelés pour qu'ils soient écrouis et ainsi plus rigides pendant le bobinage des spires.

Par rapport aux fibules du type 1, il semble qu'il y ait un travail de martelage plus important pour la mise en forme des fibules du type 2, le laiton étant plus aisé à former.

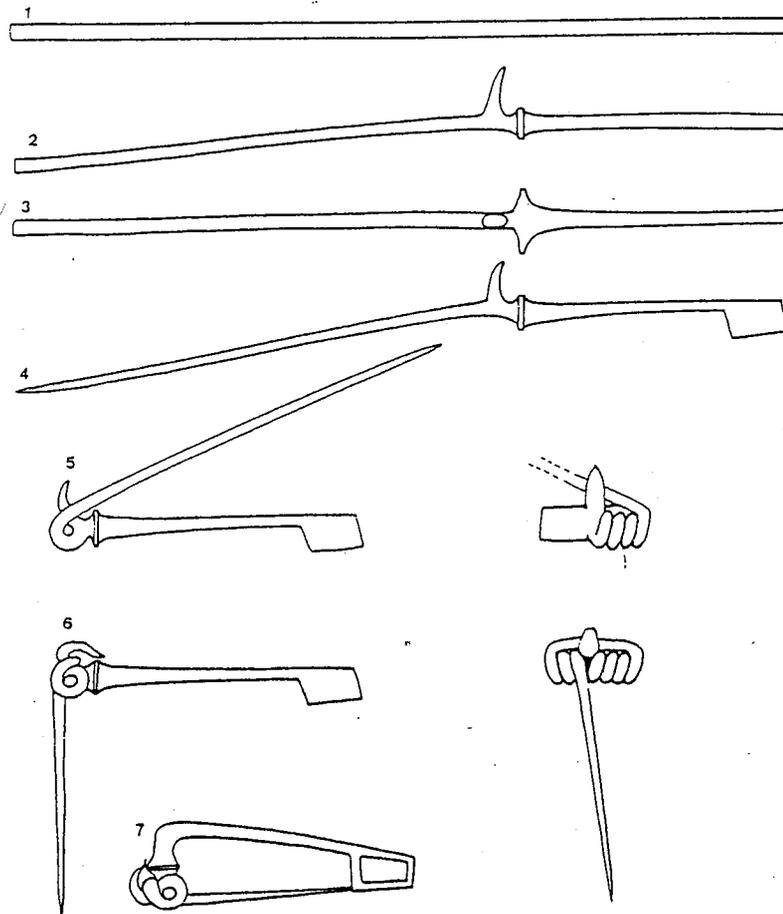


Schéma 8 - Fabrication d'une fibule de type 2 (d'après Guillaumet)

Le schéma de fabrication ci-dessus (schéma 8) est correct pour l'enchaînement des phases, mais il ne tient pas compte de la répartition des volumes du métal. L'ébauche coulée de départ doit avoir une géométrie plus élaborée : la section de la partie ressort doit être plus fine que celle de la partie arc, et il doit y avoir un renflement au niveau

du fixe-corde et du faux cache-ressort ; un second renflement est nécessaire si l'on veut obtenir un décor à ailettes, par exemple. Les longueurs des différentes parties doivent être calculées en fonction des sections choisies et des volumes de l'objet fini. Il est à noter que pour les fibules du type 2, seule la partie ressort et ardillon est dans un état écroui, ce qui est une bonne utilisation des différents états de durcissement du métal. L'arc, compte tenu de sa section, n'est que très peu sollicité mécaniquement lors de l'usage de l'objet ; il peut donc rester dans l'état recristallisé.

Type 3

Les fibules du type 3 sont en deux pièces : d'une part le ressort et l'ardillon, d'autre part l'arc avec la partie cache-ressort qui emprisonne le ressort. La fig.32 montre la photographie d'un fragment de fibule avec l'image radiographique. On note la disparition de l'ardillon, mais le bobinage du ressort est réalisé avec une corde, de la même façon que pour les fibules en une pièce.

Il est bien établi que l'ébauche de la partie arc est fabriquée par coulée en grappe à la cire perdue. Une grappe de fabricats ratés est présentée sur la photo fig. 33. Le moule a dû se fracturer pendant la coulée; un moule pour une coulée de douze fibules, probablement rompu au décirage ou à la cuisson, a été décrit par BECK *et al.* (1982-83). En outre huit fabricats sont recensés dans le catalogue de GUILLAUMET.

Un des fabricats a été découpé et examiné (photo il .34). On observe une microstructure typique d'un métal brut de coulée, avec de grandes dendrites et des parois dessinant les espaces interdendritiques. Il s'agit d'un fabricat raté, par arrêt de l'alimentation en métal ; la teneur en étain est très élevée (,65%). On note la présence en faible quantité d'une seconde phase, riche en étain, ainsi que de quelques nodules de cuivre pur, de l'ordre de 20µm de dimension, situés dans les espaces interdendritiques.

Ce dernier point ne semble explicable que par l'utilisation de cuivre pur lors de l'élaboration de l'alliage. Le cuivre pur peut ne pas être allié au zinc, si localement le cuivre n'a pas fondu, ce qui est

possible puisque la température de fusion du cuivre est de $1084,5^{\circ}\text{C}$ alors que celle de l'alliage à 20% de zinc est de 1000°C environ. Il paraît clair qu'une métallurgie d'une telle qualité, vue la faible dispersion de la teneur en zinc des laitons, ne doit utiliser que faiblement la refonte d'objets hors d'usage. On peut affirmer que le laiton était coulé au Beuvray, et que l'alliage y était très probablement réalisé.

Les parties cache-ressort et porte-ardillon sont reprises par martelage pour les allonger, le métal ne pouvant être coulé suffisamment mince, et pour leur donner leur forme définitive. Afin de préciser les conditions de cette opération, nous avons coupé l'objet de la photo fig. 30 : la coup est présentée sur la photo fig.35. On y voit, enfermé dans le cache-ressort, le ressort avec la section transversale de la corde. La partie massive, vers l'arc de la fibule, est dans un état brut de coulée : aucun travail de déformation, ni aucun traitement de recristallisation n'a été fait, la structure est dendritique et monophasée. Les parties minces qui enserrant le ressort ont été martelées et recuites, elles présentent une structure recristallisée à grains fins. Ce qui est remarquable est que seule la partie déformée a été recuite. La photo fig.36 montre la transition entre la zone en état brut de coulée et la zone déformée et recuite, qui est identifiable tant par la forme et la taille des grains, que par l'état inclusionnaire. Il y a donc une différence importante par rapport aux fibules du type 2, pour lesquelles l'objet entier était soumis au traitement de recristallisation.

- Le ressort est mis en forme par martelage à froid, comme le montrent les inclusions très allongées et très fragmentées. L'absence quasi-totale de porosités laisse supposer un procédé différent de la mise en forme des ressorts des fibules du type 2, ce qui est cohérent avec le fait qu'il ne s'agit plus d'amincir une partie d'une pièce, mais que l'on peut fabriquer du fil en plus grande longueur et le couper ensuite à la dimension désirée.

Il faut noter le choix d'alliages différents pour des procédés de mise en forme différents. En effet, nous avons vu que la partie coulée contenait une addition d'étain, ce qui améliore la coulabilité, paramètre important pour la réalisation d'une pièce complexe qui comporte des

parties minces. Le ressort est formé par martelage à partir d'une ébauche simple qui ne nécessite pas de précautions particulières pour la coulée.

L'examen des coupes métallographiques de cette fibule a permis de mettre en évidence qu'elle est étamée. L'étain est visible sous l'aspect d'une couche blanche très sinueuse. Nous ne pouvons préciser actuellement par quel procédé cet étamage a été réalisé.

Le décor des fibules de ce type était fait par une reprise par ciselure ; ceci justifierait une addition de plomb, qui facilite ce travail en assurant la fragmentation du copeau, mais nous n'avons pu le mettre en évidence dans les compositions. Cette addition est certainement moins critique dans un laiton que dans un bronze : le laiton, ayant des caractéristiques mécaniques plus faibles, se travaille aisément,

Discussion

Les fibules de type 1 sont des bronzes ayant environ 15% d'étain. L'étude doit être poursuivie pour préciser le procédé de mise en forme, mais il y a travail de martelage ; tout l'objet est laissé dans un état légèrement écroui, lorsqu'il est fini.

Les fibules des types 2, 3 et 4 sont des laitons ayant environ 20% de zinc ; les objets en cours de fabrication indiquent que le laiton était coulé au Mont-Beuvray.

Pour le type 2, la mise en forme est réalisée par martelage à froid d'une ébauche coulée, les passes de déformation alternant avec des recuits de recristallisation de tout l'objet. La partie ressort-ardillon, qui travaille mécaniquement, est dans un état déformé ; l'arc est dans un état recristallisé.

Le corps des fibules de type 3 est coulé en grappe à la cire perdue ; le laiton comporte une légère addition d'étain, comprise entre 0,5 et 3%. Les parties cache-ressort et porte-ardillon sont reprises par martelage. Mais, lors des recuits de recristallisation, seule la partie déformée est chauffée ; ceci laisse supposer un changement dans la technique de chauffage. La partie ressort de ces fibules pourrait être formée dans des conditions différentes du travail de martelage de cette

partie dans les fibules de type 2 ; par exemple en fils de plus grande longueur, découpés ensuite à la bonne dimension.

Il semble donc que du type 1 au type 4, il y ait évolution dans la technologie, pour diminuer d'une part le risque de rupture en cours de fabrication et en service, d'autre part le temps de travail, avec peut-être une division du travail. Des considérations économiques concernant les alliages sont peut-être aussi à prendre en compte : l'étain est un métal cher, donc un alliage chargé à 15% l'est aussi ; le laiton pourrait être meilleur marché.

Du type 1 au type 2, il y a surtout passage d'un alliage difficile à travailler à un alliage facile à travailler. Ceci induit la fabrication, dans le type 2, d'objets de formes plus complexes ; mais le taux d'objets mis au rebut en cours de fabrication devait être très important. Le stade de martelage de la partie ressort-ardillon est le plus délicat : il faut travailler le métal pour obtenir près de 20cm de fil de 2mm de diamètre environ. Le risque de rupture au cours du formage est très grand ; le taux de rupture en service devait également être élevé.

Le passage du type 2 au type 3 réduit beaucoup le risque de rupture en cours de formage. La fabrication des corps par coulée en grappe, et vraisemblablement de fil en grande longueur, permet la production d'objets non plus vraiment uniques comme dans le type 2, mais d'objets de petites séries. Un élément très important dans cette technique est le fait que seules les parties travaillées sont recuites, ce qui suppose l'utilisation d'un moyen de chauffage local, peut-être du type chalumeau. Cela implique un gain de temps considérable, car, après le recuit d'un laiton, il faut laisser refroidir le métal avant de poursuivre la déformation. Si l'on recuit l'objet entier le temps de refroidissement est beaucoup plus long que si l'on ne recuit que certaines parties qui, de plus, sont très minces.

Le risque de rupture du ressort en service est sensiblement le même pour les types 2 et 3. Le passage au type à charnière rend le risque presque nul, l'effet de ressort étant donné par l'épaulement de l'ardillon près de l'axe d'articulation ; l'objet est en outre réparable par changement de pièces.

Le corpus étudié semble indiquer que la maîtrise de la composition

des alliages par les artisans était excellente, le summum de la qualité correspondant au type 2. On note toutefois un accroissement de la dispersion du type 2 au type 3 ; il pourrait signifier une baisse de qualité imposée par les impératifs de production, peut-être une augmentation de la récupération pour la refonte.

L'ensemble de ces considérations va donc dans le sens d'une production de plus en plus abondante, avec vraisemblablement la recherche d'un abaissement du temps de main d'oeuvre, mais surtout du taux de rebut de fabrication, dans un premier temps par changement d'alliage, dans un second temps par simplification du système de fixation, et peut-être modification des moyens de chauffage pour effectuer les recuits.

Les différents procédés de mise en forme et les alliages permettent ainsi de valider entièrement la typologie proposée par Guillaumet, mais une autre remarque s'impose : la qualité du travail des artisans, tant dans la maîtrise des alliages que dans celle de leur mise en oeuvre.

Afin de mieux évaluer cette technicité et de vérifier certaines des hypothèses proposées pour les conditions de mise en forme, nous nous sommes orientés vers une expérimentation.

Expérimentation

Nous avons choisi pour une expérimentation la fibule de type 2 qui pose le plus de problèmes de réalisation, malgré un alliage facile à travailler. Le but n'était pas de restituer tous les paramètres archéologiques, mais de reconstituer la "chaîne opératoire", de la valider par l'expérience et d'obtenir des informations que l'on ne peut espérer de la spéculation intellectuelle.

Ceci a été réalisé par une équipe comprenant :

- * un archéologue : J.-P. GUILLAUMET ;
- * un métallurgiste de laboratoire : M. PERNOT ;
- * un praticien : J. DUBOS.

Le modèle a été la fibule n°104 du catalogue de J.-P. GUILLAUMET, avec une restitution du porte-arrillon faite à partir d'autres catalogues (FEUGERE, 1985 ; LERAT, 1979), les cotes exactes n'étant pas déter-

minantes pour notre but.

La composition de l'alliage a été choisie voisine de celle de l'objet archéologique, soit 20% de zinc, 0,8% d'étain et 0,5% de plomb. On disposait en outre, du schéma de fabrication (schéma 8) d'un ffricat (n°15816, cat. Guillaumet, n°98), et des observations métallographiques. Ces observations confirmaient l'hypothèse d'un travail important de martelages à froid, alternant avec des recuits de recristallisation, à partir d'une ébauche coulée dont la géométrie restait à définir.

Mise en oeuvre

J. Dubos a suivi une démarche qui se décompose en plusieurs étapes.

1. La première étape a été la réalisation d'un objet en plomb : ce métal, très malléable et sans écrouissage, permet de bien sentir la répartition des volumes de métal dans les différentes parties de la fibule. Il a fait des essais de bobinage des spires du ressort avec du fil de 2mm de diamètre d'un alliage base cuivre du commerce. Cela lui a permis de bien comprendre le détail de l'enchaînement des bobinages, et de savoir quelle longueur il faut réserver pour la corde afin que les deux séries de spires soient jointives après la mise en place de la corde sur le fixe-corde (cette longueur est de 2,5cm), et enfin de déterminer la longueur totale de fil à former pour obtenir le ressort et l'ardillon. On aboutit à 20cm environ au total, dont 13cm pour la partie ressort.

Il a été ainsi proposé une ébauche composée de quatre parties (schéma 9) ; la section est différente pour chaque partie. La partie médiane correspond au faux cache-ressort, la partie de faible section au ressort, celle de plus forte section à l'arc et au porte-ardillon. Les longueurs sont calculées en fonction des volumes de matière. La plus forte section de l'objet fini est située au niveau du faux cache-ressort ; elle sert à dimensionner l'ébauche à ce niveau, car le martelage ne peut conduire qu'à une diminution de section. Un renflement est placé à l'extrémité de ce qui sera l'arc, en vue de former le porte-ardillon.

2. Le second temps a été la réalisation de cette ébauche. Un moule b valve en plâtre (photo fig.37) a été fabriqué pour pouvoir tirer des

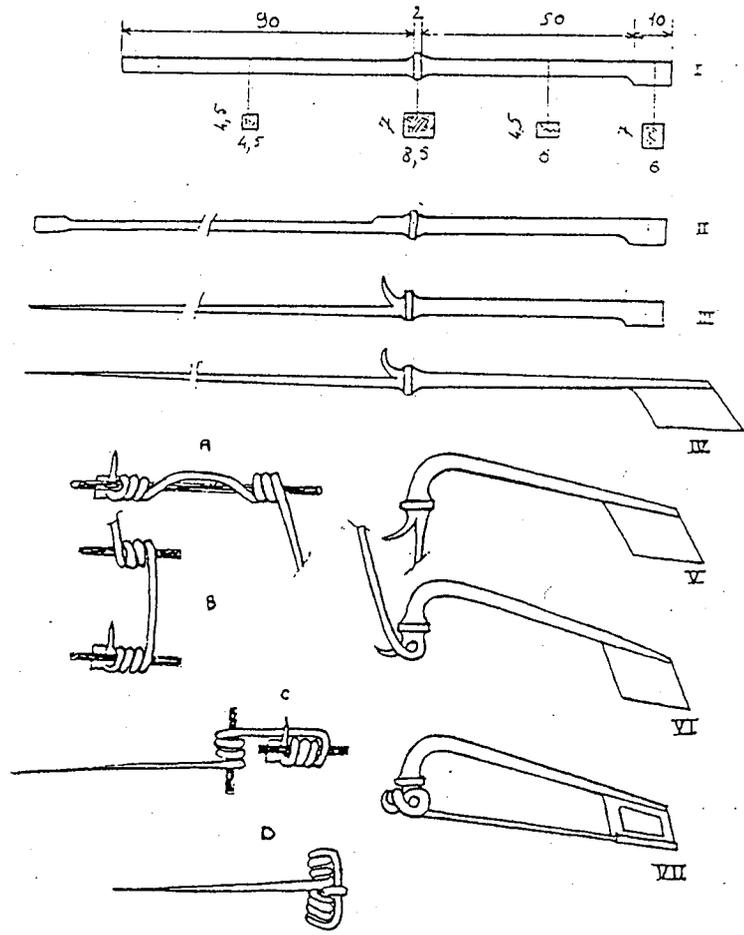


Schéma 9 - Ebauche et fabrication de l'expérimentation
(d'après J. Dubos - compagnonnage - octobre 1987)

épreuves en cire de cette ébauche. La cire synthétique courante de l'atelier de Coubertin a été utilisée.

3. La troisième étape a été la coulée d'ébauches avec l'alliage choisi. Une grappe de quatre ébauches a été préparée selon le procédé usuel de l'atelier. L'alliage a été élaboré à partir de cuivre, de zinc et de plomb purs, dans un creuset moderne, chauffé au gaz. Après refroidissement de la coulée et décochage (bris du moule), les ébauches ont été coupées à la cisaille. Une des ébauches était ratée, car rompue par la présence d'une crasse.

4. La dernière phase est celle de déformation plastique par martelage. Elle a été menée à terme au second essai. Il paraît clair que le

passage le plus délicat (risque maximal de rupture) est celui de la réduction de section de ce qui doit devenir le fil du ressort. Il a fallu retrouver les bonnes conditions de travail. Le martelage est fait avec la panne arrondie d'un marteau normal sur la bigorne d'une enclume.

Pour ne pas atteindre la rupture, le martelage est conduit sur une face du carré, celui-ci est tourné d'un quart de tour ; une autre face est martelée avec décalage d'un demi pas de la distance entre chaque coup de marteau, donc sur les zones non ou peu déformées de l'opération précédente. C'est alors qu'il faut faire le recuit de recristallisation. Le métal est monté en température au chalumeau à plat sur l'enclume pour éviter des déformations par fluage ; on le laisse refroidir avant la passe de déformation suivante. Sept recuits ont été nécessaires pour arriver à la section de 2mm, qui est finalement mise au rond.

La rupture lors d'un premier essai avait été causée par la façon de conduire la déformation qui n'était pas appropriée ; cette rupture s'est produite près du fixe-corde (photo .fig.38). Le fabricant archéologique semble être rompu au ras du fixe-corde.

La déformation de cette partie a été conduite en laissant un volume de métal pour faire le fixe-corde, donc à une extrémité, mais aussi à l'autre extrémité pour éviter l'initiation de fissures.

Le fixe-corde a été formé en fendant le métal à l'aide d'un ciseau.

Une fois le fil formé, la partie arc a été travaillée pour obtenir la diminution progressive de section vers le pied ; en même temps, le porte-ardillon était aminci. Trois recuits ont été nécessaires.

Le bobinage des spires a été fait dans l'état recuit sur un axe en laiton écroui ; la mise en place de la corde a été faite également dans l'état recuit ; le ressort est simplement écroui par le formage des spires.

L'ardillon a été martelé pour être en état écroui, il a été coupé à la longueur par un coup de marteau.

La gouttière du porte-ardillon a été roulée sur l'ardillon lui-même ; le porte-ardillon a été ajouré ensuite, tout ceci dans l'état recuit. La découpe de la lumière a été faite au ciseau sur une face plane de l'enclume, puis finie à la lime. Le fait de découper la lumière après avoir formé la gouttière présente l'avantage de permettre une seconde

tentative au cas où il y aurait rupture pendant le pliage de la gouttière. L'objet fini, avec les chutes, est présenté sur la photo fig.39. Le métal a été poli avec du sable pour enlever la couche d'oxydation qui s'était formée pendant les recuits.

Le temps de travail a été de deux heures pour toute la phase de martelage, exécutée par un homme de l'art, mais qui n'a pas coutume de former ce type d'objets. On peut remarquer qu'une fabrication en série serait logique. La phase qui contrôle le temps de travail est le temps de refroidissement après le recuit, puisqu'il faut laisser le laiton refroidir à l'air. Un travail en série d'une dizaine ou de quelques dizaines d'objets, avec un ouvrier au martelage et un ouvrier au recuit, permettrait d'optimiser en temps de production.

Nous pouvons noter que :

1. L'objet est réalisé dans cet alliage par passes de martelages et recuits, par un ouvrier ayant une excellente connaissance du travail du métal, selon le schéma 9.

2. L'outillage nécessaire est peu important : un marteau, une enclume, un chalumeau, un petit burin ou ciseau, une ou deux petites limes.

3. L'ébauche de départ doit avoir une section au moins égale à la plus forte de l'objet fini, la répartition des volumes n'est pas nécessaire, elle est cependant souhaitable.

Discussion

Dans ce travail nous avons donc mis en oeuvre une démarche d'archéologie expérimentale associant le praticien, le métallurgiste de laboratoire et l'archéologue.

Le résultat de l'expérimentation n'est pas seulement de montrer la faisabilité de la chaîne opératoire proposée. L'objet fabriqué peut être réinjecté dans les circuits d'examen et d'analyse. Actuellement des coupes métallographiques ont été réalisées uniquement sur une ébauche. Cela révèle un élément important : l'élaboration de l'alliage a été réalisée à partir de métaux purs, il n'y a pas d'inclusions non-métalliques. Or, les sulfures visualisent bien l'écoulement du métal dans les objets archéologiques. Lors d'une prochaine expérimentation nous introduirons

du soufre en impureté dans le métal, afin de comparer les observations métallographiques des objets modernes et archéologiques.

Un autre aspect est la confirmation de la technicité du travail au plan des gestes, qui montre à nouveau qu'il s'agit de l'oeuvre de professionnels.

Pour l'outillage, nous pouvons noter qu'il est simple, que des vestiges archéologiques d'un tel atelier ne sont pas spectaculaires, ni immédiats à interpréter. La visualisation des chutes, de l'ébauche, des différentes silhouettes par lesquelles passe l'objet entre l'ébauche et l'objet fini peut aider à l'interprétation des vestiges archéologiques. La fig.40 présente un objet des fouilles récentes du Mont-Beuvray: cet objet avait d'abord été interprété comme un couteau ; en liaison avec la présente étude, il a pu être interprété définitivement et sans ambiguïté comme une fibule du type 2 en cours de fabrication.

Les chiffres de 1 raté sur 4 à la coulée et de 1 raté sur 2 au formage n'ont pas de valeur statistique, mais sont des ordres de grandeur intéressants, qui confirment ce que nous supposions.

L'estimation du temps et de l'organisation du travail permet de proposer à la réflexion quelques chiffres. Si l'on admet un taux de rebut de 50%, et que deux ouvriers font gagner un facteur 3 sur le temps de formage, un atelier qui comporterait quatre ouvriers (deux à la réalisation des moules et à la coulée, un au martelage et un au recuit), travaillant 50h par semaine, pourrait produire entre 30 et 40 fibules par semaine. Si cet atelier ne produit que des fibules, il peut en achever 2000 par an. Une fibule représente 15g de métal, donc la masse de métal qui passe dans cet atelier par an est de 30 à 40kg, soit un volume de 4 litres environ, si l'on admet que la majeure partie des chutes et des ratés est recyclée. Il faut donc imaginer des circulations de matière première à cette échelle.

Conclusion

Cette étude a montré :

- la validité d'une techno-typologie pour les fibules gauloises ;

- la qualité des alliages et du savoir-faire mis en oeuvre pour la réalisation des fibules provenant du Mont-Beuvray;
- qu'une recherche fine des procédés de formage met en évidence une évolution technologique ;
- l'intérêt de retracer la chaîne opératoire pour mieux ceiner le concept d'atelier par l'archéologie expérimentale.

En effet, il nous semble que, dans le cas des fibules gauloises, seule l'identification précise des ateliers et de ce qu'on y faisait, pourra permettre de démêler le problème de la circulation des objets finis. Nous avons vu que pour les fibules des types 2, 3 et 4, le critère composition des alliages ne pouvait être pertinent pour discriminer des fabrications ou des ateliers ; dans le type 3, il y a même deux alliages différents adaptés aux procédés de formage pour les deux pièces.

Cependant, il faut remarquer que, si l'on peut sans problème affirmer que des fibules des types 2 et 3 sont fabriquées au Beuvray, nous ignorons encore si c'est dans un même atelier que les procédés ont évolué, auquel cas il y aurait des incidences chronologiques, ou bien s'il s'agit d'ateliers différents, ayant pu produire simultanément. Car, s'il y a eu évolution technologique, elle n'est pas nécessairement linéaire et faite de phases successives ; il peut y avoir évolution buissonnante, et contemporanéité de différentes phases. C'est le retour aux objets de fouilles et à leurs contextes, voire à des fouilles nouvelles, qui pourra apporter des éléments de réponse par une meilleure reconnaissance de tous les vestiges de l'atelier de transformation : débris de fours de différents types (cuissons des moules, fusion, recuit du métal ...), débris de creusets, de moules, outils, fabricats, lingots ou demi-produits (barres, fils, plaques, tôles ...).

La technicité mise en oeuvre pour réaliser les fibules assure que la transmission des savoirs devait se faire par des apprentissages très longs, à évaluer en années, voire en dizaines d'années. D'autre part les deux types d'alliages (bronze à 15% d'étain et laiton à 20% de zinc) ont des couleurs proches de celle de l'or. Ces deux remarques ne militent pas dans le sens d'un grand nombre d'ateliers et donc d'une dispersion du savoir, mais plutôt dans le sens de quelques ateliers qui devaient

très jalousement· conserver leurs secrets de fabrication, et ne les transmettre qu'à quelques apprentis. Le temps de formation étant long, il n'est possible de former que quelques individus. Les ateliers pouvaient ainsi maintenir la valeur marchande de leurs productions, tout en cherchant à faire évoluer celles-ci pour augmenter la productivité, soit pour augmenter les profits, soit pour faire face à une demande croissante, qui correspondrait à un enrichissement d'autres catégories sociales.

Ce travail n'est pas achevé, car il est conçu comme une série d'allers et retours entre l'archéologie et l'archéométrie. D'autre part, la connaissance de la qualité, de l'organisation, de la productivité d'un atelier de transformation n'est pas une fin en soi, mais seulement l'approche d'un maillon de la chaîne: matières premières - objets - diffusion *.

M. Pernot, J. Dubos et J.-P. Guillaumet

* Ce travail a été réalisé en partie au L.R.M.F., avec le soutien financier du C.N.R.S. dans le cadre d'une A.T.P., et en partie à la Fondation de Coubertin. Nous remercions l'ensemble des personnels du L.R.M.F. qui ont contribué à rendre cette réalisation possible, en particulier France DRILHON pour la radiographie, Loïc HURTEL pour les analyses et les nombreux échanges de vues, et le service photographique. Que Françoise BECK et Alain DUVAL, Conservateurs au Musée des Antiquités Nationales (Saint-Germain-en-Laye) ainsi que Mathieu PINETTE, conservateur du Musée Rolin (Autun) soient assurés de notre gratitude pour l'autorisation d'étudier les objets. L'expérimentation a été mise en oeuvre avec le concours de Corinne PEUCHET et Anne-Thérèse WATTEZ, élèves de l'Ecole du Louvre. Nous les en remercions.

BIBLIOGRAPHIE

- F. BECK, G. MONTHEL et El. RABEISEN (1982-83),
Note sur un moule à fibules de Bibracte,
Antiquités Nationales, n°14-15, p.78-85.
- H. H. COGHLAN (1980),
Examination of some continental Bronze Age decorative objects,
Journal of the Historical Metallurgy Society, 14/2, p.80-93.
- M. FEUGERE (1985),
Les fibules en Gaule méridionale, de la Conquête à la fin du Ve siècle
près J. -C.
12e Supplément à la R.A.N., Ed. C.N.R.S., Paris.
- A. FURGER-GUNTI (1977),
Zur Herstellurgstechnik der Nauheimerfibel,
Festschrift Elisabeth Schmid, p.73-84.
- J.-P. GUILLAUMET (1984),
Les fibules de Bibracte, technique et typ.9J.9 gj
Université de Dijon, Centre de Recherches sur les Techniques Gréco-
Romaines.
- K. GUNTHER (1983),
Eine Siedling der alteren Romischen Kaiserzeit mit Schmiedewerkstätten
bei Warburg-Daseburg,
Germania, 61, p.1-31.
- L. LERAT (1979),
Les fibules d'Alesia
Bibliothèque PRO ALESIA VII, Université de Dijon.
- M. PERNOT et L. HURTEL (1987),
Caractérisation métallographique de tôles d'alliages base cuivre des
époques Celtique et Gallo-Romaine,
Bull. de la S. P. F., 84/8, p.238-247.
- M. PICON et G. CHAPOTAT (1967),
Recherche sur l'origine des Bronzes trouvés au Mont-Beuvray,
Mémoires de la Société Eduenne, 51/2, p.87-95.
- M. PICON, J. CONDAMIN et St. BOUCHER (1968),
Recherches techniques sur des bronzes de Gaule romaine III,
Gallia, XXVI/2, p.245-278.



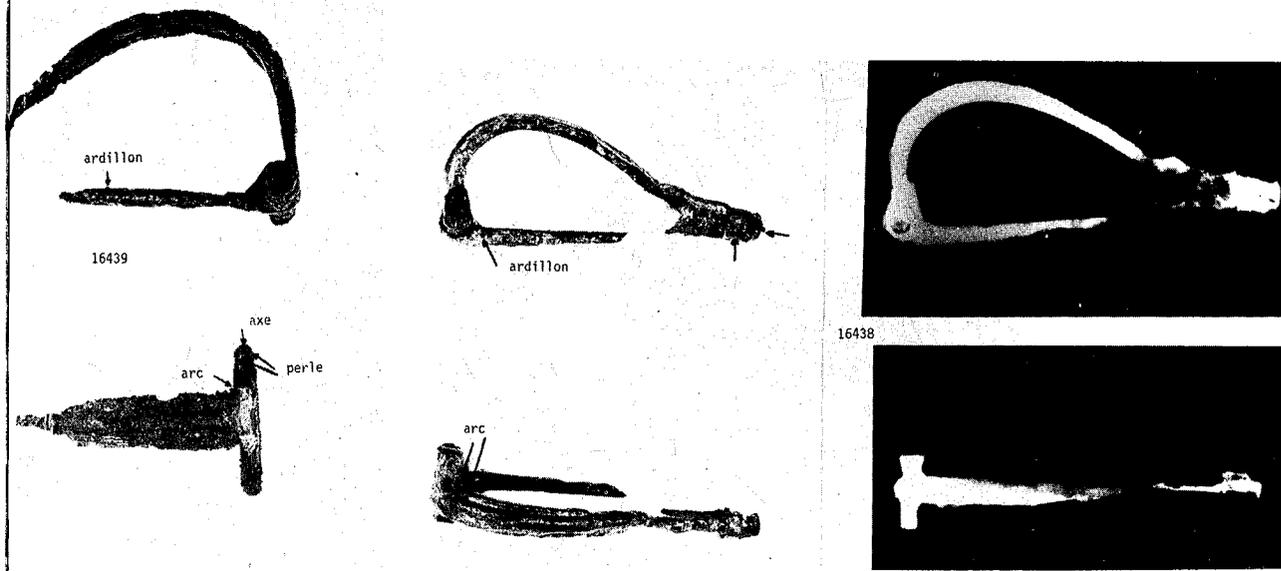
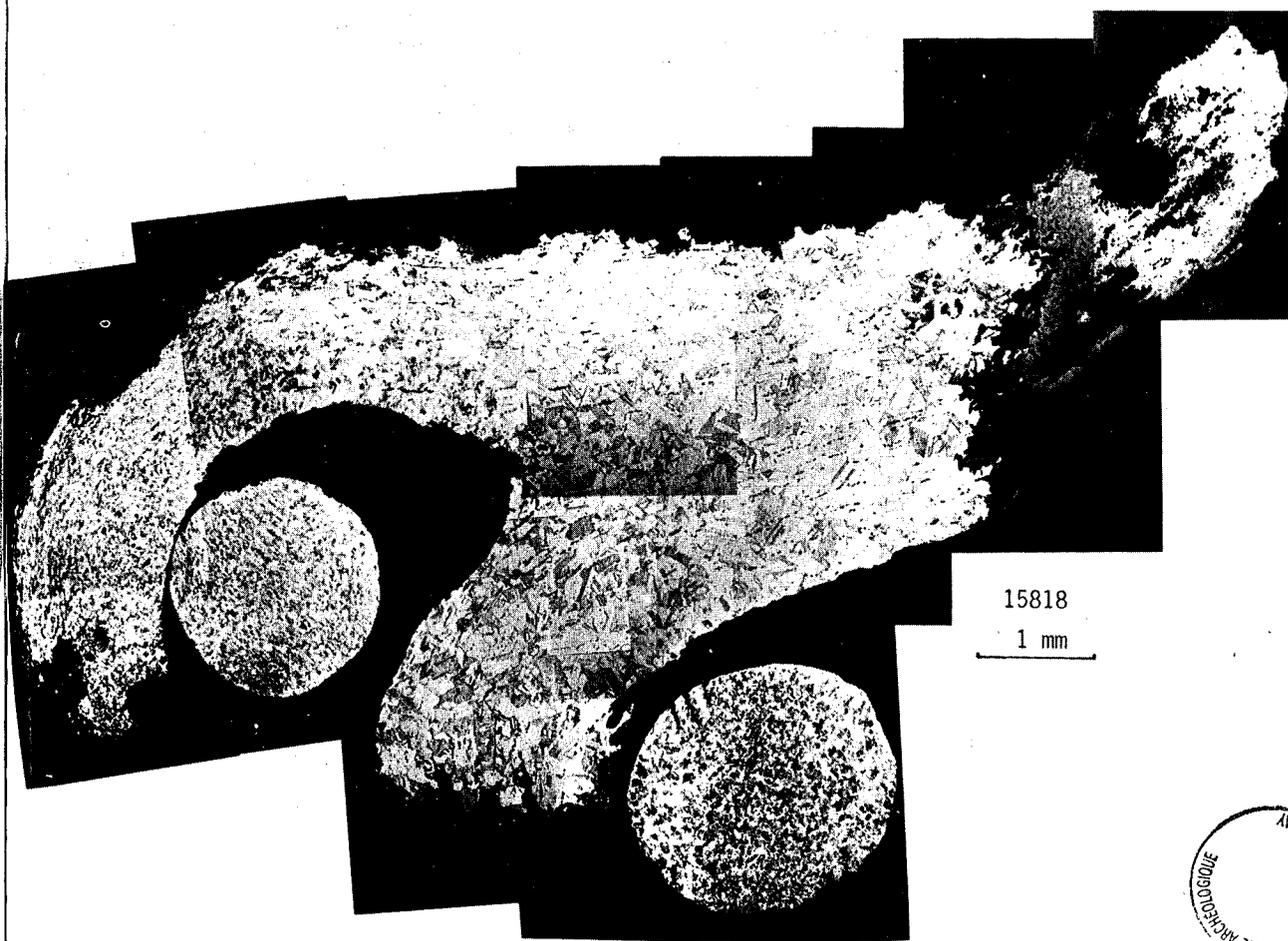
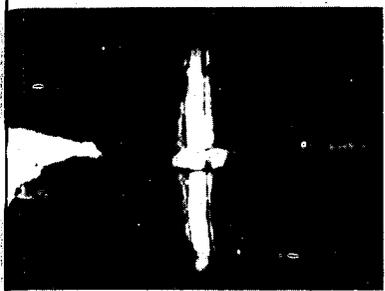


Fig.22 - Fibules de type 4 : photos et radiographies



23 - Micrographie optique de l'ensemble de la coupe longitudinale : à gauche le départ du ressort, au milieu le fixe-corde, en bas la corde, à droite le départ de l'arc ; un axe est présent dans les spires du ressort.



Fig.24 - Microstructure typique de l'arc ; structure recristallisée



Fig.25 - Microstructure de la section transversale de la corde ; structure faiblement écrouie



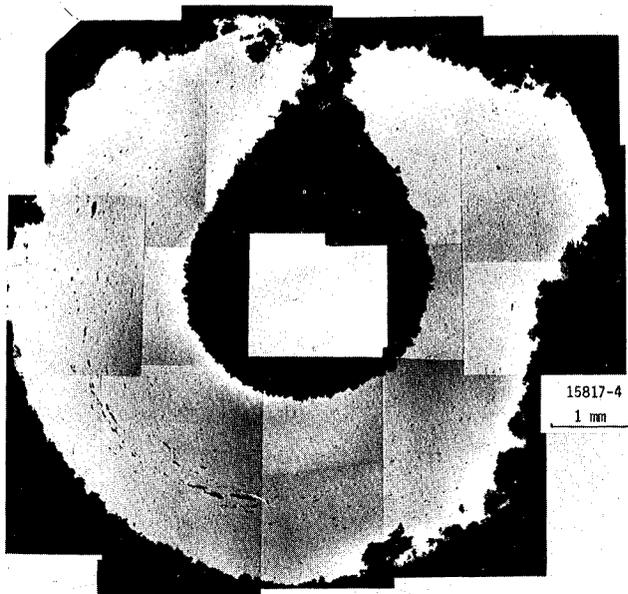


Fig.26 - Section du ressort perpendiculaire à l'axe des spires (polissage sans attaque)



Fig.27 - Détail, après attaque chimique, de la fig.26



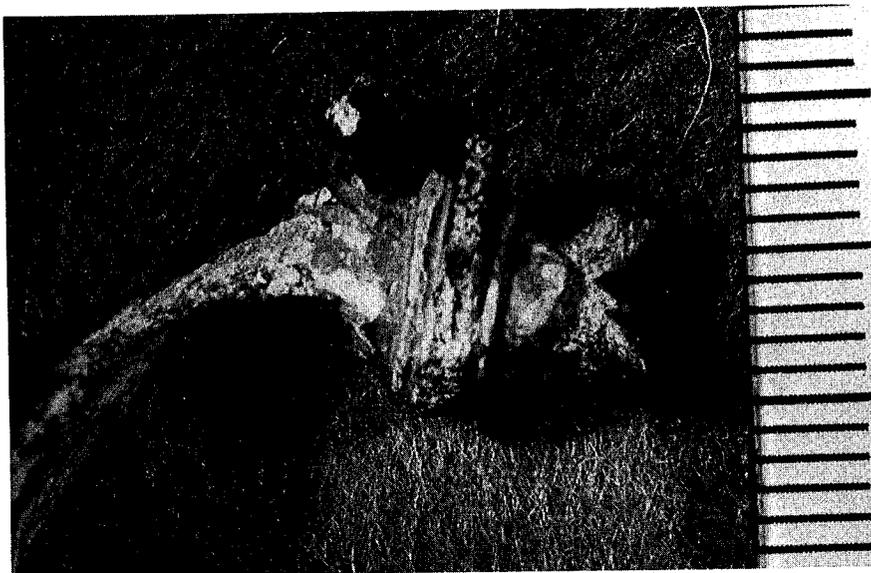


Fig.28 - Fibule du type 2 avec décor à ailettes (inv. 15819)

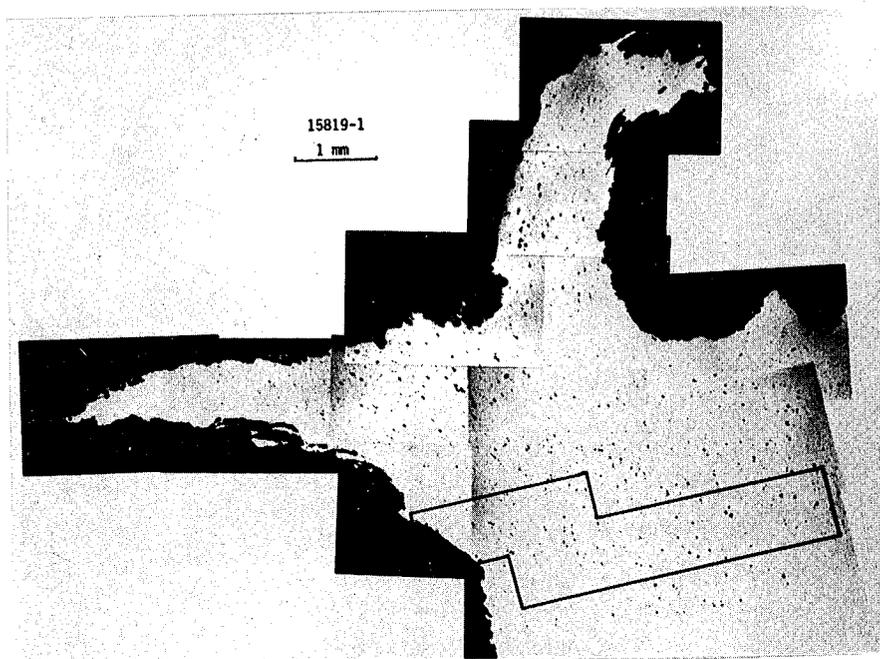
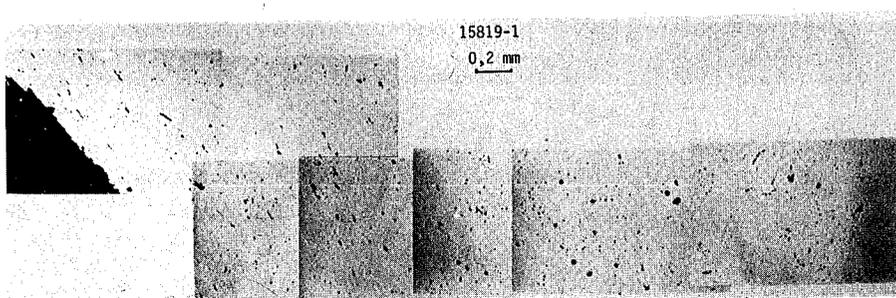


Fig.29 - a : section longitudinale au niveau du décor à ailettes
b : détail de la transition (polissage sans attaque)



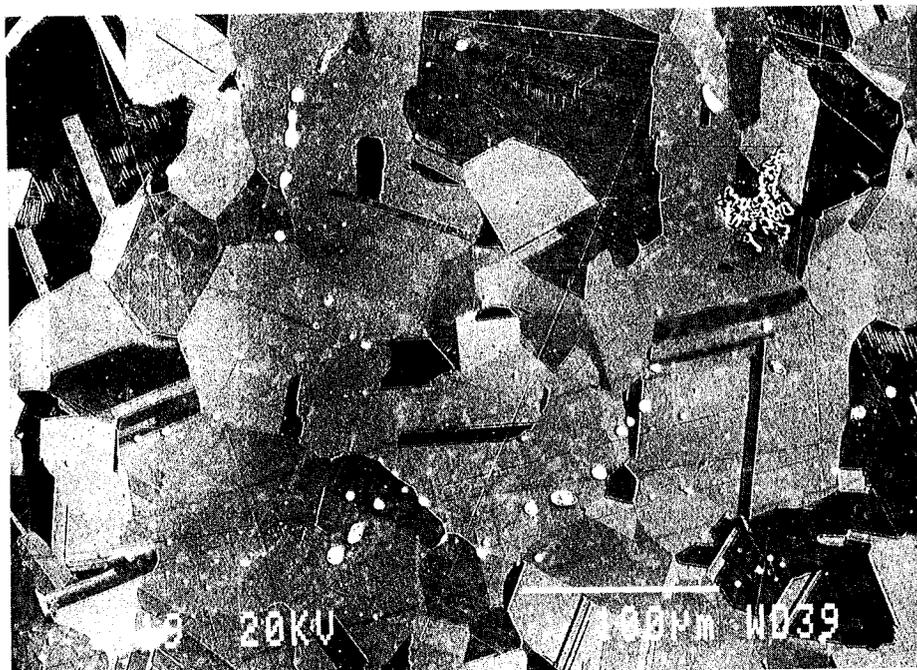


Fig.30 - Détail de la zone non déformée (électrons secondaires)

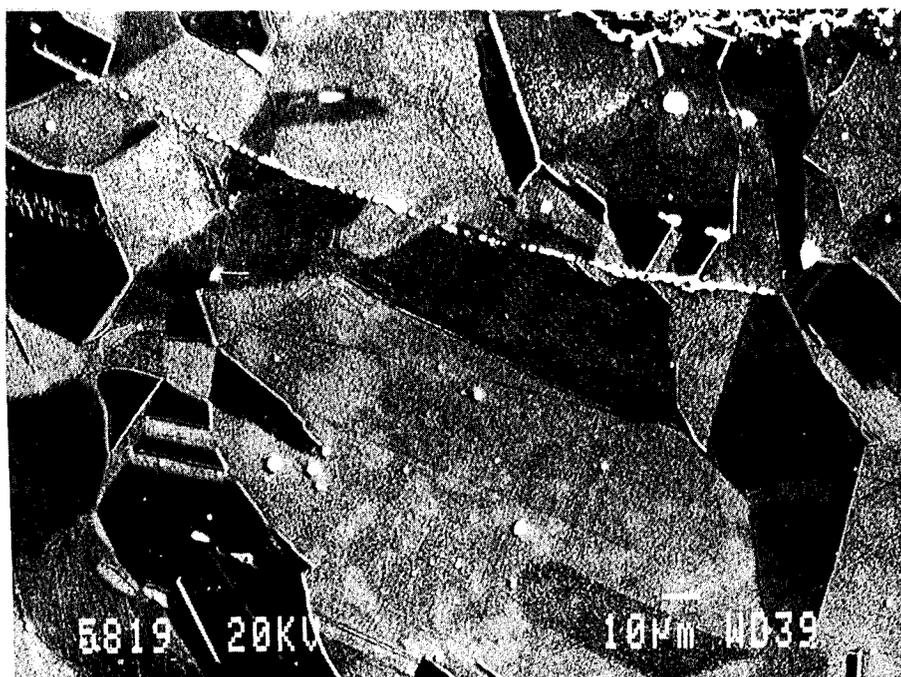
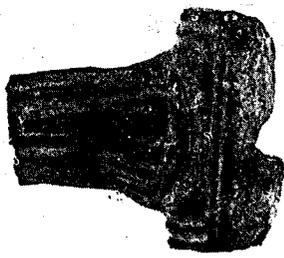


Fig.31 - Détail d'une zone déformée puis recristallisée





16437

Fig.32 - Fragment d'une fibule du type 3 : photo et radiographie



Fig.33 - Grappe de fabricats de corps de type 3 (inv. 15813)

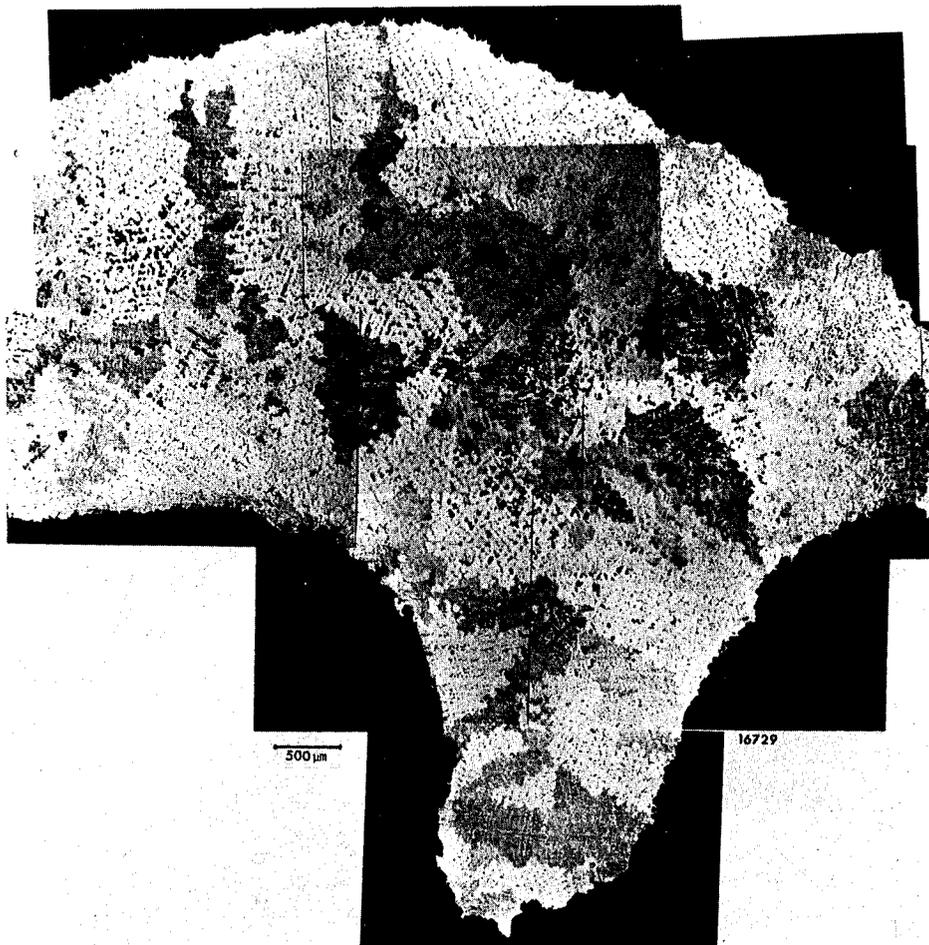


Fig.34 - Section longitudinale d'un fabricat de type 3 : structure dendritique





Fig.35 - Section longitudinale de l'objet de la fig.32 (électrons rétro-diffusés)

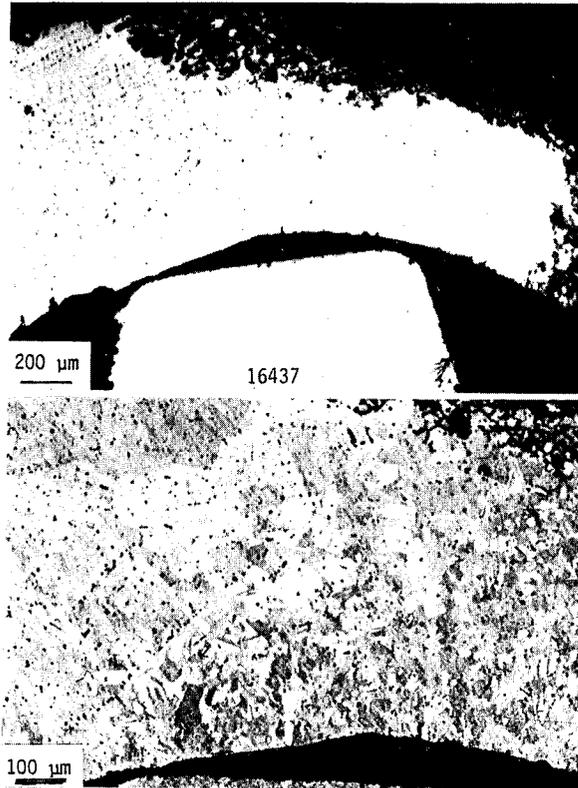


Fig. 36 - Micrographies de la transition zone dendritique/zone recristallisée ; en haut : polissage sans attaque - en bas : après attaque chimique



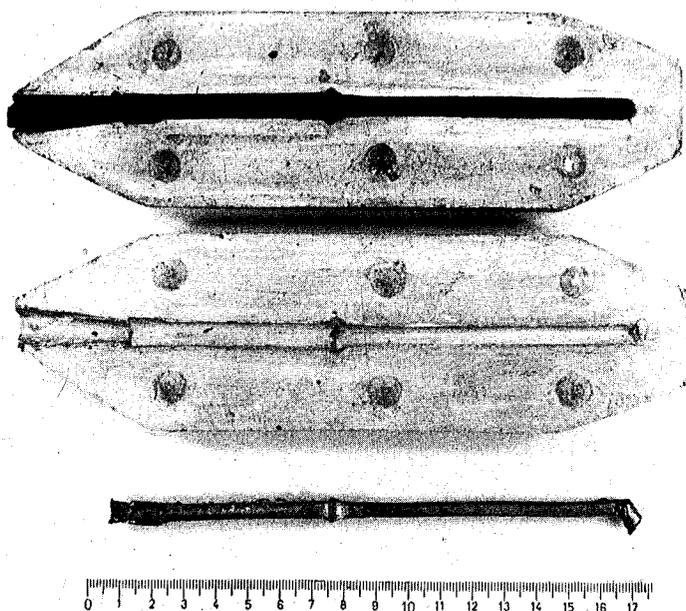


Fig.37 - Moule bivalve avec épreuve en cire en place ; en bas ébauche en laiton (expérimentation J.Dubos)

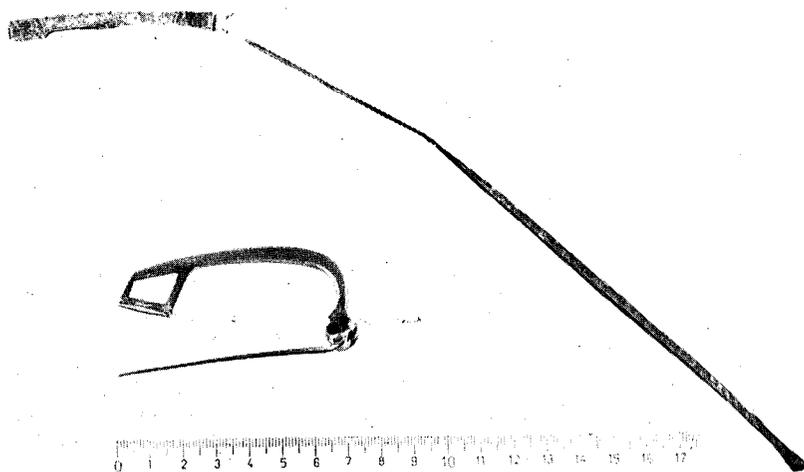


Fig.38 - Raté de fabrication et objet fini (expérimentation J.Dubos)



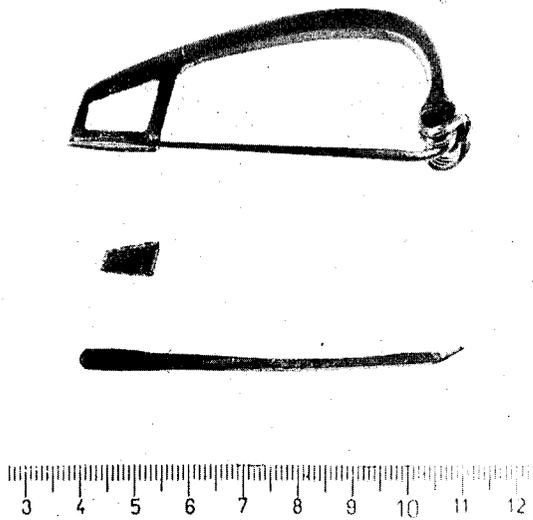


Fig.39 - Objet fini et chutes de fabrication (expérimentation J.Dubos)



Fig.40 - Objet archéologique : fabricant de type 2 (fouille du Mont-Beuvray, avec l'autorisation de A.Duval, responsable du chantier)

