

L'économie du fer protohistorique :
de la production
à la consommation du métal

L'économie du fer protohistorique :
de la production à la consommation du métal

XXVIII^e colloque de l'AFEAF
Toulouse, 20-23 mai 2004

sous la direction de
Pierre-Yves Milcent

Aquitania
Supplément 14/2
— Bordeaux —

Sommaire

AUTEURS7

AVANT-PROPOS13

LA MÉTALLURGIE D'EXTRACTION : DU MINERAI À LA BARRE DE FER

CL. DOMERGUE,

La sidérurgie extractive en Transalpine et dans la Gaule indépendante à la fin de l'âge du Fer.

Essai de mise en parallèle17

S. CABBOI, Chr. DUNIKOWSKI, M. LEROY, P. MERLUZZO,

Les systèmes de production sidérurgique chez les Celtes du Nord de la France35

J.-B. VIVET,

La production du fer protohistorique en haute Bretagne d'après les résultats des prospections,

des fouilles d'ateliers et des analyses archéométriques63

L. FOURNIER, P.-Y. MILCENT,

Actualité des recherches sur l'économie du fer protohistorique dans la Région Centre85

Cl. POLO CUTANDO, C. VILLAGORDO ROS,

L'exploitation du fer en Sierra Menera (Teruel-Guadalajara, Espagne) aux III^e - I^{er} s. a.C.107

POSTERS

D. HONORÉ, G. LÉON, N. ROUDIÉ,

Deux sites de réduction et de forge de l'âge du Fer en Normandie117

J.-M. FABRE, D. RIGAL,

Les vestiges d'ateliers sidérurgiques de l'âge du Fer sur les sites de l'autoroute A20 : Courcan (Cours, Lot)125

M. BERRANGER,
Les demi-produits de fer au I^{er} millénaire a.C. en Europe continentale : potentialités d'études133

M.-P. COUSTURES, G. RENOUX, C. SCAON, D. BÉZIAT, Chr. RICO, Fr. DABOSI,
L. LONG, Cl. DOMERGUE, Fr. TOLLON,
Le point sur une méthode de détermination de provenance des objets en fer de la sidérurgie ancienne145

P. HALKON,
"Valley of the first Iron Masters". Recent research on Iron Age iron production and its significance
in the Foulness Valley, East Yorkshire, England..... 151

LA MÉTALLURGIE D'ÉLABORATION : DE LA BARRE DE FER À L'OBJET FINI

C. ROVIRA HORTALÀ,
Producción e intercambio de los primeros objetos de hierro del nordeste de la Península Ibérica (s. VII - VI a.C.)..... 167

Ph. GRUAT, Ph. ABRAHAM, C. MAHÉ-LE CARLIER, A. PLOQUIN,
avec la collab. de C. GRIMA, G. MARCHAND, G. MARTY,
L'artisanat du fer en milieu caussenard : l'exemple de l'enceinte du Puech de Mus
à Sainte-Eulalie-de-Cernon (Aveyron), aux V^e et IV^e s. a.C. 177

Y. MENEZ, J.-B. VIVET, K. CHANSON, M. DUPRÉ,
La forge de Paule (Côtes-d'Armor)213

S. BAUVAIS, St. GAUDEFRY, Fr. GRANSAR, Fr. MALRAIN, Ph. FLUZIN,
Premières réflexions sur l'organisation des activités de forge en contexte rural à La Tène finale en Picardie239

POSTERS

J.-L. FLOUEST,
Approches quantitatives de la production de fer sur le site hallstattien de Bragny-sur-Saône (Saône-et-Loire).....265

M. MAUVILLY, V. SERNEELS, M. RUFFIEUX, E. GARCIA CRISTOBAL,
Le travail du fer dans une forge du milieu du V^e s. a.C. à Sévaz/Tudings (canton de Fribourg, Suisse)271

Chr. DUNIKOWSKI, J.-M. SÉGUIER, S. CABBOI,
La production du fer protohistorique au sud-est du Bassin Parisien279

L. DHENNEQUIN,
Les ateliers de travail du fer au Mont Beuvray : présentation des fouilles récentes effectuées
dans la zone artisanale du Champlain sur l'*oppidum* de Bibracte291

A. SCHÄFFER,	
Eisenverarbeitung im <i>Oppidum</i> von Manching (Bayern). Untersuchungen zu Schlacken und Herdfragmenten der Grabung "Altenfeld" 1996-1999	299
K. KASTOWSKY, M. MEHOFER, P. C. RAMSL,	
Analyses métallographiques d'objets de fer laténiens autour du massif de la Leitha	305
LA CONSOMMATION DU FER : ASPECTS MÉTHODOLOGIQUES ; IMPLICATIONS ÉCONOMIQUES ET SOCIALES	
J.-P. GUILLAUMET,	
Introduction. La paléomanufacture métallique, une nouvelle méthode d'étude	321
É. DUBREUCQ,	
Le petit mobilier en fer des habitats du Hallstatt D-La Tène A : un mobilier sous-exploité	329
O. NILESSE,	
Note à propos des armes de trois établissements ruraux de l'Ouest de la France	355
G. BATAILLE,	
Un nouveau protocole d'analyse des grands ensembles de mobiliers métalliques sur la base du NMI. L'exemple du sanctuaire laténien de La Villeneuve-au-Châtelot (Aube)	365
L. ORENGO,	
Hallstatt-La Tène : un "sous-âge du Fer" ? Et qu'en est-il de l'époque romaine ?	381
POSTERS	
A. FILIPPINI,	
Les couteaux en fer du Sud-Ouest de la Gaule (VIII ^e -V ^e s. a.C.)	395
M. GENERA I MONELLS,	
Le village protohistorique du Puig Roig del Roget (el Priorat) : spécialisation artisanale et signification socio-économique	407
P. FOSTER, P. SANKOT,	
La tombe n° 2254 de Tišice (Bohême centrale) et son contexte du V ^e s. a.C.	417
Remarque conclusive. L'économie du fer protohistorique (VIII ^e -I ^{er} s. a.C.). De la production à la consommation du métal	
V. SERNEELS	425

Posters

Analyses métallographiques d'objets de fer laténiens autour du massif de la Leitha

*Karolin Kastowsky, Mathias Mehofer, Peter C. Ramschl **

RÉSUMÉ

Cet article présente de nouveaux résultats d'un programme d'analyses paléométallurgiques d'objets d'époque laténienne de la région du Leithagebirge. Il a été possible d'analyser par exemple un couteau de Mannersdorf "Obere Kirchengasse", l'épée de la tombe 127 du cimetière de Mannersdorf "Reinthal Süd" et une pointe de lance de Sommerein "Wolfsbründl".

(traduction W. Antl-Weiser)

ABSTRACT

This article deals with new results of archaeometallurgical analyses of La Tène artefacts from the area of the Leithagebirge. It was possible to analyse e.g. a knife from Mannersdorf/Obere Kirchengasse, a sword from tomb 127 in the cemetery at Mannersdorf/Reinthal Süd and a spearhead from Sommerein/Wolfsbründl.

MOTS-CLÉS

analyses paléométallurgiques, objets en fer, époque laténienne, Leithagebirge

KEYWORDS

archaeometallurgical Analyses, Iron artefacts, La Tène period, Leithagebirge

* Nous remercions Kerstin Kowarik pour la traduction.

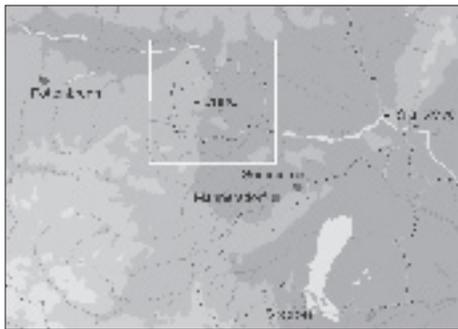


Fig. 1. Localisation des sites de Pottenbrunn, Sommerein et Mannersdorf (Basse Autriche).

1. INTRODUCTION

Dans le cadre des projets “The celtic cemetery of Mannersdorf”¹ et “Migrationsphänomene in der Frühlatènezeit”², des analyses métallographiques furent effectuées sur une série d’objets en fer provenant de sites laténiens autour du massif de Leitha (fig. 1). Trois de ces objets ont déjà été choisis lors d’une précédente présentation. Il s’agit d’un couteau provenant de Mannersdorf/Obere Kirchengasse Fnr. 246, d’une pointe de lance provenant de Sommerein/Wolfsbründl Fnr. 128 et d’une épée provenant de Mannersdorf/Flur Reinthal Süd Fnr. 127/4.

Il est important pour l’interprétation métallographique qu’avant l’évaluation archéologique, l’objet lui-même soit caractérisé et classé³ selon des paramètres techniques.

Ceux-ci sont :

- la construction interne de l’objet, c’est-à-dire la reconnaissance des différentes structures du métal, des soudures et des particules non métalliques dans l’objet examiné ;

- les processus technologiques mise en œuvre lors de la fabrication des pièces forgées (p. ex. sur la disposition des soudures) ;

- les techniques de forge qui ont servi à l’amélioration de l’objet (réduction) visant l’augmentation de la dureté, refroidissement et chauffe au rouge visant l’élimination de la friabilité ;

- la composition chimique du métal ;

- la dureté des différentes structures des métaux⁴.

De telles indications permettent non seulement de connaître avec probabilité l’histoire de la fabrication des pièces, mais aussi de reconnaître les modifications après l’achèvement du processus de fabrication, comme par exemple, les traces d’usure, de meulage, de chauffage secondaire, de décarbonisation des portions ferreuses ou des réparations.

2. MÉTHODE

Dans une première étape, les pièces sont examinées aux rayons X afin d’obtenir une première image de l’état de conservation et d’identifier des caractéristiques de fabrication visibles sur une radiographie. Puis sont déterminées les zones de prélèvement d’échantillons.

Enfin les échantillons ont été prélevés d’une manière à assurer la conservation de la pièce avec un minimum de destruction ou un apport maximal d’informations.

Le développement de la structure primaire se fait avec une solution d’attaque “Oberhoffer”. Celle-ci montre les différentes couches de fer et d’acier qui constituent l’objet, et permet de repérer le taux d’alliage, les zones riches et pauvres en phosphore⁵ des différentes couches de fer⁶.

4- Tous les objets examinés ont été analysés selon leur composition chimique. Puisque les études ne sont pas achevées actuellement, les résultats ne pourront être présentés que dans la publication finale. Il semble malgré tout judicieux aux auteurs d’évoquer certaines questions même si on ne peut pas encore y répondre complètement. L’objectif est de fournir au lecteur une première approche de l’étude technique. De même, il n’apparaît pas dans l’état actuel opportun d’effectuer des comparaisons avec d’autres analyses métallographiques inachevées.

5- Pleiner 1970.

6- Sur les questions de la phosphorisation et des images des structures en résultant, voir les différents arguments de Pleiner

1- Projet du FWF P 15977-G02 (sous la direction de Dr. Anton Kern, NHM Wien, exécution : Dr. Peter C. Ramsil).

2- Projet APART 10/2001 de l’Académie autrichienne des Sciences.

3- Pleiner 1970, travaux relatifs aux techniques de forge en Bavière.

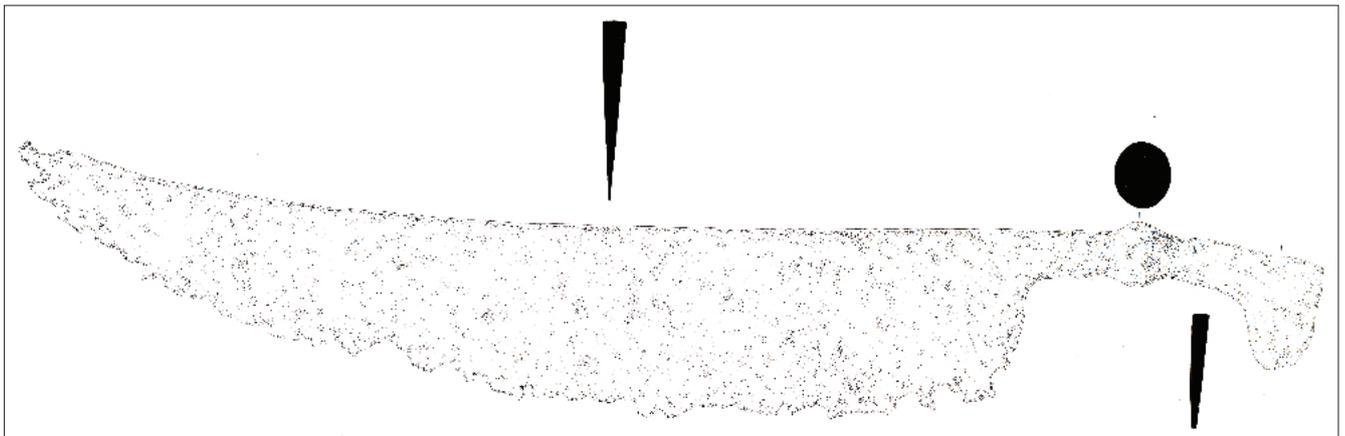


Fig. 2. Mannersdorf/Obere Kirchengasse : couteau ("Hiebmesser").

La structure est mise en évidence par une attaque au Nital (acide nitrique à 3 % dans l'éthanol)⁷. À chaque étape, les coupes métallographiques sont lavées à l'éthanol. La dureté a été mesurée sur un microduromètre⁸. La pièce est pénétrée par un objet laissant une impression carrée. Pour déterminer la dureté, il faut en mesurer la diagonale⁹.

2.1. Mannersdorf / Obere Kirchengasse, couteau Nr. 246

2.1.1. Prise d'échantillon (fig. 2)

Des échantillons pour les coupes métallographiques ont été prélevés sur la lame et le dos du couteau et une coupe transversale a été effectuée pour chacun.

& Piaskowski 1967, 77-188. Piaskowski 1970, 111- 126. Pleiner 1971, 107- 125. Piaskowski 1971, 127- 159

7- Il n'existe pas de protocole déterminant la durée de la soumission à une attaque à l'acide étant donné que chaque échantillon montre une réaction bien individuelle en relation avec son état de conservation et d'autres paramètres.

8- Schumann 1990, 175-187 ; Beit & Küttner 1990, ch. E23. Selon la mesure de dureté d'après Vickers, la dureté est calculée d'après le quotient d'une force d'essai et de la surface de la pression pyramidale qui en résulte.

9- Le développement des normes DIN s'est fait en se basant sur des aciers modernes et non sur des objets ferriques protohistoriques. Il apparaît tout de même avantageux de classer les scories et la taille des grains dans un système reconnu et standardisé afin de garantir une lisibilité optimale.

— Échantillon de la lame

Scories (d'après DIN 50602)

L'échantillon présente peu de scories transversales et quelques scories longitudinales plus grandes (correspondant approximativement aux séries des tableaux - tableaux 6.8, 8.7 et 7.4 d'après DIN 50602¹⁰).

Coupe

La grosseur des grains lors des attaques au Nital correspond aux micrographes (GB) n° VII - VIII conformément à DIN 50601. La coupe montre une structure uniforme de perlites et ferrites et principalement de perlites en limite de grain. Le long de l'axe central fictif vertical, une soudure carbonée montre par endroits, au travers de la coupe transversale, une formation de grains de grande taille (ferrite).

Les valeurs de dureté¹⁰ se trouvent aux alentours de 144 HV 0,5/15 à 256 HV 0,5/15 dans la zone de la coupe (fig. 5)

La grosseur de grain lors des attaques au Nital correspond aux micrographes (GB) No VII - VIII conformément à DIN 50601.

10- Pour des raisons de clarté, toutes les mesures individuelles mises en œuvre n'ont pas été représentées.

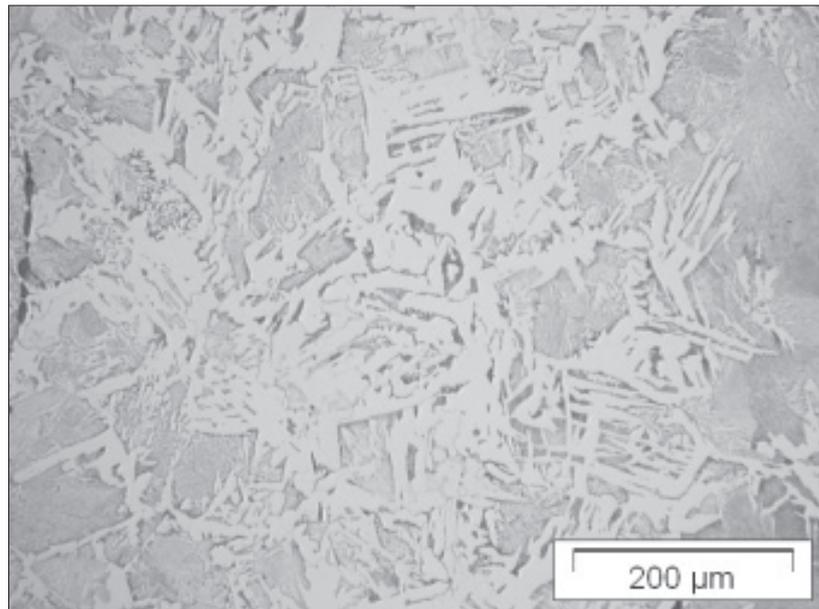


Fig. 3. Structure de Widmannstätt au centre de l'échantillon.

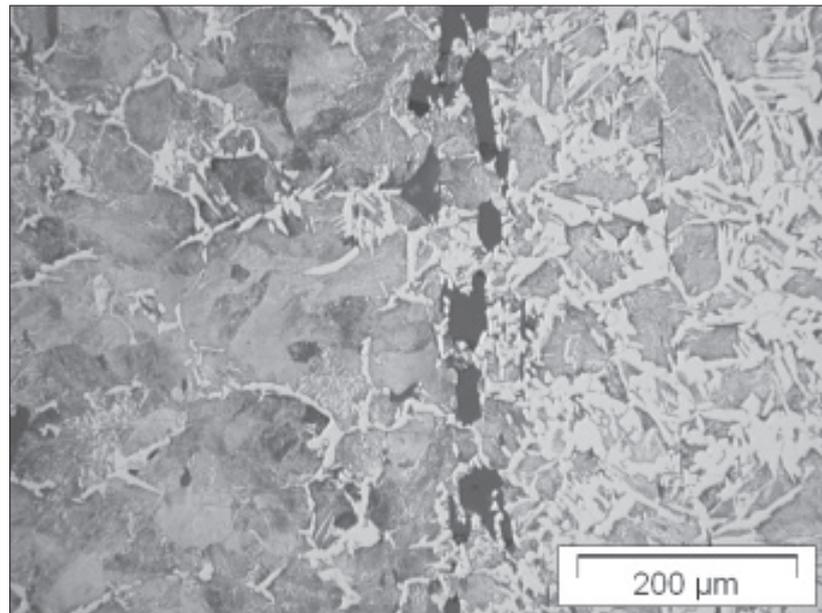


Fig. 4. Fissure de scorie entre deux structures métalliques.

– Échantillon du dos

La partie centrale de l'échantillon est assez pauvre en scories. Le taux de scories est plus élevé seulement dans la périphérie supérieure. Il est constitué en grande partie des scories longitudinales (cela correspond approximativement aux séries des tableaux - tableaux 7.5-7.8 d'après DIN 50 602). Sur le côté gauche se trouvent quelques scories plus granuleuses et de plus grande taille (ceci correspond approximativement aux séries des tableaux - tableaux 8.7 et 8.8 d'après DIN 50 602).

2.1.2. Taille des grains

La taille des grains correspond (après attaque au Nital) aux tableaux de structure (GB) Nr. II - IV d'après DIN 50601.

Nital

– Le dos

L'échantillon montre une structure perlitique avec de la ferrite aux bords des grains. Dans le secteur périphérique supérieur se trouve de la perlite.

Le centre de l'échantillon est caractérisé par une structure de Widmannstätt (fig. 3).

Les valeurs de dureté varient entre 147 HV 0,5/15 - 268 HV 0,5/15 (fig. 5).

2.2. Sommerein/Wolfsbründl – pointe de lance Nr. 128

2.2.1. Prise d'échantillon (fig. 6)

L'échantillon a été prélevé sur le tiers avant de la lame et des coupes métallographiques ont été réalisées.

Scories (d'après DIN 50601)

Le taux de scories est moyen. Trois bandes de scories sont identifiables dans la zone de la coupe. La partie gauche est caractérisée par des scories longitudinales (cela correspond aux séries des tableaux - tableaux 6.7 et 7.6 d'après DIN 50 602), au centre, on observe aussi bien des inclusions de scories granulaires que rectangulaires (cela correspond aux séries des tableaux - tableaux 7.3-7.5 et 8.2- 8.3 d'après DIN 50 602). Dans la zone droite se trouvent quelques scories plus grosses (cela

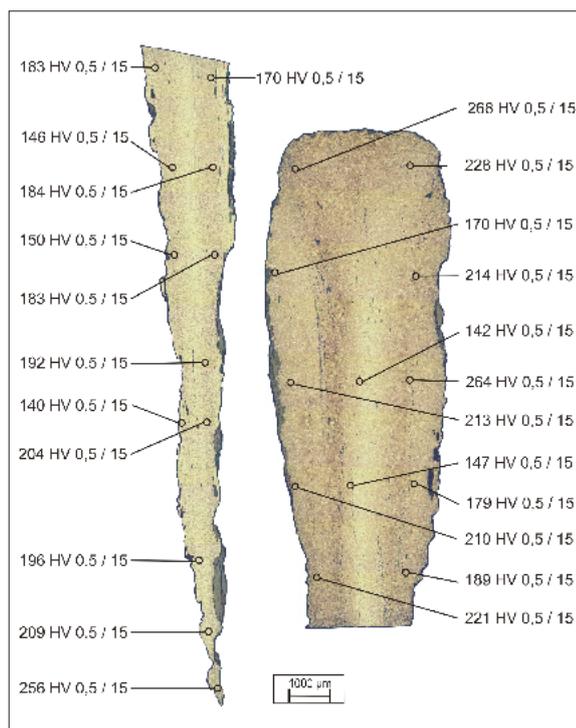


Fig. 5. Mannersdorf – couteau Nr. 246 ; Vue d'ensemble montrant une distribution de scories et de carbone (Nital), avec les mesures de dureté enregistrées.

correspond approximativement aux séries des tableaux - tableaux 6.8 et 8.7 d'après DIN 50 602).

Les scories de la zone centrale sont oblongues (cela correspond approximativement aux séries du tableau 6.8 d'après DIN 50 602). Dans la zone de la fracture médiane, on observe des scories plus grosses et granuleuses (correspond approximativement aux séries de tableaux-tableau 8.7-8.8 et 6.8 d'après DIN 50 602).

2.2.2. La taille de grain

La taille de grain correspond aux tableaux de structures (GB) Nr. III- VIII d'après DIN 50601.

Nital

Sur la coupe, la structure perlitique décelable se transforme, en partie, en structure martensitique. Au milieu de l'échantillon, la structure perlitique-ferritique se transforme en structure ferritique-

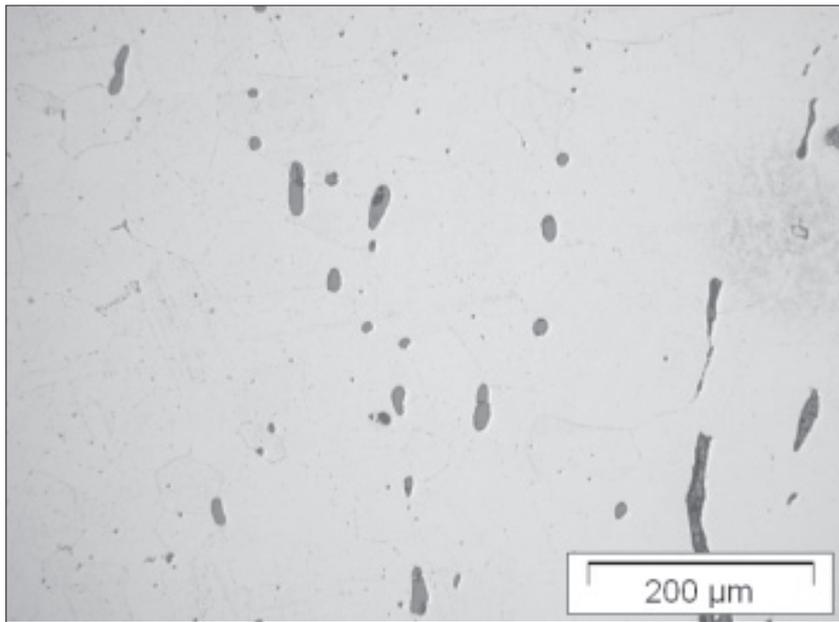


Fig. 7. Ferrite avec des inclusions de scorie assez grandes dans la zone de fracture médiane.

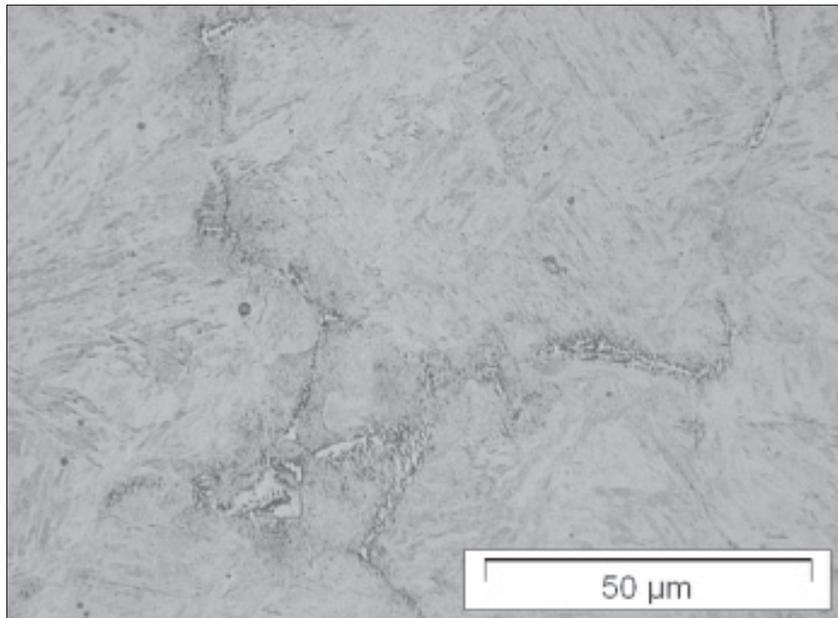


Fig. 8. Structure d'endurcissement incomplète de la lame.

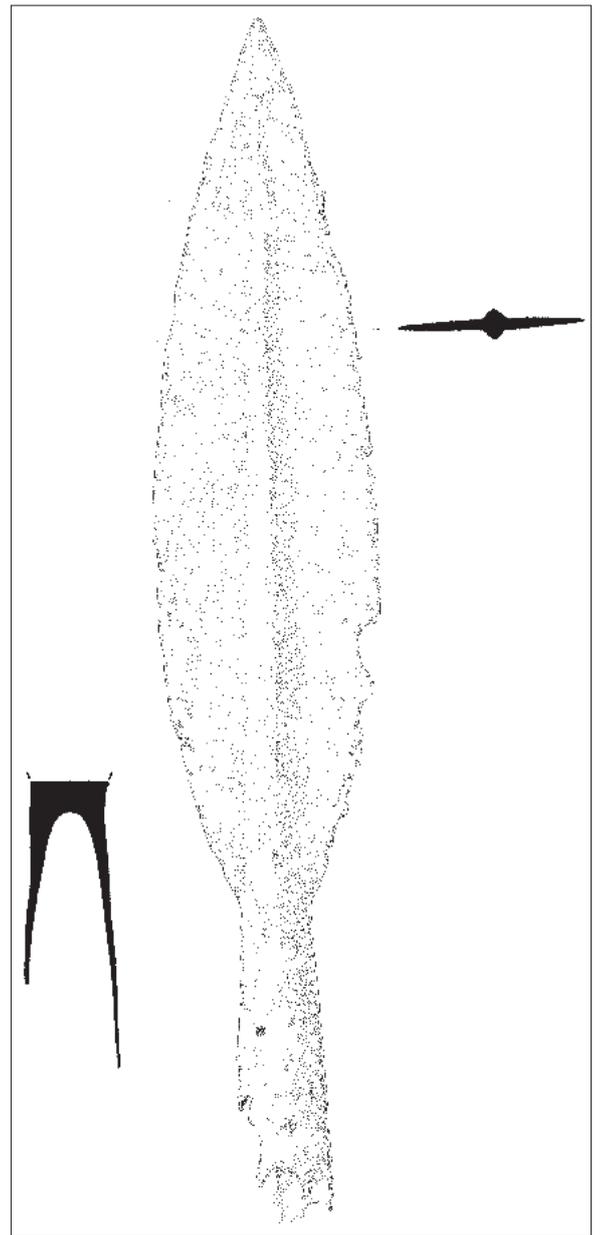


Fig. 6. Sommerein/Wolfsbründl : pointe de lance.

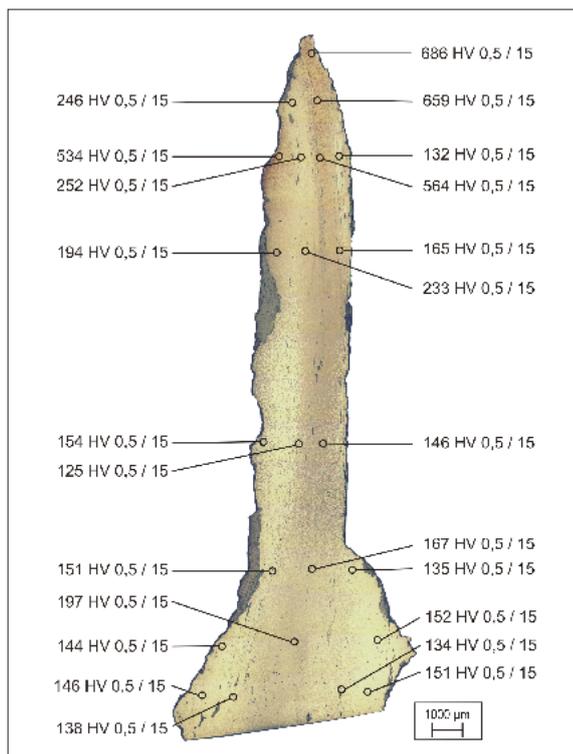


Fig. 9. Mannersdorf - pointe de lance - Fnr. : 128. Vue d'ensemble montrant une distribution de scories et de carbone (Nital), avec les mesures de dureté enregistrées.

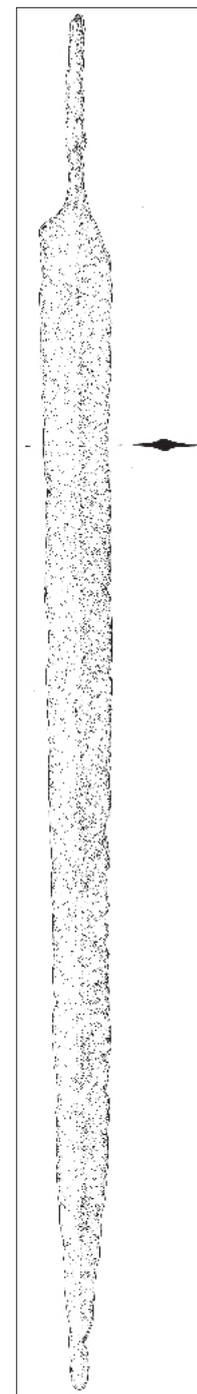
perlitique en périphérie. La structure dans la zone de la lame se compose d'une structure ferritique. Les valeurs de dureté atteignent un maximum de 668 HV 0,5/15 sur la coupe et un minimum vers 134 HV 0,5/15 (fig. 9).

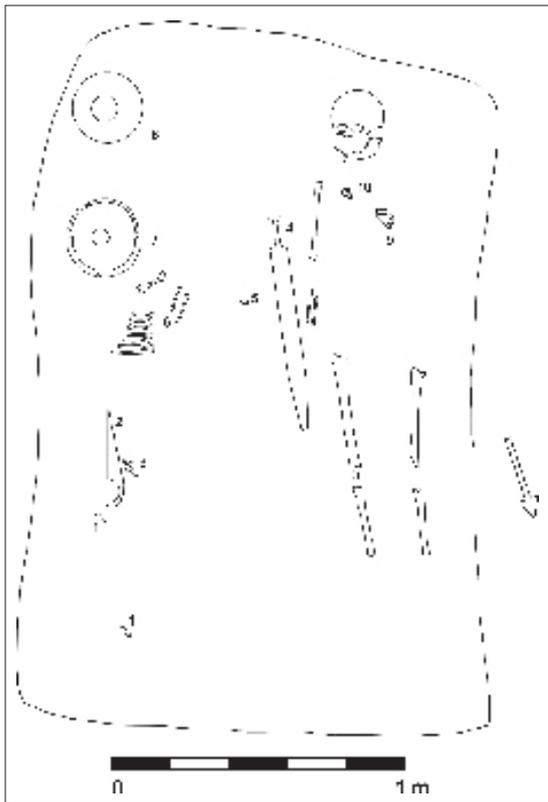
2.3. Mannersdorf/Flur Reinhthal Süd - Épée tombe 127, nr. 4 (fig. 10, 11)

Dans la tombe 127 de la nécropole de Mannersdorf - Flur Reinhthal Süd était inhumé un homme gracile âgé de 51 à 70 ans (fig. 12). Il portait sur lui deux fibules en bronze du type Duchcov, une épée en fer, les "Koppelringe" correspondants, un couteau en fer (à côté des os d'un porc domestique), une pincette et plusieurs pinces en fer au niveau de l'inhumation. En ce qui concerne les céramiques, deux récipients en forme de bouteille et formés sur plaque tournante (tournette) se trouvaient dans la tombe. L'une de ces bouteilles, nr. 8, possède un décor particulier d'empreintes à poinçons sous la forme de crocasses ("Hakenmäandern"), des formes en S et des ocelles ("Kreisaugen") doubles (fig. 13). Des décors à poinçons identiques sont connus sur l'établissement contemporain de Sopron-Krautacker.



Fig. 10, 11. Mannersdorf/Reinthal Süd (tombe 127, n° 4) : épée.

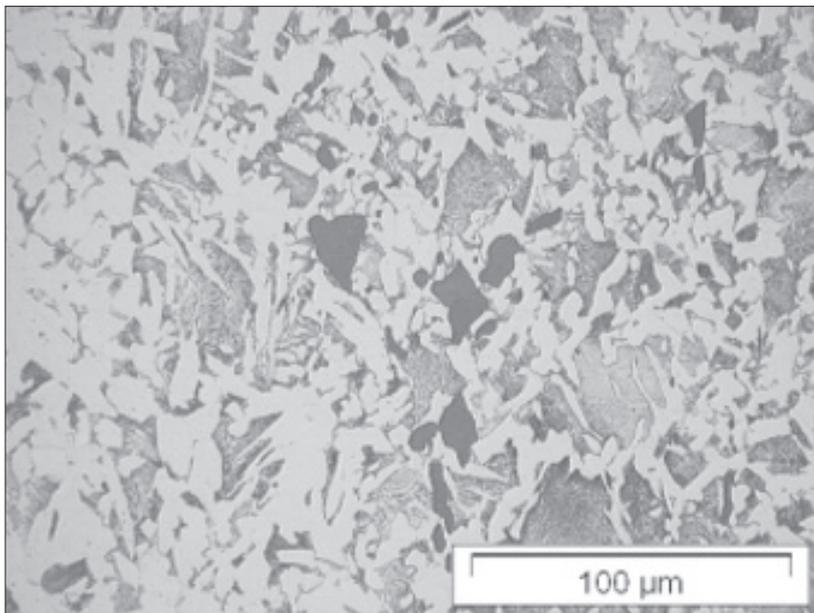




◀ Fig. 12. Mannersdorf/Reinthal Süd : Tombe n° 127.

▲ Fig. 13. Mannersdorf/Reinthal Süd (Tombe n° 127) : céramique.

▼ Fig. 14. Structure de Widmannstatt dans la zone centrale de l'échantillon.



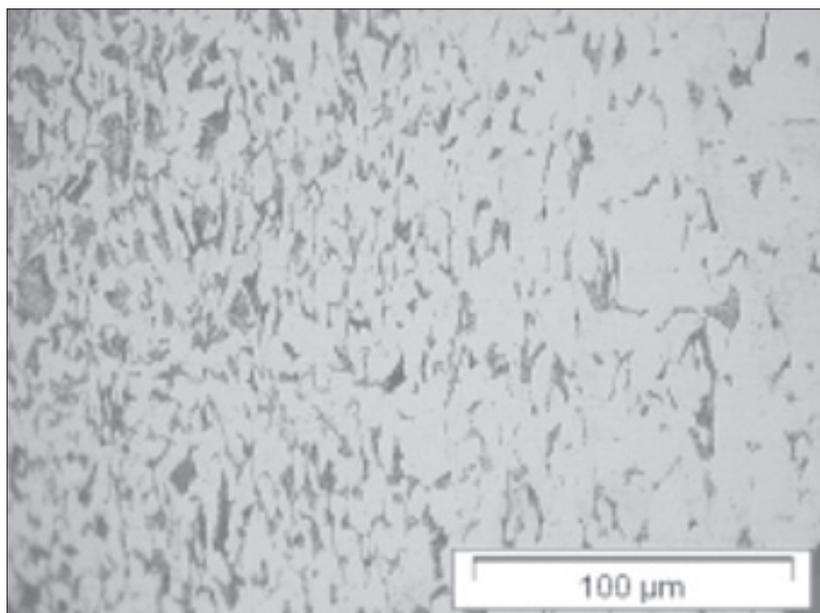


Fig. 15. Structure déformée dans la zone de la lame.

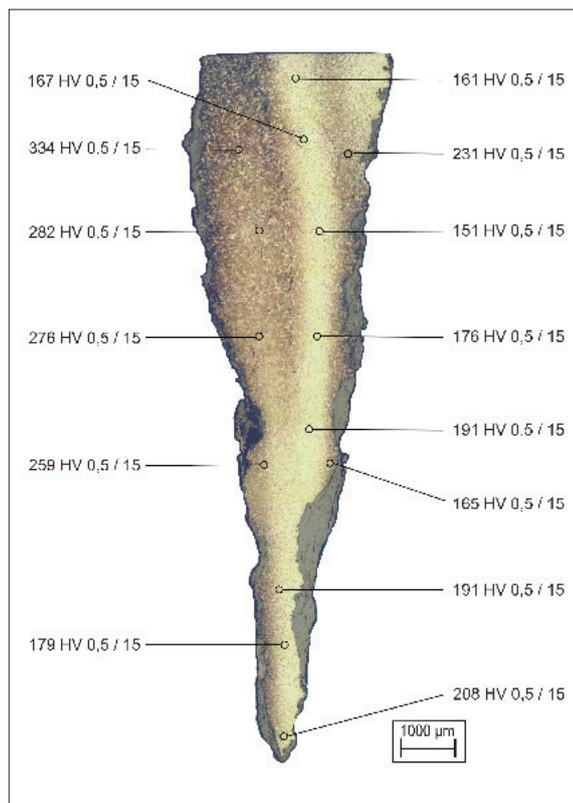


Fig. 16. Mannersdorf - épée Fnr. 127/4. Vue d'ensemble montrant une distribution de scories et de carbone (Nital), avec les mesures de dureté enregistrées.

2.3.1. Prise d'échantillon

En raison de la forte corrosion de l'épée 127/4 de Mannersdorf/Flur Reinthal Süd, un seul échantillon a été prélevé. Il n'a pu être pris au milieu de l'épée. Une coupe transversale a été réalisée.

Scories (d'après DIN 50601)

Le matériel est plutôt pauvre en scories. Il s'en trouve seulement plusieurs assez granuleuses et de plus grande taille au centre (ceci correspond approximativement aux séries des tableaux-tableaux 8.7 et 8.8 d'après DIN 50 602).

2.3.2. La taille de grain

La taille de grain (après attaque au Nital) correspond aux tableaux de structure (GB) Nr. V-VII d'après DIN 50601.

Nital

La lame peut être subdivisée en quatre zones. La structure perlitique se trouve sur le côté gauche jusqu'à la droite de la lame. Au milieu et à droite, la structure ferritique-perlitique peut être reconnue comme une structure de Widmannstatt. Sur le bord droit, une bande étroite de structure perlitique apparaît encore, qui se divise en une autre bande étroite de structure ferritique-perlitique. Les valeurs de dureté varient entre 151 HV 0,5/15 - 334 HV 0,5/15 (fig. 16).

3. INTERPRÉTATION

L'état de conservation du couteau Mannersdorf/Obere Kirchengasse Fnr. 246 est assez bon. Deux échantillons ont pu être pris desquels furent faits dans chaque cas une coupe métallographique.

L'échantillon provenant de la partie dos est constitué d'une structure perlitique sur les bords et montre une structure de Widmannstatt au centre. La lame est constituée de matériel ferritique avec de la perlite en limite de grain.

La soumission à une attaque à l'acide d'après Oberhoffer permet de supposer que le couteau se constitue d'au moins deux types de matériaux à différents taux de carbone et qu'il a probablement été fabriqué par homogénéisation des matériaux de

base. De plus, il est clair que les scories se localisent majoritairement le long des soudures d'homogénéisation. Cela est très clairement visible dans l'échantillon provenant de la lame. Le taux de carbone un peu plus élevé sur les bords de l'échantillon laisse supposer qu'il fut procédé à une augmentation du taux de carbone. Mais que celle-ci ne s'était pas étendue jusqu'à la lame.

Le couteau provenant de la nécropole de Pottenbrunn¹¹, la tombe 562, Nr. 12, présente une bonne possibilité de comparaison. Encore une fois la structure est majoritairement ferritique avec un taux élevé de perlite dans plusieurs zones superficielles de la lame aussi bien que près du dos. Pour la lame, la même construction en bandes par homogénéisation du matériel primaire est à constater.

Les couteaux sont de bonne qualité et semblent avoir été fabriqués de manière semblable.

La pointe de lance de Sommerein/Wolfsbründl Nr. 128 est d'une qualité exceptionnelle. La lame est formée d'une structure plus solide que le reste de l'échantillon. Dans cette zone, le taux de carbone est clairement plus élevé ce qui permet de supposer que l'extrémité de la pointe de lance fut soumise à un procédé de carbonisation.

La pointe de lance entière est faite d'un matériel riche en carbone. Seule la zone de l'arête médiane est pauvre en carbone. Les différents taux de carbone du métal, la distribution des scories et les différentes structures indiquent une homogénéisation du matériel primaire. La construction complète de la pointe de lance n'est pas claire. Pourtant les fractures médianes espacées et les scories longitudinales qui s'étendent des fractures médianes à la zone centrale de la flamme indiquent l'usage d'une matrice.

Une déformation des structures près des fissures médianes ne peut être constatée. De même, les scories plus grosses ne montrent aucune trace de déformation. Cela indique soit un réchauffement après le travail à froid de la pointe de lance, soit une relaxation des structures au cours du processus de durcissement. La lance provenant de la tombe 520 de la nécropole de Pottenbrunn représente un bon parallèle à ce travail de forge. Cette pièce démontre le même souci de qualité. Le matériel ne présente

11- Herdits 2002.

pratiquement pas de scories mises à part les fissures médianes où l'on trouve des scories un peu plus grossières. Au centre se trouve une soudure très soignée laquelle indique de même un plissage du matériel primaire ou un soudage de deux lingots.

Contrairement à la pointe de lance de Mannersdorf, il est clair que cette pièce n'a pas été soumise à un processus de durcissement par augmentation du taux de carbone. En revanche, des traces de déformations à froid (le travail à froid pouvant aussi conduire à un durcissement) se montrent clairement dans la zone des fractures médianes et sur les lames. Contrairement à la pointe de lance de Mannersdorf, aucune carbonisation n'a évidemment été entreprise sur cette pièce. Cependant des déformations à froid peuvent être reconnues sur l'arête médiane et en bord de lame qui indiquent un martelage final. Les deux lances sont, malgré une fabrication différente, considérées comme des travaux de forge de haute qualité.

Comme l'épée de Mannersdorf/Flur Reinthal Süd 127/4 se trouvait déjà dans un état de forte corrosion, seules des observations limitées sur sa fabrication peuvent être émises. L'échantillon ne dépassait pas la partie centrale de l'épée.

Les résultats de la soumission à une attaque au Nital indiquent que le matériel se constitue de plusieurs matériaux différents lesquels furent soudés au cours d'un procédé d'homogénéisation.

La structure de la lame montre de fortes déformations, lesquelles se sont formées lors de son travail à froid (fig. 15). Comme la structure est restée déformée, on peut exclure un procédé de réchauffement de la lame car la structure se serait alors relaxée. Une plus grande concentration de scories peut être observée au centre de l'échantillon, dont la coupe se divise en deux moitiés. Celle-ci représente aussi la ligne démarquant les différentes structures. Il s'agit probablement d'une soudure incomplète.

La structure reconnue du métal ne permet pas de supposer une augmentation intentionnelle du taux de carbone.

Le couteau Mannersdorf/ Obere Kirchengasse Fnr. 246 et l'épée Mannersdorf, Flur Reinthal Süd 127/4 sont d'une qualité moyenne.

En revanche, la pointe de lance présente un travail d'une bonne qualité. Elle montre, d'une part les traces d'un procédé de durcissement, d'autre part (mises à part les fractures médianes) un taux de scories très bas. Cette pièce est l'un exemple d'une technique de forge très évoluée.

3. CONCLUSION

Sur toutes les pièces découvertes, le processus d'homogénéisation peut¹² être constaté pour améliorer la qualité de matériel. Cela se voit sur le couteau "Mannersdorf/Obere Kirchengasse" Fnr 246, dont la transformation du métal est due à de nombreux pliages ("Doppeln") de la matière première.

Le tranchant de l'épée Mannersdorf / Flur Reinthal Süd 127/4 a été martelé à froid, pour atteindre une augmentation de la dureté. On était évidemment conscient de la qualité du matériel et on a essayé de donner au métal par cette étape de traitement une plus grande valeur d'usage. Cette méthode d'augmentation de dureté peut également être constatée sur deux épées de La Tène finale en provenance de Makotrasz / Bohême, d'Holubice / Moravie¹³ et à une épée de la fin de l'âge du fer de Braunsberg / NÖ¹⁴.

Cette découverte peut être confrontée à la pointe de lance de Sommerein /Wolfsbründl Fnr. 128, dont la lame est vraisemblablement due à une cémentation suivie d'un durcissement afin d'améliorer l'utilisation de l'objet¹⁵. Par ce procédé,

12- Description du procédé d'homogénéisation : Herdits 1998, 73-76. Il est décrit qu'après que le lingot a été forgé en une barre rectangulaire, celle-ci, dans cette étape de traitement est encore difficilement forgeable, puisque des fissures grossières de dislocation dans la distribution du carbone lors d'un traitement thermique (durcissement, recuit) naissent à nouveau. De même, l'éclatement d'inclusions de scories grossières a conduit à la destruction de la surface de l'objet. Ce n'est que par un autre forgeage de la loupe en une barre plate (Herdits 1998, 74, fig. 6) et du pliage puis du soudage au feu qu'on peut arriver à une qualité acceptable du forgeage du fer : Lychatz & Janke 2000, 307-317.

13- Pleiner 1993, 86, pl. IV, fig. 5 ; 93, pl. XXIV, pl. 2.

14- Interner Untersuchungsbericht, Vienna Institute for Archaeological Science.

15- Pour une hache de Liptovská mara, il est probable qu'un processus de production semblable a été utilisé (Mihok *et al.* 2000, 120, 125, fig. 1).

il résulte une structure fragile qui doit être protégée par un matériau plus maléable avant de casser. Cette fabrication de la lame a toutefois le désavantage que le tranchant peut s'émousser plus rapidement par l'aiguisage ou l'usure. Il n'est pas évident de savoir si l'objet a été fabriqué grâce à un trempage¹⁶ ou par un refroidissement lent après carbonisation et une recuisson finale.

Après ce procédé technique, il se pose également la question avec quoi cette carbonisation a été mise en œuvre. On ne sait pas si l'objet pendant ce processus s'est trouvé dans un récipient spécial ou placé directement dans le feu de forge. Cependant l'utilisation d'un récipient garantirait une répartition du carbone plus égale. Le processus de carbonisation pourrait avoir été mis en œuvre comme le décrit H. Herdits¹⁷ à l'aide d'un récipient d'argile rempli avec de la poussière de charbon. La carbonisation directe dans un feu de forge demanderait le fonctionnement d'une cheminée de forge, intacte temporairement, une conduite de vent aussi égale que possible et de là une atmosphère stable dans la cheminée ainsi qu'un forgeron expérimenté l'a supposé.

Les technologies appliquées correspondent jusqu'à présent aux techniques constatées pour la période de La Tène. Une comparaison avec les techniques de forge hallstattiennes ou romaines est limitée pour le moment, puisqu'on doit considérer qu'au niveau régional "une chute technologique" s'est produite au second âge du Fer. Aussi peut-on considérer que la technologie du fer présente une évolution complexe, variable selon les endroits.¹⁸

16- Pour le trempage, une carbonisation a eu lieu en premier. Ensuite l'objet est directement disloqué par la température de chauffe. Un "Austenitkorn" relativement grossier qui rendrait l'acier fragile après durcissement, naît de la longue durée de maintien à une température de chauffe élevée (environ 850 – 1 000°C, notes de l'auteur) : Schumann & Hermann 1990, 535.
 17- H. Herdits écrit que la carbonisation d'une barre de fer de forge qui provient d'expérimentation sur le traitement de minerai de fer, est roulée et chauffée ensuite dans un récipient d'argile fermé étroitement, rempli avec de la poussière de charbon pendant environ 2 heures aux environs de 800 - 900°C dans un feu de bois ouvert. Le morceau a été carbonisé après le traitement de surface. Il est resté à l'intérieur un noyau maléable. Le carbone ne s'est pas réparti de manière égale, mais a été freiné par la nature différente des structures et par les inclusions de scories. Des plaques de lame ont été fabriquées par soudage de deux barres semblables. La coupe le long du dos de lame a d'abord éveillé l'impression, comme s'il ne s'agissait pas de deux couches, mais qu'au total cinq couches auraient été soudées ensemble – trois dures et deux molles. Herdits 2000, 66, pl. 15, fig. 16.

18- Pour les exemples, voir les publications suivantes : Pleiner 1982, 99-108. Maurer 1993, 313-327. Mihok *et al.* 2000, 119-134. Presslinger 1998/99, 511-515. Schaaber 1963, 129-281. Salac 1990, 208-232. Presslinger 1998/99, 511-515.

Bibliographie

- Beitz, W. et K.-H. Küttner, éd. (1990) : *Dubbel Taschenbuch für den Maschinenbau*, 17, Berlin.
- DIN 50 601 (ISO 643 – 1983) *Metallographische Prüfverfahren Ermittlung der Ferrit- oder Austenitkorngroße von Stahl und Eisenwerkstoffen*, in : DIN, éd. 1989.
- DIN, éd. (1989) : Deutsches Institut für Normung. *DIN Taschenbuch 218 Wärmebehandlung metallischer Werkstoffe 2*, Berlin-Cologne.
- Friesinger, H. et H. Kerchler, éd. (1999) : *Archä Wien 1998/99*, Vienne.
- Friesinger, H., K. Pieta et J. Rajtar, éd. (2000) : *Metallgewinnung und Verarbeitung in der Antike (Schwerpunkt Eisen)*, *Archaeologica Slovaca Monographiae* 3, Nitra.
- Herdits, H. (1998) : "Technotypologische Betrachtungen und experimentalarchäologische Untersuchungen zu den frühmittelalterlichen Rennöfen von Unterpullendorf", in : Kaus, éd. 1998, 73-76.
- (2000) : Schweißisen - seine Herstellung, Bearbeitung und Veredelung im archäologischen Experiment, in : Friesinger et al., éd. 2000, 63-72.
- (2002) : "Die technotypologische Untersuchung an Eisenartefakten aus dem Gräberfeld von Pottenbrunn", in : Ramsil 2002.
- Kaus, K., éd. (1998) : *Burgenländische Heimatblätter* 60/2, Eisenstadt.
- Lychatz, B. et D. Janke (2000) : "Experimentelle Simulation der frühen Eisenverhüttung", *Arbeits und Forschungsberichte zur Sächsischen Bodendenkmalpflege*, 42, Dresde, 307-317.
- Maurer, H. P. (1993) : "Archäometallurgische Untersuchungen an Schlacken und Eisenfunden der latènezeitlichen Schmiedewerkstatt Kundl -Lus und aus dem Oppidum Manching", *Archaeologisches Korrespondenzblatt*, 23, Mayence, 313-327.
- (1993) : Bausch, Karl Erwin ; *Zur Technik latènezeitlicher Eisenschmiede*, *Archäologie in Deutschland* 1993/2, Stuttgart, 30-32.
- Mihok, L., E. Pribulá et K. (2000) : *Pieta Metallographic Analysis of latène iron objects from Liptovská mara Site*, in : Friesinger et al., éd. 2000, 119-134.
- Piaskowski, J. (1971) : "Technologie der Eisenherstellung im großmährischen Reich" (Folgerungen aus den Forschungen R. Pleiner), *Acta Archaeologica Carpathica*, 11, 111-126.
- (1971) : "Über die Kennzeichen der Zementation und des Schweissens an den frühmittelalterlichen eisernen Gegenständen" (Diskussion mit R. Pleiner), *Acta Archaeologica Carpathica*, 12, Krakau, 127-159.
- Pleiner, R. (1967) : "Die Technologie des Schmiedes in der Großmährischen Kultur", *Slovenska archaeologica*, 15/1, Bratislava, 77-188.
- (1971) : "Zur Schmiedetechnik des großmährischen Reiches", *Acta Archaeologica Carpathica*, 12, Krakau, 107-125.
- (1982) : Untersuchungen zur Schmiedetechnik auf den keltischen Oppida, in : Poulik, éd. 1982, 99-108.
- Pleiner, R., avec collab. de B. G. Scott (1993) : *The Celtic Sword*, Oxford.
- Poulik, J., éd. (1982) : *Pamatky Archeologické*, 73, Prague.
- Presslinger, H. (1999) : *Keltischer Stahl aus Linz. Metallkundliche Voruntersuchungen der Depotfunde vom Gründberg, Stadtgemeinde Linz*, Oberösterreich, in : Friesinger & Kerchler, éd. 1999, 511-515.
- Ramsil, P.C (2002) : *Das eisenzeitliche Gräberfeld von Pottenbrunn*, Vienne.
- Salac, V. (1990) : "Vývoji a struktura halstátského zelezárství v Podkrusnohorí ve svetle nových nálezů" (Die Entwicklung und Struktur der hallstattzeitlichen und latènezeitlichen Eisenverhüttung im Erzgebirgsvorland im Lichte neuer Funde), in : Poulik, éd. 1990, 208-232.
- Schaaber, O. (1963) : *Beiträge zur Frage des norischen Eisens Metallkundliche Grundlagen und Untersuchungen an Funden vom Magdalensberg*, *Carinthia I* 153, Klagenfurt, 129-281.
- Urban, O. H et E. M. Ruprechtsberger (1997) : "Keltische Eisendepotfunde vom Gründberg", *Archäologie Österreichs*, 8/2, Vienne, 35.