



HAL
open science

**Les Archers de César. Recherches historiques,
archéologiques et paléométallurgiques sur les archers
dans l'armée romaine et leur armement de César à
Trajan.**

Guillaume Renoux

► **To cite this version:**

Guillaume Renoux. Les Archers de César. Recherches historiques, archéologiques et paléométallurgiques sur les archers dans l'armée romaine et leur armement de César à Trajan.. Sciences de l'Homme et Société. Université Toulouse le Mirail - Toulouse II, 2006. Français. NNT: . tel-00545245

HAL Id: tel-00545245

<https://theses.hal.science/tel-00545245>

Submitted on 9 Dec 2010

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.

Les Archers de César

Recherches historiques, archéologiques et paléométallurgiques sur les archers dans l'armée romaine et leur armement de César à Trajan.

TOME 2



Guillaume RENOUX

Docteur en Sciences de l'Antiquité

FIGURES

Figure 1 : L'archer de la Guerche (Cher)



Cliché du M.A.N., Saint-Germain-en-Laye (n°32092)

Figure 2 : L'archer du Mont Saint-Jean (Sarthe)



Cliché M.A.N, Saint-Germain-en-Laye (n° 226 56)

Figure 3 : Archer parthe (Staatliche Museen, Berlin.)



Figure 4 : Archer de Toul (Meurthe-et-Moselle)



Cliché Musée Lorrain de Nancy. (n°95.279)

Figure 5 : Frise de Saint-Bertrand-de-Comminges, conservée au musée Saint-Raymond à Toulouse



Section a



Section b

Cliché de l'auteur.

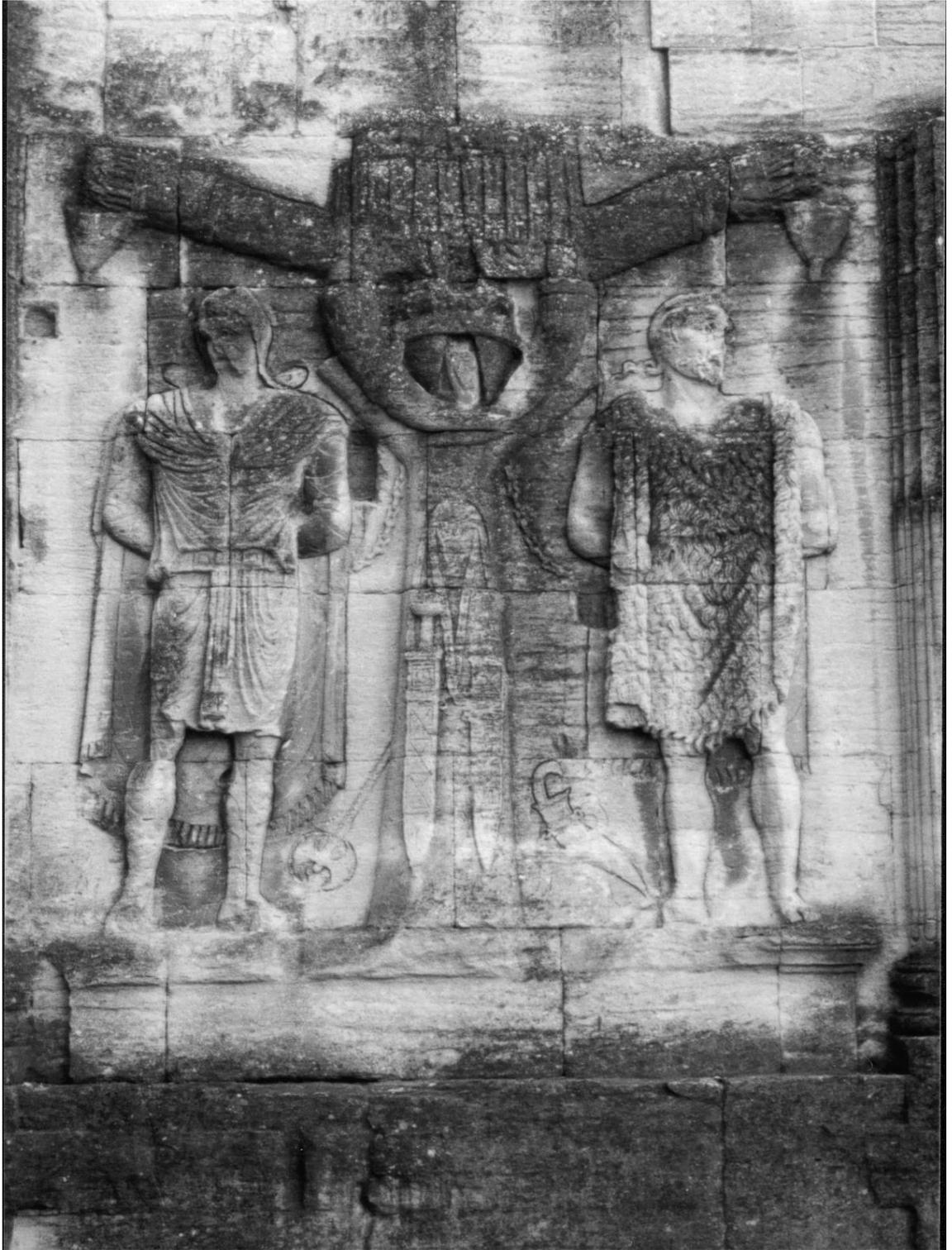


Section c



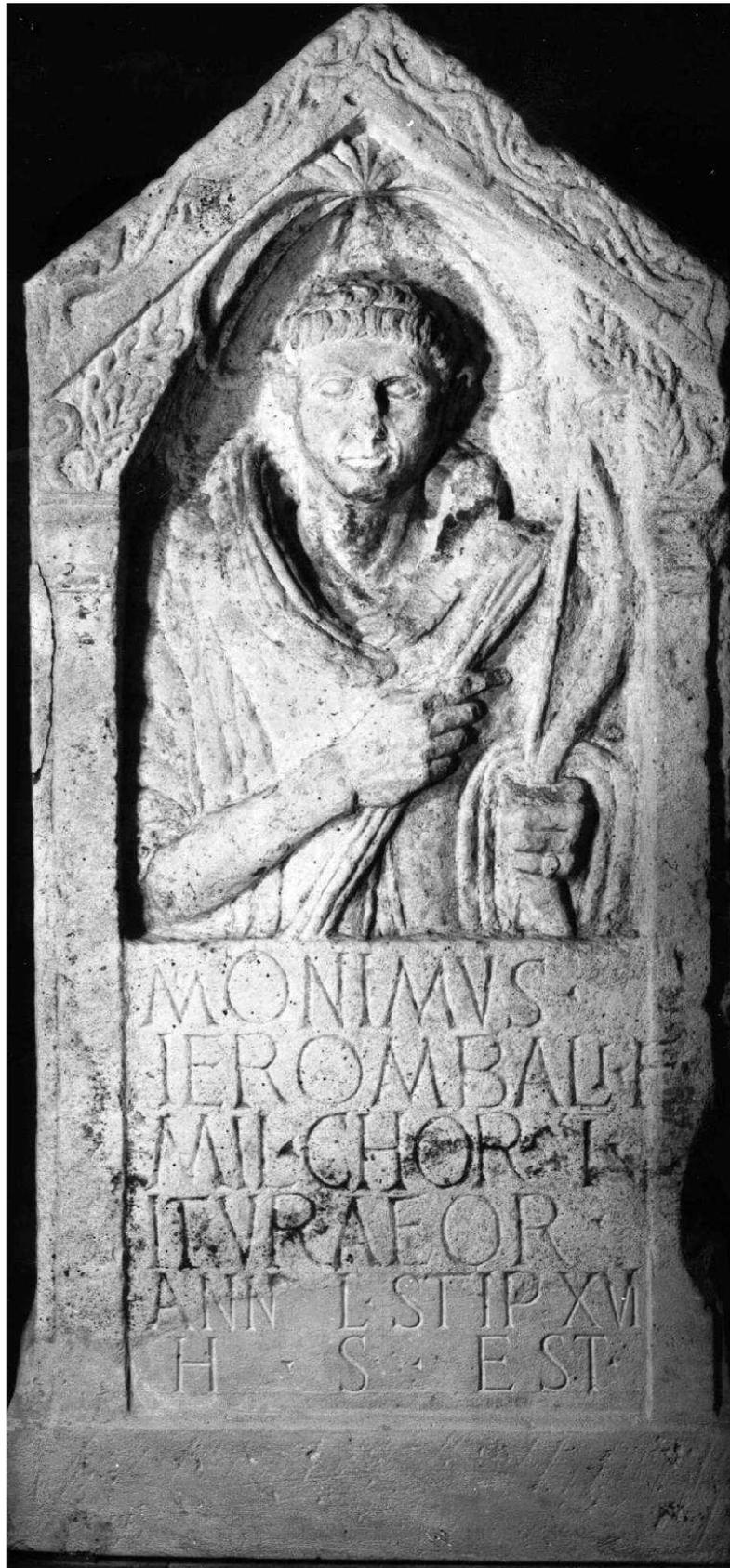
Section d

Cliché de l'auteur.

Figure 6 : Détail de l'arc de Carpentras

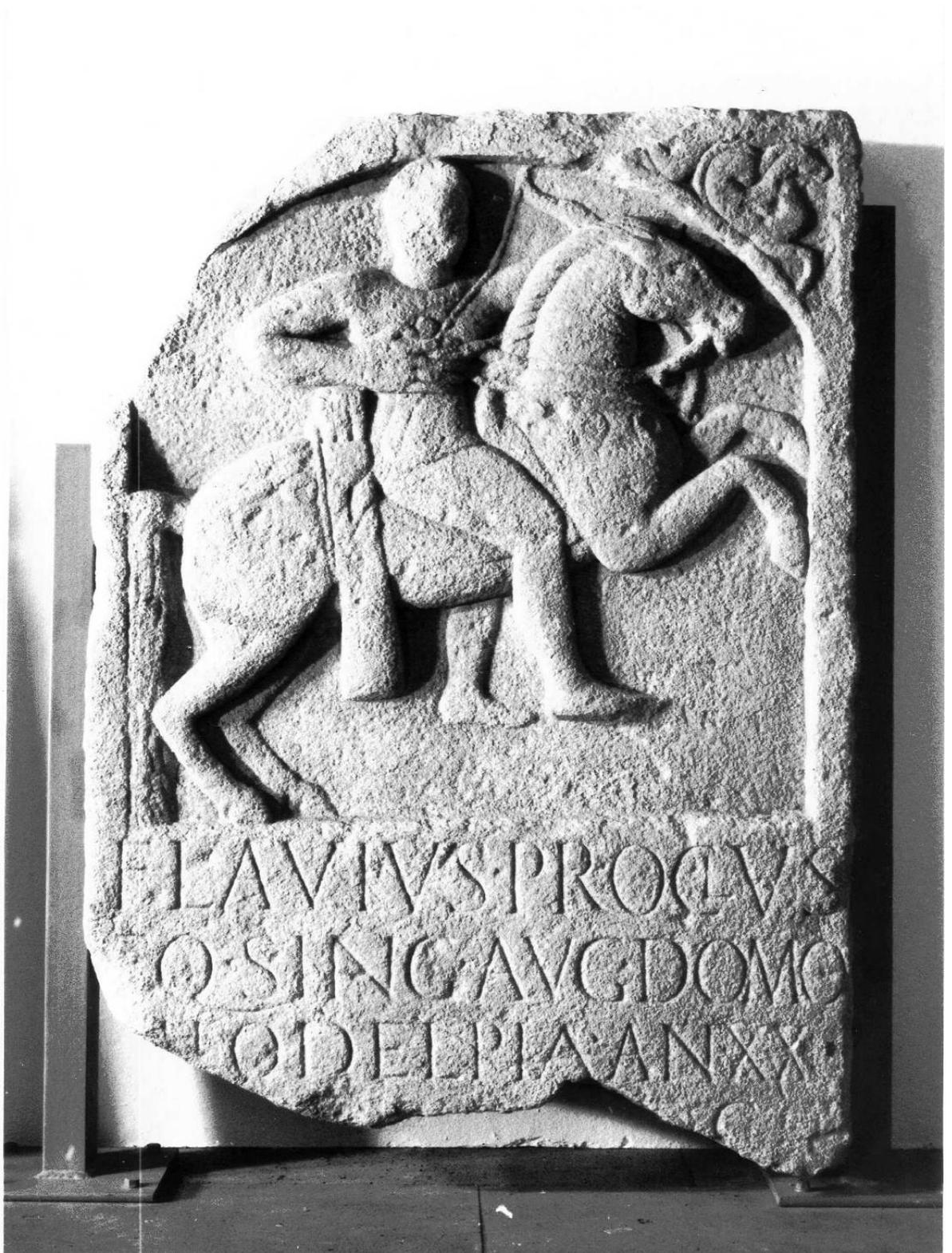
Cliché de l'auteur.

Figure 7 : Stèle de *Monimus* (CIL XIII, 7041)



Cliché du musée de Mayence.

Figure 8 : Stèle de *Flavius Proclus* (SCHLEIERMACHER, 23).



Cliché du musée de Mayence.

Figure 9 : Stèle d'*Hyperanor* (CIL XIII, 7513).



Cliché du Schlossparkmuseum, Bad Kreuznach

Figure 10 : Stèle de *Maris* (AE 1959, 188).



Cliché du musée de Mayence

Figure 11 : Stèle d'Acrabanis (CIL III, 4367)



Figure 12 : Stèle de *Crescens* (AE 1997, 1260)



Figure 13 : Stèle de *Tiberis Iulius Rufus* (AE 1906, 111)



TIBERIVS
 RVFVS
 MILITAVS
 SVB STIPENDIO
 ALEXANDRINO
 H. S. E.
 MATRIS FLAVIAE
 SIBI ET PATRI

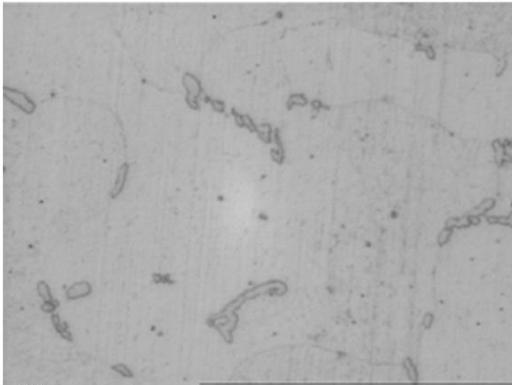
Figure 14 : Stèle de *Tiberius Iulius Abdes* (CIL XII, 7514)



Musée de Bad Kreuznach

PLANCHES

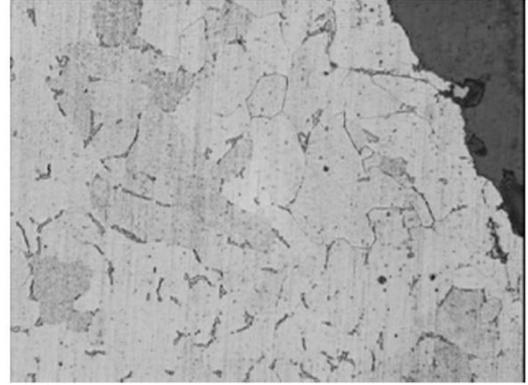
Planche 1 : Micrographies optiques. Nital 2%. Pointe de flèche BU10-484.



25 μm

Fig. 1

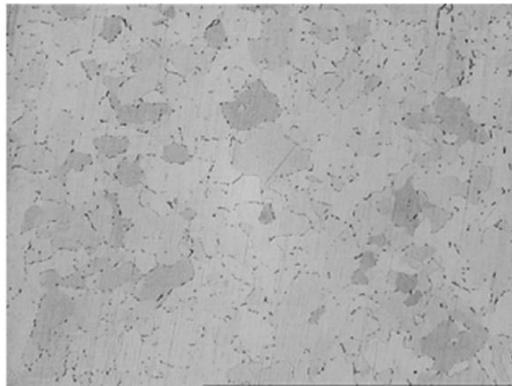
Micrographie optique. Précipités de cémentite aux joints de grains de ferrite



125 μm

Fig. 2

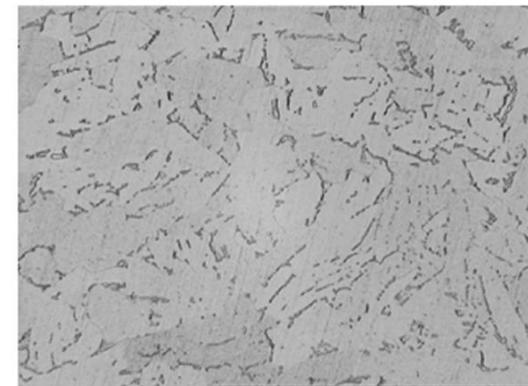
Micrographie optique. Structure ferritique avec précipités de cémentite aux joints de grains.



500 μm

Fig. 3

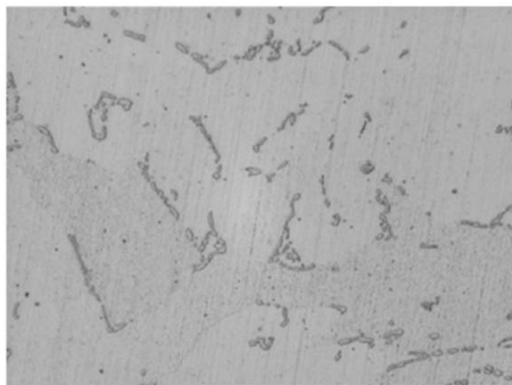
Micrographie optique. Structure ferritique et cémentite intergranulaire.



125 μm

Fig. 4

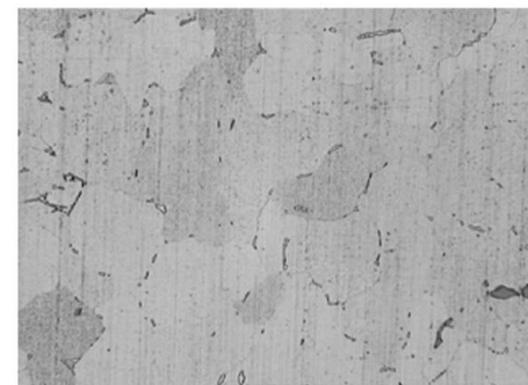
Micrographie optique. Structure ferritique et cémentite intergranulaire.



50 μm

Fig. 5

Micrographie optique. Structure ferritique et cémentite intergranulaire.

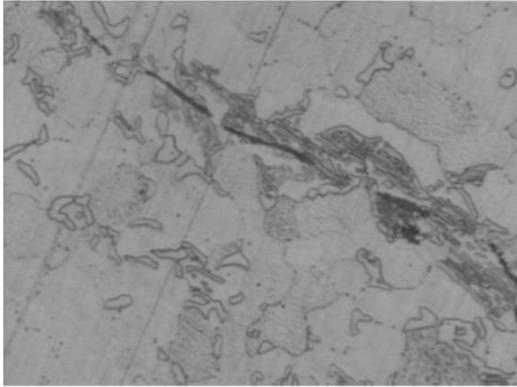


125 μm

Fig. 6

Micrographie optique. Structure ferritique et cémentite intergranulaire.

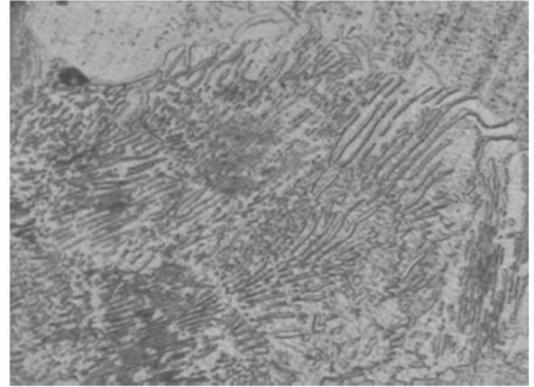
Planche 2 : Micrographies optiques. Nital 2%. Pointe de flèche BU10-3220.



125 μm

Fig. 1

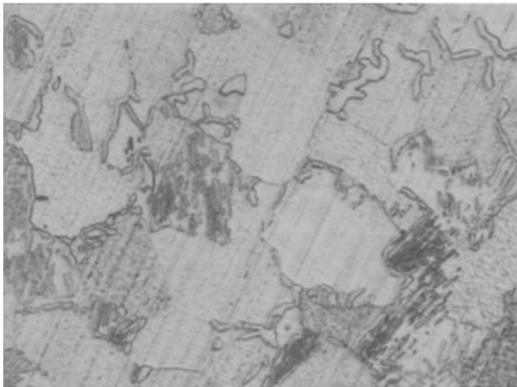
Micrographie optique. Structure ferritique avec alignements de scories



125 μm

Fig. 2

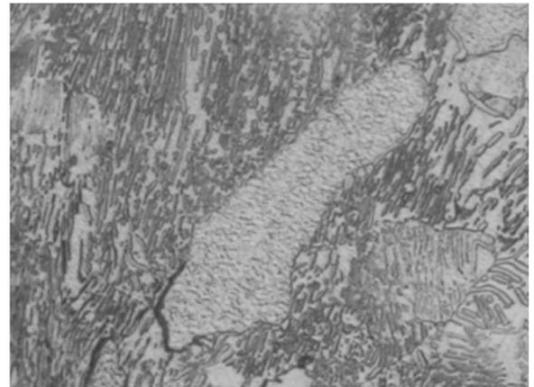
Micrographie optique. Structure ferrito-perlitique en voie de décarburation.



125 μm

Fig. 3

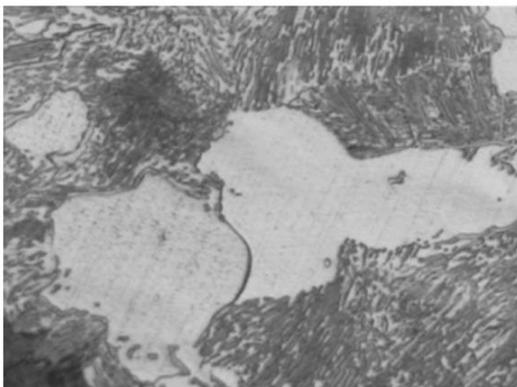
Micrographie optique. Structure ferritique, avec la perlite en voie de décarburation.



125 μm

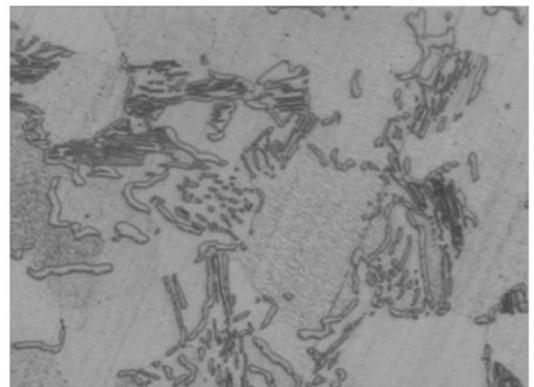
Fig. 4

Micrographie optique. Idem à la figure 2.



125 μm

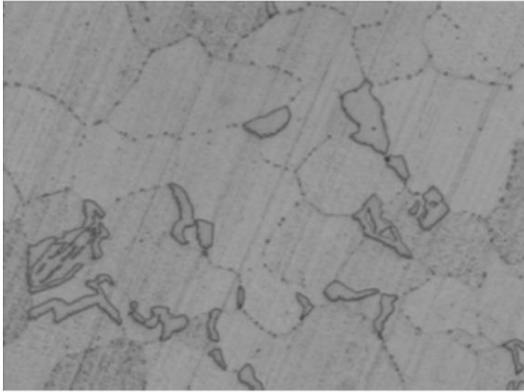
Fig. 5



125 μm

Fig. 6

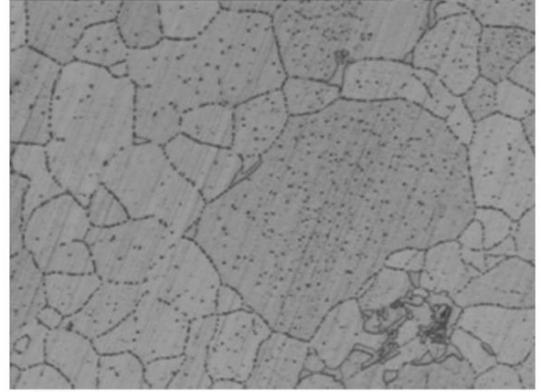
Planche 3 : Micrographies optiques. Nital 2%. Pointe de flèche BU10-3220.



125 μm

Fig. 1

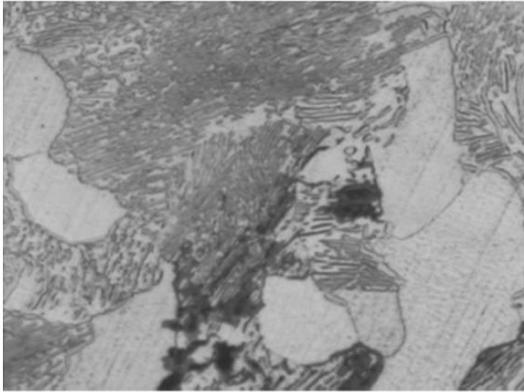
Micrographie optique. Structure ferritique, avec carbures aux joints de grains.



250 μm

Fig. 2

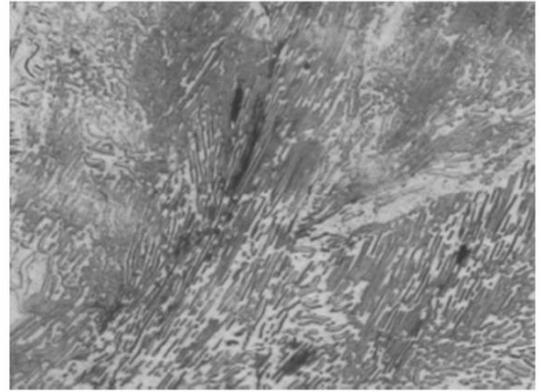
Micrographie optique. Structure ferritique avec croissance exagérée d'un cristal



125 μm

Fig. 3

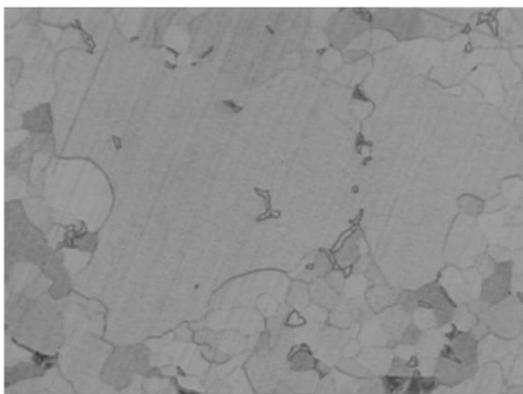
Micrographie optique. Structure ferrite-perlitique.



250 μm

Fig. 4

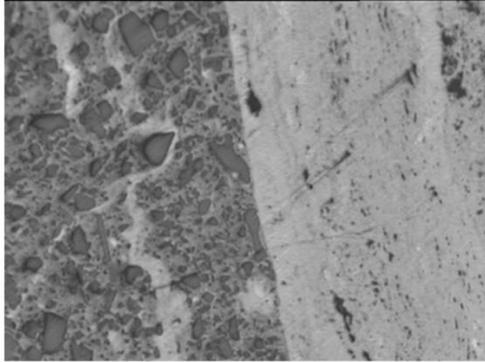
Micrographie optique. Idem que Fig. 3



500 μm

Fig. 5

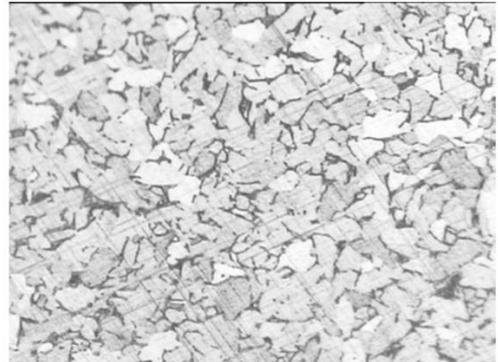
Planche 4 : Micrographies optiques. Nital 2%. Pointe de flèche BU 10-3567.



500 μm

Fig. 1

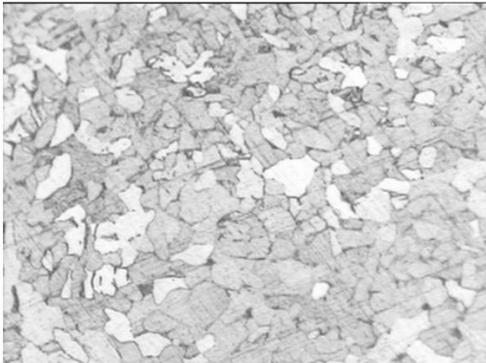
Micrographie optique. Zone intermédiaire entre la gangue (avec cristaux de quartz) et les parties oxydées (à droite)



125 μm

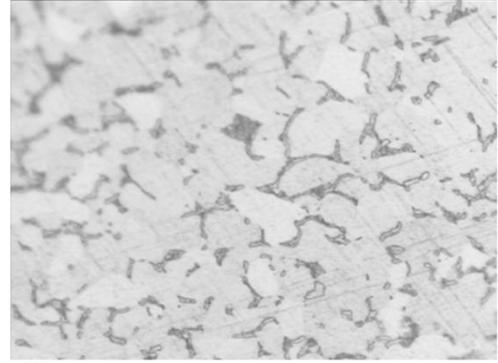
Fig. 2

Micrographie optique. Structure ferritique avec précipités de cémentite aux joints de grains.



125 μm

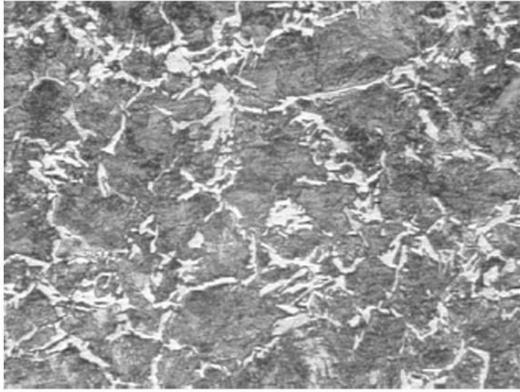
Fig. 3



50 μm

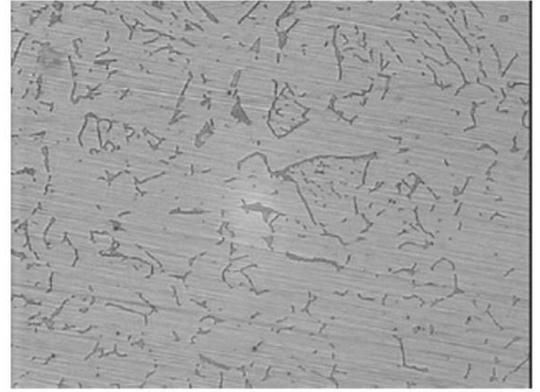
Fig. 4

Planche 5 : Micrographies optiques. Nital 2%. Pointe de flèche PM 502.



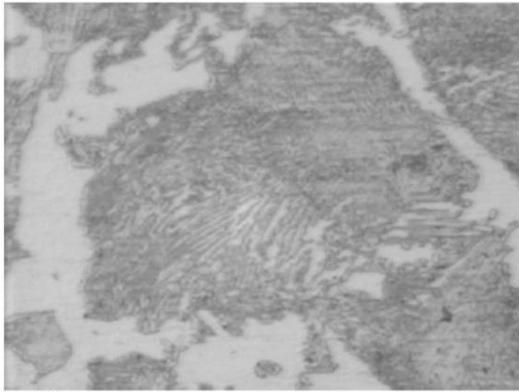
125 μ m **Fig. 1**

Micrographie optique. Structure ferrito-perlitique.



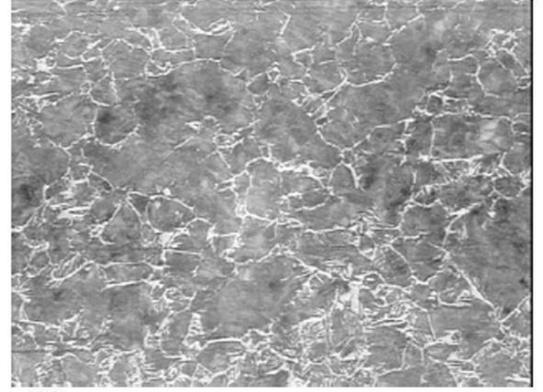
125 μ m **Fig. 2**

Micrographie optique. Structure ferritique avec précipités intergranulaires de cémentite.



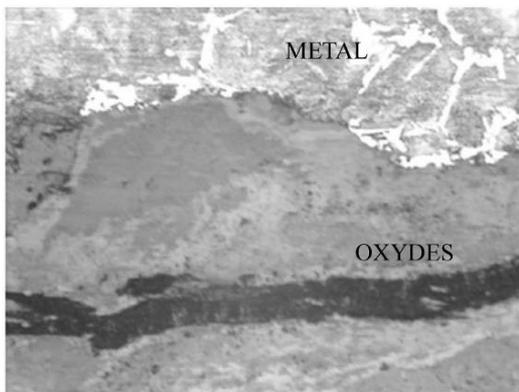
25 μ m **Fig. 3**

Micrographie optique. Structure ferrito-perlitique.



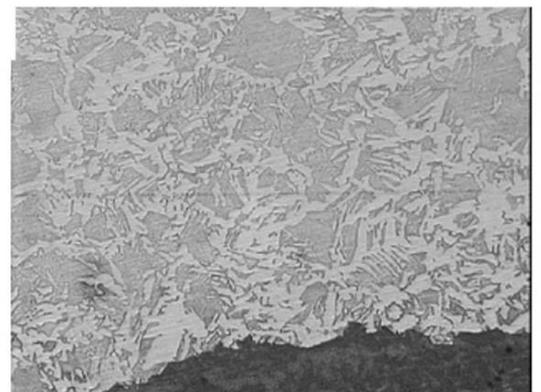
500 μ m **Fig. 4**

Micrographie optique. Structure ferrito-perlitique.



125 μ m **Fig. 5**

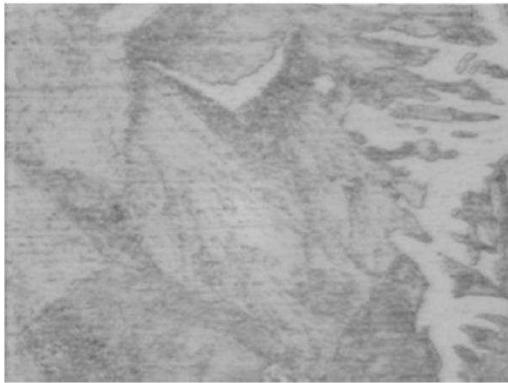
Micrographie optique. Mémoire de la microstructure dans les couches d'oxydation.



125 μ m **Fig. 6**

Micrographie optique. Structure ferrito-perlitique.

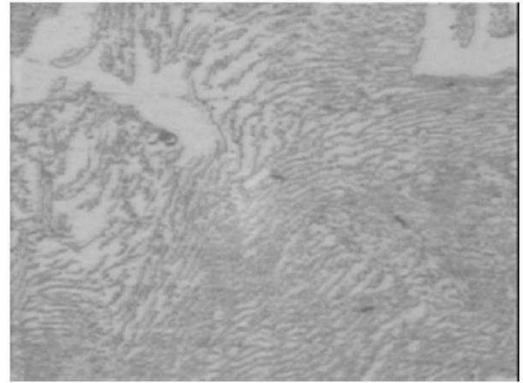
Planche 6 : Micrographies optiques. Nital 2%. Pointe de flèche PM 502.



25 μ m

Fig. 1

Micrographie optique. Structure bainitique.



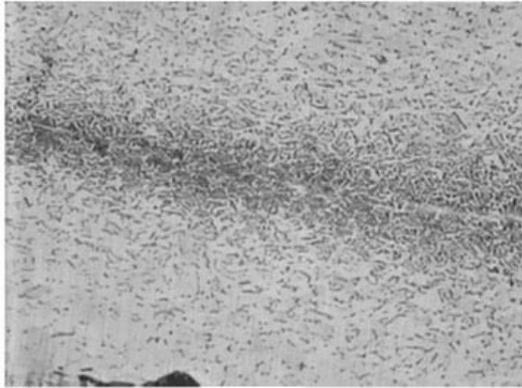
25 μ m

Fig. 2

Micrographie optique. Structure ferrito-perlitique.

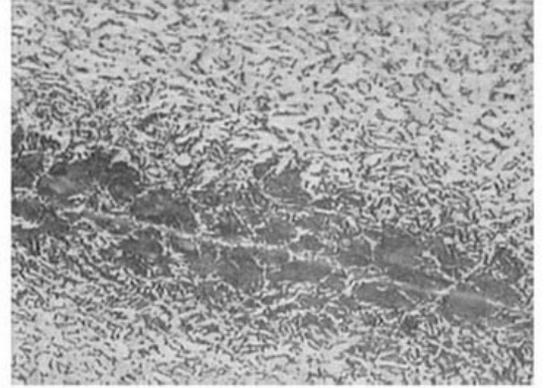
Planche 7 : Micrographies optiques. Nital 2%. Pointe de flèche PM 662.

Coupe longitudinale.



500 µm *Fig. 1*

Micrographie optique. Structure ferrito-perlitique avec liseré clair au niveau du soudage partiel de la barbelure



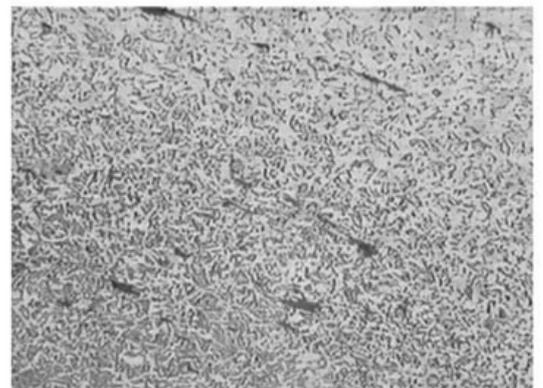
250 µm *Fig. 2*

Micrographie optique. Idem à la figure 1.



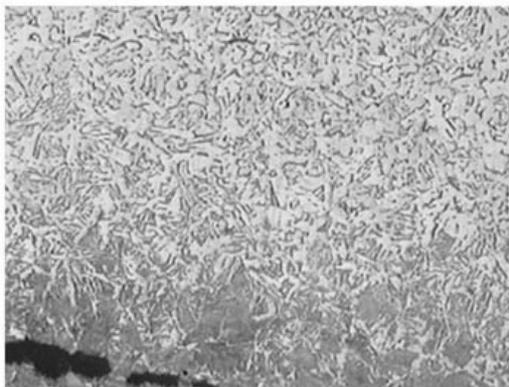
125 µm *Fig. 3*

Micrographie optique. Structure ferrito-perlitique.



500 µm *Fig. 4*

Micrographie optique. Structure ferrito-perlitique avec scories.



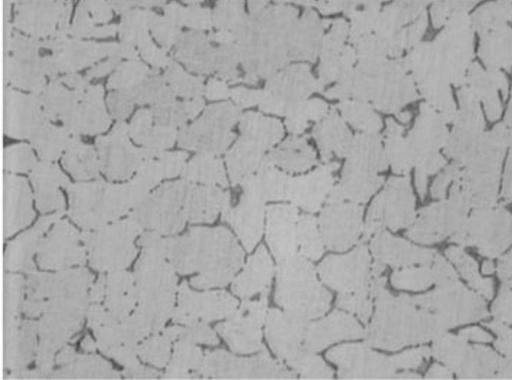
500 µm *Fig. 5*

Micrographie optique. Transition entre le domaine ferritique et ferrito-perlitique.



50 µm *Fig. 6*

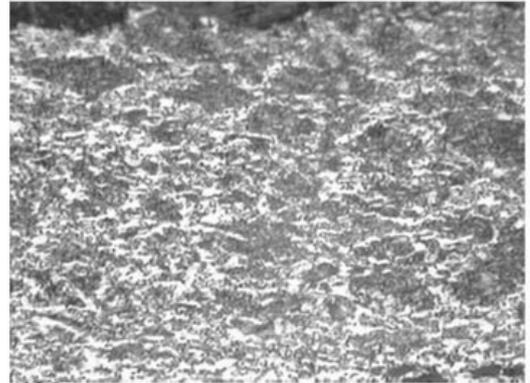
Micrographie optique. Structure ferrito-perlitique.

Planche 8 : Micrographies optiques. Nital 2%. Pointe de flèche PM 662.**Coupe longitudinale.**

125 μm

Fig. 1

Micrographie optique. Structure ferritique avec précipitation intergranulaire de cémentite.



125 μm

Fig. 2

Micrographie optique. Structure ferrite-perlitique au niveau de l'extrémité de la pointe.

Planche 9 : Micrographies optiques. Nital 2%. Pointe de flèche PM 662.

Coupe transversale.



125 μm

Fig. 1

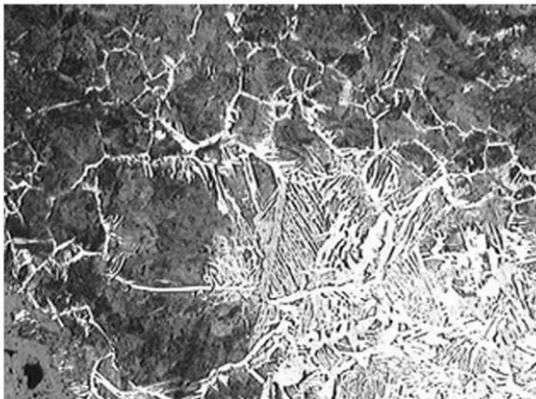
Micrographie optique. Structure ferrito-perlitique avec ferrite aciculaire.



125 μm

Fig. 2

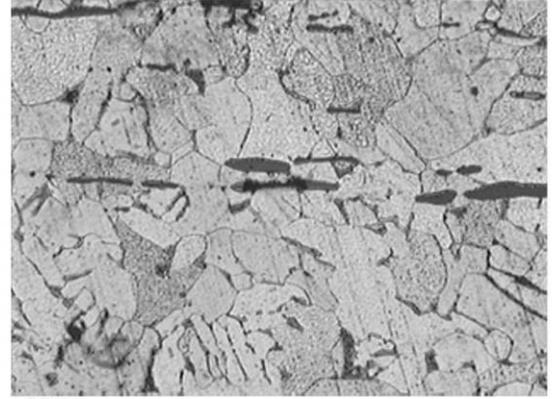
Micrographie optique. Structure ferrito-perlitique avec ferrite aciculaire.



500 μm

Fig. 3

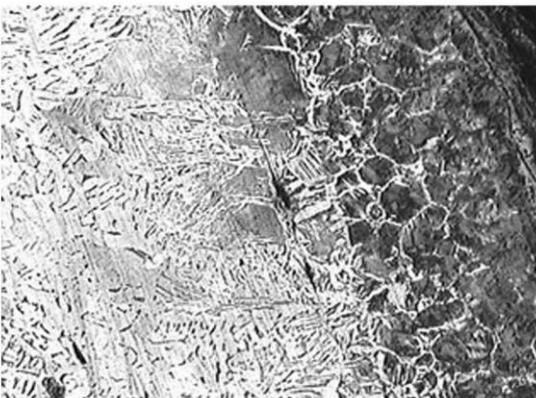
Micrographie optique. Transition entre un domaine eutoctoïde et un domaine ferritique.



125 μm

Fig. 4

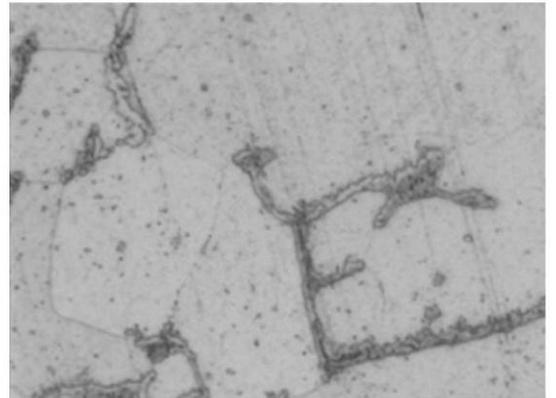
Micrographie optique. Structure ferritique avec alignements de scories.



500 μm

Fig. 5

Micrographie optique. Transition entre un domaine eutoctoïde et un domaine ferritique.

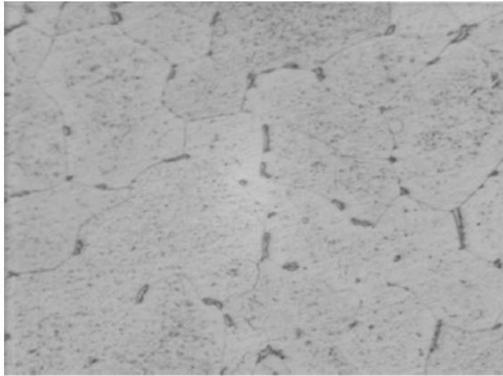


25 μm

Fig. 6

Micrographie optique. Structure ferritique avec précipités de cémentite aux joints de grains.

Planche 10 : Micrographies optiques. Nital 2%. Pointe de flèche PM 594.



50 μm

Fig. 1

Micrographie optique. Structure ferritique avec précipités de cémentite aux joints de grains.



500 μm

Fig. 2

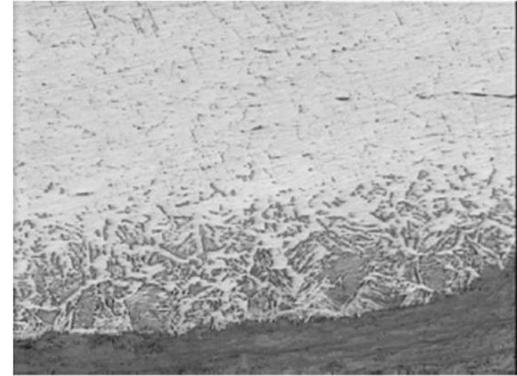
Micrographie optique. Structure ferrito-perlitique avec liseré clair au niveau du soudage partiel de la barbelure lors du forgeage.



50 μm

Fig. 3

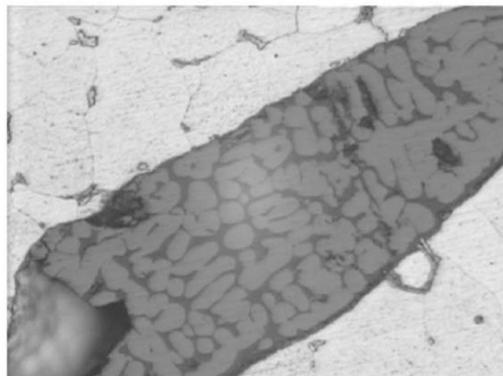
Micrographie optique. Scories avec dendrites de wustite dans une matrice de fayalite.



500 μm

Fig. 4

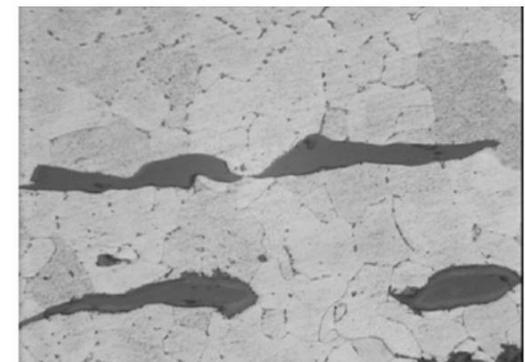
Micrographie optique. Structure ferrito-perlitique en surface et structure ferritique à coeur.



50 μm

Fig. 5

Micrographie optique. Structure ferritique. Scorie avec dendrites de wustite dans une matrice de fayalite.

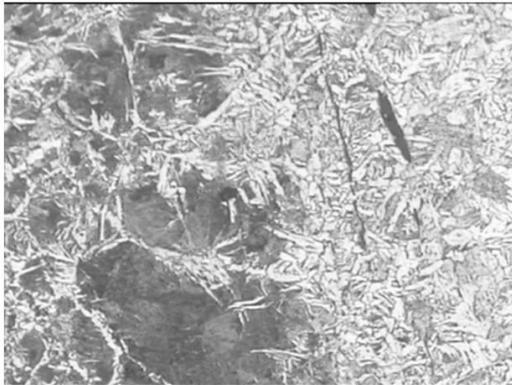


125 μm

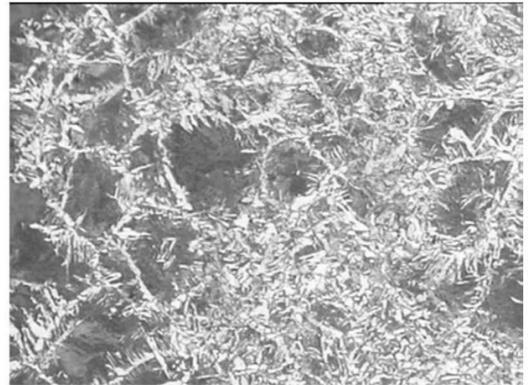
Fig. 6

Micrographie optique. Scories monophasées.

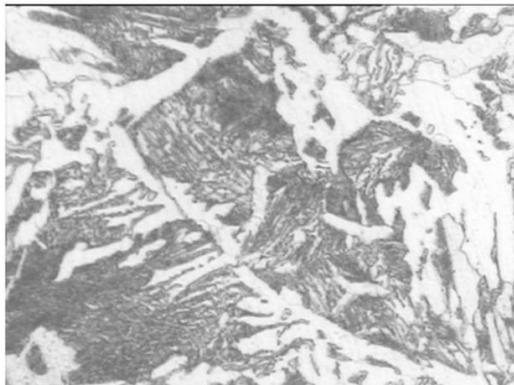
Planche 11 : Micrographies optiques. Nital 2%. Pointe de flèche PM 1312.



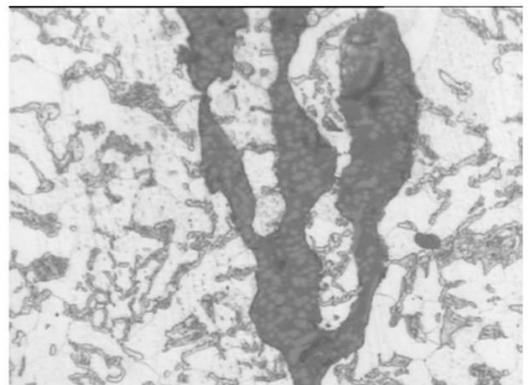
250 μm
Fig. 1
Micrographie optique. Structure de Widmanstätten.



250 μm
Fig. 2
Micrographie optique. Structure de Widmanstätten.

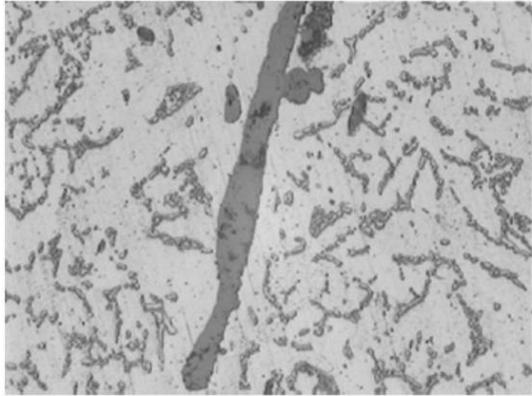


50 μm
Fig. 3
Micrographie optique. Structure ferrito-perlitique avec ferrite aciculaire



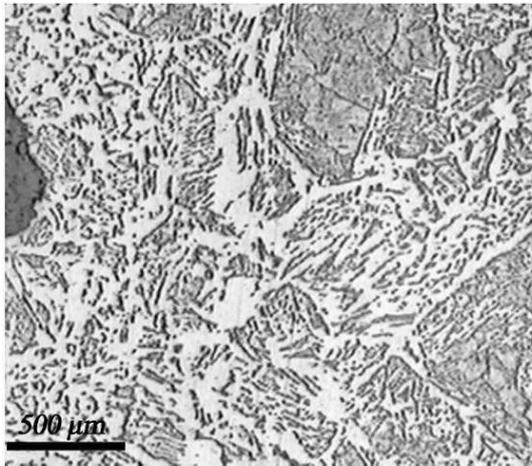
50 μm
Fig. 4
Micrographie optique. Scories avec dendrites de wüstite dans une matrice de fayalite.

Planche 12 : Micrographies optiques. Nital 2%. Pointe de flèche PM 1054.



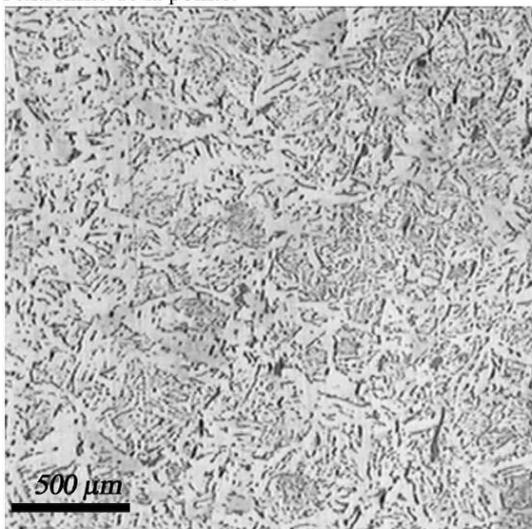
50 µm *Fig. 1*

Micrographie optique. Présence d'oxydes résiduels formant des alignements dans le plan de la soudure.



500 µm *Fig. 2*

Micrographie optique. Structure ferrito-perlitique vers l'extrémité de la pointe.



500 µm *Fig. 3*

Micrographie optique. Structure ferrito-perlitique.

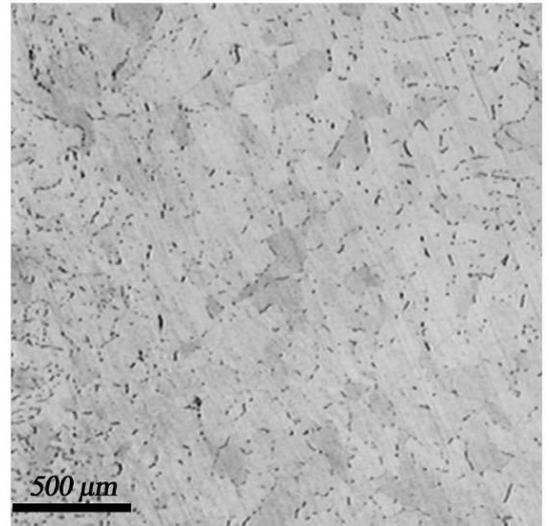


Fig. 4

Micrographie optique. Structure ferritique avec précipités de cémentite aux joints de grains.

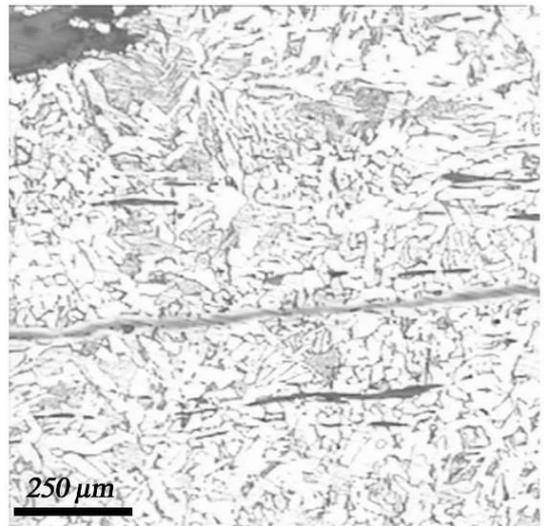
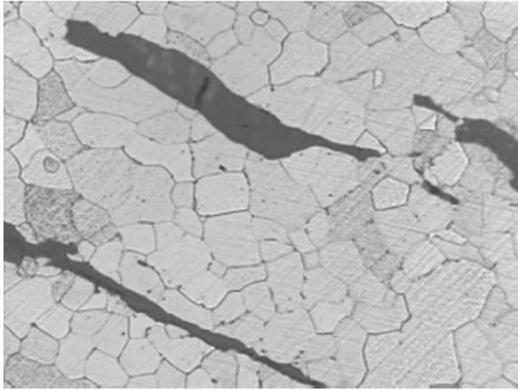


Fig. 5

Micrographie optique. Zones voisines de la liaison par soudage-forgeage de la barbelure avec le corps de la flèche. On bénéficie de la sensibilité à l'oxydation de la zone soudée pour mieux en révéler la localisation (liseré rougcâtre)

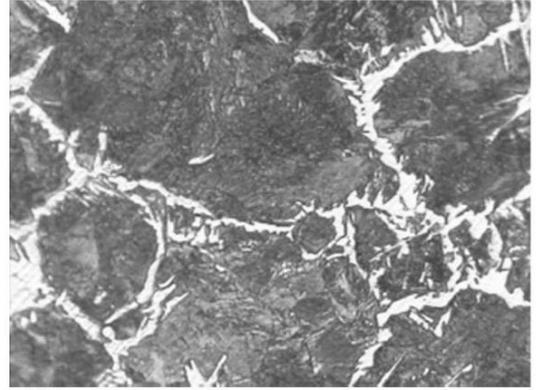
Planche 13 : Micrographies optiques. Nital 2%. Pointe de flèche PM 945.



125 μm

Fig. 1

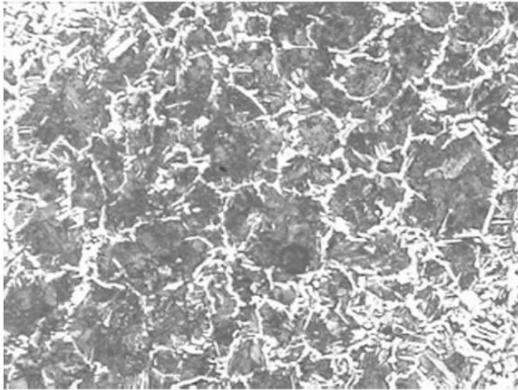
Micrographie optique. Structure ferritique avec scories monophasées.



125 μm

Fig. 2

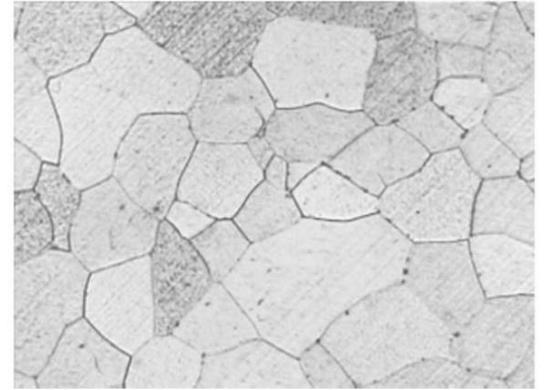
Micrographie optique. Structure ferrito-perlitique hypoeutectoïde.



250 μm

Fig. 3

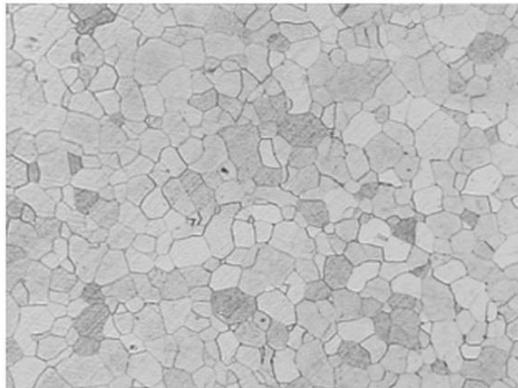
Micrographie optique. Structure ferrito-perlitique hypoeutectoïde.



125 μm

Fig. 4

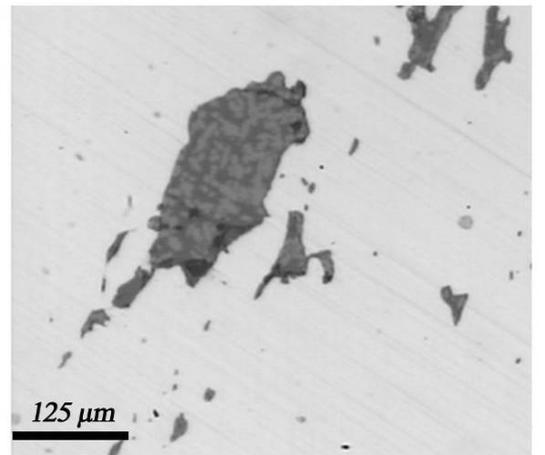
Micrographie optique. Structure ferritique équiaxe.



250 μm

Fig. 5

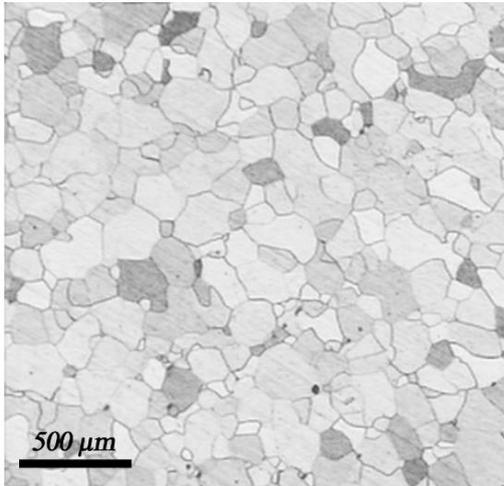
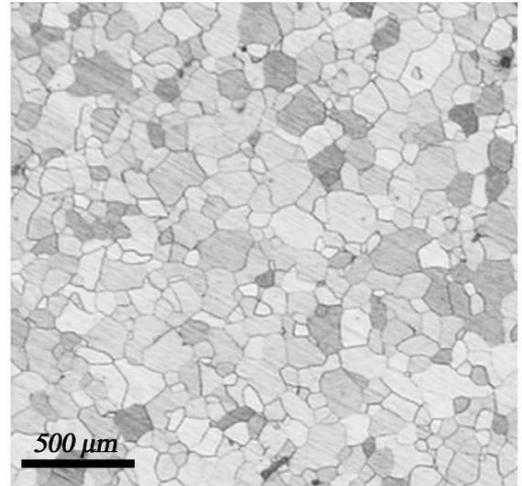
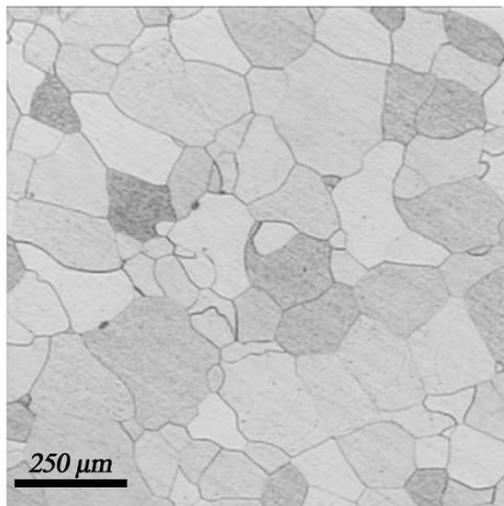
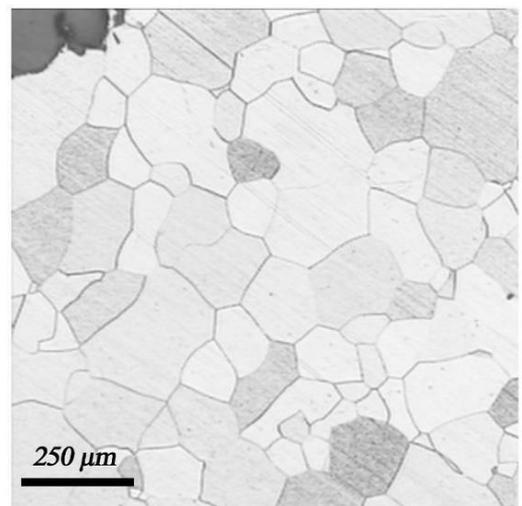
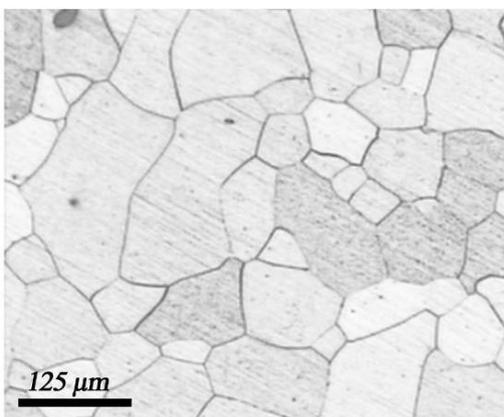
Micrographie optique. Structure ferritique.



125 μm

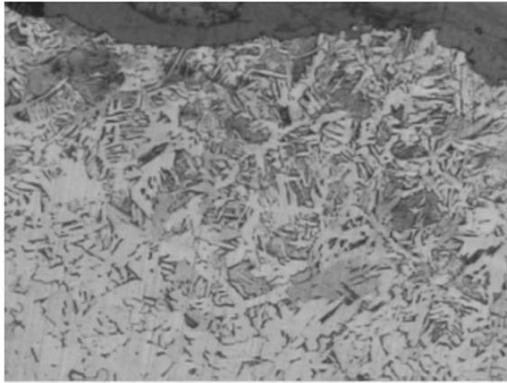
Fig. 6

Micrographie optique. Scorie avec dendrites de wustite dans une matrice de fayalite.

Planche 14 : Micrographies optiques. Nital 2%. Pointe de flèche PM 1343.*Fig. 1**Fig. 2**Fig. 3**Fig. 4**Fig. 5*

Micrographies optiques. Différentes plages d'observation sur l'échantillon. Structure ferritique.

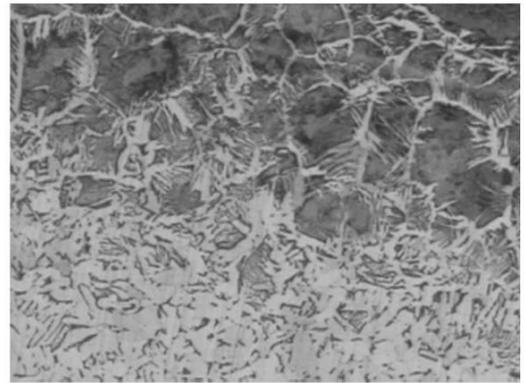
Planche 15 : Micrographies optiques. Nital 2%. Pointe de flèche PM 994.



500 μm

Fig. 1

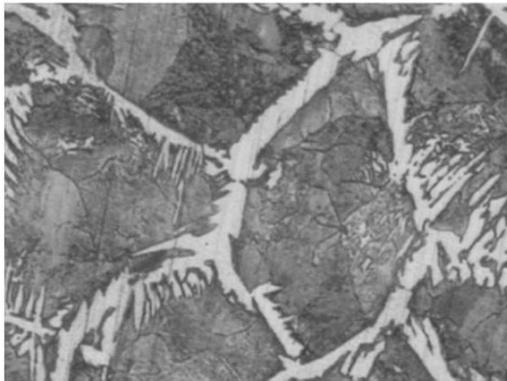
Micrographie optique. Structure ferrito-perlitique au bord de la pièce.



500 μm

Fig. 2

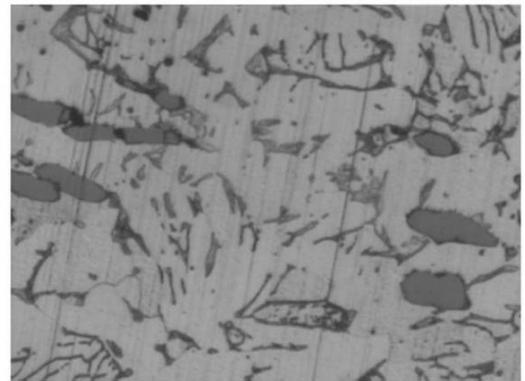
Micrographie optique. Transition entre un domaine ferrito-perlitique et un domaine eutectoïde.



125 μm

Fig. 3

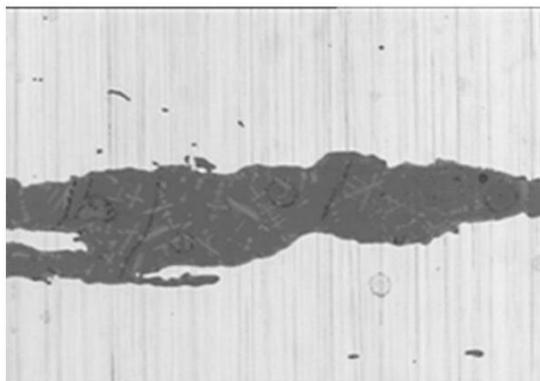
Micrographie optique. Structure de Widmanstätten.



125 μm

Fig. 4

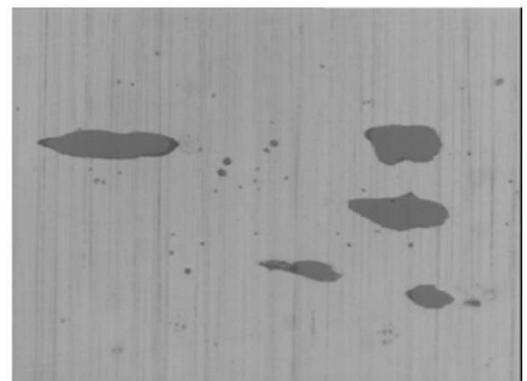
Micrographie optique. Structure ferritique et scories avec wustite coalescée.



125 μm

Fig. 5

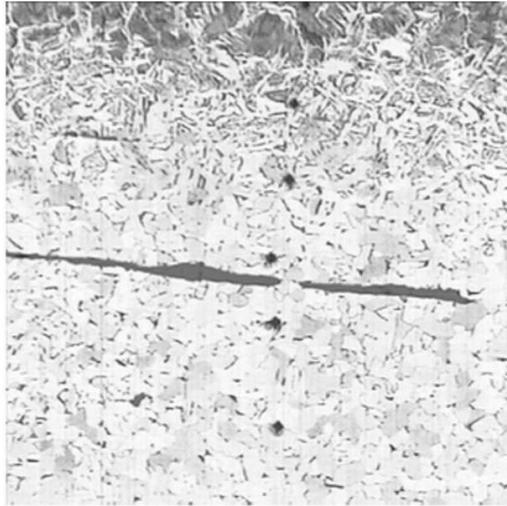
Micrographie optique. Scorie à structure de dendrites de wustite dans une matrice de fayalite.



50 μm

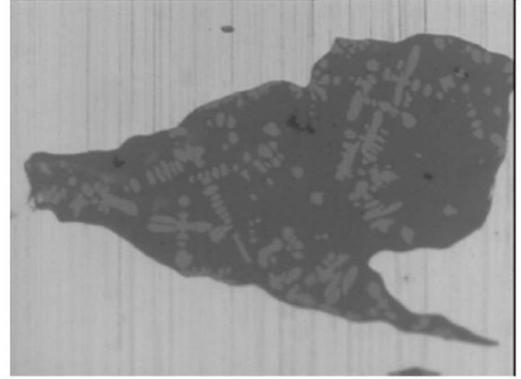
Fig. 6

Micrographie optique. Scories avec wustite coalescée.

Planche 16 : Micrographies optiques. Nital 2%. Pointe de flèche PM 994.

500 μm *Fig. 1*

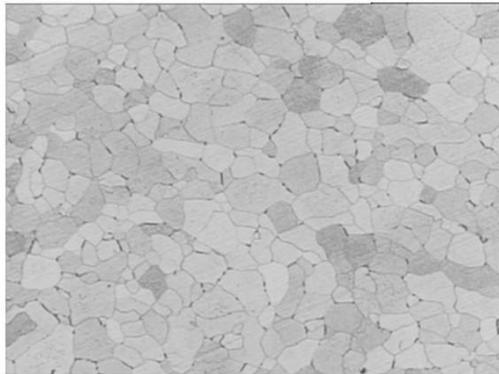
Micrographie optique. Structure ferrito-perlitique au bord de la pièce. Empreintes de microduretés vickers.



50 μm *Fig. 2*

Micrographie optique. Acorie avec dendrites de wustite.

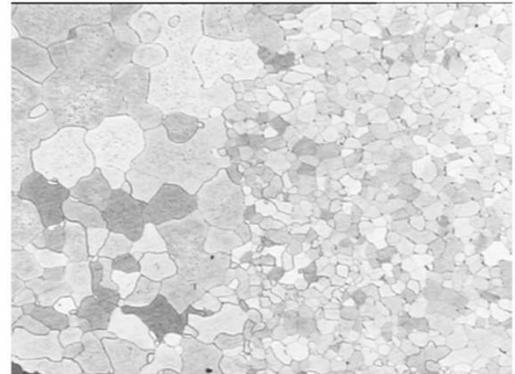
Planche 17 : Micrographies optiques. Nital 2%. Pointe de flèche PM 991.



250 µm

Fig. 1

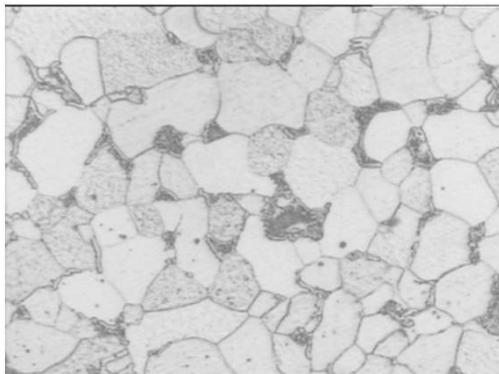
Micrographie optique. Structure ferritique équiaxe avec fine précipitation intergranulaire de cémentite.



500 µm

Fig. 2

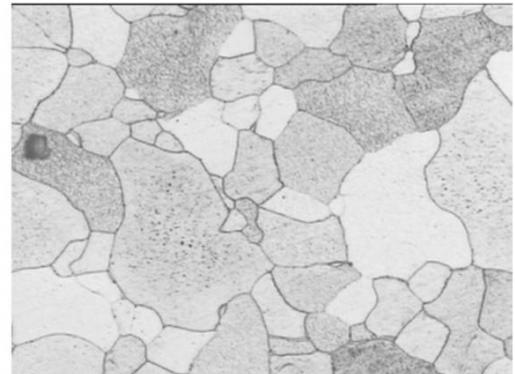
Micrographie optique. Structure ferritique. On observe une zone recristallisée à petits grains après un écouissage local plus fort.



50 µm

Fig. 3

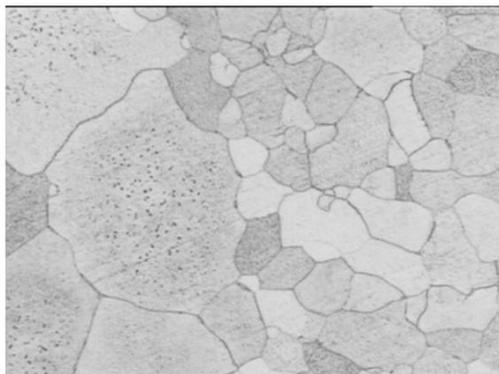
Micrographie optique. Structure ferritique avec carbures et/ou perlite aux joints de grains.



125 µm

Fig. 4

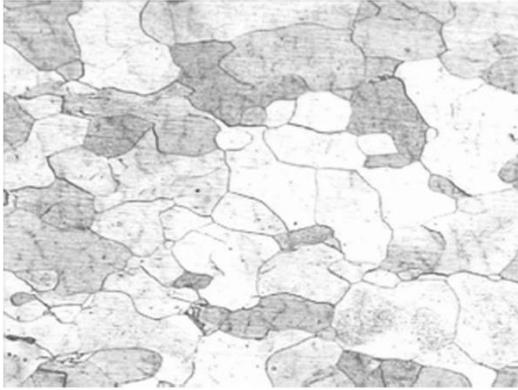
Micrographie optique. Structure ferritique non équiaxe.



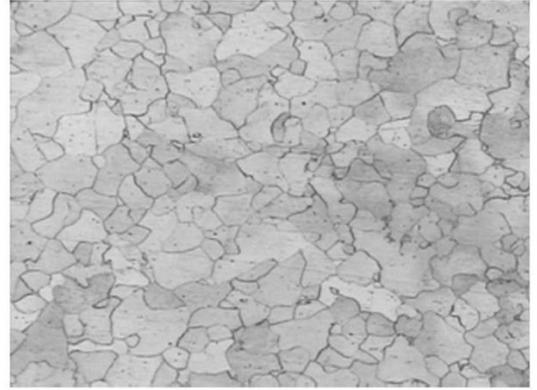
125 µm

Fig. 5

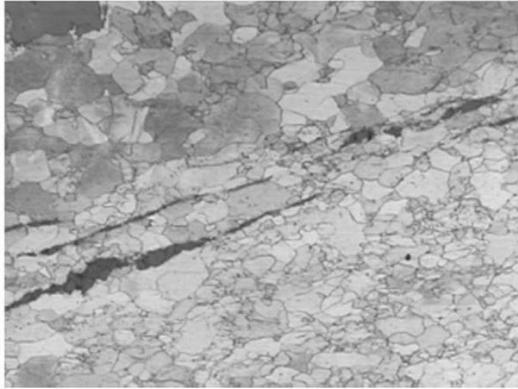
Micrographie optique. Structure ferritique non équiaxe.

Planche 18 : Micrographies optiques. Nital 2%. Pointe de flèche PM 1772.**250 μm****Fig. 1**

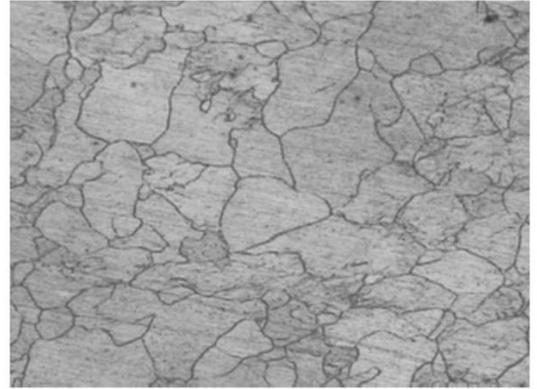
Micrographie optique. Structure ferritique non équiaxe.

**250 μm****Fig. 2**

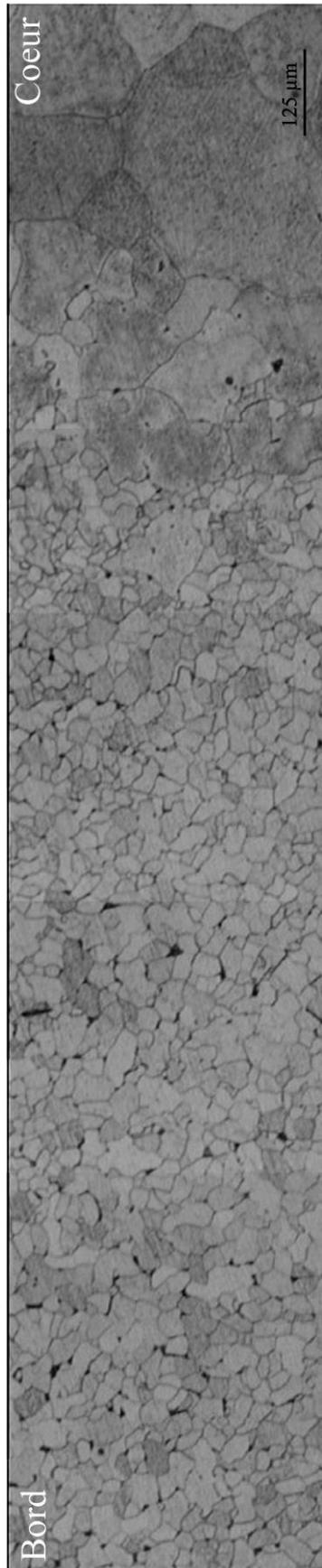
Micrographie optique. Structure ferritique.

**500 μm****Fig. 3**

Micrographie optique. Structure ferritique avec processus de recristallisation au bord de la pièce.

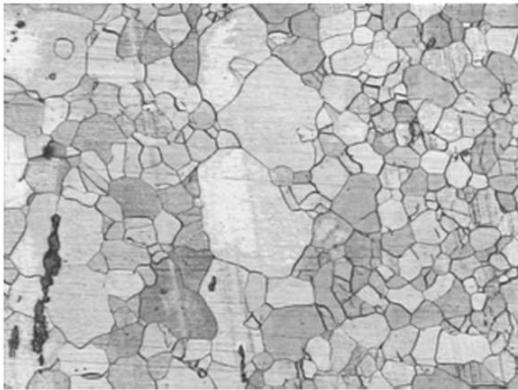
**125 μm****Fig. 4**

Micrographie optique. Structure ferritique.

Planche 19 : Micrographies optiques. Nital 2%. Pointe de flèche PM 886.

Micrographies optiques. Structure ferritique avec écouissage vers le bord de la pointe de flèche.

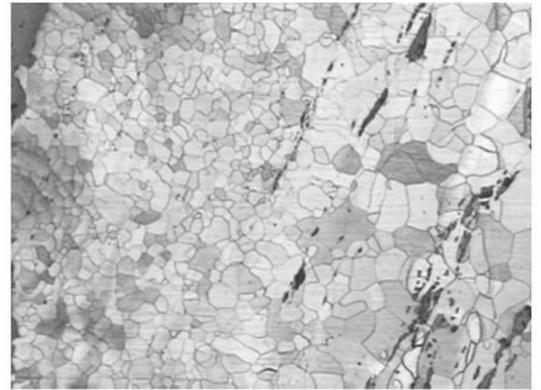
Planche 20 : Micrographies optiques. Nital 2%. Pointe de flèche PM 1769.



250 μm

Fig. 1

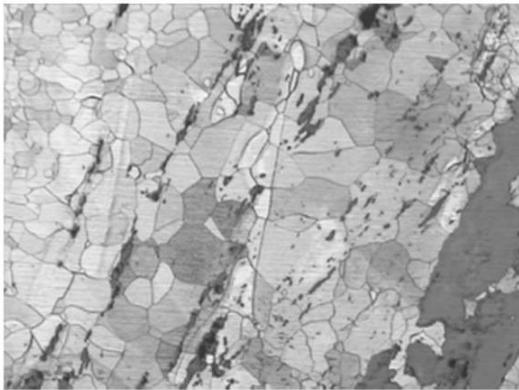
Micrographie optique. Structure ferritique.



500 μm

Fig. 2

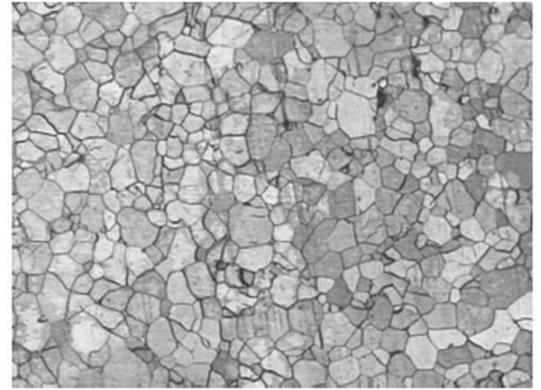
Micrographie optique. Structure ferritique avec recristallisation locale des grains de ferrite.



500 μm

Fig. 3

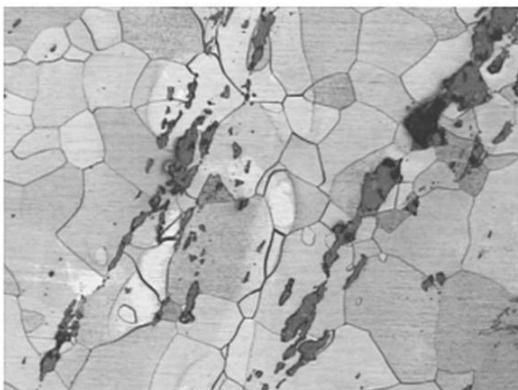
Micrographie optique. Structure ferritique avec recristallisation locale des grains de ferrite.



250 μm

Fig. 4

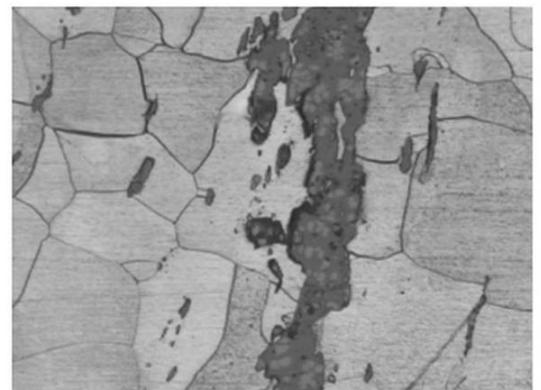
Micrographie optique. Structure ferritique.



250 μm

Fig. 5

Micrographie optique. Alignements de scories.

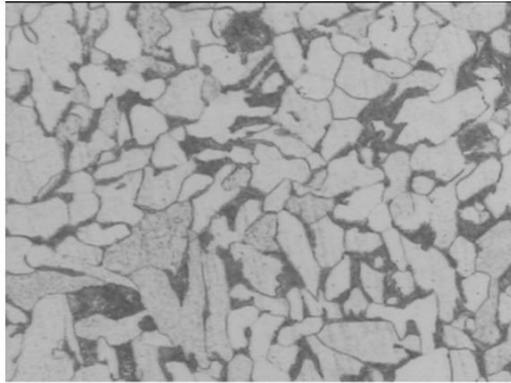


250 μm

Fig. 6

Micrographie optique. Scories avec dendrites de wustite dans une matrice de fayalite.

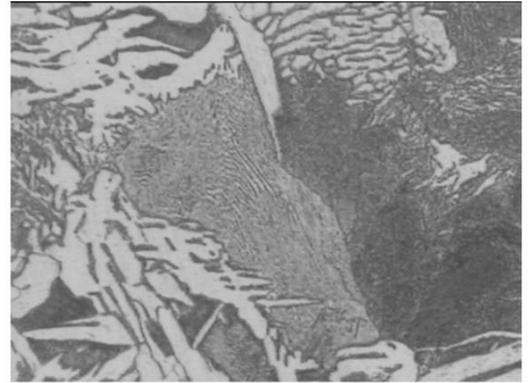
Planche 21 : Micrographies optiques. Nital 2%. Pointe de flèche E 21-101.



50 μ m

Fig. 1

Micrographie optique. Structure ferritique avec carbures aux joints de grains.



50 μ m

Fig. 2

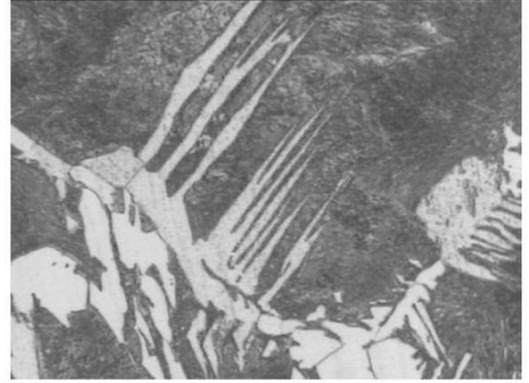
Micrographie optique. Structure ferrite-perlitique.



125 μ m

Fig. 3

Micrographie optique. Structure avec ferrite aciculaire et scorie avec dendrites de wüstite dans une matrice de fayalite.



50 μ m

Fig. 4

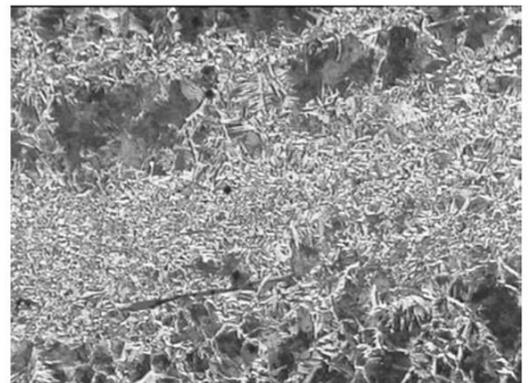
Micrographie optique. Structure de Widmanstätten.



50 μ m

Fig. 5

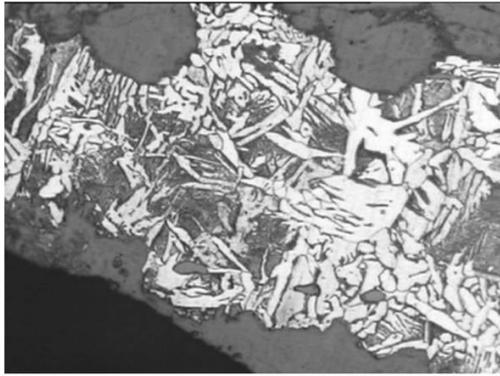
Micrographie optique. Microinclusion de scorie dans le métal avec dendrites de wüstite.



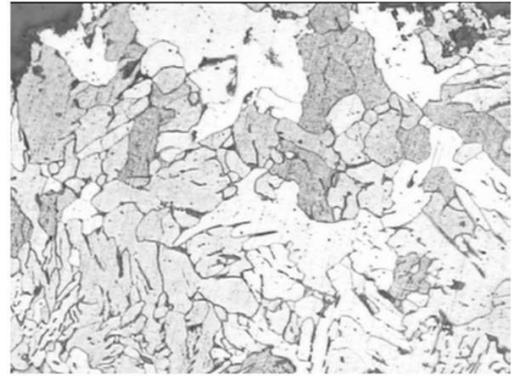
500 μ m

Fig. 6

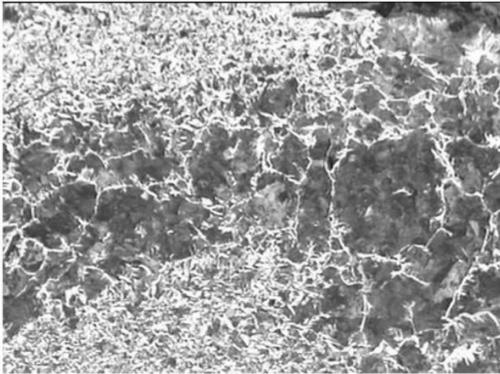
Micrographie optique. Structure de widmanstätten au coeur de la pièce.

Planche 22 : Micrographies optiques. Nital 2%. Pointe de flèche E 21-101.125 μm *Fig. 1*

Micrographie optique. Structure de type de Widmanstätten

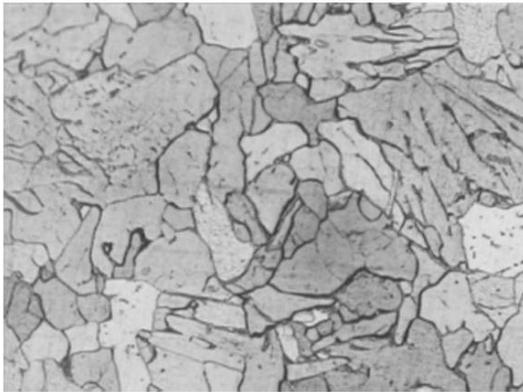
125 μm *Fig. 2*

Micrographie optique. Structure ferritique hors d'équilibre.

500 μm *Fig. 3*

Micrographie optique. Structure ferrito-perlitique.

Planche 23 : Micrographies optiques. Nital 2%. Pointe de flèche E 21-748.



125 μm

Fig. 1

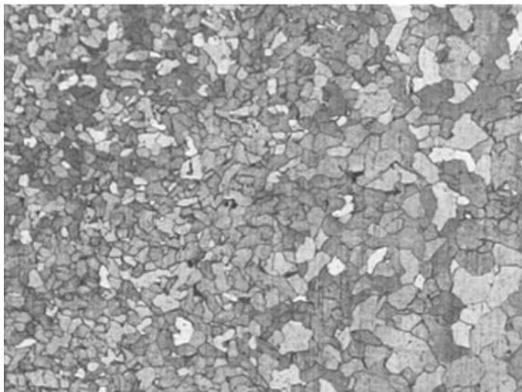
Micrographie optique. Structure ferritique non équiaxe dans une zone déformée par le forgeage.



250 μm

Fig. 2

Micrographie optique. Transition entre le domaine ferritique et eutectoïde.



250 μm

Fig. 3

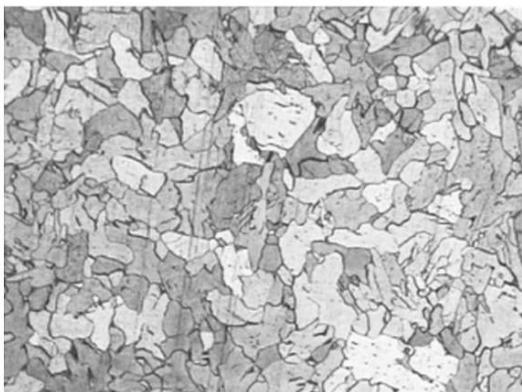
Micrographie optique. Structure ferritique avec recristallisation locale



125 μm

Fig. 4

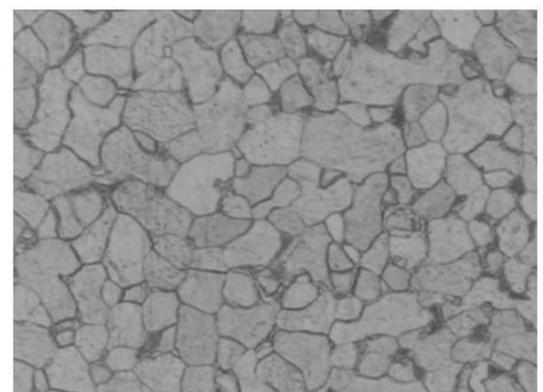
Micrographie optique. Structure de Widmanstätten.



250 μm

Fig. 5

Micrographie optique. Structure ferritique.

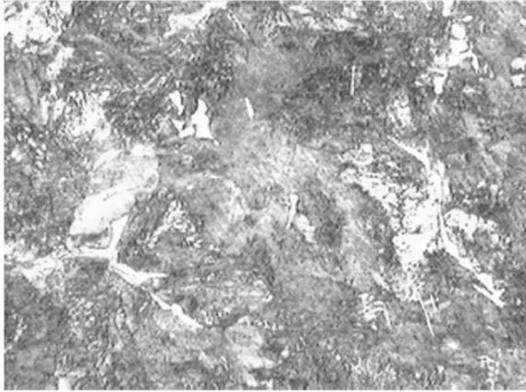


50 μm

Fig. 6

Micrographie optique. Structure ferritique avec précipités de cémentite aux joints de grains.

**Planche 24 : Micrographies optiques. Nital 2%. Fer de trait de catapulte PM 436.
Coupe transversale.**



125 μm

Fig. 1

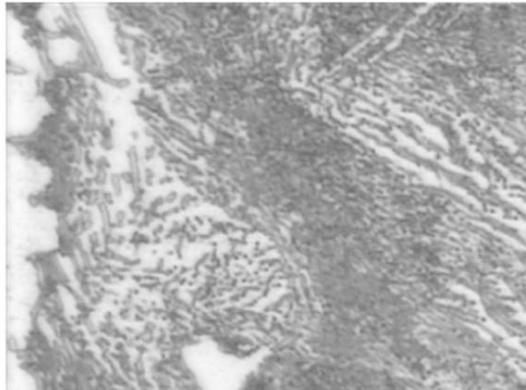
Micrographie optique. Structure martensitique.



125 μm

Fig. 2

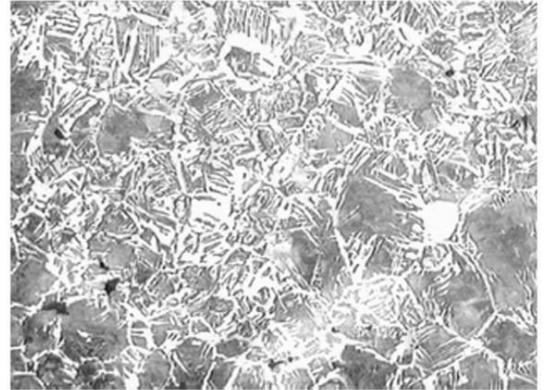
Micrographie optique. Décomposition de la structure ferrito-perlitique.



25 μm

Fig. 3

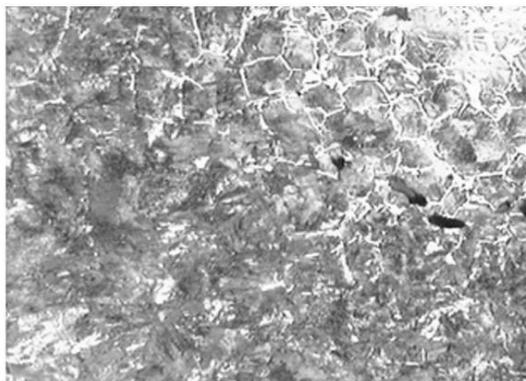
Micrographie optique. Structure ferrito-perlitique.



500 μm

Fig. 4

Micrographie optique. Structure de Widmanstätten.

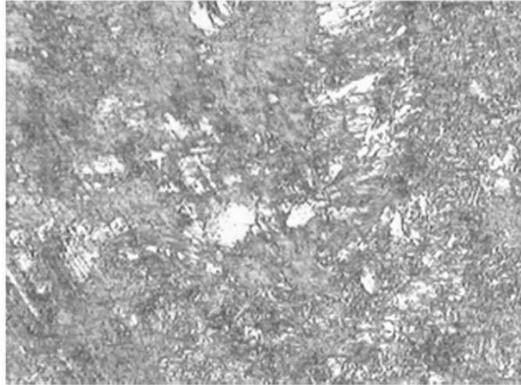


500 μm

Fig. 5

Micrographie optique. Transition entre le domaine hypoeutectoïde et hypereutectoïde.

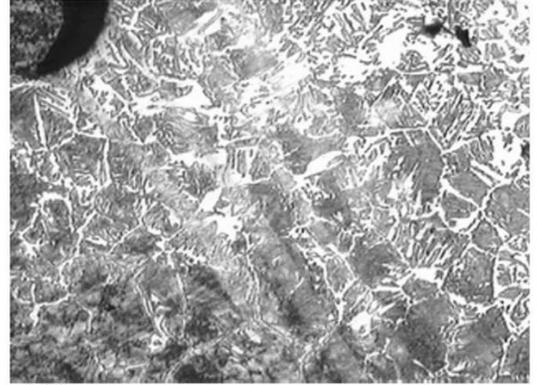
**Planche 25 : Micrographies optiques. Nital 2%. Fer de trait de catapulte PM 436.
Coupe transversale.**



50 μm

Fig. 1

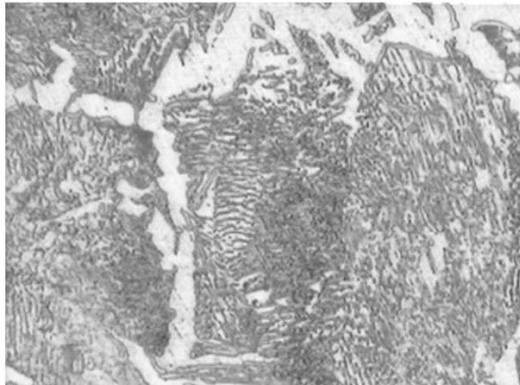
Micrographie optique. Structure de trempe de type bainite.



500 μm

Fig. 2

Micrographie optique. Structure de Widmanstätten.



50 μm

Fig. 3

Micrographie optique. Structure ferrito-perlitique.

**Planche 26 : Micrographies optiques. Nital 2%. Fer de trait de catapulte PM 436.
Coupe longitudinale.**



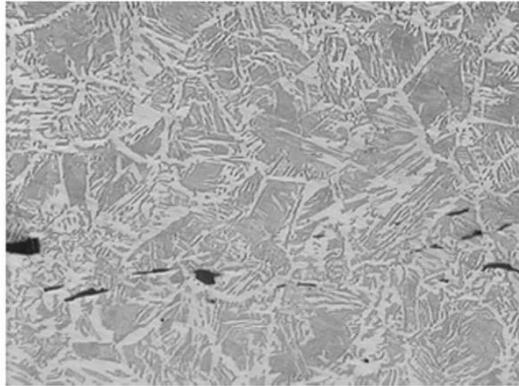
500 μm *Fig. 1*

Micrographie optique. Structure martensitique.



250 μm *Fig. 2*

Micrographie optique. Structure ferrito-perlitique.



500 μm *Fig. 3*

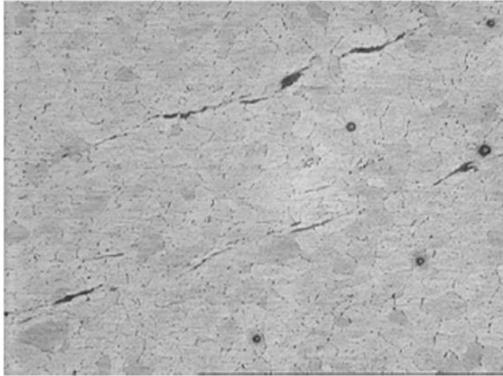
Micrographie optique. Structure de Widmanstätten avec alignements de scories.



50 μm *Fig. 4*

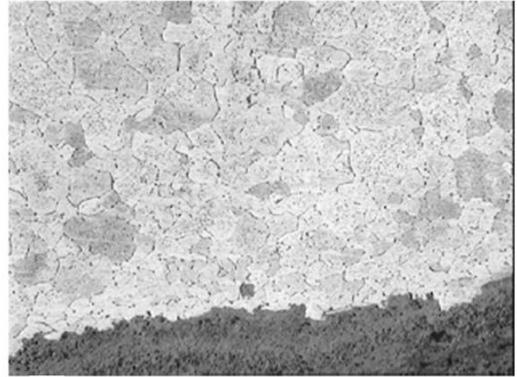
Micrographie optique. Structure de Widmanstätten et structure ferrito-perlitique partiellement dégradée.

Planche 27 : Micrographies optiques. Nital 2%. Pointe de flèche d'Alésia Camp C.



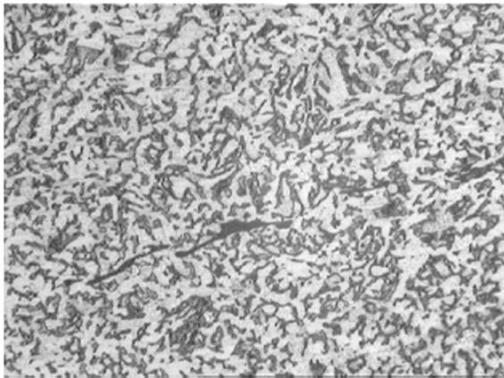
500 µm *Fig. 1*

Micrographie optique. Structure ferritique avec alignements de scories



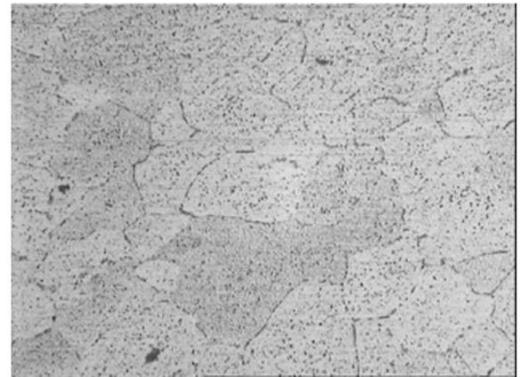
500 µm *Fig. 2*

Micrographie optique. Structure ferritique au bord de l'échantillon.



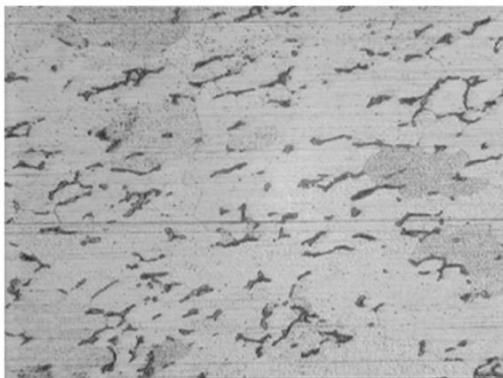
125 µm *Fig. 3*

Micrographie optique. Structure ferrito-perlitique avec scories.



125 µm *Fig. 4*

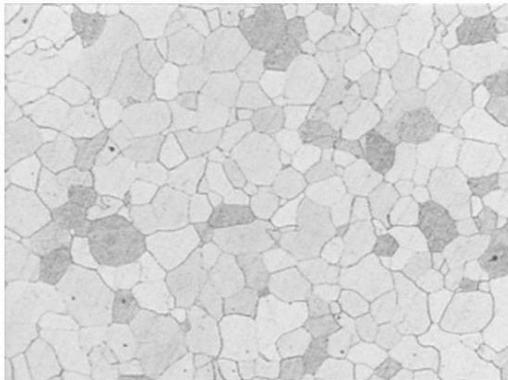
Micrographie optique. Structure ferritique avec précipités de cémentite aux joints de grains.



125 µm *Fig. 5*

Micrographie optique. Structure ferritique avec nombreux carbures aux joints de grains.

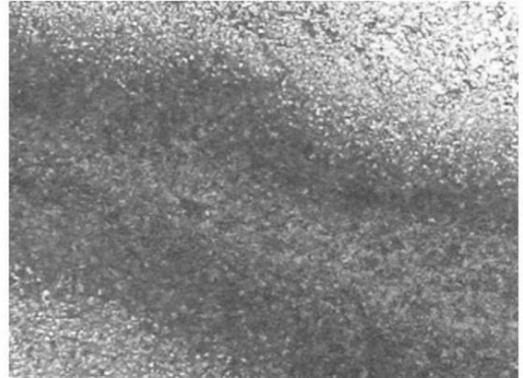
**Planche 28: Micrographies optiques. Nital 2%. Pointe de flèche d'Alésia Camp B.
Coupe longitudinale.**



250 μm

Fig. 1

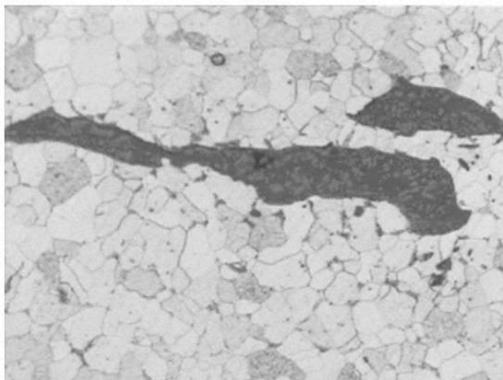
Micrographie optique. Structure ferritique équiaxe, au cœur de l'échantillon.



250 μm

Fig. 2

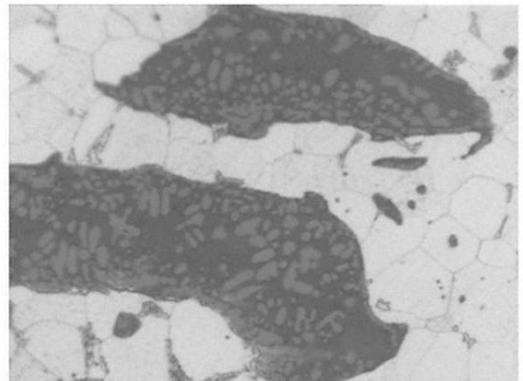
Micrographie optique. Soudure, structure ferrito-perlitique à l'intérieur de la zone de soudage.



250 μm

Fig. 3

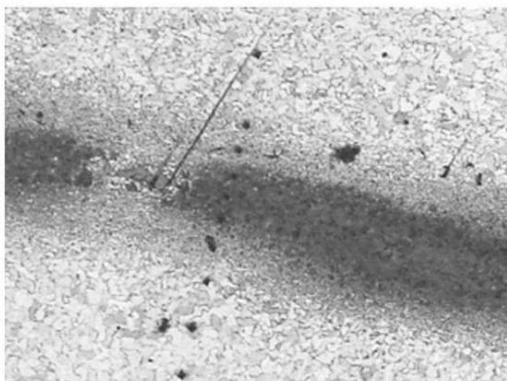
Micrographie optique. Structure ferritique avec précipités de cémentite aux joints de grains. Scorie avec dendrites de wustite



50 μm

Fig. 4

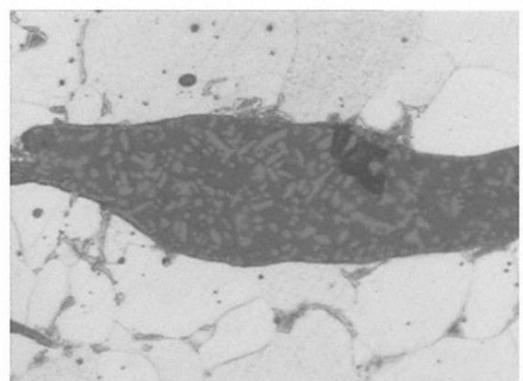
Micrographie optique. Alignement de scorie avec dendrites de wustite.



500 μm

Fig. 5

Micrographie optique. Soudure de la barbelure.



50 μm

Fig. 6

Micrographie optique. Scorie avec dendrites de wustite.

**Planche 29 : Micrographies optiques. Nital 2%. Pointe de flèche d'Alésia Camp B.
Coupe transversale.**

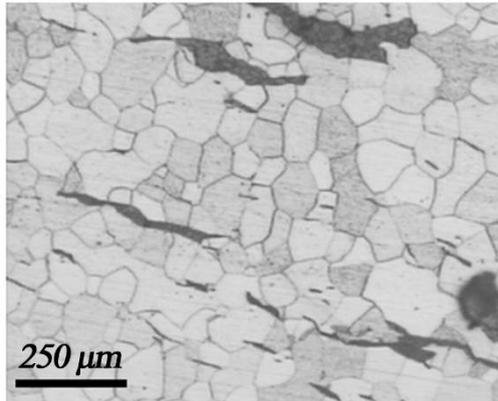


Fig. 1

Micrographie optique. Structure ferritique avec alignements de scories.

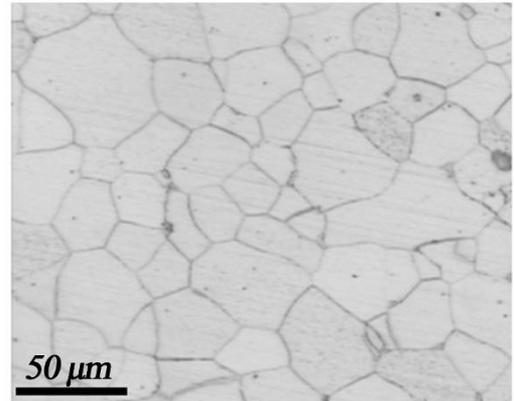


Fig. 2

Micrographie optique. Structure ferritique équiaxe.

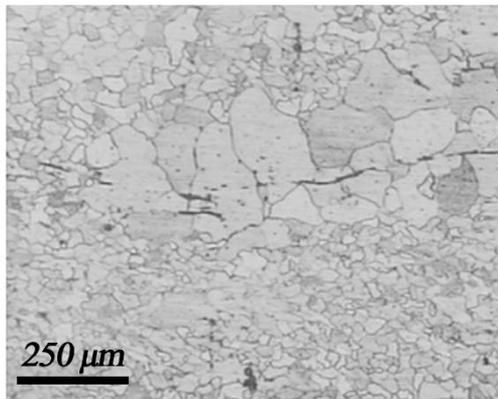


Fig. 3

Micrographie optique. Structure ferritique avec croissance exagérée de certains grains.

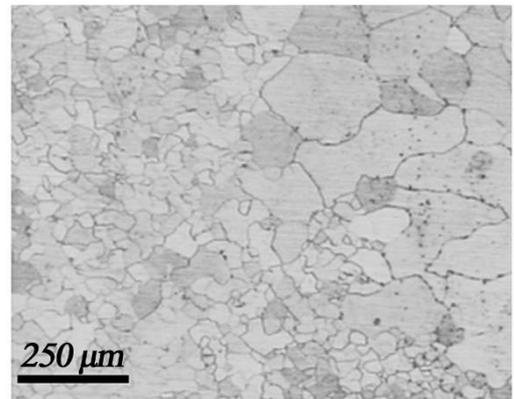


Fig. 4

Micrographie optique. Autre plage d'observation de la structure ferritique avec croissance exagérée de certains grains.

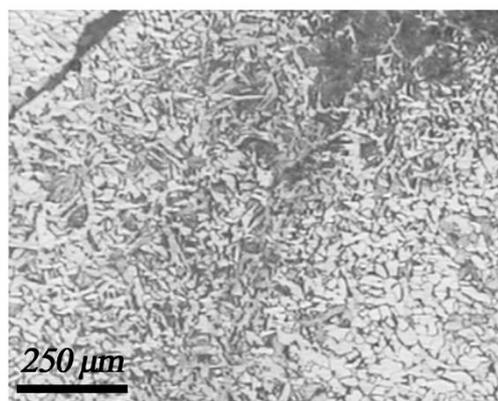


Fig. 5

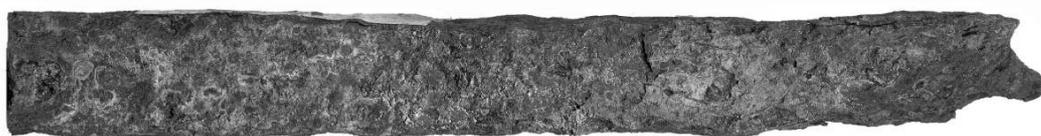
Micrographie optique.
Structure ferrito-perlitique au bord de la pointe de flèche.

Planche 30 : Les barres de fer utilisées pour la restitution de la fabrication des pointes de flèche.

Barres de fer provenant des épaves au large des Saintes-Maries-de-la-Mer



BARRE SM6

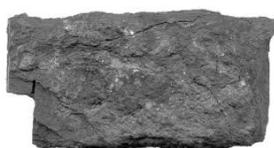


BARRE SM6.2

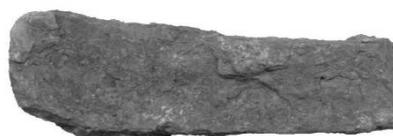


BARRE SM6.3

Barres de fer provenant de Saint-Bertrand-de-Comminges



22.03



34.01

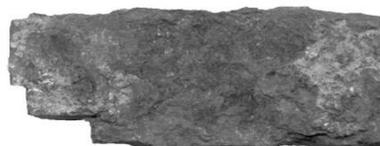


Planche 31 : Les différentes étapes de la fabrication d'une pointe de flèche.



A - Etirement de la barre de fer



B - Poursuite de l'étirement de la barre



C - Etirement de la barre de fer au marteau pilon



D - Façonnage de la douille



E - Enroulage de la douille



F - Enroulage et finition de la douille



G - La douille est séparée de la barre à l'aide du tranchet



H - Fabrication de la tête de la pointe de flèche

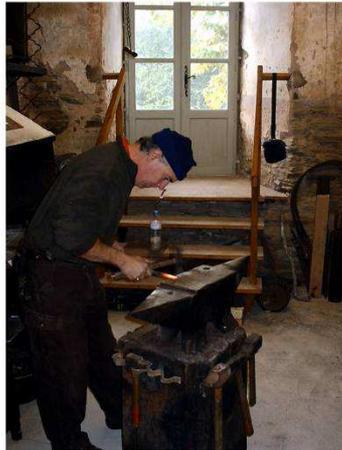


I - Fabrication et finition de la barbelure



J - La pointe de flèche à une barbelure est fabriquée

Planche 32 : La fabrication d'une pointe de flèche d'après un type retrouvé à Alésia.



Pascal Lavaud en train de forger



A - Préparation de la forme de la tête



B - Usinage de la tête. Découpe au burin



C - Travail et façonnage de la tête



D - Pointe de flèche à une aileron (en bas)

Planche 33 : Exemples de quelques étapes de la fabrication d'une pointe de flèche foliacée.



A - Travail de la face A



B - Travail de la face B



C - Pointe de flèche foliacée au final

Planche 34 : Les pointes de flèche obtenues à partir du fer à béton et des barres de fer archéologiques.

Pointes de flèche obtenues à partir de fer à béton



Essai 1



Essai 2



Essai 3

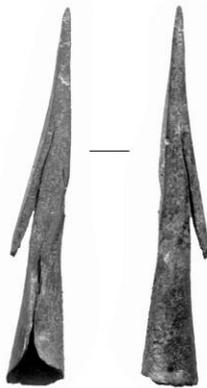


Essai 4

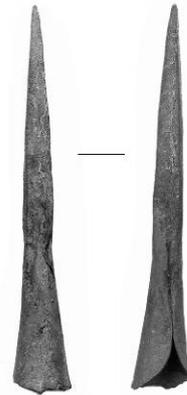


Essai 5

Pointes de flèche obtenues à partir de la barre de fer SM6 des Saintes-Maries-de-la-Mer



Essai 6.1



Essai 6.2

Planche 35 : Les pointes de flèche obtenues à partir des barres de fer archéologiques.

Pointes de flèche obtenues à partir de la barre SM 6-2



6.2.a



6.2.b

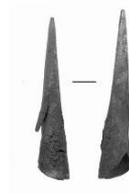
Pointes de flèche obtenues à partir de la barre SM 6-3



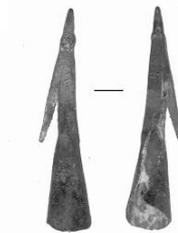
6.3.1



6.3.2



6.3.3



6.3.4



6.3.5

Pointes de flèche obtenues à partir d'une barre de St-Bertrand-de-Comminges



SBC 1



SBC 2

Planche 36 : Différentes pointes de flèche fabriquées avec les barres de fer antiques.



SBC 34.01



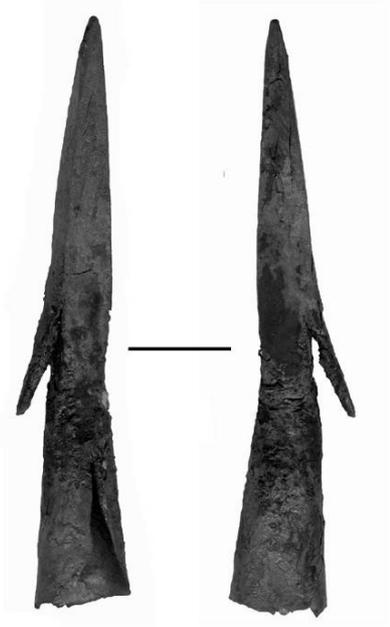
SM6-2 num. 7



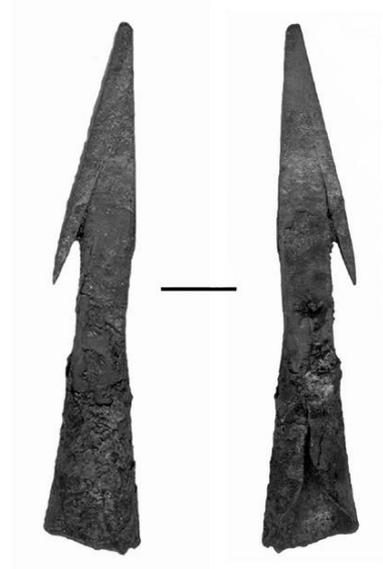
SM6-2 num.5



SM6-2 num.6



SM6-2 num.8



SBC 34.01 num.9



SM6.2 num.1
Essai de fabrication d'une
douille ouverte

Planche 37 : Barre de fer et pointes de flèche réalisées lors de la dernière expérimentation.



A- Barre de fer SM 24-03-02



SM 24-1



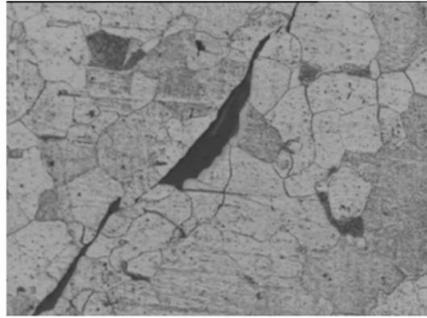
SM 24-2



SM 24-3

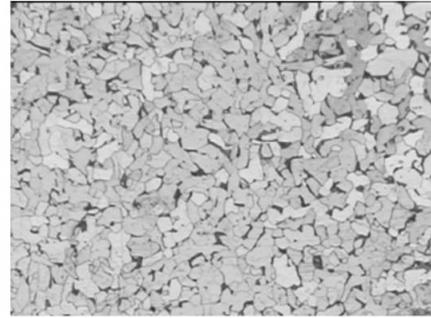
B- Pointes de flèches réalisées à partir de la barre de fer SM24-03-02

Planche 38 : Exemples de micrographies optiques. Nital 2%. Barre de fer SM 6.



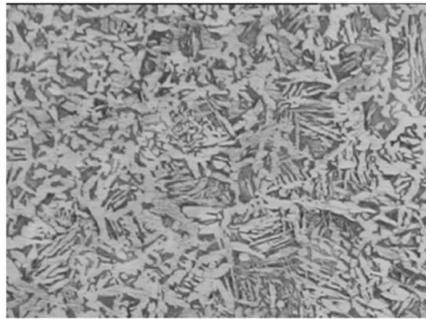
125 μm Fig. 1

Micrographie optique. Structure ferritique



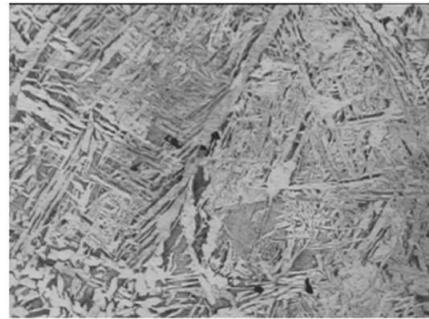
500 μm Fig. 2

Micrographie optique. Structure ferritique



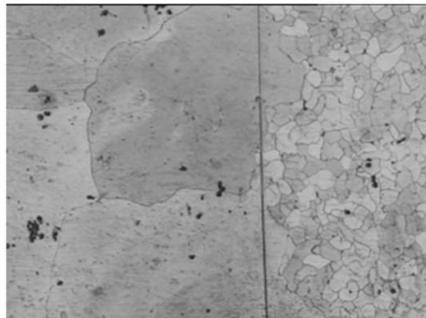
500 μm Fig. 3

Micrographie optique. Structure ferrite-perlitique au bord de la barre



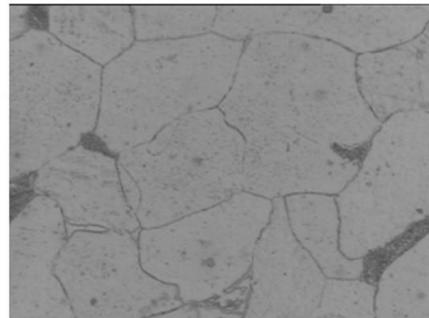
500 μm Fig. 4

Micrographie optique. Structure ferrite-perlitique



500 μm Fig. 5

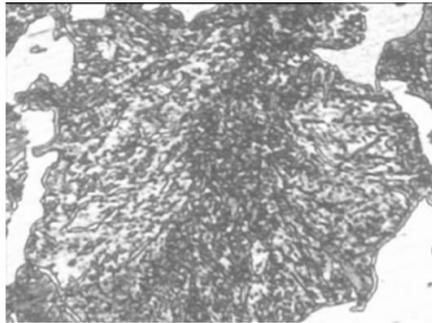
Micrographie optique. Structure ferritique avec croissance exagérée de certains grains



50 μm Fig. 6

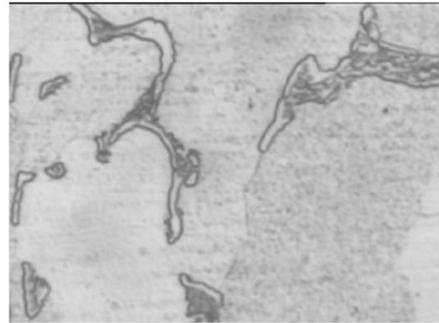
Micrographie optique. Structure ferritique

Planche 39 : Micrographies optiques. Nital 2 %. Barre SBC 34-01-1.



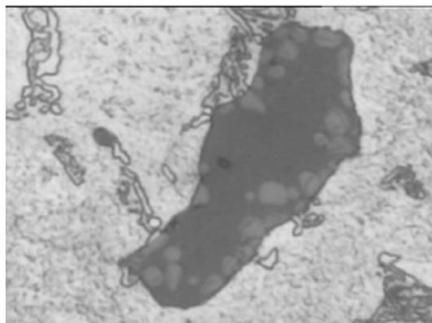
250 μm Fig. 1

Micrographie optique. Structure ferrito-perlitique



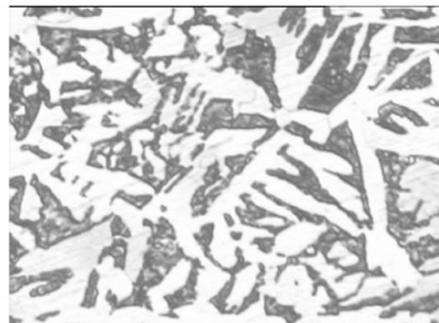
125 μm Fig. 2

Micrographie optique. Structure ferritique avec précipités de cémentite aux joints de grains



125 μm Fig. 3

Micrographie optique. Scorie avec dendrites de wustite FeO



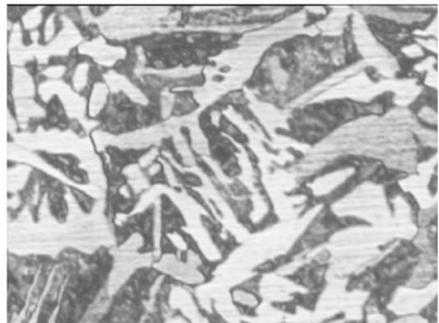
500 μm Fig. 4

Micrographie optique. Structure de Widmanstätten



500 μm Fig. 5

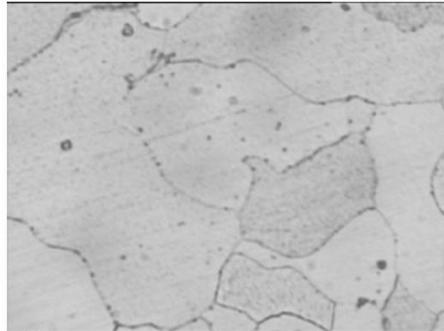
Micrographie optique. Structure ferritique



500 μm Fig. 6

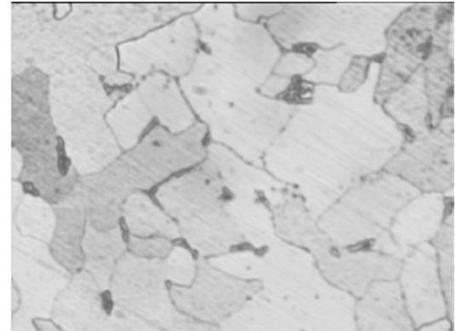
Micrographie optique. Structure de Widmanstätten

Planche 40 : Micrographies optiques. Nital 2%. Barre SBC 34-01-2.



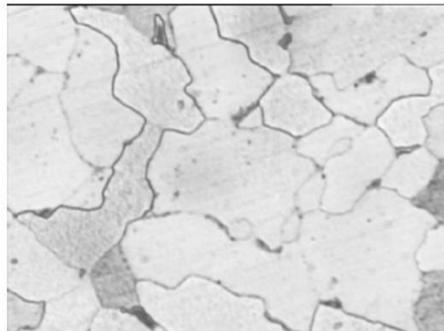
250 μm Fig. 1

Micrographie optique. Structure ferritique



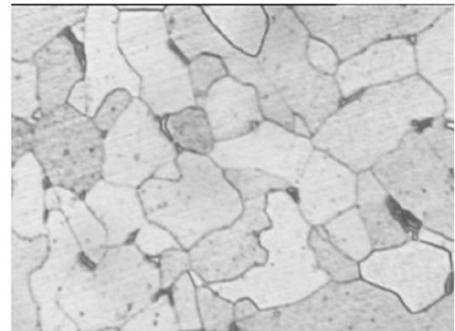
500 μm Fig. 2

Micrographie optique. Structure ferritique avec précipités de cémentite aux joints de grains



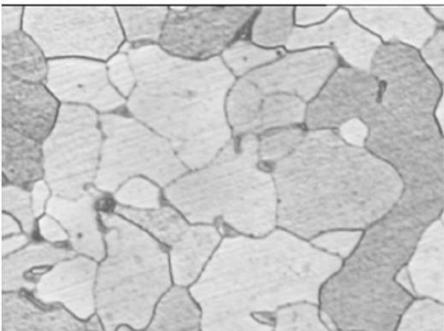
500 μm Fig. 3

Micrographie optique. Structure ferritique



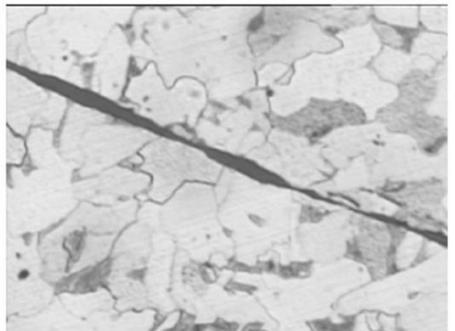
500 μm Fig. 4

Micrographie optique. Structure ferritique



500 μm Fig. 5

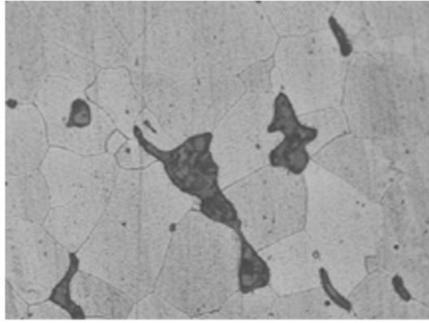
Micrographie optique. Structure ferritique



500 μm Fig. 6

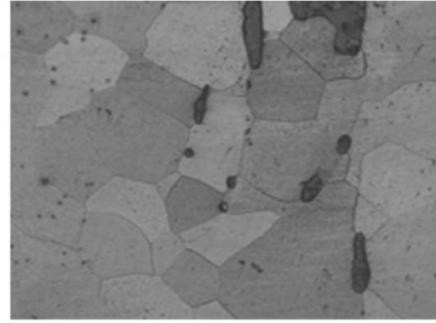
Micrographie optique. Structure ferritique, avec scorie monophasée

Planche 41 : Micrographies optiques. Nital 2%. Barre SM24-03-21.



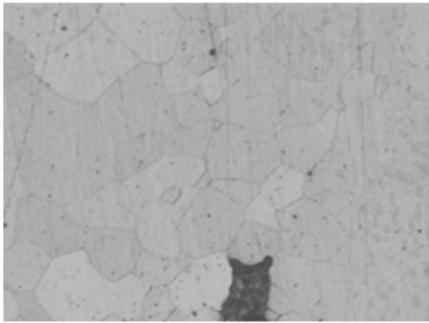
125 μm *Fig. 1*

Micrographie optique. Structure ferritique, avec inclusions de scories FeO



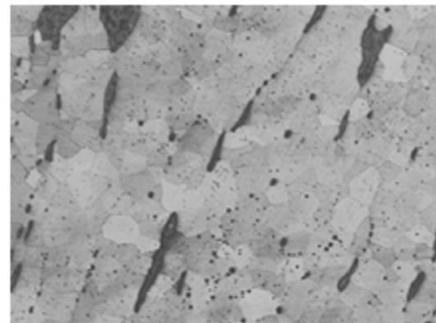
125 μm *Fig. 2*

Micrographie optique. Structure ferritique, équiaxe, avec inclusions de scories FeO



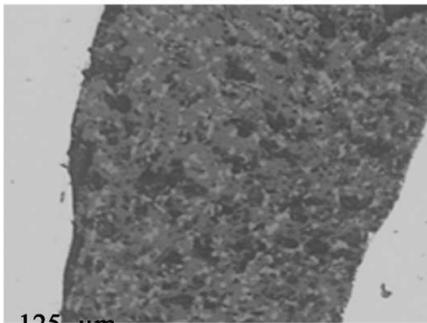
250 μm *Fig. 3*

Micrographie optique. Structure ferritique



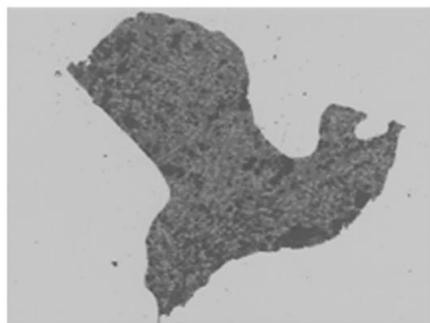
500 μm *Fig. 4*

Micrographie optique. Structure ferritique avec alignements de scories



125 μm *Fig. 5*

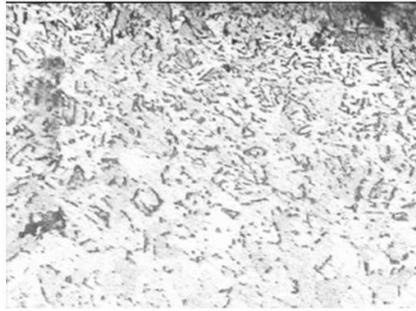
Micrographie optique. Scorie avec dendrites de wustite



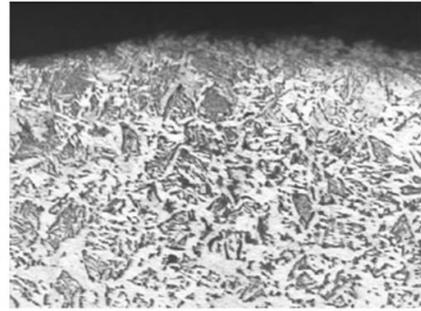
250 μm *Fig. 6*

Micrographie optique. Scorie avec dendrites de wustite FeO

Planche 42 : Exemples de micrographies optiques observées sur la pointe de flèche 6.2a.

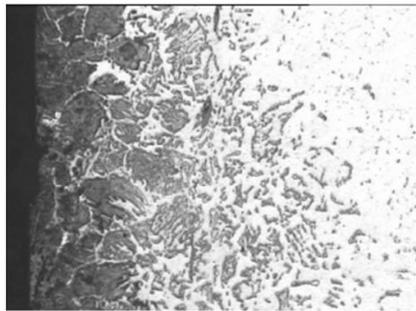


250 μm Fig. 1

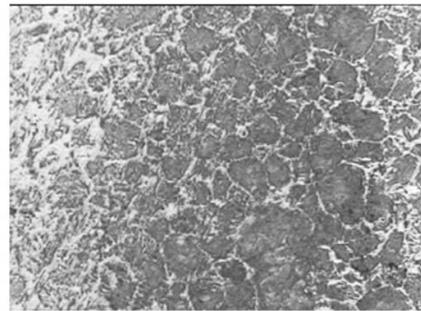


250 μm Fig. 2

Micrographies optiques. Structure de Widmanstätten au bords de la pointe de flèche

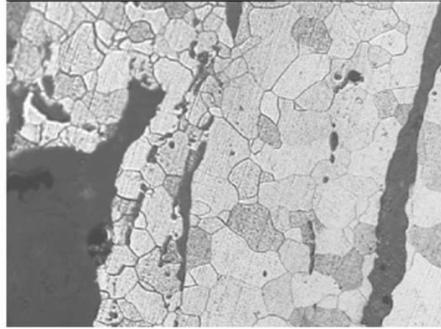


250 μm Fig. 3



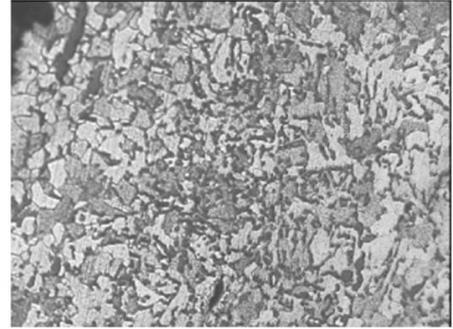
250 μm Fig. 4

Planche 43 : Exemples de micrographies optiques observées sur la pointe de flèche SM6-2 num3.



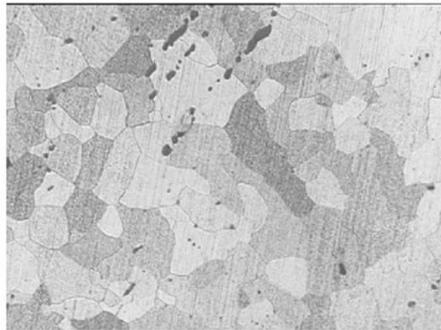
250 μm Fig. 1

Micrographie optique. Structure ferritique



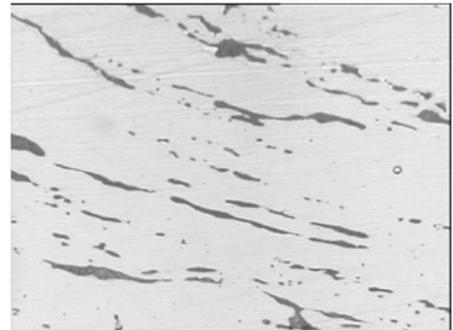
250 μm Fig. 2

Micrographie optique. Structure ferrito-perlitique



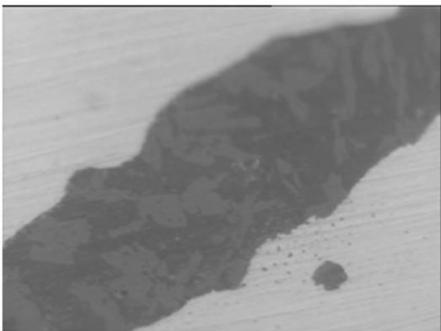
250 μm Fig. 3

Micrographie optique. Structure ferritique



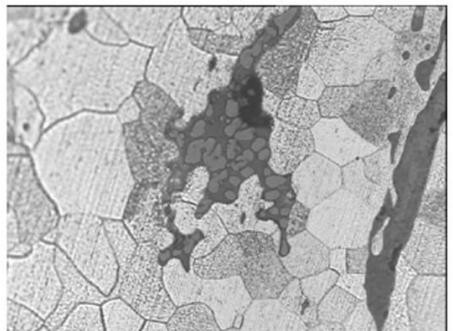
250 μm Fig. 4

Micrographie optique. Alignements de scories.



25 μm Fig. 5

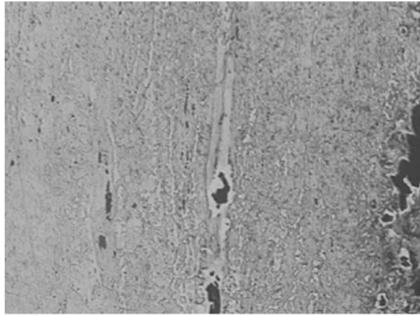
Micrographie optique. Scorie avec dendrites de wustite FeO



125 μm Fig. 6

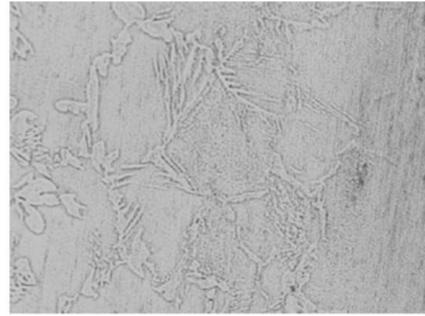
Micrographie optique. Scorie avec dendrites de wustite FeO

Planche 44 : Exemples de micrographies optiques observées sur la pointe de flèche SM24-2.



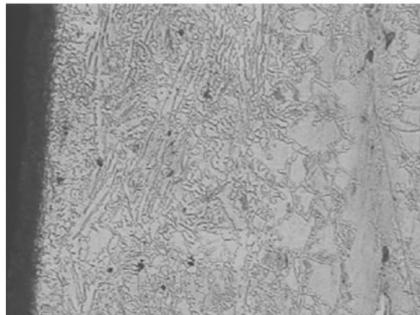
500 μm Fig. 1

Micrographie optique. Structure ferritique, avec liseré blanc matérialisant la soudure



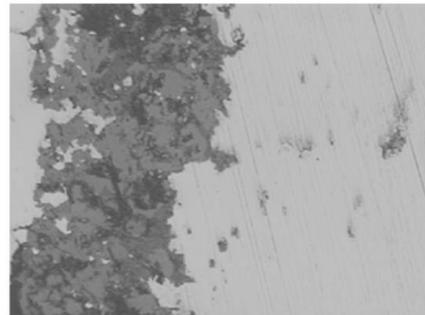
125 μm Fig. 2

Micrographie optique. Structure ferrito-perlitique



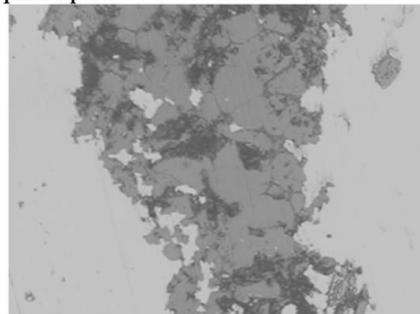
500 μm Fig. 3

Micrographie optique. Structure ferrito-perlitique



50 μm Fig. 4

Micrographie optique. Scorie avec dendrites de wustite FeO



50 μm Fig. 5

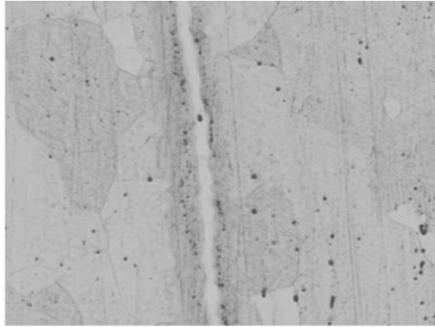
Micrographie optique. Scorie avec dendrites de wustite FeO



500 μm Fig. 6

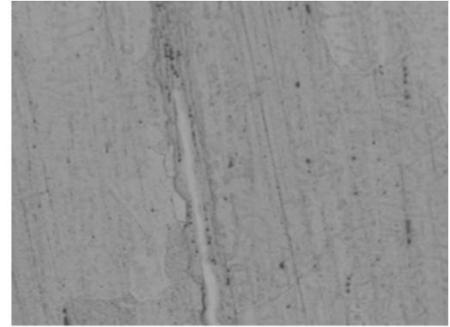
Micrographie optique. Liseré blanc matérialisant la soudure de la barbelure

Planche 45 : Exemples de micrographies optiques observées sur la pointe de flèche SM24-3.



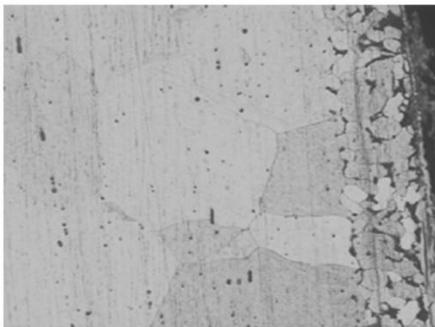
250 μm Fig. 1

Micrographie optique. Structure ferritique, avec liseré blanc matérialisant la soudure



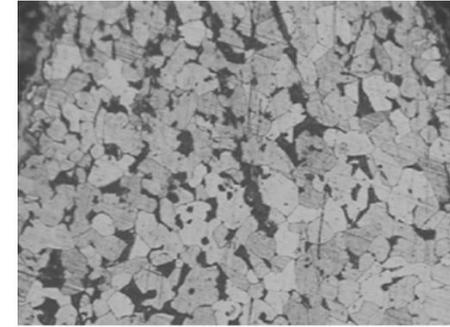
250 μm Fig. 2

Micrographie optique. Structure ferritique, avec liseré blanc matérialisant la soudure



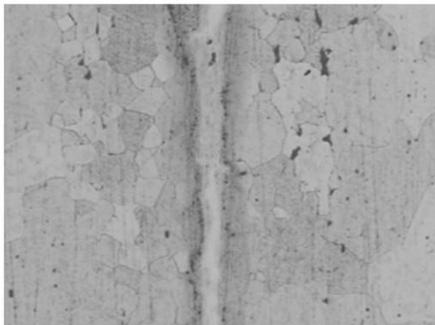
250 μm Fig. 3

Micrographie optique. Structure ferritique



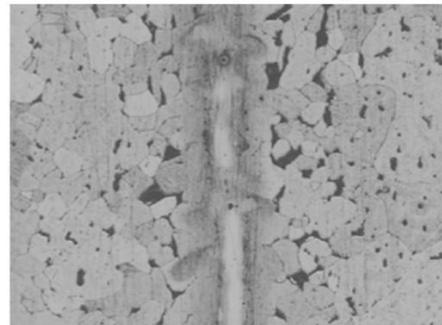
250 μm Fig. 4

Micrographie optique. Structure ferritique avec précipités de cémentite aux joints de grains



250 μm Fig. 5

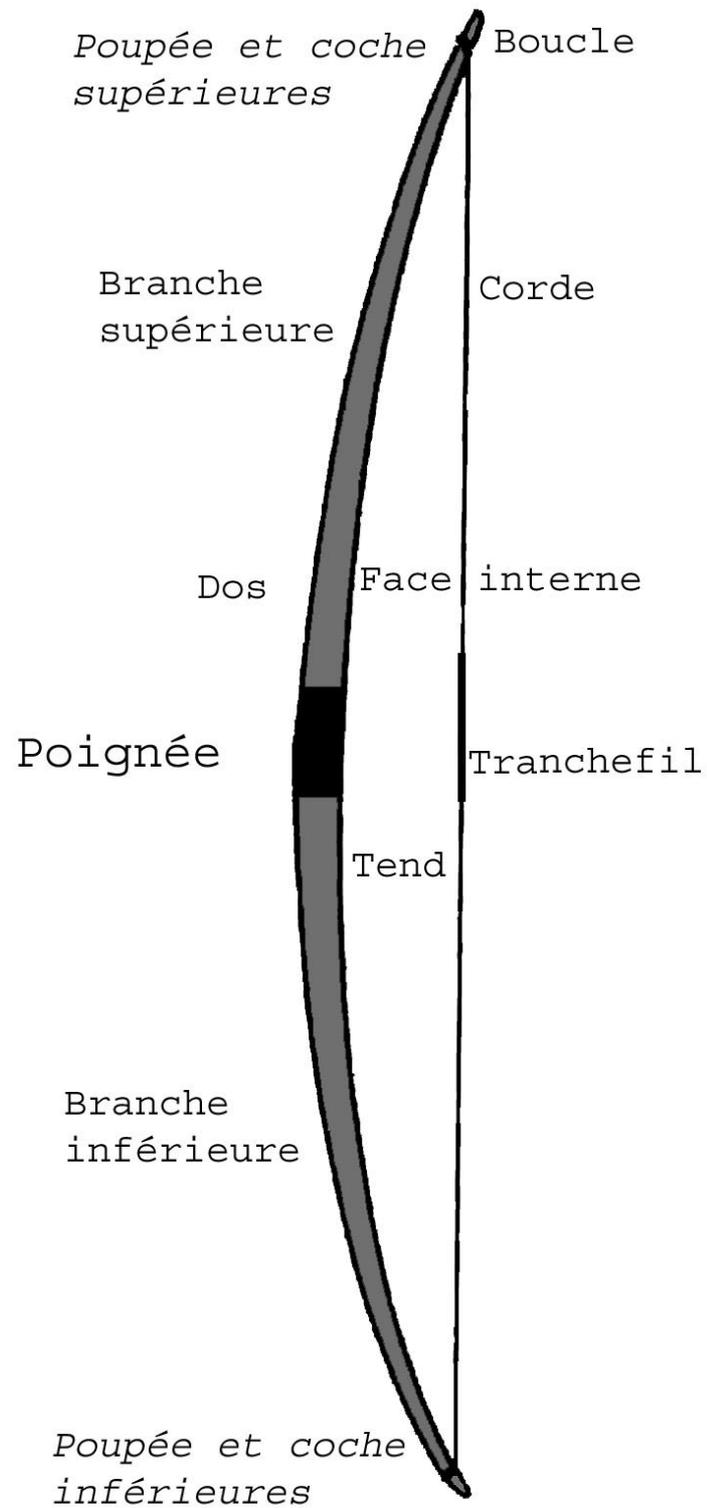
Micrographie optique. Structure ferritique, avec liseré blanc matérialisant la soudure



250 μm Fig. 6

Micrographie optique. Structure ferritique, avec liseré blanc matérialisant la soudure

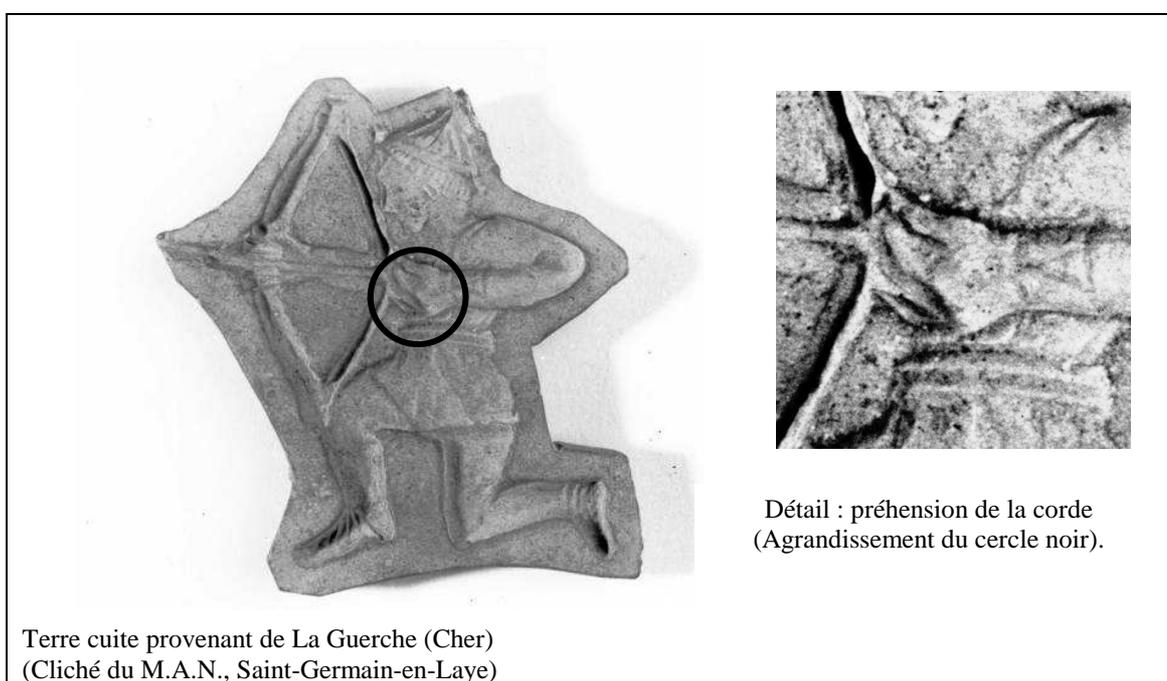
ANNEXES

ANNEXE 1 TERMINOLOGIE SIMPLIFIEE DE L'ARC.

ANNEXE 2 LES DIFFERENTS MODES DE PREHENSION DE LA CORDE DE L'ARC.

La technique du tir à l'arc passe par plusieurs opérations successives : il faut tout d'abord **bander** l'arc, c'est-à-dire relier les deux extrémités de l'arc par la corde. Cette opération réalisée, nous pouvons armer l'arc. La seconde opération consiste à **tendre** l'arc en amenant la corde vers soi. La difficulté qui règne dans cette action c'est qu'il faut tirer sur la corde en même temps qu'il faut maintenir le talon de la flèche, fixée sur la corde par l'encoche. Pour ce faire, il existe quatre méthodes de **préhension** : la primaire, la secondaire, la tertiaire et celle dite « méditerranéenne ».

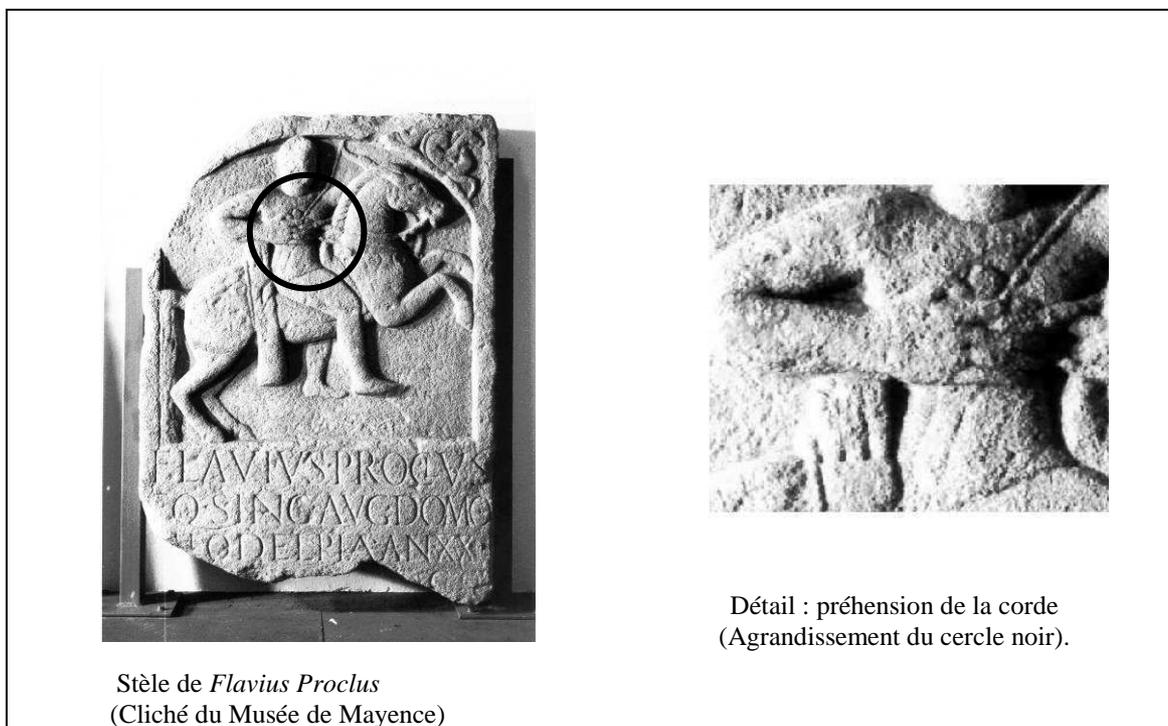
- **Méthode primaire** : Elle consiste à serrer le talon de la flèche par le pouce et l'index qui sont repliés sur la corde.



Sur l'archer de La Guerche nous distinguons une méthode de préhension de la corde de l'arc. Cette dernière peut être assimilée à la méthode de type primaire. Le talon de la flèche est maintenu par le pouce et l'index. Cette méthode se fait instinctivement. A noter que l'archer ici, à la différence de l'archer sur la stèle de Maris, tient l'arc de la main droite, alors que Maris le tient de la main gauche.

- **Méthode secondaire** : Elle se rapproche de la primaire mais le majeur et l'annulaire servent à tendre la corde.
- **Méthode tertiaire** : Pratiquement identique à la secondaire mais ici seul le majeur est sur la corde. Cette méthode et les précédentes sont les plus faciles d'utilisation mais elles ne permettent pas de tendre un arc puissant. Le tir en est aussi peu précis.

- **Méthode méditerranéenne** : Cette façon de procéder demande une technicité, une pratique et une maîtrise du tir à l'arc de haut niveau. Ici la corde est tirée à la fois par l'index, le majeur et l'annulaire. Le talon de la flèche étant maintenu par l'index et le majeur. Cette méthode était la plus répandue dans les pays autour du bassin méditerranéen, d'où son nom. Elle est, encore de nos jours, utilisée par les archers.



La méthode méditerranéenne permet une meilleure stabilité de l'arc et donne un lâcher de flèche beaucoup plus souple et doux. Cette position des doigts sur la corde se distingue assez bien sur la stèle de Flavius Proclus. En effet, au-dessus de l'inscription est représenté un archer à cheval tirant à l'arc. L'agrandissement d'un détail de cette stèle montre la position des doigts sur la corde de l'arc adoptée par l'archer.

- Enfin, il existe une **cinquième méthode** de préhension, appelée « décoche mongole ». Elle utilise le pouce replié pour maintenir la corde. La flèche étant simplement retenue par le pli du pouce qui est tenu fermé par l'index. Dans cette méthode l'archer utilise une protection annulaire entourant le pouce. Seul le pouce ici supporte le poids de la corde.

ANNEXE 3 INVENTAIRE DES RENFORTS D'ARCS

Classification par pays

N°	Pays	Lieu de découverte	Datation	Exemplaires	Lieu de conservation	Bibliographie
1	Gde-Bretagne	Bar Hill Dumbartonshire	Seconde moitié su II° s.	6	Hunterian Museum, Université de Glasgow	MacDonald, <i>The roman fort on the Bar hill</i> , 1906. H. Russel Robinson, <i>What the soldiers wore on Hadrian's wall</i> , 1976.
2	Gde-Bretagne	Caerlon Monmouthshire	Milieu IV° s.	plusieurs	-	E. Nash Williams, <i>The roman legionary fortresat Caerlon in Monmouthshire, Report on the excavations out in the Prygs Field</i> , 1927-9, part II, Cardiff, 1932, p. 50.
3	Gde-Bretagne	Corbridge Northumberland	-	plusieurs	Musée de Corbridge	?
4	Gde-Bretagne	Silchester Hampshire	-	-	-	G.C. Boon, <i>Roman Silchester</i> , 1957 p. 89
5	Gde-Bretagne	Vindolanda	Claude-Hadrien	-	-	R. Birley, <i>Vindolanda, a roman frontier post on Hadrian's wall</i> , Londres, 1977.
6	Gde-Bretagne	Waddon Hill Dorset	-	-	-	G. Webster dans <i>Proc. Dorset Natural, Historical and Archaeological Society</i> , 86, 1965, p.146.
7	France	Seltz	-	-	-	Stade, 1933, p. 113
8	France	Strasbourg	-	-	Musée archéologique de Strasbourg	?
9	France	Lyon	-	-	-	Jean-Claude Béal, Martine Genin, <i>Art et Archéologie dans l'Ain et Rhône-Alpes</i> , n°1,1985.
10	Suisse	Vindonissa Windisch	45-100	-	Musée archéologique de Vindonissa	
11	Suisse	Zurich Camp de Zurich Linderhof	?	-	Cons. Au Landesmuseum de Zurich	-
12	Autriche	Carnuntum	Fin du IV° s.	32 frag.	Museum Carnuntum à Deusch Altenburg	Werner, 1932.
13	Autriche	Vienne	1 ^{ère} moitié du V° s.	-	Römisches Museum de Vienne	Werner, 1932, p.48 et 58
14	Hongrie	Intercisa	1 ^{ère} moitié du V° s.	17 frag.	-	A Salomon, Csontmübely Intercisaban (un atelier

						d'osserie à Intercisa), <i>Archeologia Ertesito</i> , Budapest, 1976, CIII, p.207-15
15	Hongrie	Sites avars	-	-	-	K.C. von Sebestyen, Rätselhefte Beinplatten in dem Gräbern der Völkerwanderungszeit, <i>Dolgozatok</i> , 6, 1930, p. 178-204
16	Russie	Herzog Grande Caramanie	Bas- Empire	-	-	Werner, 1932, p. 41
17	Russie	Nizni Baskuncak Basse volga	III° -IV°	-	-	Werner, 1932, p. 36.
18	Russie	Pokrovsk	Fin IV°-V°	-	-	Werner, 1932, p. 44 sq.
19	Russie	Seelmann	Fin IV°-V°	-	-	Werner, 1932, p. 44sq.
20	Allemagne	Heddernheim	Vespasien- fin II° s.	-	-	U. Fischer, <i>Grabungen im römischen Steinkastell von Heddernheim</i> , 1957-59, Francfort-s/ Main, 1973, n°4, p. 141.
21	Allemagne	Mayence	I° s.	-	Museum de Mayence	H. Klumbach, Gerätgriff aus Hirschgeweih von Mainzer Legionslager, <i>JRGZM</i> , 1971, p. 232.
22	Allemagne	Mayence	III° s.	1	Museum de Mayence	H. Klumbach et U. Moortgat-Correns, Orientalisches Rollsiegel vom Mainzer Legions, <i>Germania</i> , 46, 1968, p.37.
23	Allemagne	Mayence	-	2	Museum de Mayence	G. Behrens, dans <i>Mainzer Zeitschrift</i> , 8/9, 1913-4, p. 72.
24	Allemagne	Oberaden	Camp Augustéen légionnaire	-	Musée de Dortmund	Stade, 1933, p. 114.
25	Allemagne	Osterburken	II° s.- milieu du III°s.	-	Museum Schwäbisch- Hall	H. Zurn, Katalog Schwäbisch-Hall, 1965, p. 44.
26	Allemagne	Risstissen	I° s.	2	-	G. Ulbert, <i>Das Donau- Kastell Risstissen</i> , Stuttgart, 1970, n° 255- 56, p.35.
27	Allemagne	Stocktadt	-	2	-	Stade, 1933.
28	Allemagne	Straubing	-	-	-	N. Walke, Das Römische Donaukastell Straubing-Sorviodurum, Berlin, 1965.
29	Allemagne	Zugmantel	-	-	-	Stade dans Eckinger, 1933, note 1.

ANNEXE 4 INVENTAIRE DES DECOUVERTES DE POINTES DE FLECHE EN FER EN FRANCE

(par lieux de découverte)

(?) : doute sur l'identification en tant que pointe de flèche.

≈ : environ

Localité	Département	Type de site	Datation	Nbr. de flèches	Sources bibliographiques.
Mont Lassois. Vix	Côte-d'Or	Habitat fortifié	Âge du fer	3	Chaume, B., <i>Vix et son territoire à l'Âge du fer. Fouilles du mont Lassois et environnement du site princier</i> , Ed. M. Mergoïl, 2001, p.552, Pl. 64.
Quennes	Yonne	<i>Tumulus</i>	II ^{ème} âge du fer	3	Non publiée
Soissons (Pommiers)	Aisne	<i>Oppidum</i>	La Tène III	-	A. Duval, « Les flèches d'Alésia », <i>Ant. Nat.</i> 2, 1970.
St-Pierre-en-Châtre (Vieux-Moulin)	Oise	<i>Oppidum</i>	La Tène III	16	<i>Idem</i>
Essey-lès-Nancy (Sté Geneviève)	Meurthe et Moselle	<i>Oppidum</i>	La Tène III	-	J. Berpré, l' <i>oppidum</i> de Sainte Geneviève, fouilles de 1909, <i>Mém. Soc. Arch. Lorraine</i> , 1910.
Bois-Durieu	Rhône	Habitat	La Tène III	≈ 100	Fustier, P, <i>Gallia</i> 16, 1958.
St-Dié/Hurbache (La Bure)	Vosges	<i>Castellum</i>	La Tène II/III	-	Tronquart, G., Camp celtique de la Bure, <i>B.S. PH. Vosgienne</i> , t.68 à85, 1965-1982.
Etival-Clairefontaine (La Pierre d'Appel)	Vosges	<i>Castellum</i>	La Tène III	3	Deyber, A., L'habitat fortifié de « La Pierre d'Appel », <i>Gallia</i> 42, 1984, I, p. 211, fig. 26.
Ollioules (La Courtine)	Var	<i>Oppidum</i>	La Tène III	-	-
Isse	Yonne	Près d'un <i>Tumulus</i>	La Tène III	1	Non publiée
Chatillon/Seine Tremblois	Côte-d'Or	Sanctuaire	La Tène III	2	-

Boirolles	Meuse	<i>Oppidum</i>	La Tène III	-	Werly, M., « Notice sur l' <i>oppidum</i> de Boirolles », <i>Soc. Ant. de France</i> , 1877, p.289.
Gournay/Aronde	Oise	Sanctuaire	La Tène	8 à 12	Brunaux, Meniel, Rapin, « Un sanctuaire gaulois », <i>Gallia</i> 38, 1980.
Villey le Sec	Meurthe-et-Moselle	Inconnu	La Tène finale	1	Non publiée.
Roanne	La Loire	<i>Oppidum</i>	II ^{ème} s.	1	Feugère, « Equipement militaire romain », <i>Cah. Arch. de la Loire</i> , 3, 1983.
Entremont	Bouches-du-Rhône	Habitat	II ^{ème} - I ^{er} s. av. J.-C.	2 (?)	Feugère, M., « L'équipement militaire d'époque républicaine en Gaule », <i>J.R.M.E.S.</i> , Vol. 5, 1994, p. 3-23.
Alise-Ste-Reine (<i>Alésia</i>)	Côte d'Or	<i>Oppidum</i>	I ^{er} s. av. J.-C.	146	Reddé, M., Von Schnurbein, <i>Alésia</i> , vol 2.
Plateau de Merdogne (<i>Gergovia</i>)	Puy-de-Dôme	<i>Oppidum</i>	I ^{er} s. av. J.-C.	6	A. Duval, <i>op.cit.</i>
La Cloche Les Pennes-Mirabeau	Bouches-du-Rhône	<i>Oppidum</i>	I ^{er} s. av. J.-C.	2	<i>D.A.M.</i> 16, 1993.
Luzech	Lot	<i>Oppidum</i>	I ^{er} s. av. J.-C.	-	Viré, « Les fouilles proto-historiques de Luzech », <i>B.S.P.F.</i> , t.X, 1913, fig. 1, p.700/
Ribemont sur Ancre ¹	Somme		I ^{er} s. av. J.-C.	4	Pourrier, Marie, mémoire de maîtrise
Chassenard	Allier	Tombe	I ^{er} s. ap. J.-C.	1	Masque de fer, 1991-1992, <i>R.M.N.</i>
Aulnay-de-Saintonge	Charente-Maritime	<i>Castellum</i>	I ^{er} s. ap. J.-C.	3	Tassaux, F. et D., Aulnay-de-Saintonge : un camp Augustotibérien en Aquitaine, <i>Aquitania</i> , tome 7, 1983.
La Guyomerais. Chatillon/Seiche	Ille - et - Vilaine	Villa Gallo-romaine	II ^{ème} - III ^{ème} s. ap. J.-C.	3	<i>Nos ancêtres les Riedones</i> , catalogue d'exposition, p.38-

¹ Nous remercions très chaleureusement Marie Pourrier des informations qu'elle nous a communiquées sur les découvertes des pointes de flèche à Ribemont sur Ancre.

					39
Lyon	Rhône		II ^{ème} -III ^{ème} s. ap. J.- C.	1 ²	
Beaulieu (Orléans)	Loiret	Inconnu	Epoque gallo- romaine	2	<i>Bulletin de la Société Archéologique</i> , 1849, T.I p. 26.
Orléans	Loiret	Inconnu	Epoque gallo- romaine	1	Non publiée.
Michery	Yonne	Inconnu	Epoque gallo- romaine	1	Prampart, J.Y., Michery « Cour Notre Dame », 1984, p.13, pl. XVIII, n°1.
Vertault (<i>Vertillum</i>)	Côte-d'Or	<i>Vicus</i>	Epoque gallo- romaine	2	Non publiée
Equevillon (Mont Rivel)	Jura	Temples	I ^{er} -III ^{ème} s. ap. J.- C.	22 ³	Leng, F., <i>Le Mt- Rivel : site gallo- romain en Franche- Comté</i> , 1990, 256 pages
Montmaurin	Haute-Garonne	Villa	Gallo- romain	5	Fouet, G., La villa Gallo-romaine de Montmaurin, <i>Gallia</i> , 1969, p. 177-179.
Amancey	Doubs	Inconnu	Antique	1	Non publiée
Puy d'Issolud (<i>Uxellodunum</i>)	Lot	<i>Oppidum</i>	I ^{er} s. av. J.-C. (51 av. J.-C.)	≈1000	J.-P. Girault (inédit)

Inventaire des pointes de flèche conservées par les musées en France.

Musée	Ville et département	Lieu de découverte	Datation	Nombre de flèches
St Raymond	Toulouse (Haute-Garonne)	Inconnu	Probablement antique	3
La Vieille Charité	Marseille (Bouches-du- Rhône)	<i>Oppidum</i> de La Cloche	I ^{er} s. av. J.-C.	2

² D'après la publication, les auteurs considèrent qu'il y a eu 3 pointes de flèche découvertes. A notre avis, les deux autres seraient plutôt des fers de traits de catapulte.

³ Pour notre étude nous n'avons gardé que 6 d'entre elles. Les autres sont trop incertaines chronologiquement pour figurer dans ce travail.

Antiquités Nationales	St-Germain-en-Laye (Yvelines)	Mayence (Allemagne) <i>castrum</i>	I ^{er} s. ap. J.-C.	1
Antiquités Nationales	St-Germain-en-Laye (Yvelines)	Porentruy (Suisse)	I ^{er} s. av. J.-C./ I ^{er} s. ap. J.-C.	2
Musée de Bretagne	Rennes (Ille-et-Vilaine)	La Guyomerais	II ^{ème} - III ^{ème} s. ap. J.-C.	3
Musée de Bretagne	Rennes (Ille-et-Vilaine)	Rétiers	V ^{ème} s. av. J.-C.	1
Musée d'Art et d'Histoire de Toul	Toul (Meurthe-et-Moselle)	Villey le Sec	La Tène finale	1
Musée des Beaux-Arts	Orléans (Loiret)	Beaulieu	Epoque gallo-romaine	2
Musée des Beaux-Arts	Orléans (Loiret)	Orléans	Epoque gallo-romaine	1
Centre Archéologique départemental	Ribemont sur Ancre (Somme)	Ribemont sur Ancre	Âge du fer et I ^{er} s. av. J.-C	4
Musées d'art et d'histoire	Auxerre (Yonne)	Quennes (Yonne)	2 ^{ème} âge du fer	3
Musée de Sens C.E.R.E.P. ⁴	Sens (Yonne)	Michery « La Cour Notre Dame »	Gallo-romain	1
Musée de Sens C.E.R.E.P.	Sens (Yonne)	Isse	La Tène III	1
Musée de Sens C.E.R.E.P.	Sens (Yonne)	Inconnu	La Tène III(?)	1
Musée du Chatillonnais	Châtillon-sur-Seine (Côte-d'Or)	Mont Lassois, Vix	Âge du fer	3
Musée du Chatillonnais	Châtillon-sur-Seine (Côte-d'Or)	<i>Vicus de Vertillum</i> (Vertault)	Période gallo-romaine	2
Musée du Chatillonnais	Châtillon-sur-Seine (Côte-d'Or)	Sancturaire du Tremblois	La Tène III	2
Musée des Beaux Arts et d'Archéologie	Besançon (Doubs)	Amancey	Antique	1
Musée des Beaux Arts et d'Archéologie	Besançon (Doubs)	Inconnue	Antique	9
Musée Archéologique,	Champagnole (Jura)	Temple Mt-Rivel	I ^{er} -III ^{ème} s. ap. J.- C.	22

⁴ C.E.R.E.P. : Centre de Recherche et d'Etudes du Patrimoine. Musées de Sens.

ANNEXE 5 CARACTERISTIQUES DES DIFFERENTS TYPES D'INVESTIGATION RETENUS POUR LA QUALIFICATION MICROSTRUCTURALE ET ANALYTIQUE DES OBJETS ETUDIES

➤ Préparation métallographique des échantillons.

L'étude métallographique a pour objectif la mise en évidence, lors de l'observation au microscope, de la microstructure de l'échantillon : cristallinité (taille de grain), degré d'équiaxialité ; nature, morphologie et distribution des phases (précipités et inclusions) dans la matrice métallique. L'obtention de la surface d'examen nécessite donc un protocole de préparation allant du prélèvement local à l'attaque chimique (NF A 05-150).

- Le découpage des échantillons.

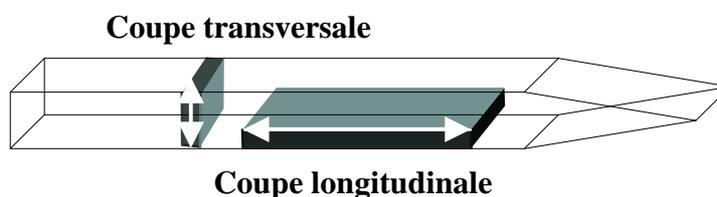
Cette opération est effectuée à l'aide d'une tronçonneuse STRUERS (ACCUTOM)

La découpe des pointes de flèche a été conduite selon deux plans de coupe différents, **longitudinal** et **transversal**, afin d'aboutir à une meilleure approche de l'échantillon, permettant ainsi de tenir compte des spécificités de structure et de distribution des phases associées à l'histoire thermique et mécanique de l'objet (vitesse de refroidissement, fibrage dû au forgeage, etc...) .

Les surfaces étudiées sont généralement comprises entre 0,1 et 1 cm²

L'intervention est réalisée mécaniquement à l'aide d'un disque de découpe humidifié en permanence par un mélange d'eau et d'huile lubrifiante pour éviter de fausser les observations et les interprétations ultérieures. En effet, cette première étape nécessite beaucoup de soin : certaines précautions doivent être prises pour éviter toutes modifications majeures de la microstructure du métal qui pourraient être provoquées, soit par un échauffement, soit par une déformation entraînant un écrouissage.

*Schéma représentant les différentes coupes effectuées sur les pointes de flèche :
coupes longitudinale et transversale*



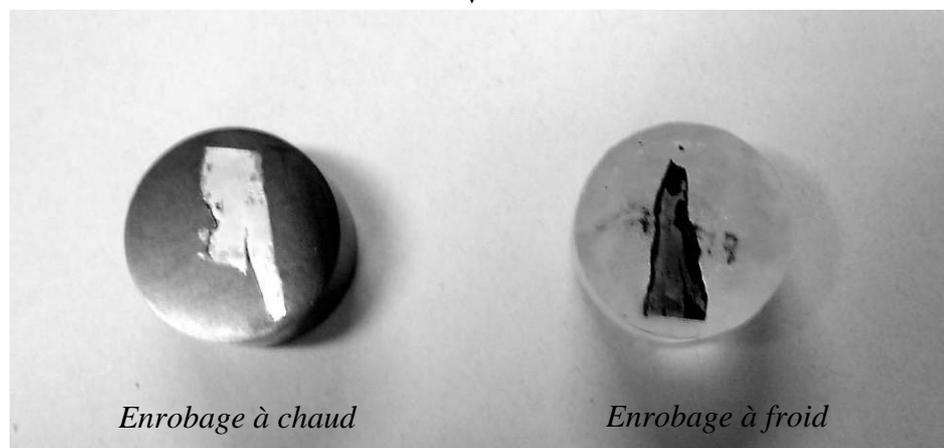
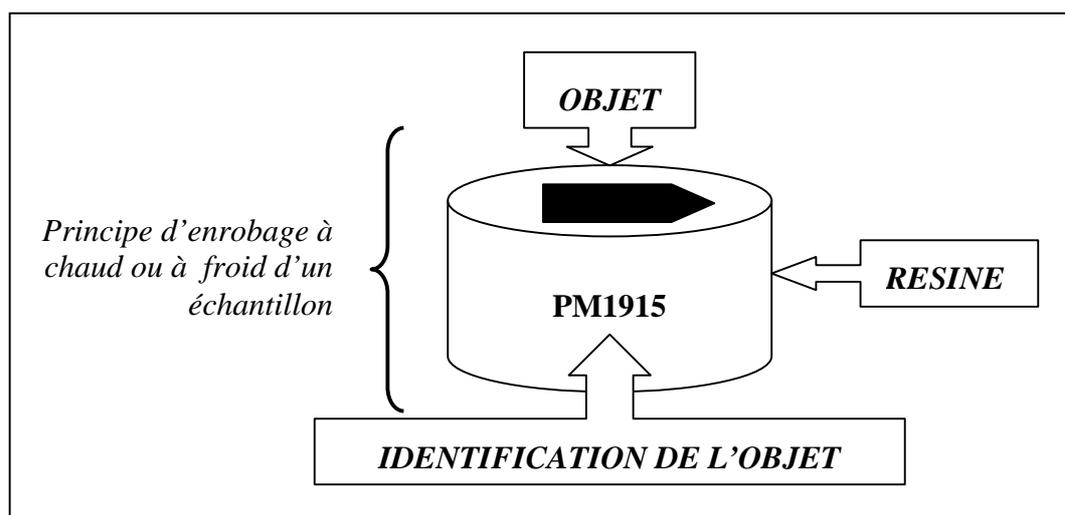
- Enrobage des échantillons.

L'échantillon est enrobé dans une résine polymérisable à froid ou à chaud. Cette opération est effectuée pour mieux appréhender l'échantillon et faciliter sa manipulation.

Enrobage à froid.

L'échantillon est placé dans un moule. La résine mélangée avec un durcisseur est versée sur l'échantillon. La quantité correcte des deux éléments doit être mesurée avec soin.

Pour nos échantillons nous avons utilisé des résines Epoxydes : leur temps de prise est relativement long mais leur adhésion au métal est excellente. Ces résines polymérisent par une réaction chimique après avoir été mélangées dans des proportions correctes ; 3 volumes de résine pour 1 volume de durcisseur.



Exemples d'enrobage de deux pointes de flèche du Puy d'Issolud

Enrobage à chaud.

L'enrobage à chaud nécessite une presse d'enrobage. L'échantillon est placé à l'intérieur de la presse, puis il est recouvert de résine. Une pression de 50 bars et une température de 170° C sont appliquées. Liquide, la résine remplit sous pression les fentes et les cavités. L'opération dure environ 25 mn.

Le refroidissement de la résine se fait à l'eau et progressivement, à partir du moment où la température est redescendue à 75° C, pour éviter tout choc thermique qui pourrait entraîner une fissuration de l'enrobage.

L'intérêt de ce genre d'enrobage réside dans le fait qu'il prend moins de temps que celui qui est pratiqué à froid. On ne peut toutefois pas ensuite désenrober l'échantillon sans dommage.

- Prépolissage et polissage de finition des échantillons.

La présence de couches oxydées à la surface des pointes de flèche ne nous a pas permis de réaliser un polissage électrolytique. Le prépolissage mécanique est sans nul doute la manipulation la plus importante et la plus délicate du travail préparatoire à l'observation, un mauvais polissage rend très problématique, voire impossible, l'observation de la microstructure au microscope optique. Le polissage que nous avons réalisé se divise en deux étapes : prépolissage sur papiers abrasifs et polissage de finition à la pâte diamantée.

Prépolissage.

Il s'effectue sur une polisseuse BUEHLER *Metaserv*.

Il est réalisé à l'aide de papiers abrasifs de SiC de granulométrie différente et de plus en plus fine, en s'efforçant de toujours garder la surface observée parfaitement plane.

Granulométrie standard FEPAP (grains par unité de surface)	80	180	320	600	1000	1200	2400	4000
--	----	-----	-----	-----	------	------	------	------

Le polissage se fait sous l'eau afin d'éliminer tout risque d'échauffement du métal. Pour qu'aucune trace de polissage ne subsiste, nous devons à chaque changement de disque, tourner l'échantillon de 90°, afin que les lignes provoquées par l'abrasif soient effacées par le disque suivant. Entre chaque disque, l'échantillon doit être soigneusement nettoyé à l'éthanol et immergé dans un bac à ultrasons.

Polissage de finition.

Pour avoir le meilleur polissage possible, il convient d'utiliser un poli à la pâte diamantée. Il s'effectue sur deux types de polisseuses soit STRUERS *DP 10* à deux vitesses de rotation, 125 et 250 trs.mn⁻¹, soit TRIEFUS à vitesse de rotation variable, jusqu'à 775 trs.mn⁻¹.

La pâte diamantée doit être appliquée à l'aide d'un diluant (éthanol) sur un drap. Elle est étalée sur ce dernier à l'aide d'un gant. Le gant doit être changé à chaque fois que l'on passe à une nouvelle pâte et par conséquent à un nouveau drap.

Chaque drap est choisi en fonction de la granulométrie de la pâte (cela correspond à la taille moyenne en micromètres des grains de diamant). Nous avons employé une pâte diamantée de 6µm sur un drap dur et une pâte de 1 µm sur un drap feutré. Au cours de l'opération, le disque et l'échantillon doivent être régulièrement lubrifiés.

Pour éviter que des particules d'impuretés ne viennent s'incruster dans l'échantillon, ce dernier doit être minutieusement lavé, à chaque changement de granulométrie, à l'aide d'un solvant et immergé dans un bac à ultrasons.

A l'issue du polissage fin, l'échantillon est séché à l'air chaud. Nous obtenons un poli miroir, sur lequel il est déjà possible d'effectuer un examen préalable. Les fissures, cavités et inclusions sont clairement détectées. Cependant la microstructure de fer ne sera révélée qu'après une attaque chimique appropriée.

- Attaque chimique.

Sur les échantillons étudiés, nous avons utilisé un réactif d'attaque : le nital 3%, constitué de 3 ml d'acide nitrique HNO_3 et de 100ml d'éthanol $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$.

Le réactif d'attaque est employé avec succès pour l'examen des structures des aciers au carbone ou faiblement alliés. Dans certains cas, de meilleures conditions seront obtenues avec une concentration différente en HNO_3 (2 à 5% notamment).

Cette solution est appliquée sur l'échantillon. La durée de l'attaque est variable. Elle se définit en fonction des objets étudiés ; elle peut demander plus ou moins de temps pour révéler les joints de grains et pour différencier les phases constituantes de l'alliage. Elle varie généralement entre 5 et 10 secondes pour les pointes de flèche. L'échantillon doit être ensuite très rapidement rincé à l'éthanol et bien séché.

➤ Observations macroscopique et microscopique des échantillons.

Le protocole de préparation achevé, l'étude métallographique proprement dite peut se dérouler. Nous pouvons dès lors étudier la microstructure de l'alliage et caractériser notamment la distribution et la morphologie des cristaux (taille de grain) ainsi que les modifications subies par le métal sous l'action du forgeage. Ces observations peuvent être réalisées à deux échelles d'examen optique de la surface polie et attaquée de l'objet étudié : macroscopique et microscopique.

- Macroscopie optique.

L'observation macroscopique s'effectue tout simplement à l'aide d'une loupe binoculaire dont le grossissement est assez faible (inférieur à 100). Elle permet d'avoir une vision globale de l'échantillon et met en évidence des traces de forgeage, le fibrage ainsi que la répartition éventuelle d'inclusions. Facilitant l'identification de différences majeures sur la section observée, elle précède toujours l'examen à l'échelle microscopique.

- Microscopie optique.

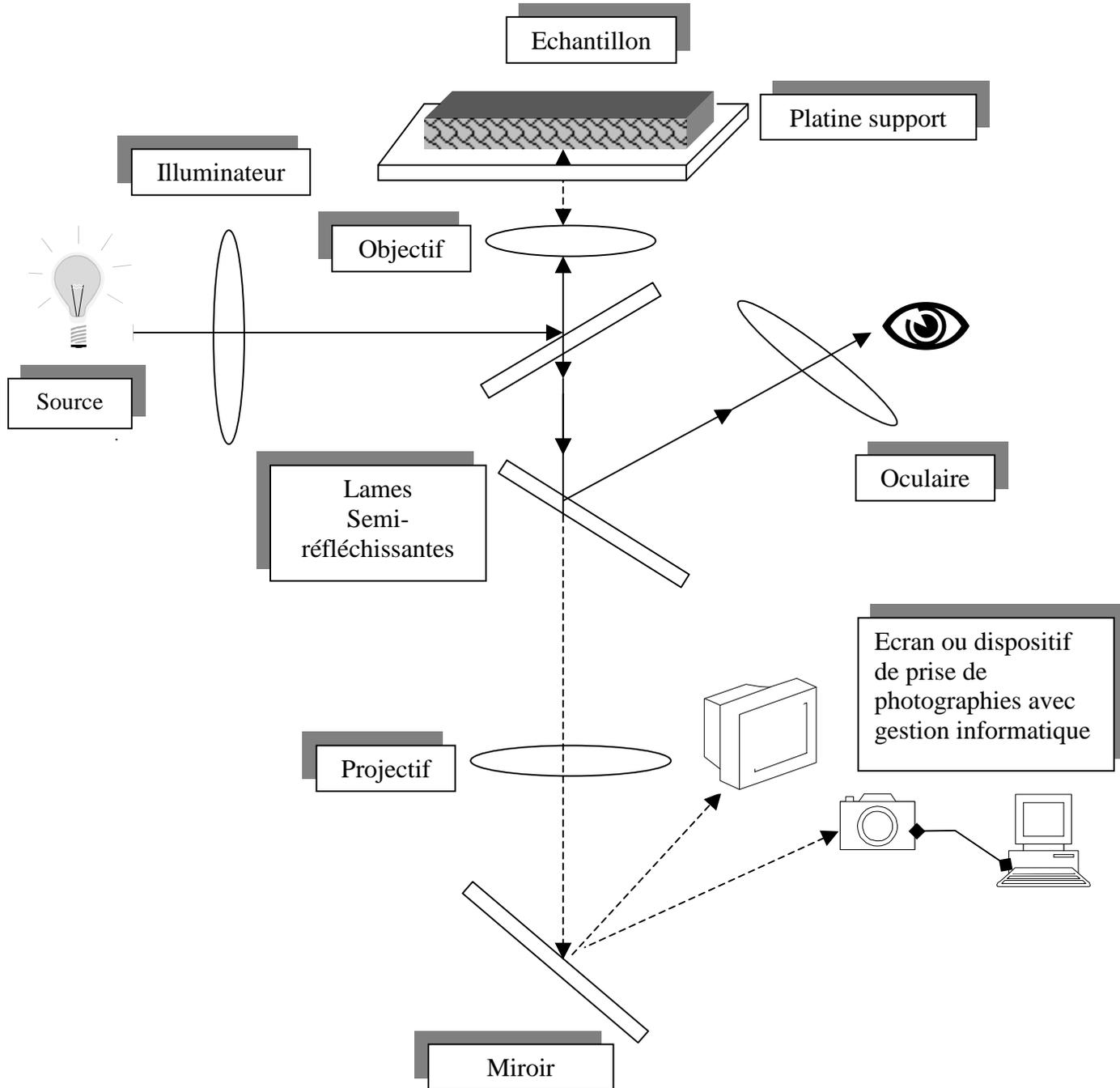
Le microscope optique par réflexion intervient dans une deuxième étape de l'examen. Cet appareil se compose de trois parties essentielles (cf. schéma) :

- ⇒ Une platine orientable où l'on pose l'échantillon.
- ⇒ Un dispositif d'éclairage.
- ⇒ Un dispositif de transfert (objectif + oculaire) du rayonnement réfléchi par la surface polie. Les objectifs utilisés sont X5, X10, X20, X50 et X100.

Les grossissements usuels sont compris entre 200 et 1200, cette dernière valeur nécessitant une préparation de surface particulièrement soignée.

Le microscope optique permet d'avoir une approche beaucoup plus fine de la microstructure de l'échantillon, favorisant ainsi l'étude très détaillée des phases solides qui le constituent.

On définit ainsi sa carte d'identité, chaque caractéristique étant, à terme, associée à une étape de l'histoire métallurgique du matériau, depuis son élaboration jusqu'à sa transformation pour une finalité d'usage donnée.



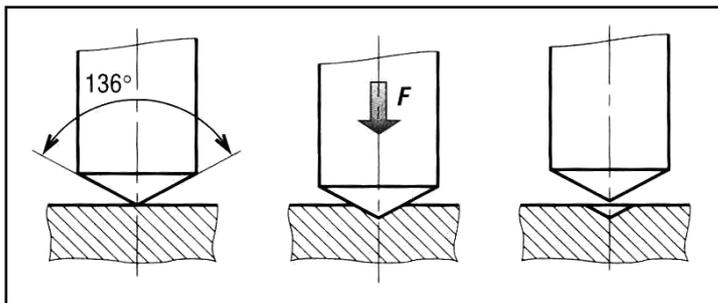
*Schéma expliquant le principe de fonctionnement du microscope métallographique
(D'après J. Barralis et G. Maeder).*

➤ Méthodes d'essai de dureté.

La dureté d'un métal est, par définition, la résistance qu'il oppose à la pénétration d'un autre corps plus dur que lui. La dureté d'un métal est d'autant plus élevée que la pénétration de l'indentateur est plus faible. Les essais de dureté nous permettent d'avoir une idée du niveau relatif des propriétés mécaniques de l'échantillon étudié. Ils sont assez faciles de mise en œuvre, moyennant certaines précautions élémentaires. Ils sont considérés comme peu destructifs. Ils peuvent être un outil de discrimination rapide et efficace de deux phases dont les colorations sont sensiblement les mêmes après attaque chimique.

Il existe plusieurs méthodes d'essais : Brinell, Rockwell, Knoop... Pour nos études, nous avons utilisé presque exclusivement la méthode Vickers ; la dureté Knoop avec indentateur à section losangique est intéressante pour caractériser les gradients de dureté (dans les zones cémentées par exemple) : elle permet alors d'apprécier la profondeur de carburation (ou de décarburation).

Principe de l'essai de microdureté Vickers

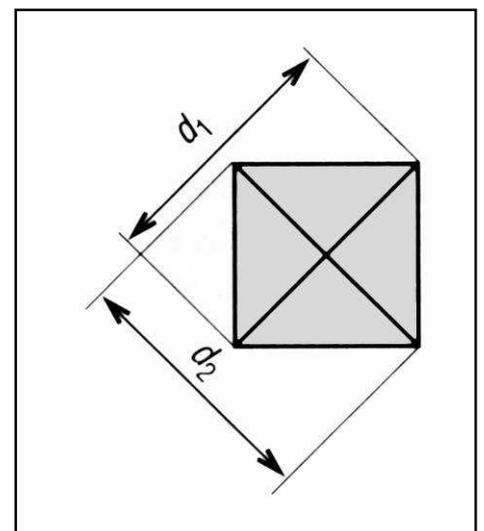


Elle consiste à appliquer sur la pièce un pénétrateur en forme de pyramide droite, à base carrée, d'angle au sommet de 136° , sous une charge constante, pendant une durée déterminée.

Pour la plupart des échantillons analysés, nous avons choisi une charge de 50g. Nous avons, dans chacun de nos essais, utilisé pour l'observation et les mesures d'empreintes de dureté, un objectif X40.

Après le retrait de la charge, nous devons mesurer les deux diagonales du carré de la base de l'empreinte pyramidale. Une relation simple permet d'en déduire les valeurs de microdureté.

La conclusion est claire : plus les valeurs de Hv (Hardness Vickers) sont élevées, plus la zone étudiée est dure et vice et versa.



Mesure de l'empreinte



Exemple d'empreinte Vickers

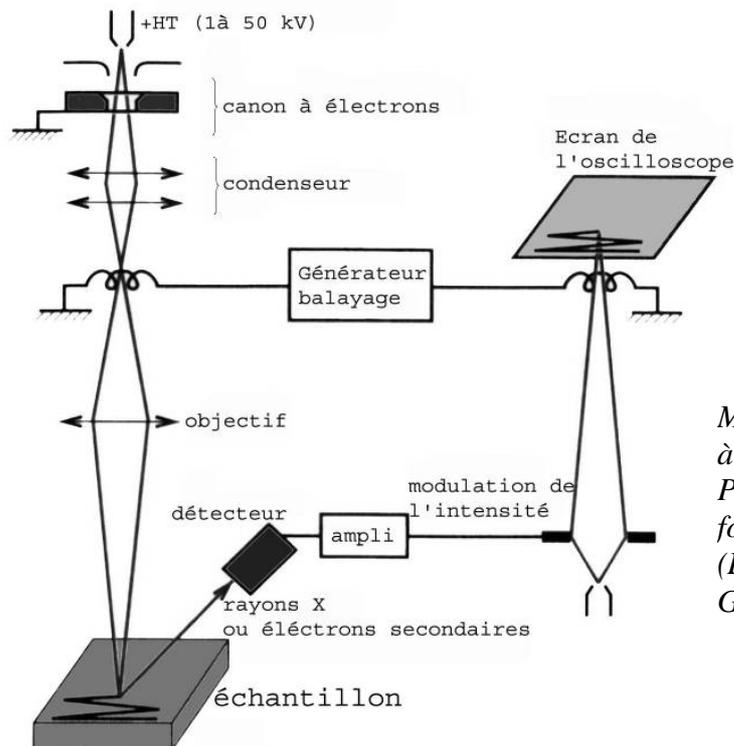
➤ Méthodes analytiques.

Sous leur diversité, les différentes techniques d'analyse de surface présentent des éléments communs. Pour caractériser un échantillon, on excite la matière en la bombardant par un flux de particules énergétiques (électrons, ions,...) ou un rayonnement photonique (rayons X, ...) émis par une source primaire. L'échantillon joue le rôle de source secondaire en émettant de nouvelles particules dites secondaires qui transportent l'information recherchée. Ces particules émises sont analysées par un détecteur spécifique qui transforme ce flux secondaire en un signal observable. On peut aussi s'intéresser aux électrons rétrodiffusés par la surface de l'échantillon. Les contrastes des gris reflètent la nature des éléments présents aux points d'impact des électrons primaires.

- Microscopie électronique à balayage (M.E.B) / Microanalyse associée (E.D.S.).

L'intérêt du M.E.B réside dans son pouvoir très élevé de résolution et sa grande profondeur de champ. Il permet des analyses ponctuelles sur des surfaces de l'ordre du μm^2 .

Son principe est analogue à celui du microscope mais les rayons lumineux du spectre visible sont remplacés par le rayonnement associé à un faisceau d'électrons (canon à électrons). Dans le M.E.B., un faisceau, assez fin, balaie la surface de l'échantillon placé préalablement à l'intérieur du microscope où le vide a été fait (environ 10^{-4} Pa). Les photons, émis par l'interaction électrons-matière, sont captés par un détecteur qui les transforme en un signal électronique. Le signal permet de moduler l'intensité du faisceau d'un tube cathodique à balayage synchrone. Par ce processus s'établit une correspondance entre un point de l'échantillon et un point de l'écran du tube. L'on crée ainsi une image, non définie par les lois optiques, car contrairement au microscope optique, elle ne se forme pas directement.



Limitation de l'analyse
aux éléments dont le
numéro atomique >12

*Microscopie électronique
à balayage.
Principe de
fonctionnement
(D'après J. Barralis et
G. Maeder).*

Les photons X générés sont discriminés par un spectromètre à dispersion d'énergie (E.D.S.) donnant lieu à un spectre révélant les éléments chimiques contenus dans la zone étudiée à partir des pics spécifiques qui les caractérisent sur l'abscisse des énergies dont le choix aura été opéré au début de l'expérience. Nous obtenons à l'issue de cet examen un spectre indiquant, au moins de façon qualitative, la présence avérée de tel ou tel élément dans la zone examinée. Un étalonnage avec des échantillons de référence permet d'affiner les valeurs des teneurs en éléments décelés.

- Spectrométrie de Masse d'Ions Secondaires (S.I.M.S.).

Des analyses locales par analyse ionique SIMS ont été réalisées sous les conditions suivantes : source d'ions primaires Cs^+ d'énergie 10 KeV, surface irradiée de $50 \times 50 \mu\text{m}^2$ ou $250 \times 250 \mu\text{m}^2$.

Cette technique présente un intérêt analytique certain, car les émissions ioniques secondaires sont caractéristiques de la nature chimique des éléments qui composent l'échantillon étudié. L'analyse SIMS des matériaux est basée sur deux principes (cf. schéma ci-dessous) :

- Le bombardement de la surface par un faisceau d'ions primaires qui provoque une pulvérisation.
- L'extraction, le transport, le filtrage et la détection des ions formés au cours de la pulvérisation.

Elle permet d'obtenir, sous plusieurs formes, différentes informations sur les échantillons étudiés :

- Imagerie ionique (répartition des éléments en 2D ou 3D).
- Spectre de masse.
- Analyses isotopiques.
- Profils de répartition en profondeur et latérale des éléments.

Nous avons utilisé cette méthode pour obtenir des profils de répartition des éléments les plus fréquents contenus dans la matrice ainsi que dans les micro-inclusions. A souligner que tous les éléments sont détectables (dont C, O, Cl, etc...). Plusieurs particularités peuvent être soulignées : l'extrême sensibilité de tous les éléments (hydrogène compris) ; effet de "matrice", parfois difficile à apprécier ; estimation relative des teneurs, moyennant la disponibilité d'étalons appropriés (pas de quantitatif).

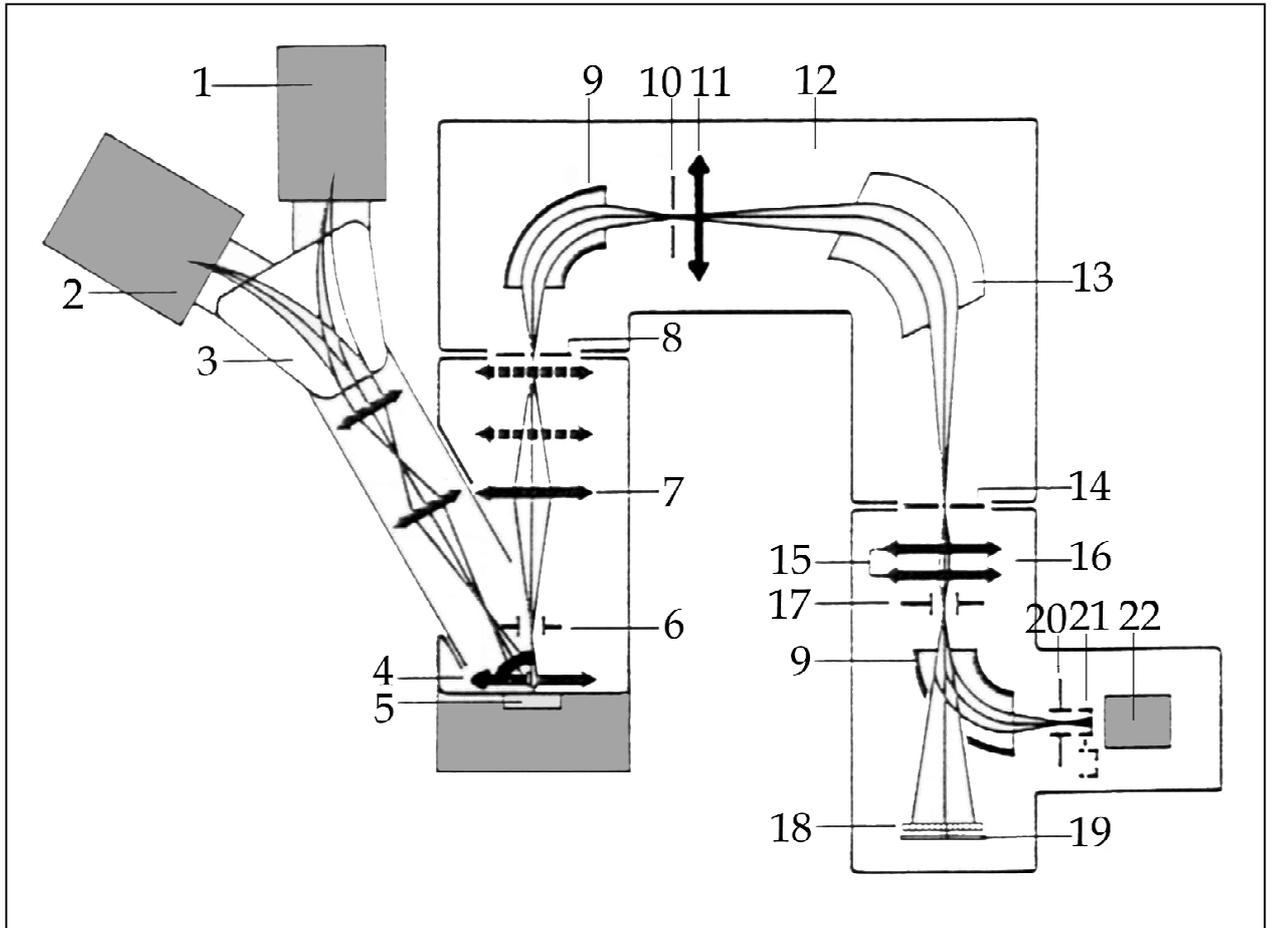


Schéma du fonctionnement du SIMS.

(Source : INSA Toulouse)

- 1- Source d'ion Césium
- 2- Source d'ion Duoplasmatron
- 3- Filtrage magnétique du faisceau primaire
- 4- Lentille à immersion
- 5- Echantillon
- 6- Système de transfert dynamique
- 7- Optique de transfert
- 8- Fente d'entrée du spectromètre
- 9- Secteur électrostatique
- 10- Fente d'énergie
- 11- Lentille du spectromètre

- 12- Spectromètre
- 13- Secteur magnétique
- 14- Fente de sortie
- 15- Lentilles de projection
- 16- Système de détection
- 17- Déflecteur
- 18- Galette de microcanaux
- 19- Ecran fluorescent
- 20- Déflecteur
- 21- Cage de Faraday escamotable
- 22- Multiplicateur d'électrons

- Diffraction des rayons X.

Cette méthode est utilisée pour la caractérisation des structures cristallines et de ce fait l'identification des phases cristallines présentes par exemple dans un alliage ou dans les couches de corrosion. Pendant très longtemps, les notions de réseaux, de mailles cristallines restèrent hypothétiques, jusqu'au jour où grâce à la découverte des rayons X, elles furent démontrées. Les plus puissants des microscopes optiques n'ayant qu'un pouvoir de résolution de l'ordre de $0.3 \mu\text{m}$ ne pouvaient mettre en évidence la distribution régulière des atomes dans les cristaux, dans le domaine des échelles de l'ordre de l'angström ($1 \text{ Angström} (\text{Å}) = 1/10\,000\,000$ de millimètre).

Les rayons X permettent d'analyser ces réseaux cristallins, grâce à la mise en œuvre des techniques de diffraction. Ils sont produits par l'interaction d'électrons et d'une cible métallique (anticathode). On bombarde sous vide secondaire une anticathode métallique appropriée et refroidie (Cu pour l'étude d'une matrice ferreuse) par un faisceau d'électrons, accélérés sous tension continue. Les rayons X produits irradient la surface de l'objet et sont diffractés par les plans réticulaires de ce dernier. Les raies de diffraction des rayons X produites seulement dans des conditions angulaires bien précises (loi de Bragg) sont caractéristiques du réseau cristallin de la phase irradiée; elles en permettent donc l'identification par référence à des fiches d'étalonnage associées à des phases très pures.

Ce processus est réalisé dans un appareil appelé « diffractomètre à rayons X ». Le faisceau obtenu, à la sortie du tube générateur de rayons X, s'analyse sous forme d'un spectre qui donne lieu à la mise en place d'une courbe continue, où viennent se superposer des raies caractéristiques des phases cristallisées qui composent l'échantillon étudié. On utilise le rayonnement monochromatique (par exemple raie $K\alpha$ du cuivre). L'intensité des pics dépend des teneurs en ces phases, introduisant des limites dans leurs détections.

Cette méthode comporte cependant des limites : d'une part, les phases doivent être suffisamment abondantes pour permettre une bonne détection, d'autre part, une phase amorphe ne donnera pas de réponse.

- Microsonde électronique.

Cette méthode permet, sur des surfaces préalablement polies, de préciser les teneurs locales en éléments chimiques. Elle a été utilisée pour l'identification des phases et des éléments des différentes micro-inclusions (scories) contenues dans la matrice ferreuse. Cette méthode demande une bonne connaissance de l'échantillon étudié et le repérage des scories devant faire l'objet d'une analyse.

Le mode de fonctionnement de la microsonde électronique est le suivant (cf. schéma ci-dessous) : un faisceau d'électrons fortement accélérés irradie une faible surface ($1\mu\text{m}^2$) de l'échantillon. Le rayonnement émergent est analysé dans un spectromètre afin d'identifier les différentes radiations caractéristiques qui le composent et de connaître ainsi les éléments présents dans le faible volume concerné ($1\mu\text{m}^3$) ; il est ainsi possible de quantifier ces informations en comparant les intensités des rayons X caractéristiques de chaque élément présent dans l'échantillon, à l'intensité des mêmes radiations émises par un témoin de référence. Il faut cependant faire attention au seuil de détection.

Le processus d'analyse et son exploitation sont pilotés par un ordinateur. Les résultats de l'investigation sont visualisés, mémorisés et conditionnés sur écrans vidéo.

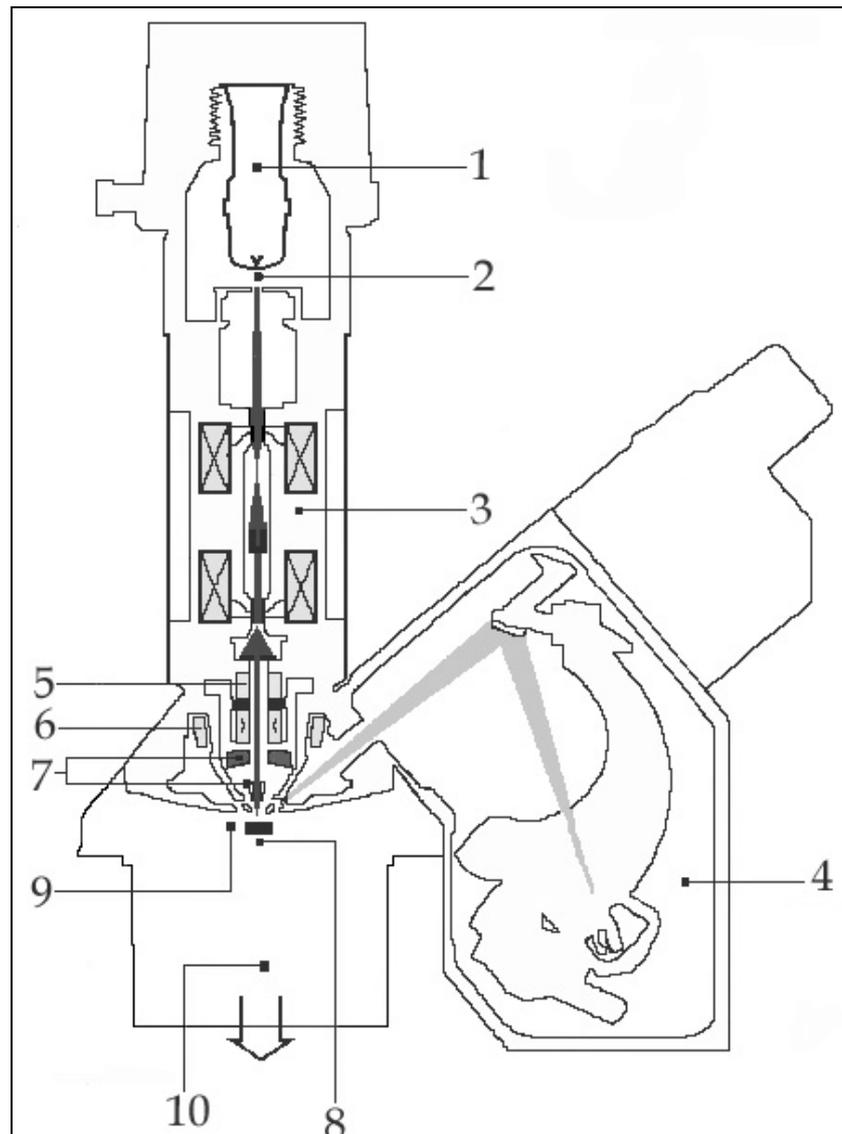


Schéma de fonctionnement de la microsonde électronique. (Source : UPS)

1 – Canon à électrons	6 – Platine à haute précision mécanique
2 – Anode réglable à la distance du wehnelt	7 – Microscope optique à haute résolution
3 – Colonne avec ses trois lentilles adaptables	8 – Bobines de balayage SEM
4 – Spectromètre	9 – Introduction de l'échantillon. Le carré noir représente l'échantillon
5 – Lentille formée de mini-bobines	10 – Système de pompage

- Méthode d'analyse par LA-ICP-MS (Laser Ablation - Inductively Coupled Plasma - Mass Spectrometry).

L'intérêt de cette méthode réside dans le fait que l'on peut pratiquer des analyses sur des surfaces réduites (telles que les scories se trouvant dans la matrice métallique) et

atteindre les éléments à l'état de traces, ces surfaces étant supérieures ou égales au diamètre du faisceau laser actuellement utilisé, soit environ 300 μ m (cf. image MEB ci-dessous).

Cette technique ne demande pas de préparation spécifique des échantillons, nous pouvons passer de la microsonde électronique au LA-ICP-MS avec les mêmes échantillons.

Après avoir placé préalablement l'échantillon dans la cellule d'ablation de l'appareil, le faisceau laser, focalisé à sa surface, procède à l'ablation de la matière à analyser. L'aérosol qui en résulte est entraîné par un flux d'argon dans la torche à plasma où les particules sont atomisées et ionisées. Une fois dans le spectromètre de masse, les ions sont d'abord séparés selon leur rapport "masse sur charge" puis détectés.

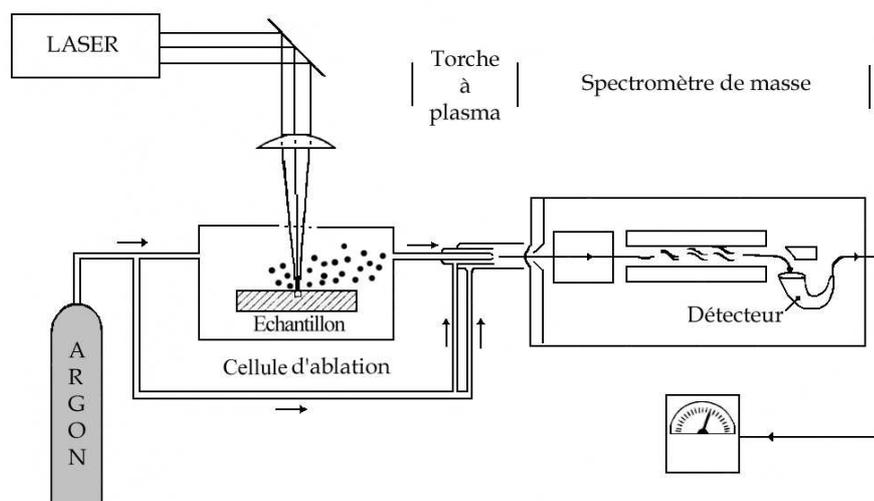


Schéma représentant le fonctionnement du spectromètre de masse de torche à plasma à couplage inductif et ablation laser (LA-ICP-MS) (d'après M.-P. Coustures, p. 19).

Pour la majorité des éléments analysables, la limite de détection est théoriquement inférieure au ppb (H, C et O ne sont pas détectables).⁵ De même que la méthode SIMS, la technique mise en œuvre avec LA-ICP-MS est destructive.

⁵ Coustures, M.-P., *D'où proviennent les barres de fer des épaves antiques des Saintes-Maries-de-la-Mer (Bouches-du-Rhône) ?*, Mémoire D.E.S.S. « Méthodes scientifiques et techniques en archéologie », Université de Bourgogne, septembre 2001, pages 18-19.

ANNEXE 6 FICHES RECAPITULATIVES DES POINTES DE FLECHE ETUDIEES

Nous proposons ici, sous forme de fiches, le descriptif de certaines données concernant l'étude métallurgique des pointes de flèche. Est indiqué : une photo et une radiographie prises sous des angles différents, quand celles-ci ont pu être effectuées. Les mesures de microdureté Vickers figurent également. Les diagrammes de microdureté ont été indiqués à partir du moment où ils étaient significatifs d'une structure hétérogène (la barre de dispersion des valeurs est placée entre +10% et -10%).

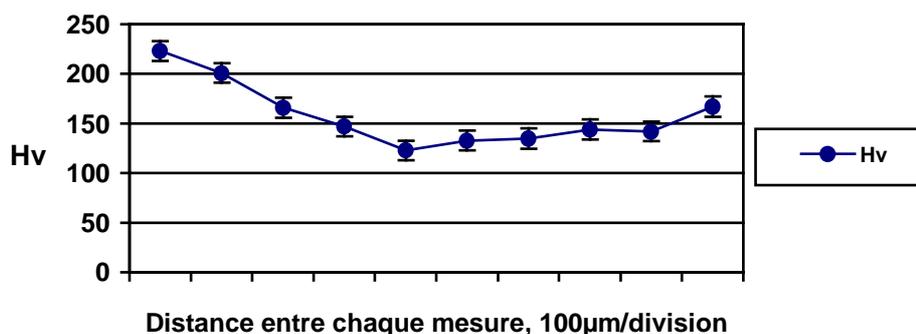
➤ Les pointes de flèche du Puy d'Issolud.

Pointe de flèche PM 594

Charge	50g
Objectif	X40

Mesures	d1(μm)	d2(μm)	Hv
1	20.8	19.8	223
2	20.9	21.9	201
3	23.4	23.6	166
4	25.3	24.7	147
5	27.8	27.0	123
6	26.2	26.4	133
7	26.2	26.0	135
8	25.4	25.1	144
9	25.5	25.4	142
10	22.4	24.6	167

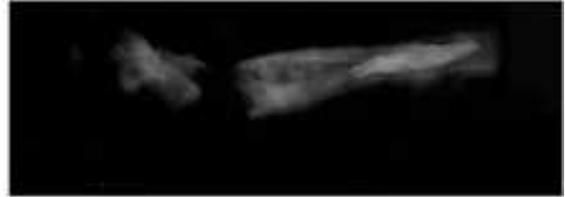
Maximum (Hv)	Minimum (Hv)	Moyenne (Hv)
223	123	159



Pointe de flèche BU 10-3220



BU10-3220



0 5 cm



0 5 cm

Charge	50 g
Objectif	X40

Mesures	d1(μm)	d2(μm)	Hv
1	29,1	27,6	114
2	27,6	28,2	110
3	27,6	30,0	111
4	21,8	22,5	188
5	22,1	21,5	194
6	28,5	29,1	111
7	31,2	30,8	96
8	20,7	21,5	207
9	20,7	19,4	229
10	21,3	22,4	193
11	23,4	20,8	188
12	22,7	22,3	183
13	27,6	28,0	119
14	26,5	28,0	124
Maximum (Hv)	Minimum (Hv)	Moyenne (Hv)	
229	96	157	

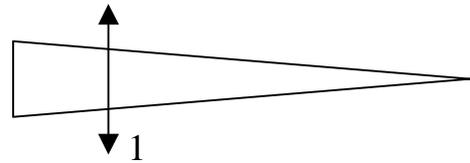
Partie la moins bien conservée

Mesures	d1(μm)	d2(μm)	Hv
1	33,5	32,6	84
2	32,8	31,5	89
3	32,1	32,2	89
4	29,1	32,2	98
5	32,1	30,5	94
6	34,4	32,3	83
7	33,0	33,0	84
Maximum (Hv)	Minimum (Hv)	Moyenne (Hv)	
98	83	88	

Pointe de flèche E21-12 748

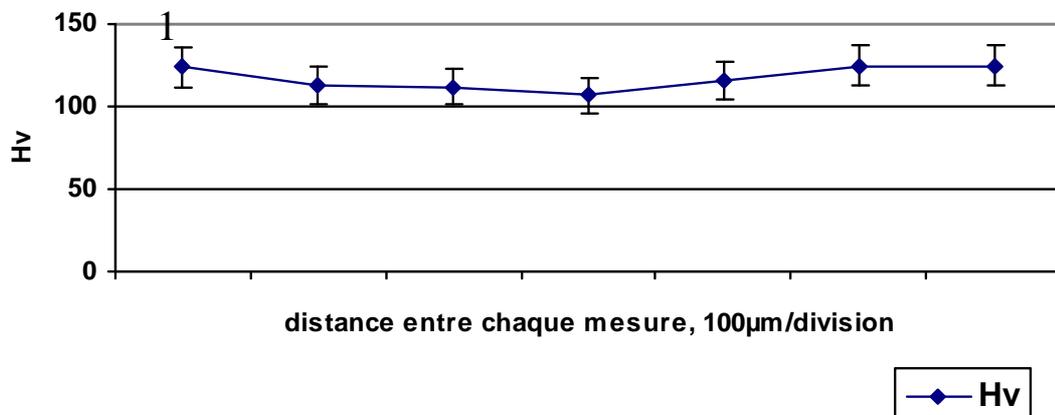


E21-12 748

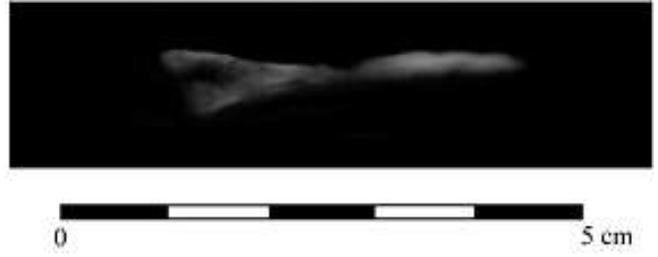


Charge	50 g
Objectif	X40

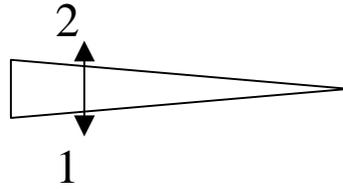
Maximum (Hv)	Minimum (Hv)	Moyenne (Hv)
125	107	117



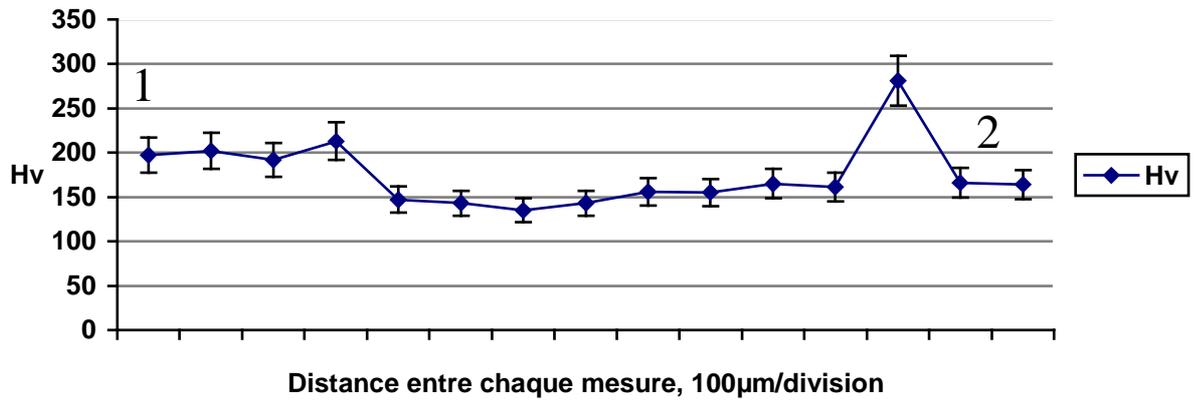
Pointe de flèche PM 1312



Charge	50 g
Objectif	X40



Maximum (Hv)	Minimum (Hv)	Moyenne (Hv)
281	135	168



Pointe de flèche PM 1343



PM1343



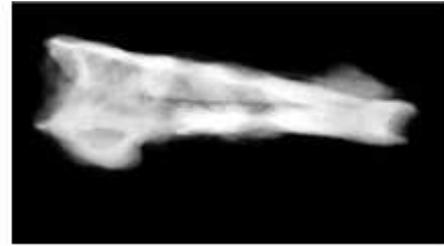
Charge	50 g
Objectif	X40

Mesures	d1(μm)	d2(μm)	Hv
1	28,3	30,3	107
2	28,6	29,7	108
3	28,2	28,2	116
4	28,3	29,1	112
5	28,1	30,8	106
6	27,3	27,0	125
Maximum (Hv)	Minimum (Hv)	Moyenne (Hv)	
125	106	112	

Pointe de flèche PM 1769



PM1769



0 3 cm



0 3 cm

Charge	50 g
Objectif	X40

Mesures	d1(μm)	d2(μm)	Hv
1	28,7	29,5	109
2	25,7	26,0	138
3	26,1	25,9	136
4	27,0	26,2	130
5	26,1	26,4	134
6	27,1	26,8	127
7	28,0	26,3	125
8	25,9	25,7	138
9	24,2	24,3	156
10	23,9	24,6	156
11	23,5	23,7	165
Maximum (Hv)	Minimum (Hv)	Moyenne (Hv)	
165	109	137	

Pointe de flèche PM 1770



PM1770



Pointe de flèche PM 1772



PM1772

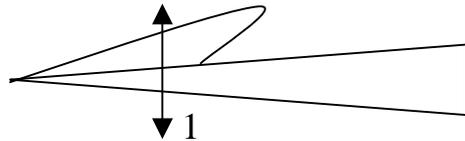


0 3 cm

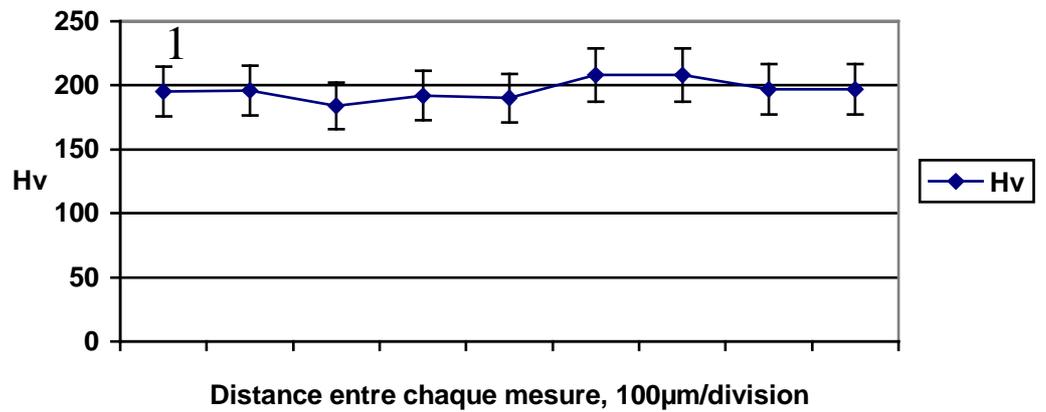


0 3 cm

Charge	50 g
Objectif	X40



Maximum (Hv)	Minimum (Hv)	Moyenne (Hv)
208	184	196

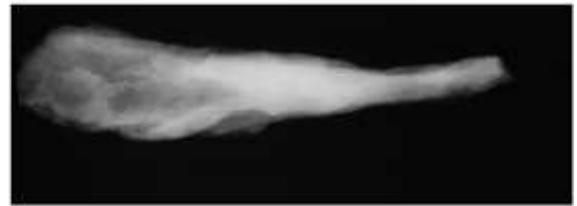


Pointe de flèche BU1-PM 994

104

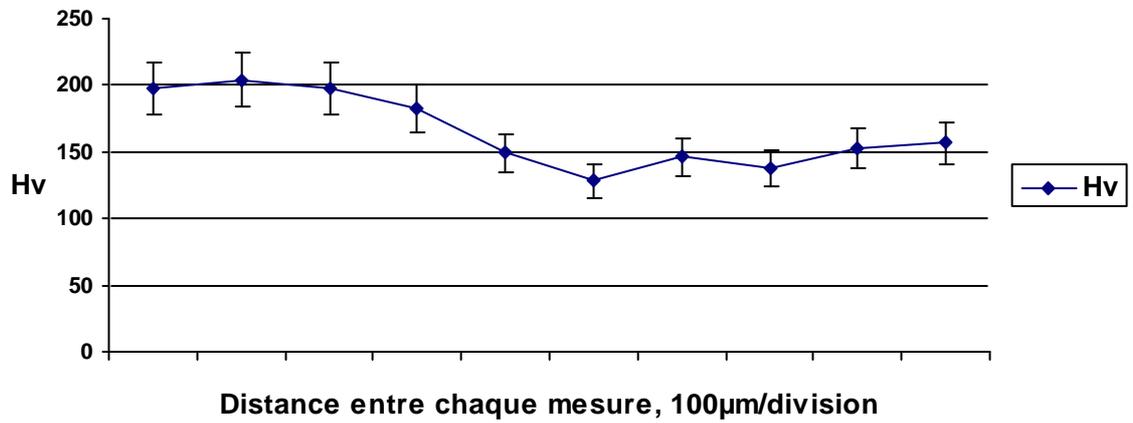


BU1-
PM994

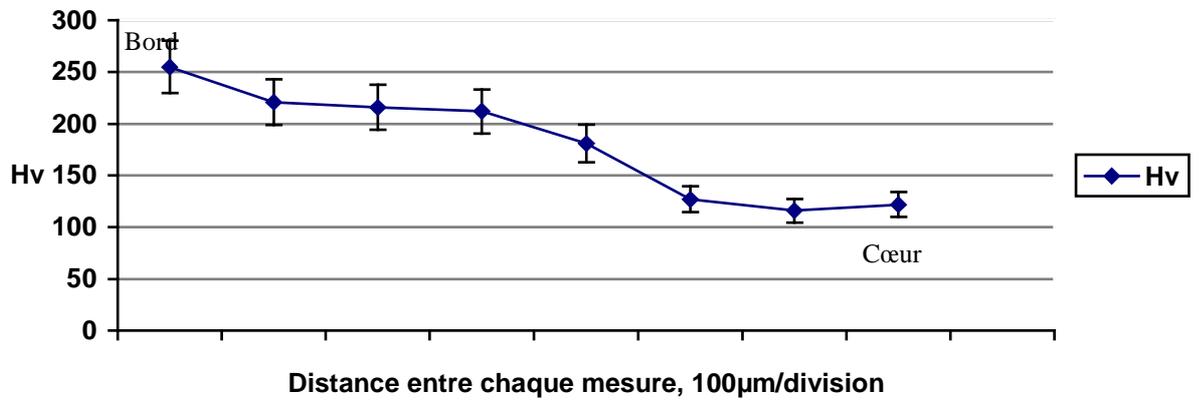


Charge	50g
Objectif	X40

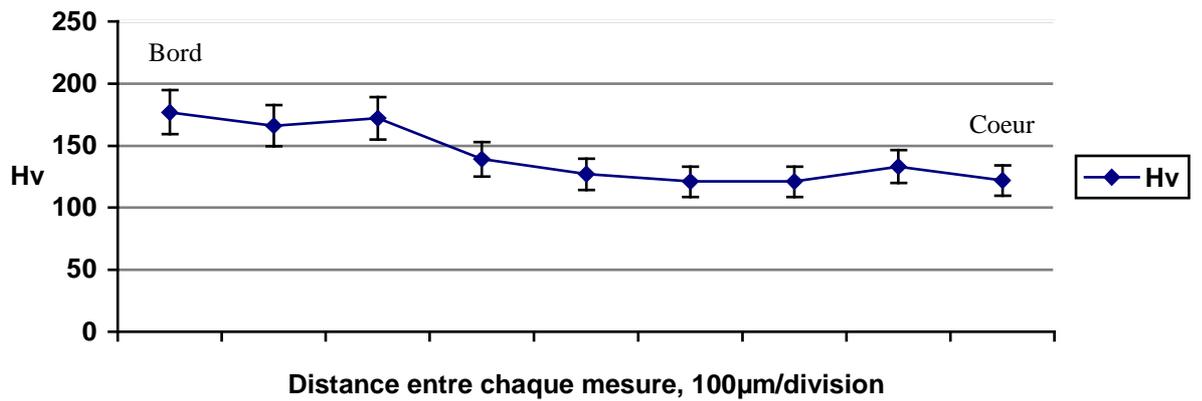
Maximum (Hv)	Minimum (Hv)	Moyenne (Hv)
204	128	165



Maximum (Hv)	Minimum (Hv)	Moyenne (Hv)
255	116	181



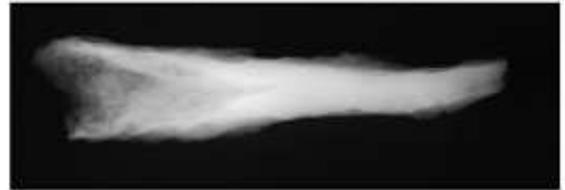
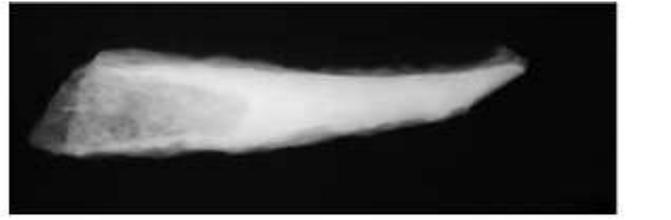
Maximum (Hv)	Minimum (Hv)	Moyenne (Hv)
177	121	142



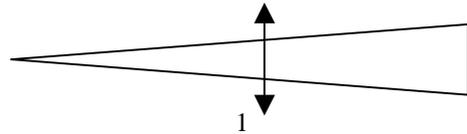
Pointe de flèche PM 945



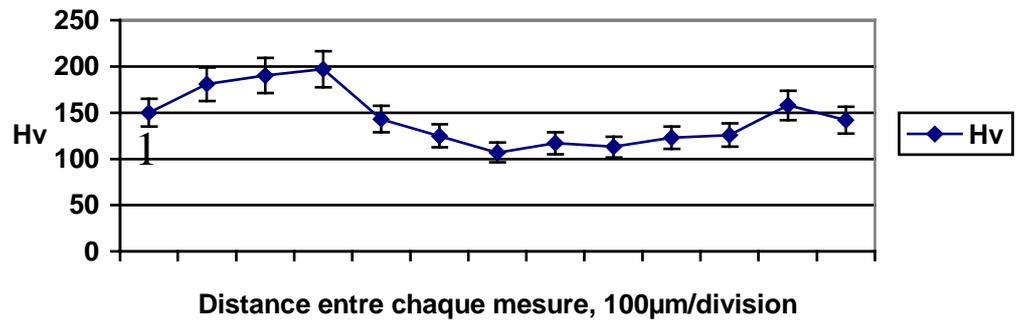
PM945



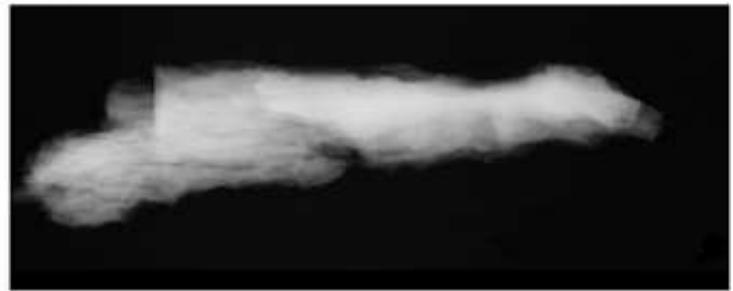
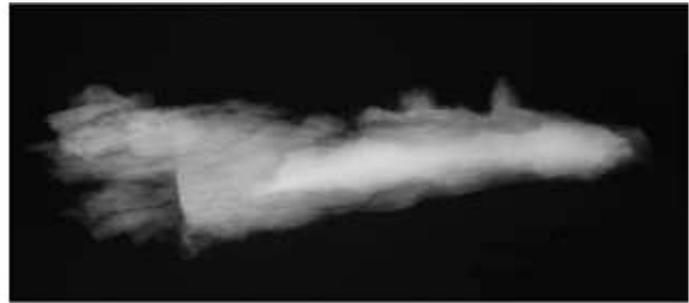
Charge	50 g
Objectif	X40



Maximum (Hv)	Minimum (Hv)	Moyenne (Hv)
197	107	144



Pointe de flèche PM 991



Charge	50g
Objectif	X40

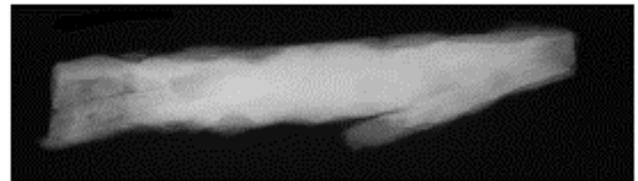
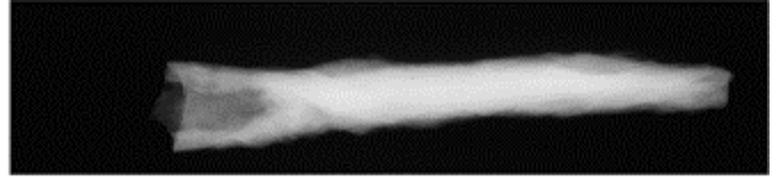
Mesures	d1(μm)	d2(μm)	Hv
1	26,7	30,2	114
2	29,1	29,1	109
3	31,6	31,1	94
4	29,0	31,8	100
5	32,4	33,0	86
6	30,4	30,5	99
7	30,6	31,2	96

Maximum (Hv)	Minimum (Hv)	Moyenne (Hv)
114	94	100

Pointe de flèche PM 1054



PM1054



Charge	50g
Objectif	X40

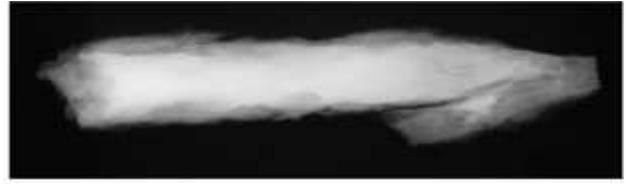
Mesures	d1(μm)	d2(μm)	Hv
1	24.2	24.9	159
2	23.4	24.5	160
3	23.2	24.2	164
4	24.6	23.9	157
5	24.3	24.9	152
6	24.2	25.8	147
7	22.1	22.4	186
8	24.9	24.2	152
9	25.7	24.9	143
10	26.1	26.8	131
11	27.2	27.9	121
12	27.2	25.7	132

Maximum (Hv)	Minimum (Hv)	Moyenne (Hv)
186	121	150

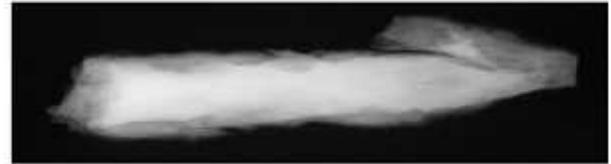
Pointe de flèche BU1 –PM 886



BU1-PM886



1 cm

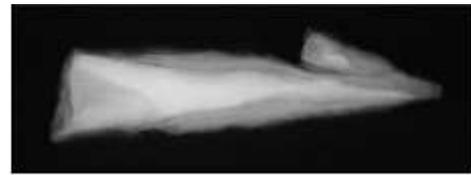


1cm

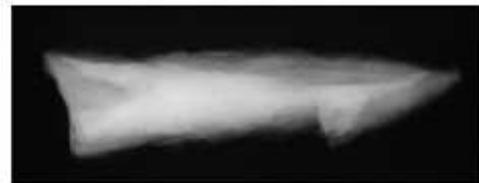
Pointe de flèche BU1-n°20



BU1-n°20

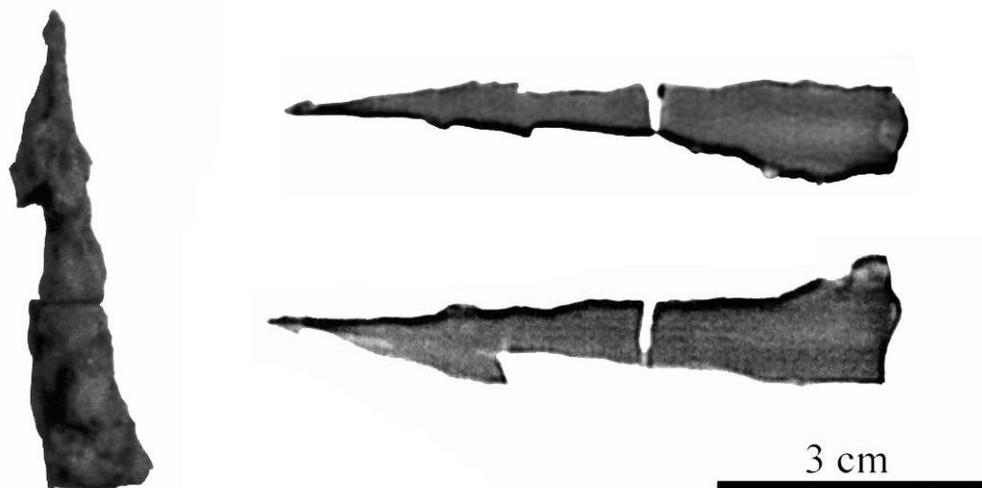


1cm



1 cm

Pointe de flèche BU10-484



Charge	50 g
Objectif	X40

Mesures	d1 (μm)	d2 (μm)	Hv
1	31,0	30,4	97
2	31,0	30,2	98
3	29,6	29,1	107
4	28,4	28,1	115
5	24,7	26,1	143
6	27,5	27,8	121
7	28,3	27,5	118
8	28,4	27,9	116
9	32,3	30,2	94
10	31,9	31,2	92
11	26,9	27,4	125
12	31,5	30,8	95
13	31,0	30,0	99
14	30,0	29,6	104
15	33,7	33,6	81
16	32,1	31,7	90
17	30,9	33,1	90
18	31,4	31,1	94
19	26,8	27,3	126
20	25,9	26,1	136
21	31,5	29,6	98
22	30,8	29,9	100
23	29,0	28,7	111
24	30,0	29,7	103
25	30,8	29,0	103

Maximum (Hv)	Minimum (Hv)	Moyenne (Hv)
143	81	106

Pointe de flèche PM 662



Charge	50 g
Objectif	X40

Meures	d1(μm)	d2(μm)	Hv
1	26,3	27,8	126
2	27,5	27,7	121
3	27,9	26,7	123
4	27,7	28,0	119
5	27,4	26,5	127
6	26,0	25,8	137
7	17,5	19,6	267
8	15,5	17,7	335
9	20,2	20,3	225
10	19,0	21,2	228
11	24,6	25,1	149
12	24,3	24,8	153
13	22,6	23,5	173
14	21,5	21,5	199
15	21,5	22,7	189
16	27,1	27,1	125
17	19,2	19,8	241
18	27,0	28,1	121
19	18,8	20,2	243
20	20,5	20,4	220
21	19,1	18,9	255

Maximum (Hv)	Minimum (Hv)	Moyenne (Hv)
335	119	184

Pointe de flèche PM 502



Charge	50 g
Objectif	X40

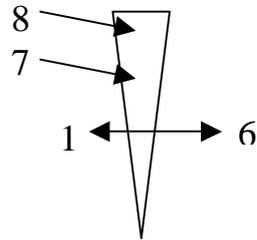
Mesures	d1 (µm)	d2 (µm)	Hv
1	20,7	20,0	223
2	23,7	24,3	160
3	27,8	26,8	123
4	27,4	28,2	119
5	26,8	25,8	133
6	27,4	28,6	118
7	24,0	22,5	170
8	19,5	20,5	230
9	22,5	21,2	193
10	20,5	21,5	209
11	20,6	20,8	215
12	23,2	22,8	173
13	21,5	20,6	208
14	18,6	19,4	255
15	21,9	20,2	207
16	20,3	19,9	228
17	19,9	22,1	209

Maximum (Hv)	Minimum (Hv)	Moyenne (Hv)
255	118	186

Pointe de flèche BU10-3567

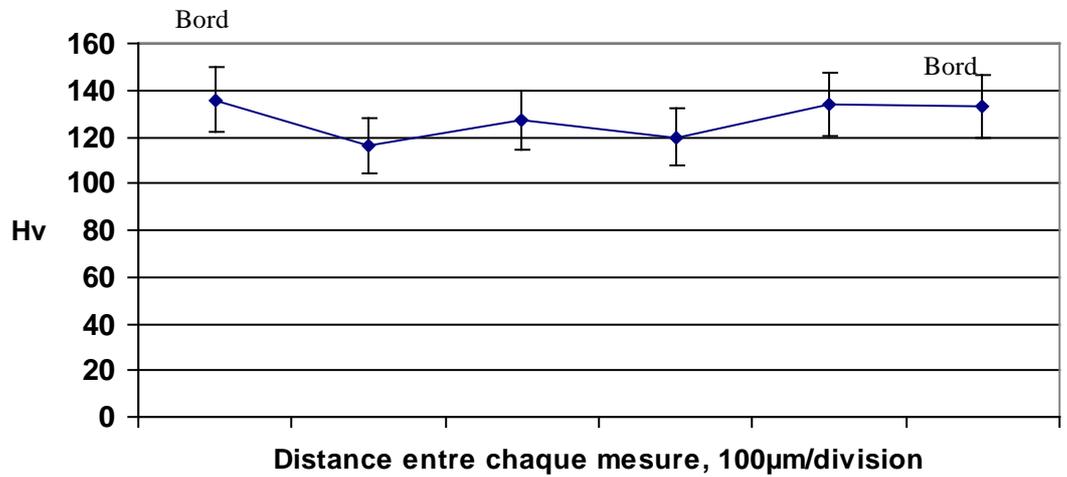


BU10-3567



Charge	50 g
Objectif	X40

Maximum (Hv)	Minimum (Hv)	Moyenne (Hv)
136	116	127

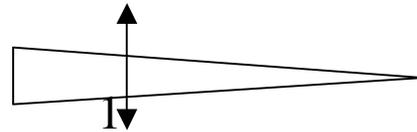


Pointe de flèche E21-101

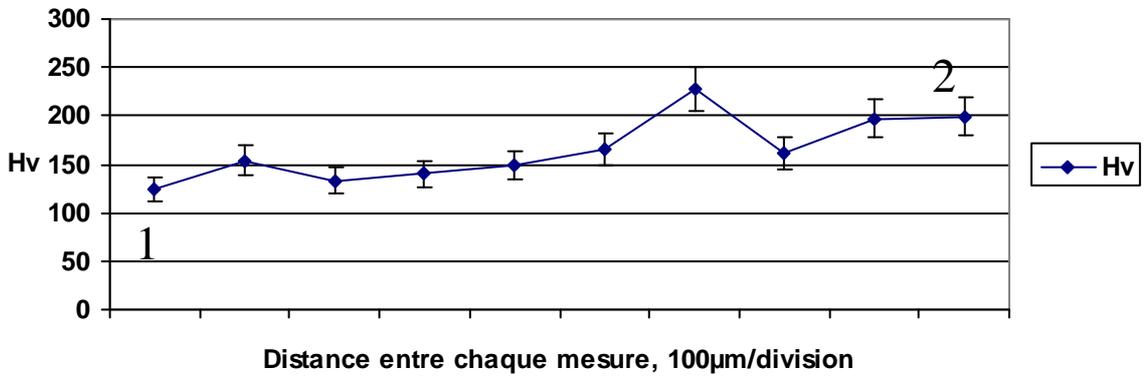


E21-101

Charge	50 g
Objectif	X40

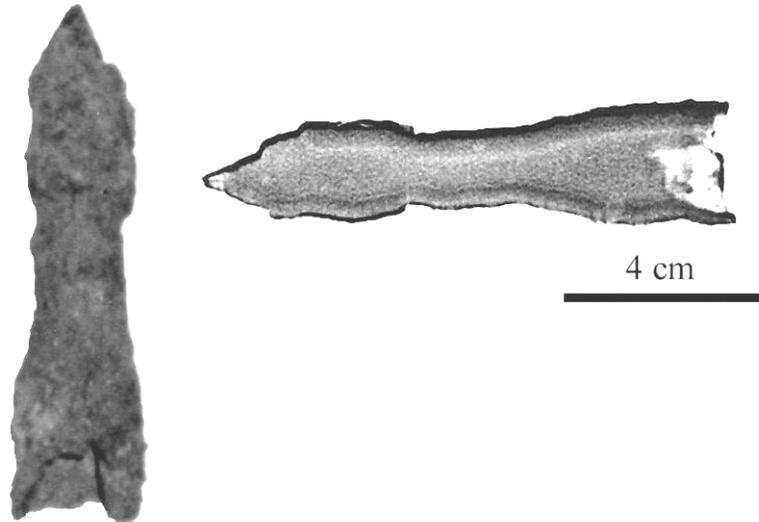


Maximum (Hv)	Minimum (Hv)	Moyenne (Hv)
227	124	165



➤ **Le trait de catapulte.**

Fer de Trait de catapulte PM 436



Coupe longitudinale

Charge	50g
Objectif	X40

Mesures	d1 (µm)	d2 (µm)	Hv
1	18,4	18,6	269
2	17,9	17,8	288
3	19,1	18,5	260
4	18,4	19,5	257
5	19,9	21,5	215
6	23,4	22,4	176
7	22,1	23,6	176
8	24,3	24,3	156
9	26,7	26,8	128
10	19,9	22,0	210
11	18,6	20,1	245
12	18,4	20,4	245
13	16,3	18,3	306
14	17,1	16,6	325
15	17,7	17,2	303
16	17,6	16,8	311
17	20,6	18,6	239
18	19,8	19,4	240
19	19,5	18,7	253
20	18,1	16,2	314
21	16,9	16,1	339
22	17,9	16,1	320
23	16,3	16,9	325

24	17,2	18,5	289
25	18,2	16,6	304

Maximum (Hv)	Minimum (Hv)	Moyenne (Hv)
339	128	259

Coupe transversale

Charge	50g
Objectif	X40

Mesures	d1 (µm)	d2 (µm)	Hv
1	18,1	18,4	276
2	18,4	18,8	267
3	19,8	19,8	235
4	20,4	21,7	208
5	22,5	22,7	180
6	20,4	21,6	209
7	17,7	17,6	296
8	18,9	19,4	251
9	20,1	19,8	231
10	17,7	20,6	252
11	22,5	22,8	179
12	21,2	23,0	189
13	19,8	20,1	231
14	19,0	19,7	246
15	18,2	18,8	269
16	18,7	18,3	269
17	20,0	18,7	246
18	18,3	19,4	260
19	18,0	19,5	262

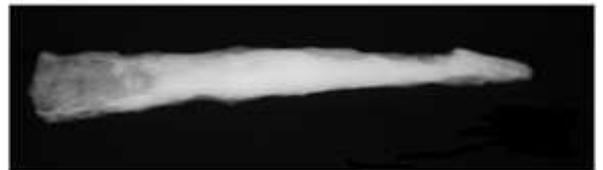
Maximum (Hv)	Minimum (Hv)	Moyenne (Hv)
296	179	239

➤ **Les pointes de flèche d'Alésia.**

Pointe de flèche Alésia Camp C.

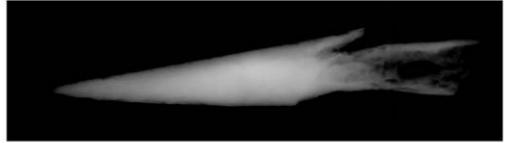


Pointe de flèche d'Alésia. Camp C

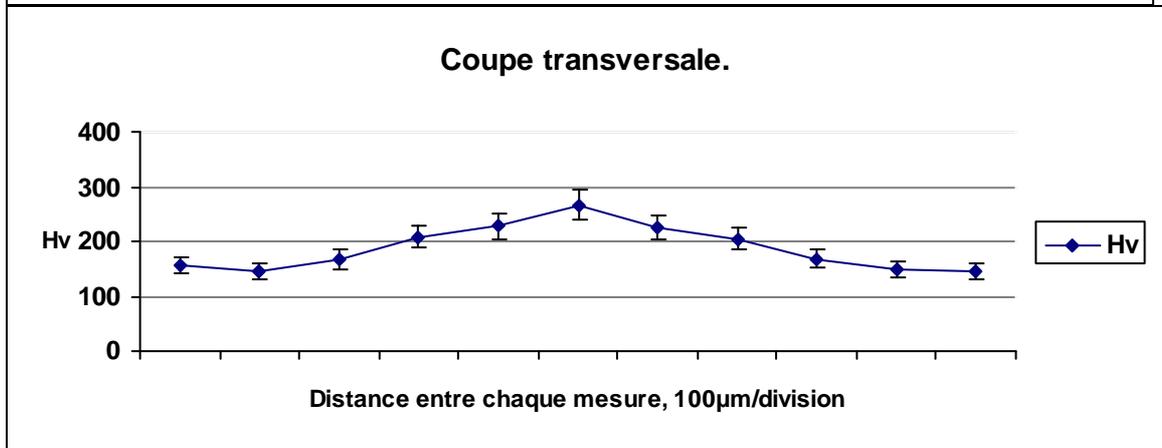
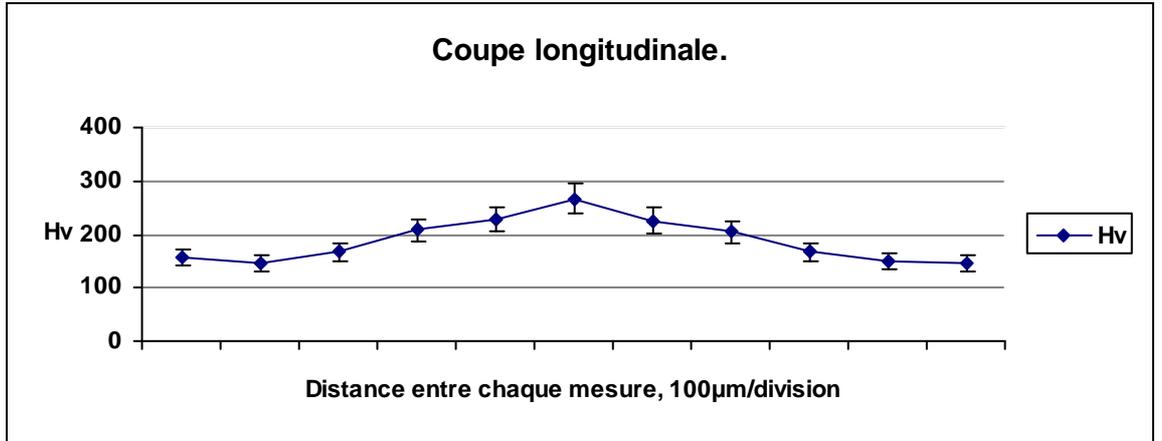


Pointe de flèche d'Alésia. Camp B.

Pointe de flèche d'Alésia. Camp B



Collection R. Collot



ANNEXE 7 IMAGES ET SPECTRES MEB-EDS

Nous présentons dans cette annexe les analyses MEB-EDS effectuées sur un certain nombre de pointes de flèche du Puy d'Issolud et d'Alésia. Nous avons retenu les résultats les plus significatifs (l'échelle d'énergie des spectres est exprimée en Kv entre 0.0 et 10).

Pointe de flèche PM 1772

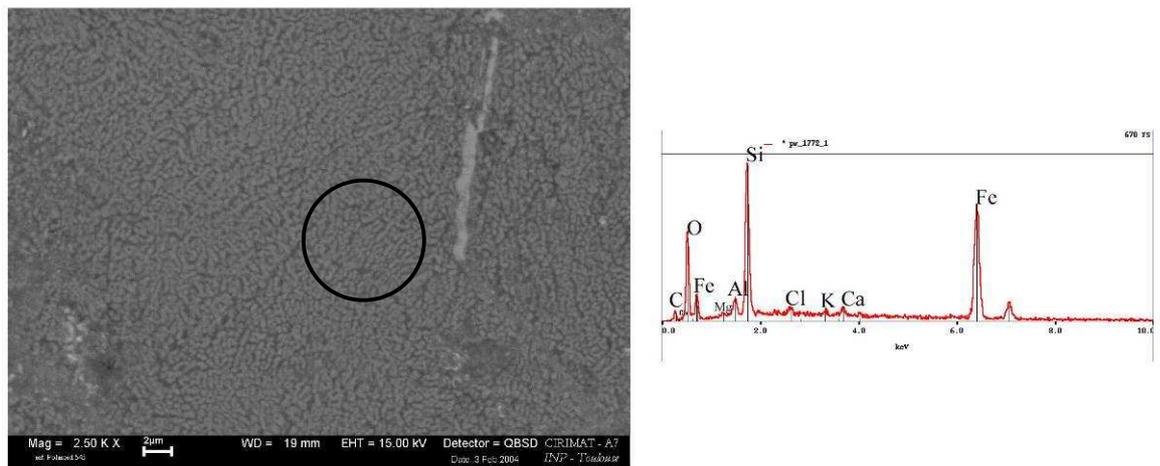


Figure 15 : Image et spectre MEB-EDS. Analyse d'une scorie. Le cercle noir représente la plage étudiée.

Pointe de flèche BU10-3567

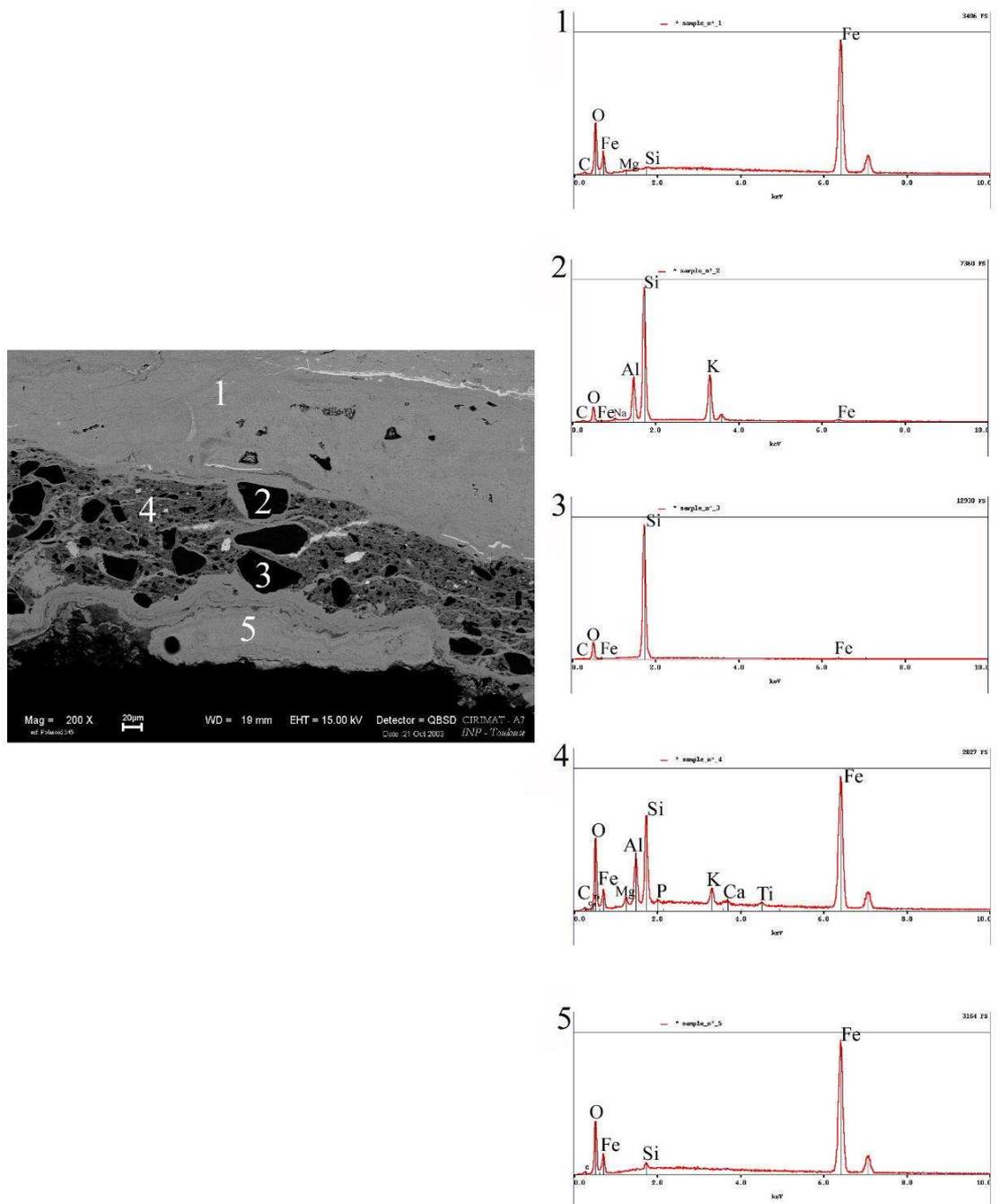
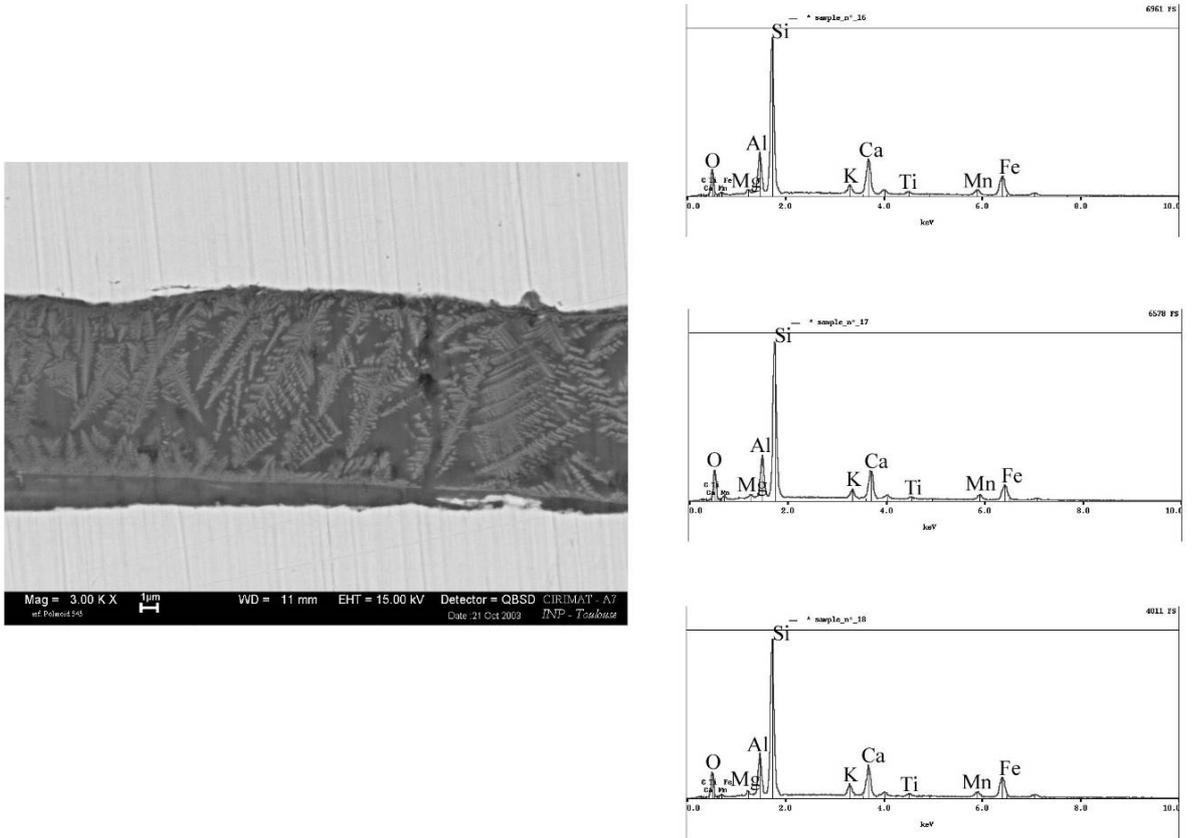


Figure 16 : Image et spectres MEB-EBS. Identification des grains de sable (2 et 3) de la zone de gangue (4) et des zones oxydées (5)

Pointe de flèche BU 10-3567



Pointe de flèche E21-748

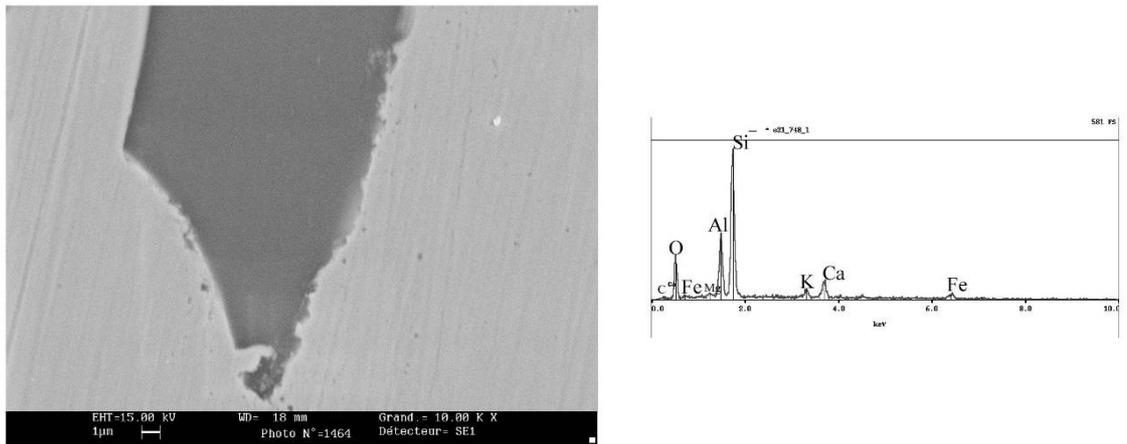


Figure 17 : Images et spectres MEB-EDS de deux types de scories.

Pointe de flèche PM 662

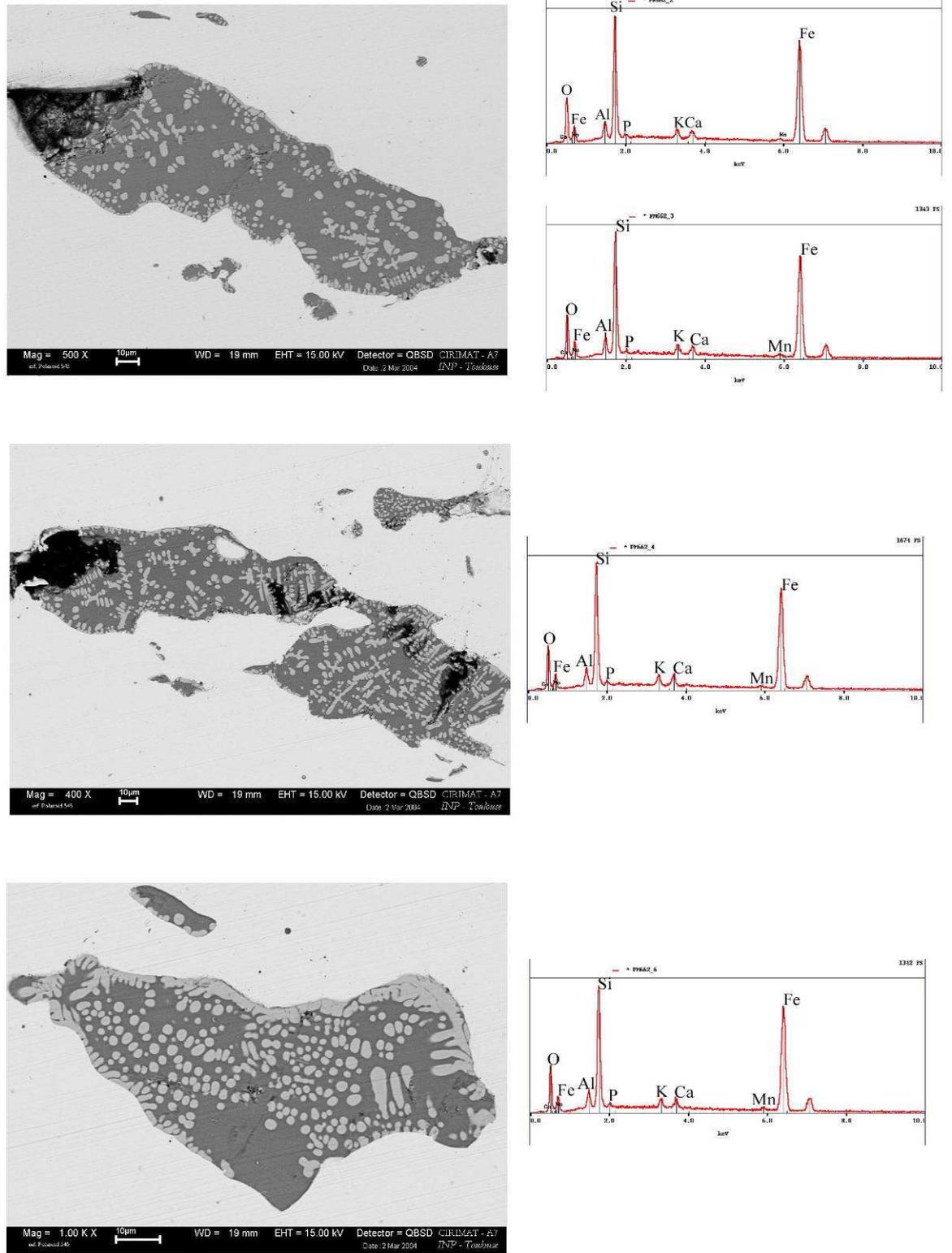
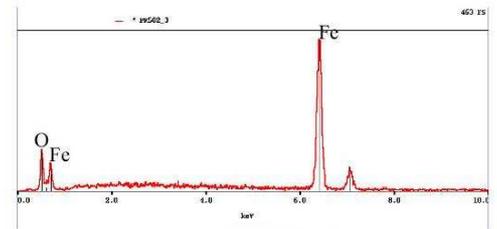
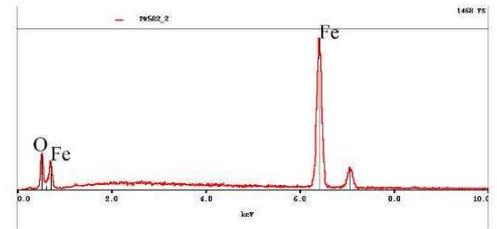
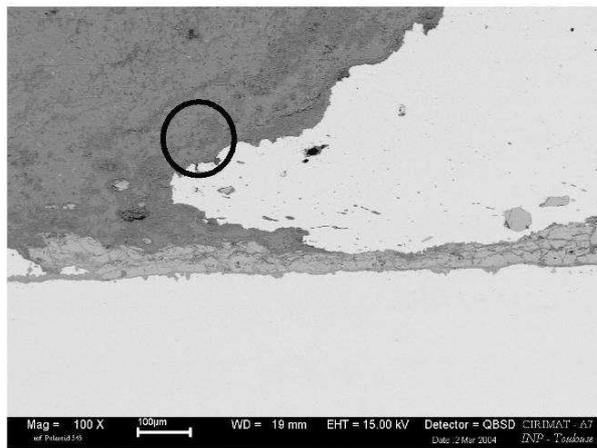
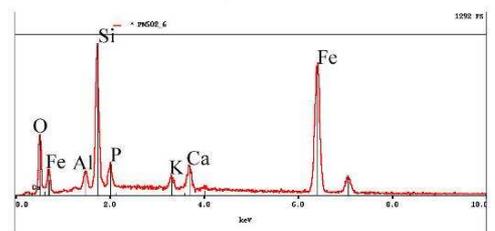
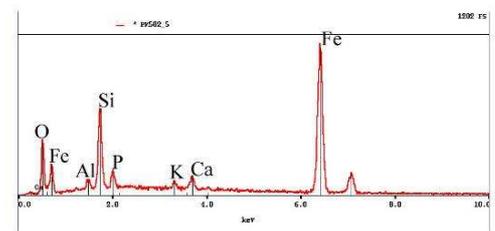
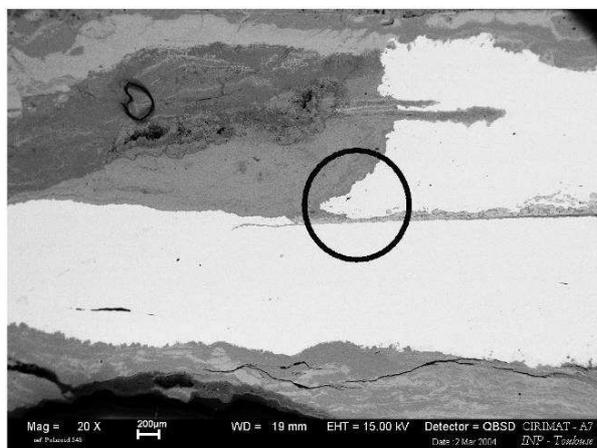


Figure 18 : Images et spectres MEB-EDS. Analyse de plusieurs scories avec dendrites de wustite. La présence de phosphore est à signaler.

Pointe de flèche PM 502



Analyses des zones oxydées



Analyses de deux scories avec dendrites FeO se situant dans la zone matérialisée par le cercle noir

Figure 19 : Images et spectres MEB-EDS.

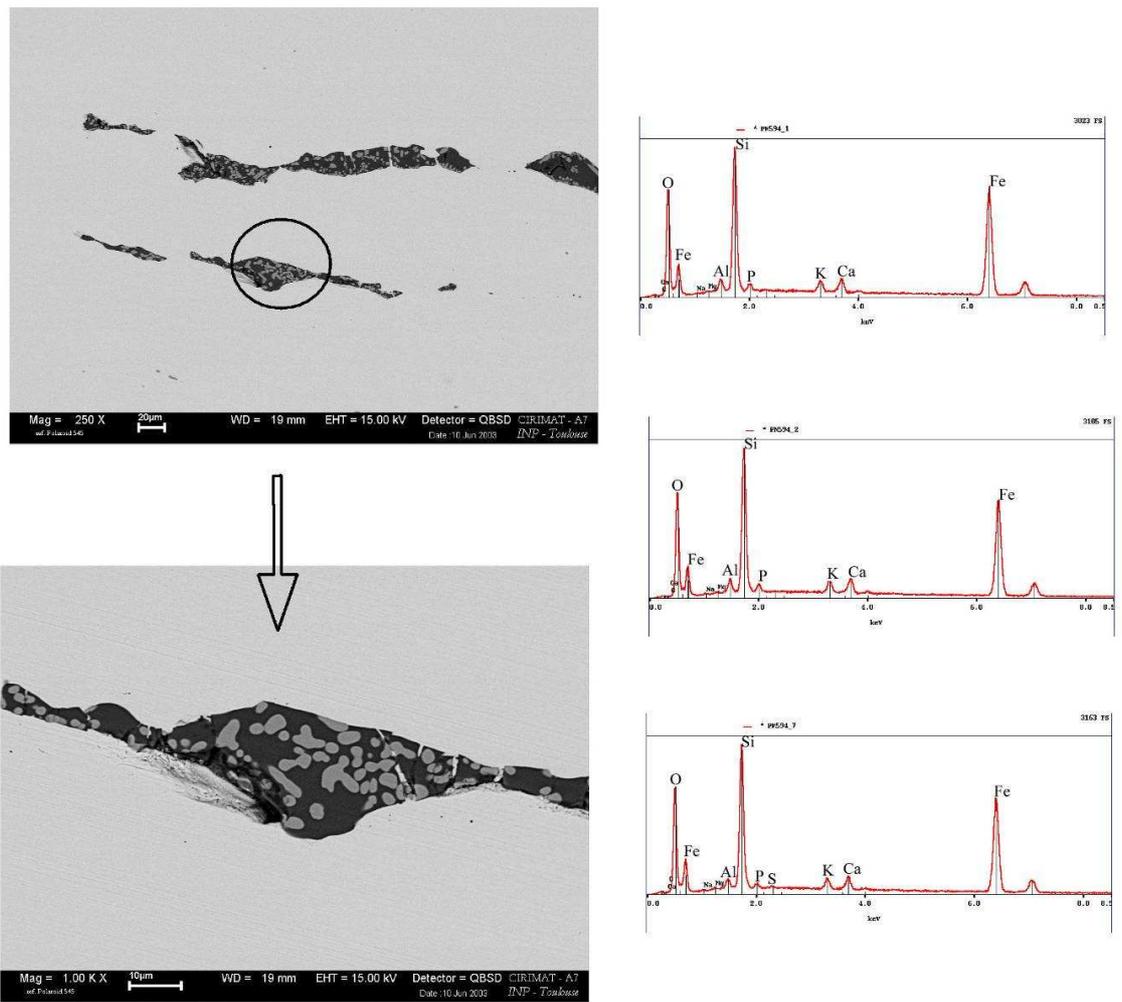


Figure 20 : Images et spectres MEB-EDS. Analyse d'une scorie avec dendrites de wustite. Présence de phosphore.

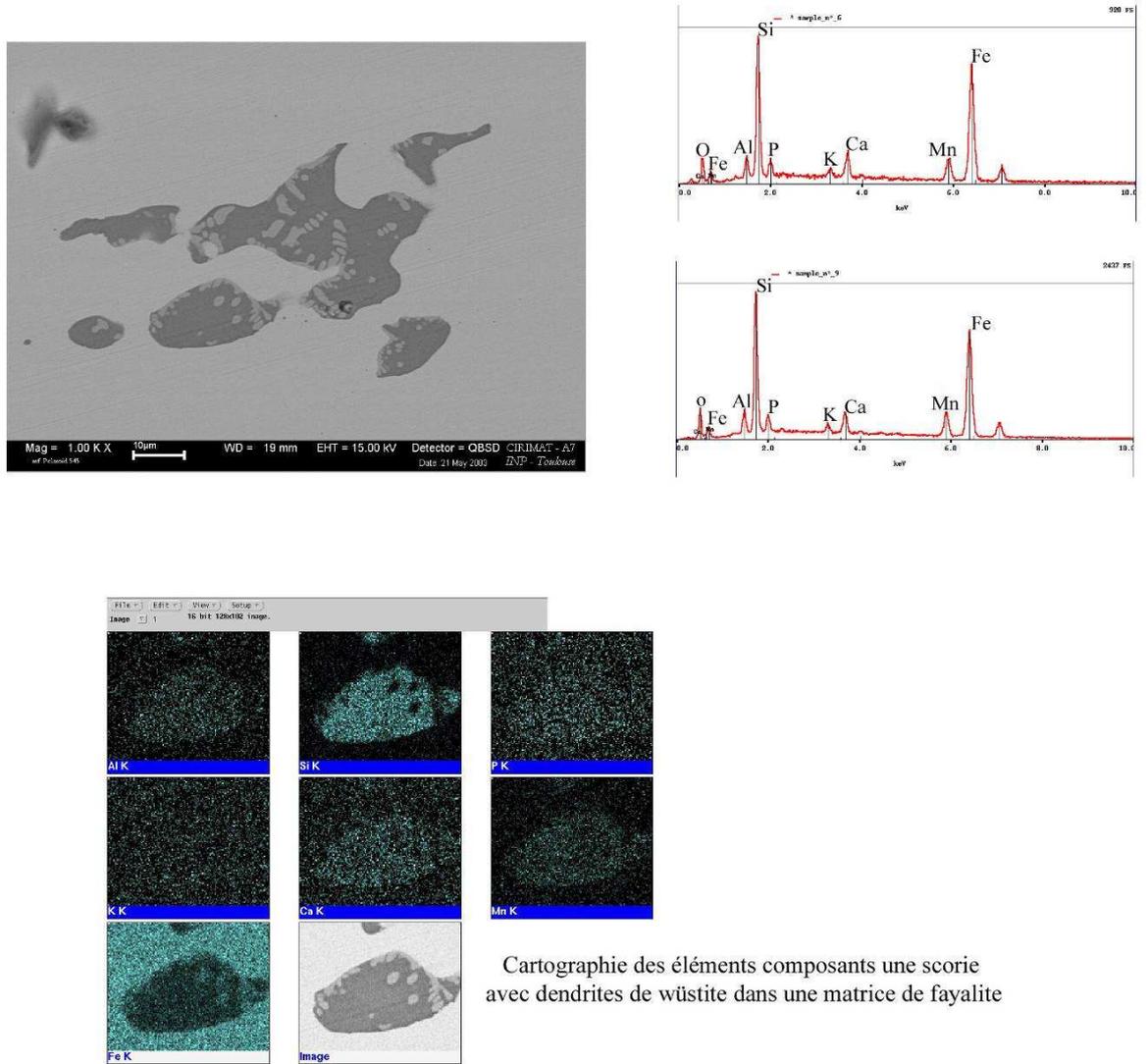


Figure 21 : Images et spectres MEB-EDS. Analyse d'une scorie avec dendrites de wüstite. Présence de phosphore. Cartographie des éléments.

Al	Si	P
K	Ca	Mn
Fe	image	

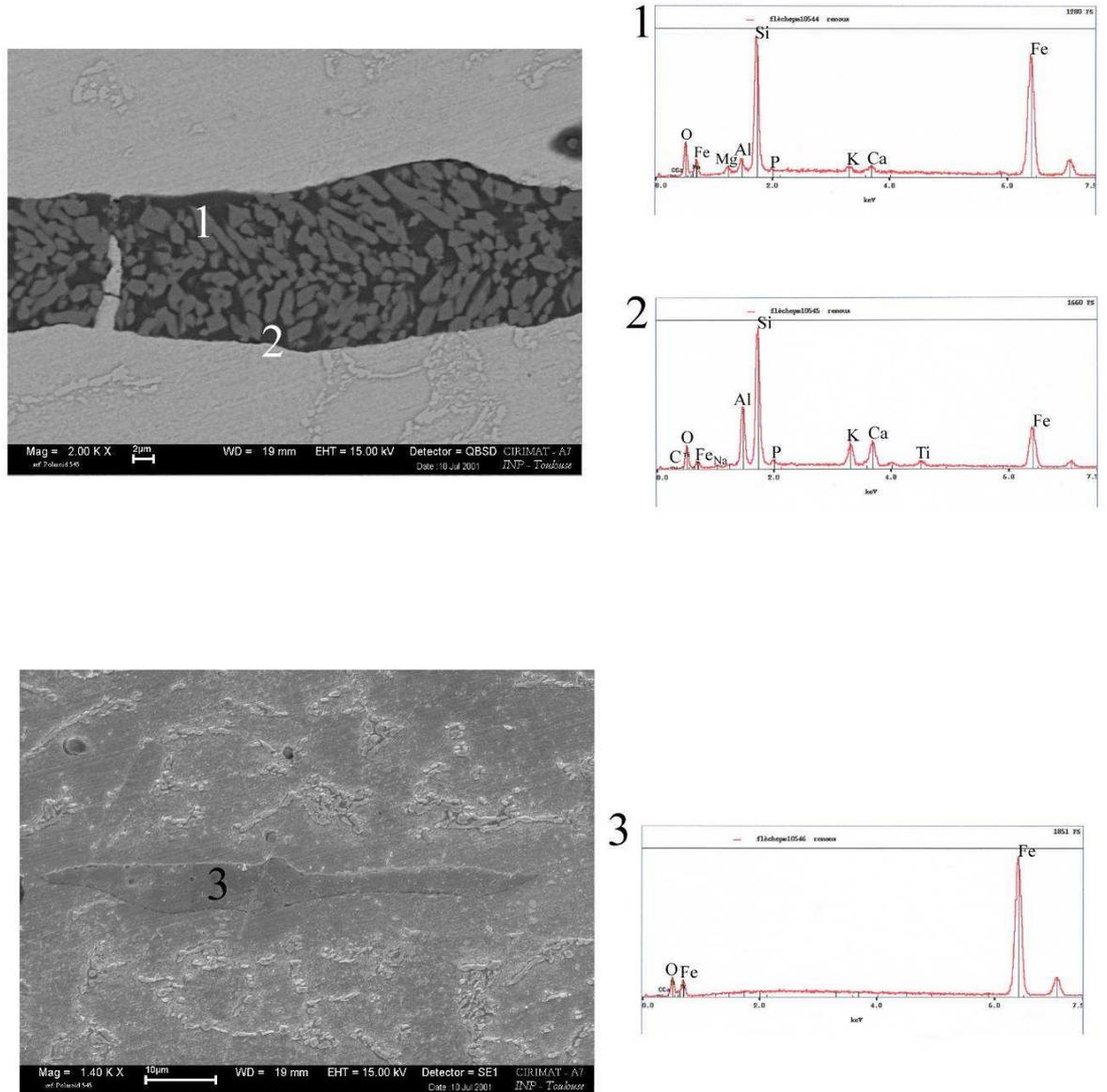
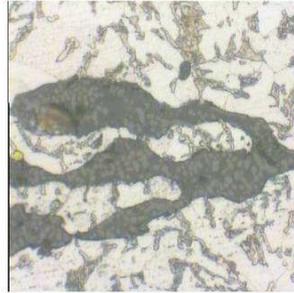
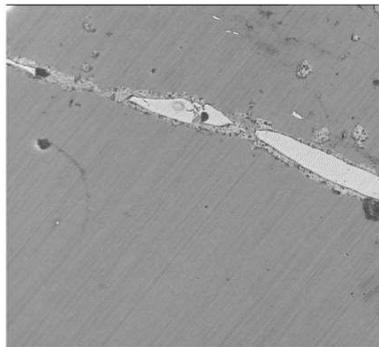
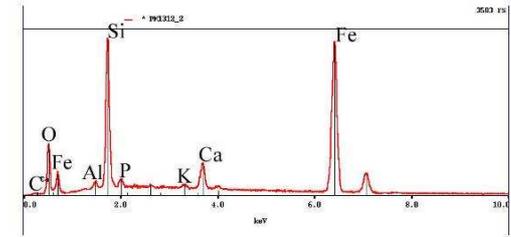
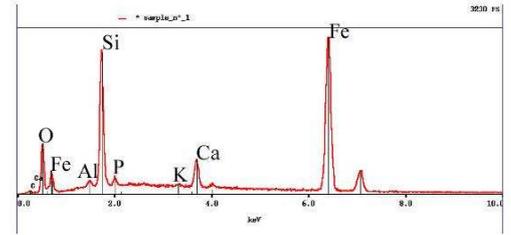


Figure 22 : Images et spectres MEB-EDS. Analyse de scories. Les plages d'analyse sont indiquées par un chiffre.

Pointe de flèche PM 1312



Analyses effectuées dans la matrice de la scorie



Scorie analysée aussi à la microsonde électronique

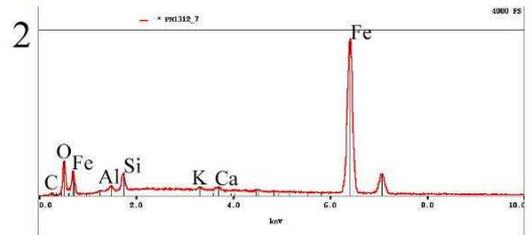
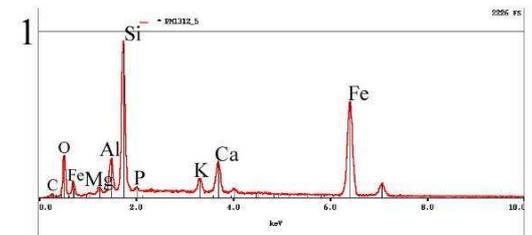
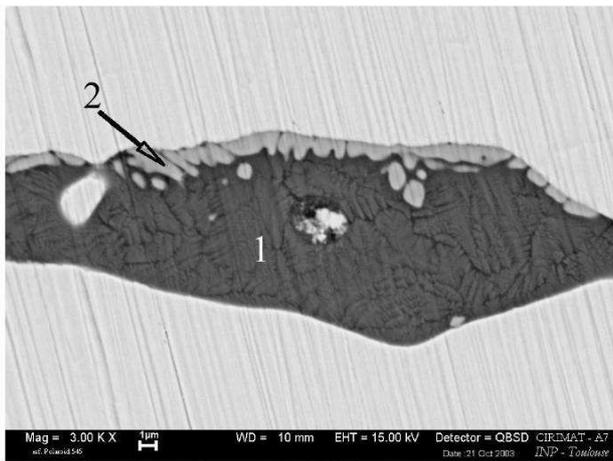
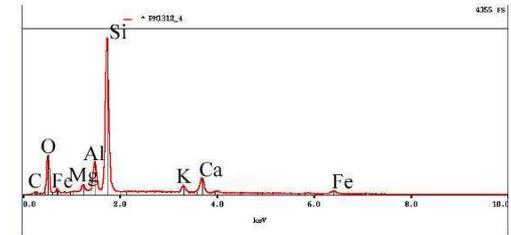


Figure 23 : Images et spectres MEB-EDS. Analyse de scories.

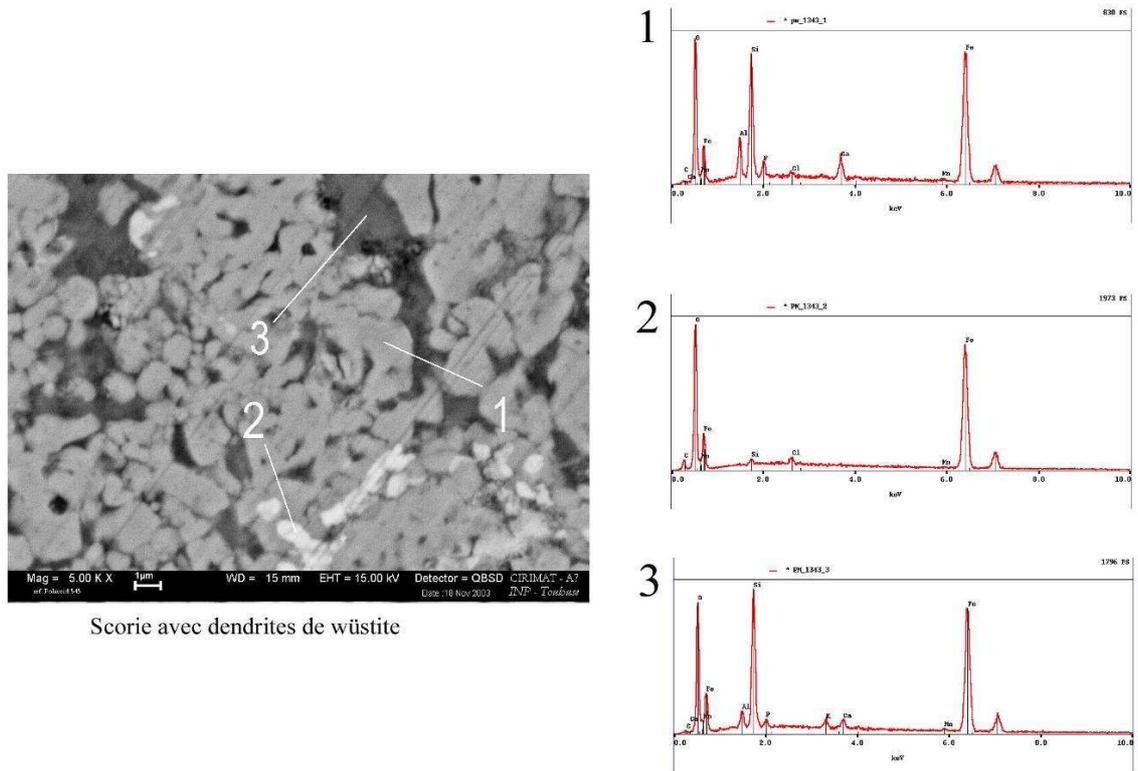


Figure 24 : Images et spectres MEB-EDS. Analyse d'une scorie avec dendrites de wüstite. Trois plages ont été étudiées. La présence de phosphore est à noter.

Pointe de flèche PM 1769

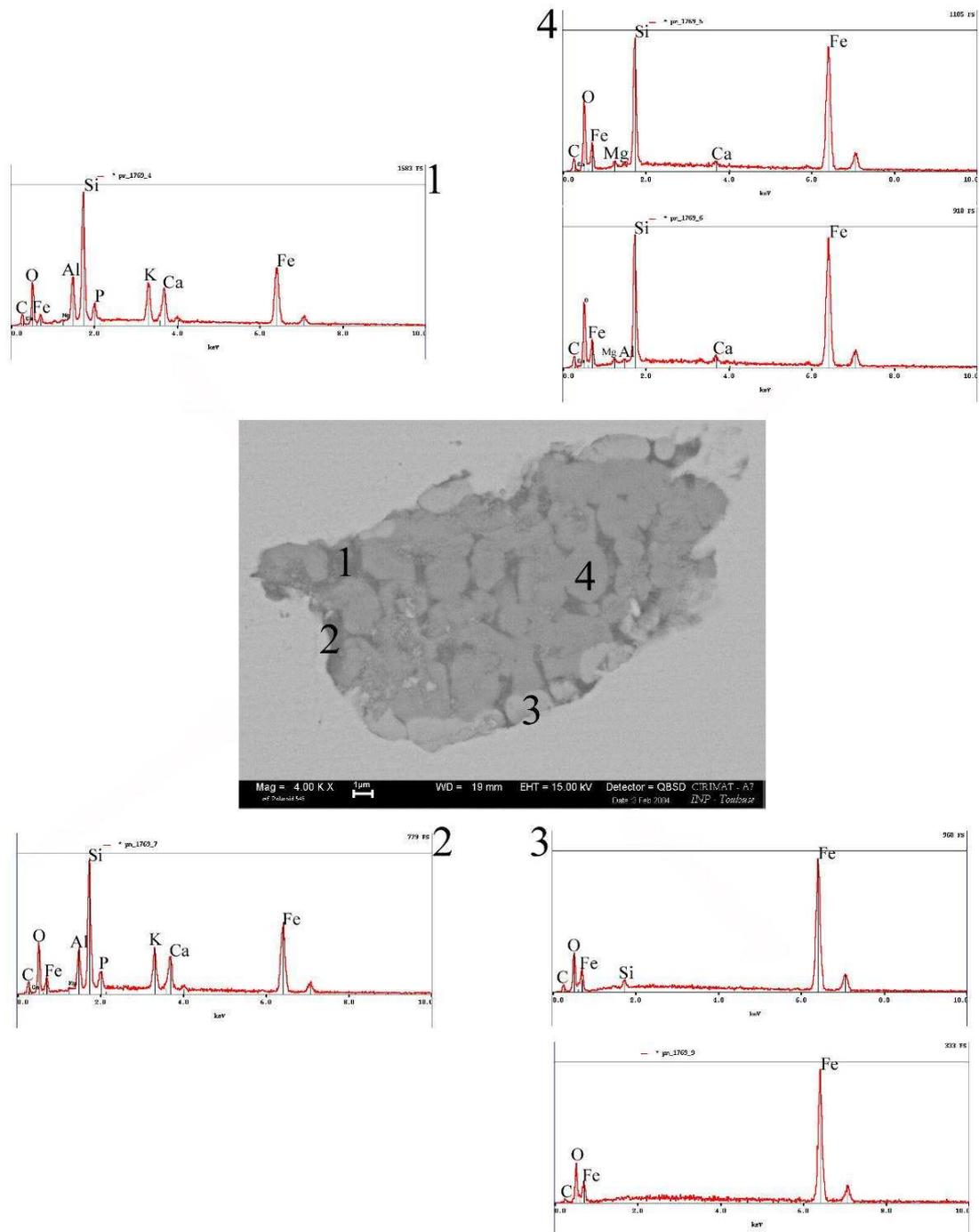


Figure 25 : Images et spectres MEB-EDS. Scorie avec dendrites de wustite. Les plages 1 et 2 révèlent la présence de phosphore.

Pointe de flèche PM 1769

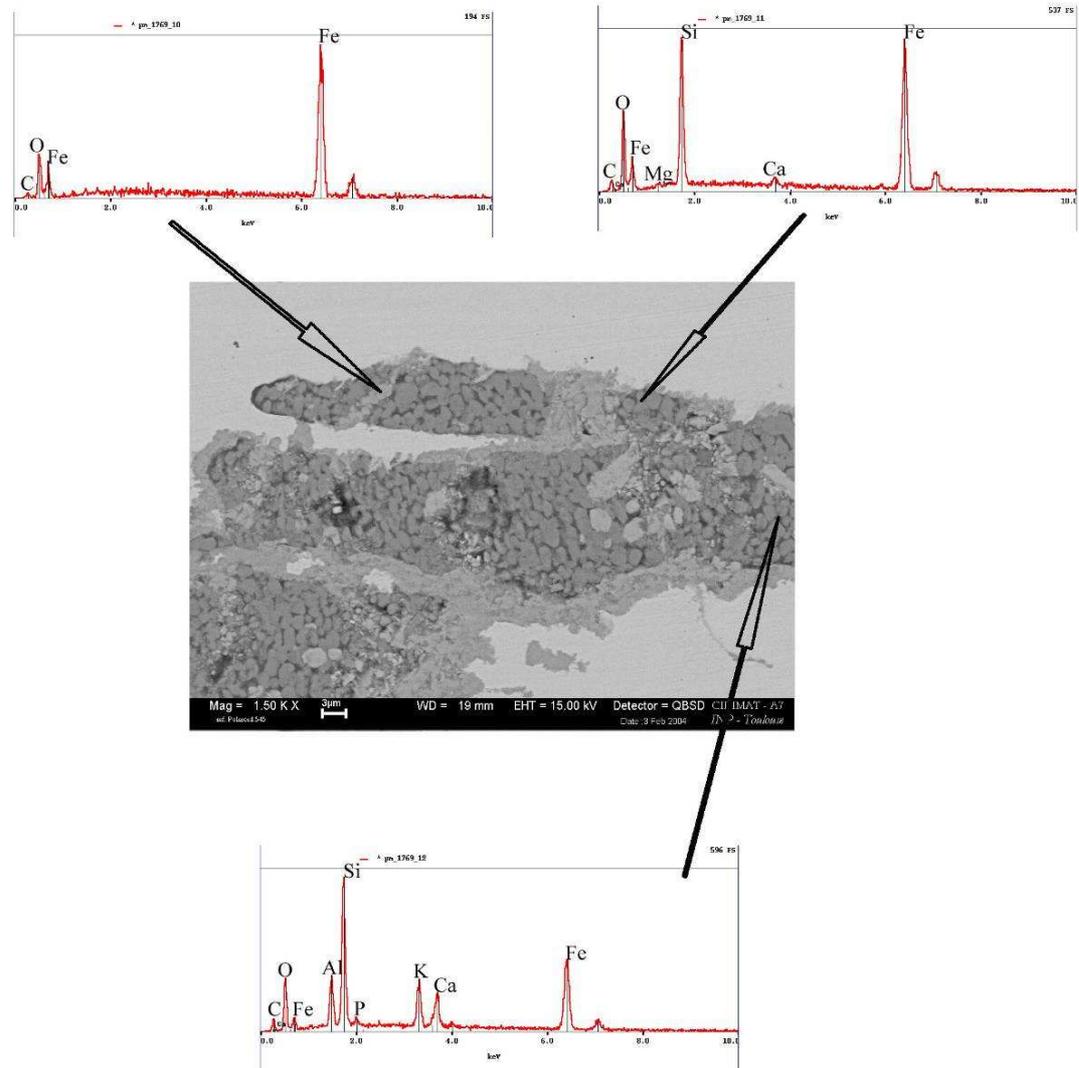


Figure 26 : Images et spectres MEB-EDS. Analyse d'une scorie avec dendrites de wustite.

ANNEXE 8 ANALYSES A LA MICROSONDE ELECTRONIQUE

Echantillon	Ox% (Na)	Ox% (Mg)	Ox% (Al)	Ox% (Si)	Ox% (P)	Ox% (K)	Ox% (Ca)	Ox% (Ti)	Ox% (Cr)	Ox% (Mn)	Ox% (Fe)	Ox% (Ni)
994a1	0.02	0.20	4.92	27.37	1.15	0.93	3.14	0.03	0.00	8.94	52.97	0.00
994a2	0.03	0.32	5.03	27.05	1.18	0.84	3.22	0.12	0.01	9.01	52.95	0.02
994b1	0.04	0.23	4.75	27.43	1.19	0.76	3.27	0.14	0.03	8.67	53.34	0.00
994b2	0.07	0.24	4.89	28.03	1.16	0.83	3.26	0.14	0.04	9.13	52.26	0.05
994c1	0.07	0.21	4.20	31.20	1.46	0.90	3.34	0.00	0.00	5.97	52.15	0.00
994c2	0.00	0.25	4.22	31.14	1.48	0.95	3.45	0.10	0.00	6.16	50.67	0.00
994c3	0.10	0.20	4.30	30.59	1.54	0.82	3.40	0.04	0.00	5.94	52.37	0.12
991-1	0.17	0.57	3.55	31.22	0.22	1.37	6.93	0.11	0.00	1.35	53.76	0.04
991-2	0.19	0.58	3.85	35.63	0.29	1.58	7.52	0.12	0.00	1.26	48.39	0.00
991-3	0.04	0.43	2.06	18.63	0.07	0.63	4.46	0.18	0.06	0.99	71.24	0.05
991-4	0.16	0.62	4.04	35.62	0.21	1.57	7.83	0.12	0.00	1.18	49.16	0.00
1054a1	0.12	0.77	6.48	23.50	1.37	0.81	1.38	0.48	0.00	0.28	65.55	0.00
1054a2	0.29	0.61	8.38	23.70	1.69	1.28	1.75	0.60	0.06	0.27	63.27	0.05
1054a3	0.45	0.67	6.55	29.11	1.97	2.04	2.04	0.35	0.00	0.37	57.22	0.00
1054a4	0.76	0.51	7.65	30.89	2.26	2.76	2.65	0.38	0.00	0.19	52.05	0.01
1054a5	0.30	1.25	3.21	29.17	1.06	1.21	1.12	0.31	0.00	0.53	64.15	0.02
1312-1	0.23	2.11	10.85	63.39	0.00	2.52	7.81	0.48	0.00	1.78	10.10	0.06
1312-2	0.27	2.18	11.06	63.31	0.04	2.52	7.86	0.53	0.00	1.84	11.01	0.01
1312-3	0.23	2.09	11.0	63.91	0.00	2.52	7.71	0.52	0.00	1.71	10.86	0.03
945-1	0.19	0.25	3.33	35.03	0.40	0.93	2.79	0.44	0.00	2.13	53.59	0.00
945-2	0.17	0.20	3.24	35.54	0.39	1.05	2.82	0.41	0.00	1.97	54.36	0.04
945-3	0.17	0.13	3.40	35.02	0.47	0.99	2.84	0.34	0.00	1.87	53.97	0.00
594-1	0.00	0.03	0.23	0.49	0.09	0.02	0.06	0.00	0.00	0.00	74.42	0.05
594-2	0.03	0.15	0.20	0.30	0.00	0.02	0.06	0.08	0.00	0.00	98.17	0.01
594-3	0.02	0.11	0.42	2.89	0.10	0.17	0.40	0.01	0.00	0.12	95.59	0.00
594-4	0.06	0.03	0.60	1.63	0.87	0.01	1.24	0.00	0.02	0.00	90.63	0.04
662-1	0.05	0.17	2.94	18.07	0.38	0.82	0.93	0.15	0.06	0.82	74.09	0.09
662-2	0.08	0.23	4.91	31.28	0.73	1.37	1.69	0.08	0.03	1.02	59.04	0.03
662-3	0.07	0.25	4.87	30.52	0.78	1.35	1.57	0.16	0.00	1.10	60.02	0.00

Echantillon	Ox% (Na)	Ox% (Mg)	Ox% (Al)	Ox% (Si)	Ox% (K)	Ox% (Ca)	Ox% (Ti)	Ox% (Cr)	Ox% (Mn)	Ox% (Fe)	Ox% (Ni)
PM 436 1	0.28	0.60	4.95	75.25	1.88	4.32	0.28	0.00	0.86	10.84	0.00
PM 436 2	0.40	0.94	7.49	63.59	2.83	6.37	0.40	0.04	1.40	17.0	0.00
PM 436 3	0.30	1.09	6.52	62.51	2.07	7.06	0.48	0.0435	1.56	17.68	0.00
PM 436 4	0.02	0.41	0.09	39.93	0.06	0.23	0.00	0.0115	0.91	44.33	0.01
PM 436 5	0.03	0.27	0.11	33.98	0.06	0.35	0.01	0.0067	0.41	47.77	0.00
PM 436 6	0.17	0.46	5.56	62.75	1.45	1.49	0.22	0.0002	0.46	20.83	0.00
PM 436 7	0.28	0.92	7.20	63.07	2.98	5.87	0.31	0.0502	1.33	16.98	0.00
PM 436 8	0.36	0.95	6.59	63.61	2.60	6.14	0.43	0.0224	1.36	18.24	0.08
PM 436 9	0.27	0.21	2.98	78.69	0.66	1.62	0.302	0.0002	0.3	9.99	0.01
PM 436 10	0.00	0.89	0.76	38.59	0.00	0.20	0.23	0.0207	1.55	44.41	0.00
PM 436 11	0.00	0.65	0.19	37.88	0.06	0.15	0.02	0.0205	1.03	45.91	0.01
PM 436 12	0.34	0.83	6.48	65.71	2.43	6.13	0.39	0.0877	1.40	15.39	0.00
PM 436 13	0.32	0.96	6.22	68.17	2.16	5.97	0.39	0.0225	1.39	16.44	0.00
PM 436 14	0.21	0.69	6.12	50.38	1.35	2.84	0.40	0.0002	1.02	29.06	0.12
PM 436 15	0.00	0.59	0.48	35.08	0.05	0.20	0.02	0.0011	0.65	49.17	0.04
PM 436 16	0.42	0.62	7.50	77.41	3.94	3.33	0.40	0.0002	0.61	5.90	0.04
PM 436 17	0.36	0.86	6.25	64.90	2.61	5.52	0.34	0.0002	1.17	16.26	0.01
PM 662 1	0.05	0.04	0.48	1.71	0.06	0.11	0.05	0.0239	0.29	96.26	0.00
PM 662 2	0.04	0.21	4.16	30.11	1.09	1.44	0.08	0.00	1.08	60.10	0.02
PM 662 3	0.09	0.04	0.61	1.48	0.06	0.11	0.04	0.00	0.32	96.49	0.14
PM 662 4	0.21	0.13	3.44	30.04	1.89	5.56	0.00	0.00	0.25	56.06	0.01
PM 662 5	0.0	0.05	0.20	0.24	0.00	0.02	0.00	0.00	0.16	99.30	0.03
PM 662 6	0.02	0.00	0.22	0.16	0.00	0.0	0.00	0.01	0.04	97.45	0.13
PM 662 7	0.12	0.20	5.38	30.99	1.69	1.82	0.14	0.00	1.04	56.7	0.00
PM 662 8	0.08	0.23	5.26	31.17	1.75	1.81	0.06	0.02	1.08	57.39	0.00
PM 662 9	0.10	0.19	5.56	30.25	1.54	1.75	0.15	0.00	1.05	57.44	0.00
PM 662 10	0.06	0.33	1.05	5.77	0.30	0.84	0.07	0.01	0.32	89.09	0.00
PM 662 11	0.0	0.22	0.44	0.4	0.00	0.08	0.03	0.00	0.18	96.96	0.01
PM 662 12	0.03	0.27	1.97	13.05	0.56	3.28	0.11	0.04	0.38	80.15	0.00
PM 662 13	0.25	0.57	4.7	32.17	1.97	6.47	0.00	0.00	0.60	49.47	0.02
PM 662 14	0.00	0.21	0.36	0.21	0.00	0.06	0.10	0.00	0.34	97.82	0.07
PM 662 15	0.03	0.25	4.62	30.32	1.24	1.58	0.10	0.00	1.11	58.90	0.04
BU10 484 1	0.01	0.01	0.20	5.0911	0.00	0.85	0.00	0.86	0.01	68.06	0.00
BU10 484 2	0.00	0.06	0.05	5.22	0.0	0.72	0.00	0.54	0.09	68.64	0.03
BU10 484 3	0.03	0.00	18.03	64.04	16.89	0.00	0.01	0.00	0.05	1.75	0.05
BU10 484 4	0.00	0.03	0.00	2.48	0.01	0.36	0.00	0.04	0.01	72.84	0.00

ANNEXE 9 RESULTATS ET IMAGES S.I.M.S.

Cette méthode d'analyse a été privilégiée pour la localisation du carbone dans la matrice ferreuse. L'échelle donnée est logarithmique. Notons que des effets de matrice peuvent intervenir dans l'émission des ions secondaires : l'intensité ionique mesurée n'est pas directement proportionnelle à la concentration d'un élément. C'est le cas notamment pour la présence de carbone dans les dendrites de FeO qui ne doit pas être considérée comme significative.

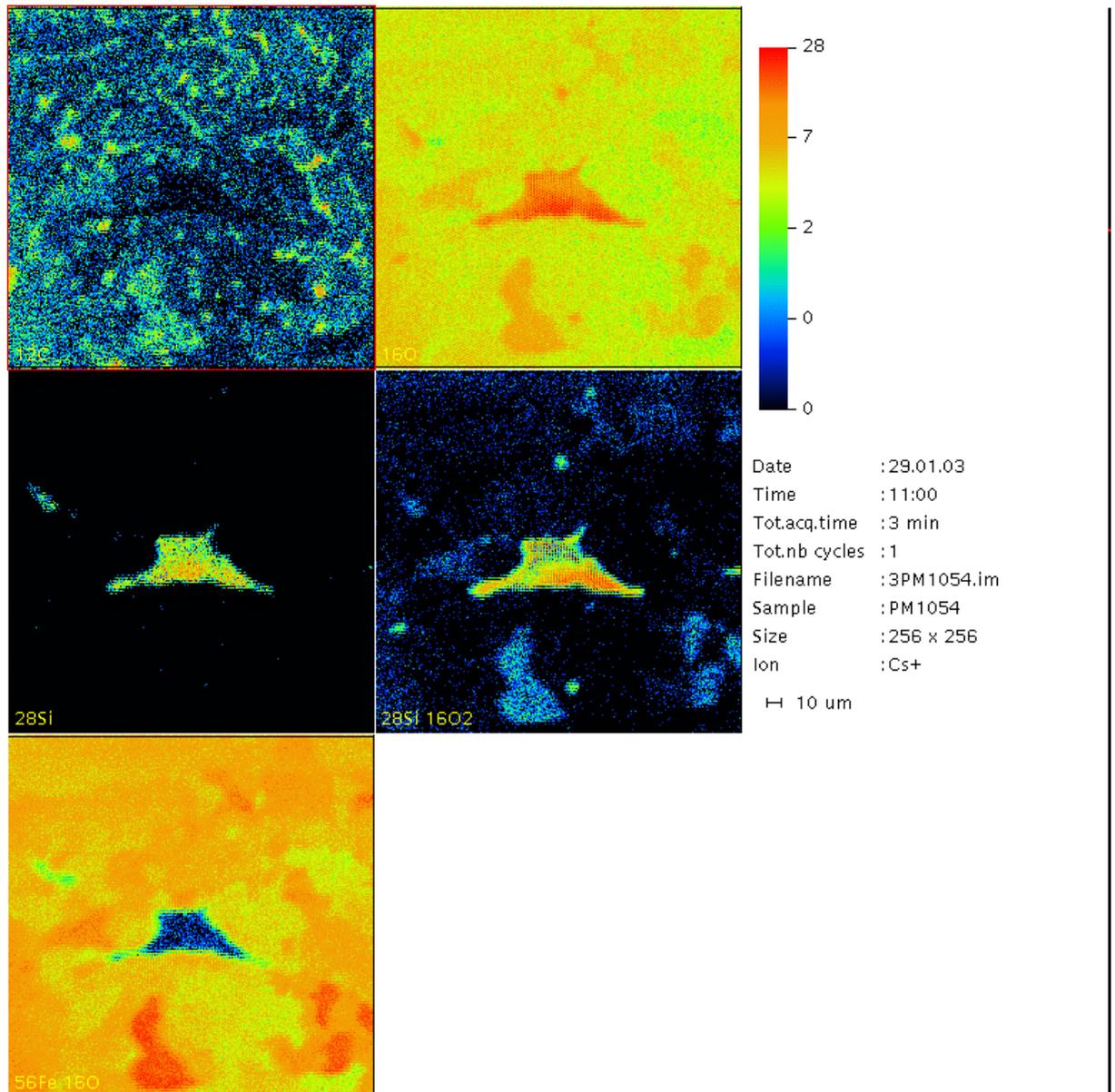


Figure 27 : Pointe de flèche PM 1054. Analyse d'une scorie monophasée. Les espèces recherchées étant le C, O, Si, SiO₂ et FeO. L'analyse dans ce cas présent a été réalisée pour faire apparaître surtout le carbone qui se présente en précipités sur les joints de grains.

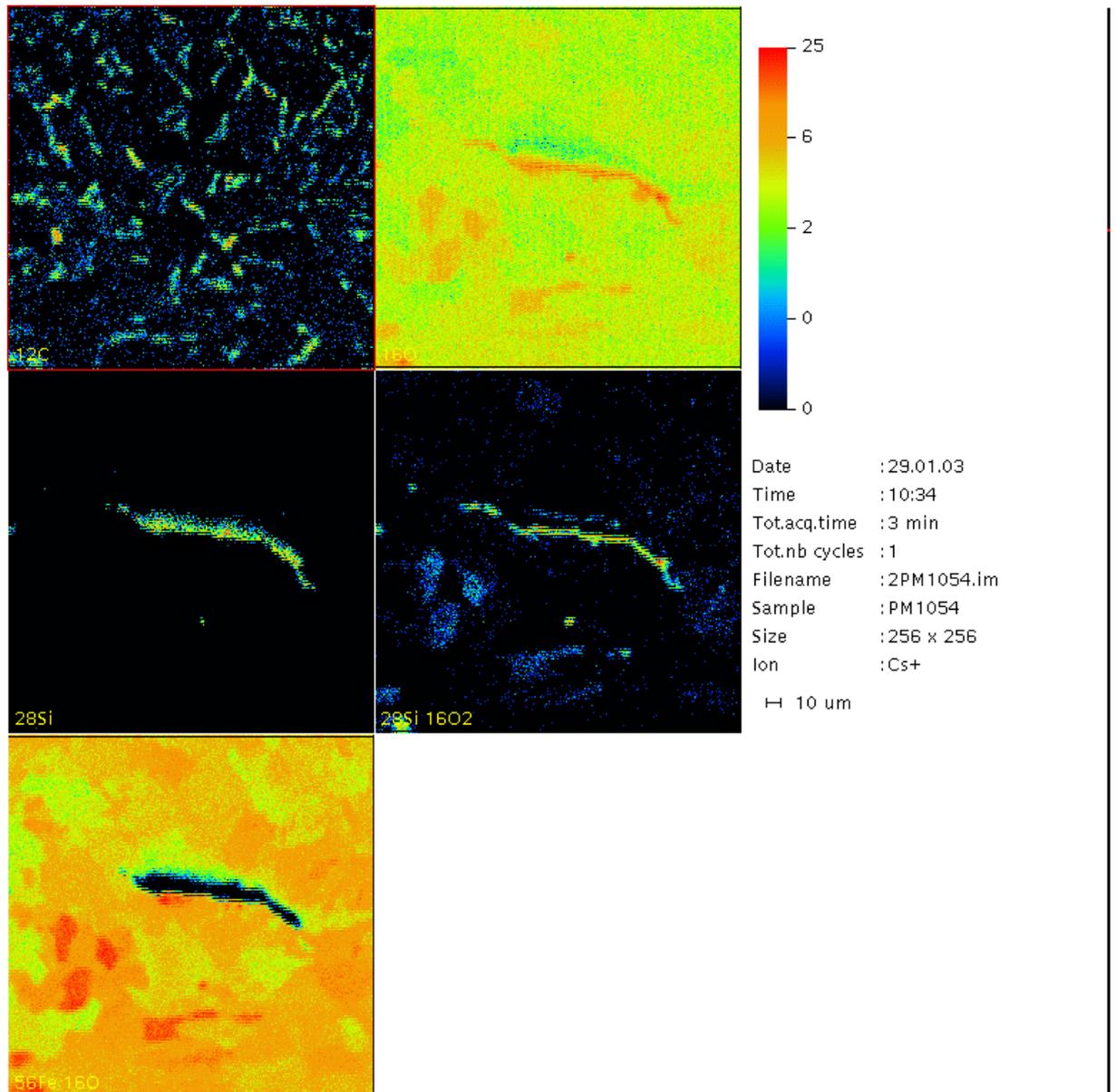


Figure 28 : : Pointe de flèche PM 1054. Analyse d'une scorie monophasée. Les espèces recherchées étant le C, O, Si, Cl, SiO₂ et FeO. Sur la première image nous constatons l'emplacement des précipités de cémentite aux joints de grains de la structure ferritique.

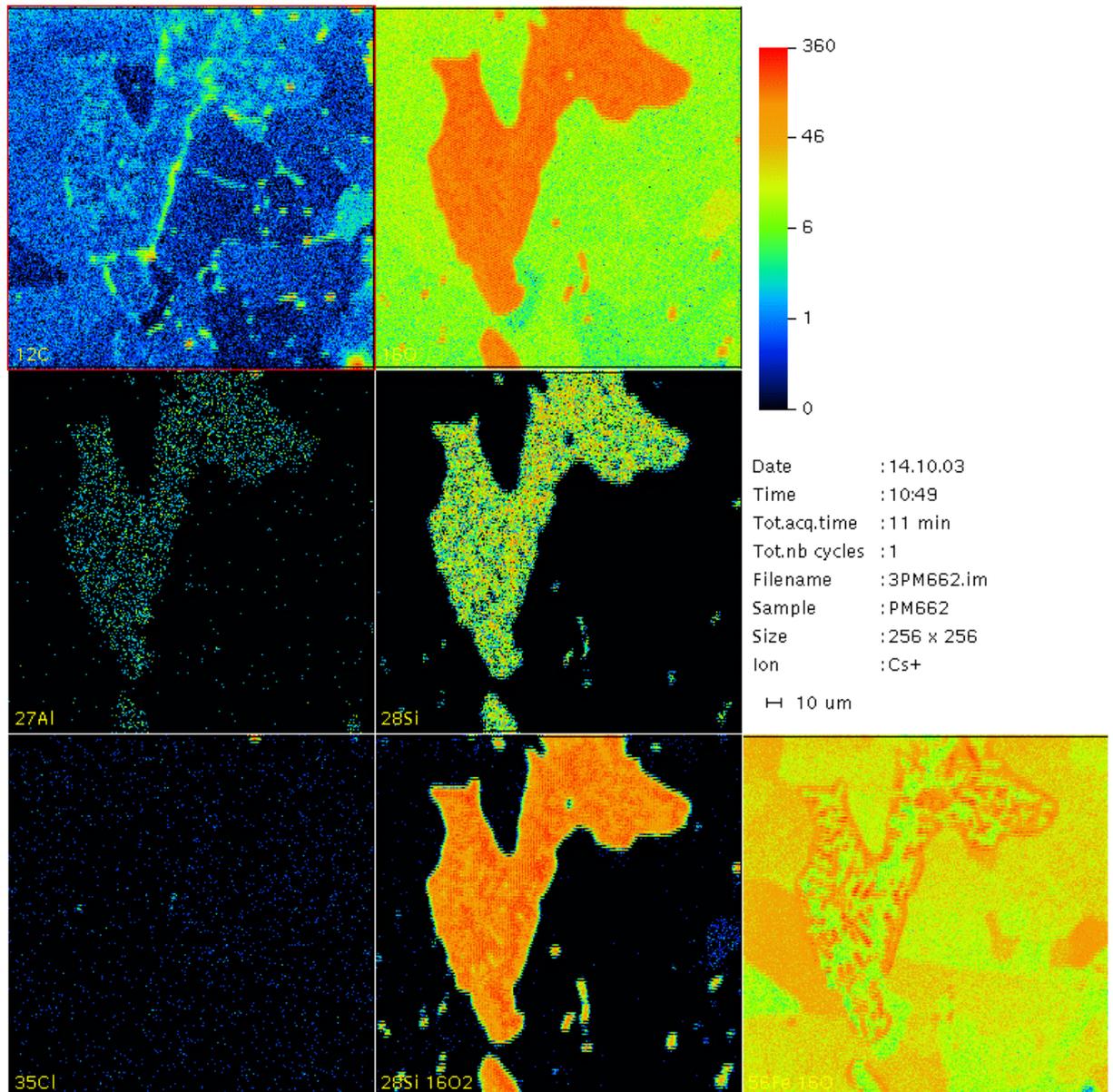


Figure 29 : Pointe de flèche PM 662. Analyse d'une scorie biphasée avec dendrites de wustite. Les espèces recherchées étant le C, O, Al, Si, Cl, SiO₂ et FeO. La structure ferritique s'observe parfaitement.

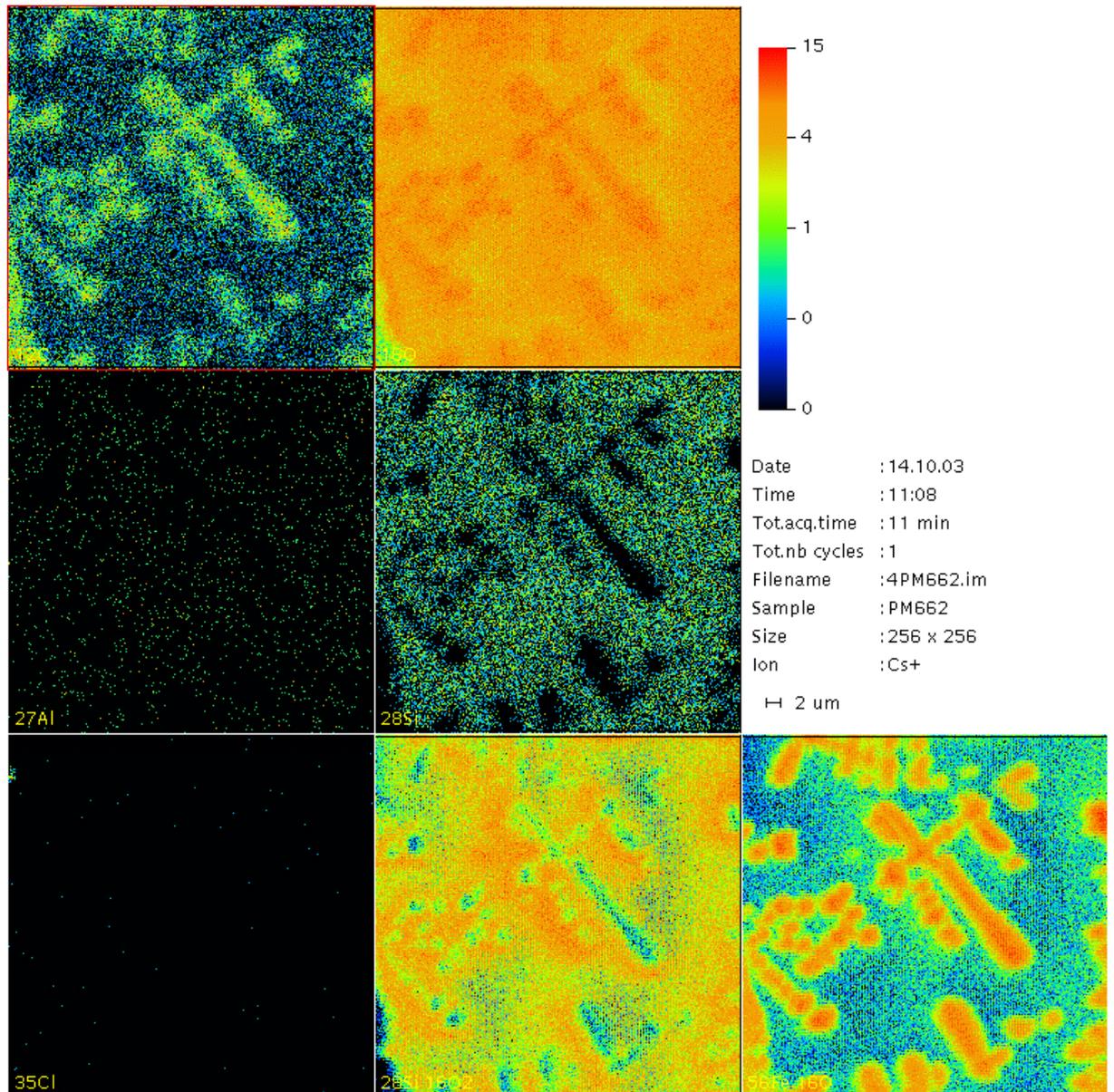


Figure 30 : Pointe de flèche PM 662. Analyse d'une scorie biphasée avec dendrites de wustite. Les espèces recherchées étant le C, O, Al, Si, Cl, SiO₂ et FeO.

TABLE DES ANNEXES

ANNEXE 1	TERMINOLOGIE SIMPLIFIEE DE L'ARC.....	75
ANNEXE 2	LES DIFFERENTS MODES DE PREHENSION DE LA CORDE DE L'ARC.....	76
ANNEXE 3	INVENTAIRE DES RENFORTS D'ARCS	78
ANNEXE 4	INVENTAIRE DES DECOUVERTES DE POINTES DE FLECHE EN FER EN FRANCE.....	80
ANNEXE 5	CARACTERISTIQUES DES DIFFERENTS TYPES D'INVESTIGATION RETENUS POUR LA QUALIFICATION MICROSTRUCTURALE ET ANALYTIQUE DES OBJETS ETUDIES.....	84
➤	PREPARATION METALLOGRAPHIQUE DES ECHANTILLONS.....	84
-	LE DECOUPAGE DES ECHANTILLONS.....	84
-	ENROBAGE DES ECHANTILLONS.....	84
	<i>Enrobage à froid.....</i>	85
	<i>Enrobage à chaud.....</i>	85
-	PREPOLISSAGE ET POLISSAGE DE FINITION DES ECHANTILLONS.....	86
	<i>Prépolissage.....</i>	86
	<i>Polissage de finition.....</i>	86
-	ATTAQUE CHIMIQUE.....	87
➤	OBSERVATIONS MACROSCOPIQUE ET MICROSCOPIQUE DES ECHANTILLONS.....	87
-	MACROSCOPIE OPTIQUE.....	87
-	MICROSCOPIE OPTIQUE.....	87
➤	METHODES D'ESSAI DE DURETE.....	89
➤	METHODES ANALYTIQUES.....	90
-	MICROSCOPIE ELECTRONIQUE A BALAYAGE (M.E.B) / MICROANALYSE ASSOCIEE (E.D.S.).....	90
-	SPECTROMETRIE DE MASSE D'IONS SECONDAIRES (S.I.M.S.).....	91
-	MICROSONDE ELECTRONIQUE.....	93
-	METHODE D'ANALYSE PAR LA-ICP-MS (LASER ABLATION - INDUCTIVELY COUPLED PLASMA - MASS SPECTROMETRY).....	94
ANNEXE 6	FICHES RECAPITULATIVES DES POINTES DE FLECHE ETUDIEES.....	96
➤	LES POINTES DE FLECHE DU PUY D'ISSOLUD.....	96
➤	LE TRAIT DE CATAPULTE.....	115
➤	LES POINTES DE FLECHE D'ALEZIA.....	117
ANNEXE 7	IMAGES ET SPECTRES MEB-EDS.....	119
ANNEXE 8	ANALYSES A LA MICROSONDE ELECTRONIQUE.....	131
ANNEXE 9	RESULTATS ET IMAGES S.I.M.S.....	133