
Étude métallographique et chimique de produits finis et semi-finis en fer issus du site du Rocher du Vieux-Château à Pont-de-Bonne (Modave, Belgique)

Auteur : Dewez, Amandine

Promoteur(s) : Van Wersch, Line

Faculté : Faculté de Philosophie et Lettres

Diplôme : Master en histoire de l'art et archéologie, orientation archéométrie, à finalité approfondie

Année académique : 2024-2025

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/24897>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.

Université de Liège
Faculté de Philosophie et Lettres
Département des Sciences historiques
Histoire de l'Art et Archéologie



ETUDE METALLOGRAPHIQUE ET CHIMIQUE DE PRODUITS FINIS ET SEMI-FINIS EN FER

ISSUS DU SITE DU *ROCHER DU VIEUX-CHATEAU* A PONT-DE-BONNE
(MODAVE, BELGIQUE)



ERRATA

Mémoire présenté par **Amandine DEWEZ**
en vue de l'obtention du grade de Master en Histoire de l'art et Archéologie,
orientation Archéométrie, à finalité approfondie

Sous la direction de **M. Pierre NOIRET** et de **Mme Line VAN WERSCH**
Lecteurs : Alexandre Disser
Justin Coppe

Année académique 2024-2025

Université de Liège
Faculté de Philosophie et Lettres
Département des Sciences historiques
Histoire de l'Art et Archéologie
 LIÈGE université
Philosophie et Lettres
Département de Philosophie

ETUDE METALLOGRAPHIQUE ET CHIMIQUE DE PRODUITS FINIS ET SEMI-FINIS EN FER

ISSUS DU SITE DU *ROCHER DU VIEUX-CHATEAU* A PONT-DE-BONNE
(MODAVE, BELGIQUE)



ERRATA

Mémoire présenté par **Amandine DEWEZ**
en vue de l'obtention du grade de Master en Histoire de l'art et Archéologie,
orientation Archéométrie, à finalité approfondie

Sous la direction de **M. Pierre NOIRET** et de **Mme Line VAN WERSCH**
Lecteurs : Alexandre Disser
Justin Coppe

Année académique 2024-2025

a. Corrections orthographiques

Pages	Au lieu de :	Lire :
10	au 1 ^{er} siècle après J.-C.	au 1 ^{er} siècle avant J.-C.
12	un moindre d'intérêt	un moindre intérêt
14	Pour la première fois, on reconnaît aux sociétés gauloises et celtes un niveau technologique et artistique comparable à celui des peuples antiques.	Pour la première fois, il est reconnu que les sociétés gauloises et celtes possèdent un niveau technologique et artistique comparable à celui des peuples antiques.
15	les fouilles mettent à jour	les fouilles mettent au jour
15	On peut également citer la naissance de la revue	Nous pouvons également citer la naissance de la revue
16 (et Table des matières)	2.2.1. Sur les traces de métallurgie ancienne	2.2.1. Sur les traces de la métallurgie ancienne
18	leur premières utilisations	leurs premières utilisations
18	le livre de R.F. Tylecote, <i>A History of Metallurgy</i> , sorti en 197	le livre de R.F. Tylecote, <i>A History of Metallurgy</i> , sorti en 1976
20	les culotes de forge	les culots de forge
20	analyses typologiques et morphologiques plus systématique	analyses typologiques et morphologiques plus systématiques
21	la forge	le forgeage
23	et les analyses de provenance de provenance	et les analyses de provenance
24	socle méthodologique afin de renouveler	socle méthodologique solide afin de renouveler
24	également appelés produits semi-finis ou barre	également appelés produits semi-finis ou barres
24	du hors circuit technique	hors du circuit technique
24 (notes de bas de page)	à partir de la fin du Moyen-Âge	à partir de la fin du Moyen Âge

25	Ce type de dépôts métalliques devient particulièrement courant à partir du V ^e siècle avant J.-C. et ont livré le plus de matériel	Les dépôts métalliques de ce type deviennent particulièrement courants à partir du V ^e siècle avant J.-C. et ont livré le plus de matériel
25	Antiquité romaine ou Moyen Âge	Antiquité romaine ou Moyen Âge
26	partiellement ou totalement allongées	partiellement ou totalement allongée
27	issus de contextes de dépôts ou d'atelier	issus de contextes de dépôts ou d'ateliers
28	les fers à soir	les fers à soie
28	ainsi que leur caractéristiques métallographiques	ainsi que leurs caractéristiques métallographiques
28	les fers à soie et les hooked billets	les fers à soie et les hooked billets
28	ont été identifiés tout d'abord dans les nord-est de la France en 2003 et caractérisés grâce à l'analyse métallographique, puis recensés dans d'autres contextes européens	ont été identifiées tout d'abord dans les nord-est de la France en 2003 et caractérisées grâce à l'analyse métallographique, puis recensées dans d'autres contextes européens
29	différentes échelle géographique , afin de mettre en évidence d'éventuels réseaux d'échange	différentes échelles géographiques , afin de mettre en évidence d'éventuels réseaux d'échanges
29	techniques employés	techniques employées
37	on peut identifier plusieurs types de phases	nous pouvons identifier plusieurs types de phases
42	si on ne sait pas les identifier	si nous ne savons pas les identifier
55	les relations techniques et microstructuraux	les relations techniques et microstructurales
56	un autres élément considéré comme	un autre élément considéré comme
56	corrosion limitée qui n'a pas que faiblement affecté	corrosion limitée qui n'a que faiblement affecté
56	Trois éléments identifiés de manière certaine à des fiches ont été sélectionnées	Trois éléments identifiés de manière certaine comme des fiches ont été sélectionnés

57	point de vue macroscopique que microscopique et structurelle	point de vue macroscopique que microscopique et structurel
57	autre catégorie d'objet exhumés	autre catégorie d'objets exhumés
58	endommagé en partie	endommagé une partie
58	ont été intégrées	ont été intégrés
59	comme en témoignent	comme en témoigne
61	pour ce type de matériel ¹¹ .	pour ce type de matériel.
63	de x5 à x100	de x5 à x200
65	approuvé dans l'étude des éléments majeurs	approuvé dans les études des éléments majeurs
67	des teneurs significatives en phosphore ne peuvent provenir uniquement du minerai ou du charbon	des teneurs significatives en phosphore ne peuvent que provenir du minerai ou du charbon uniquement
68 (notes de bas de page)	les échantillons P.VCh10_5_2_70_27 et P.VCh10_5_2_78_7.	les échantillons P.VCh10/5/2/70/27 et P.VCh10/5/2/78/7.
80	avec des avec des replis successifs	avec des replis successifs
84	Les rapports de composés non réduits (CNR) révèlent des valeurs relativement élevées pour K ₂ O/CaO (~0,7) dans les classes 1 et 2, indiquant , malgré une certaine variabilité des rapports Al ₂ O ₃ /SiO ₂ et MgO/Al ₂ O ₃ .	Les rapports de composés non réduits (CNR) révèlent des corrélations relativement élevées pour K ₂ O/CaO (~0,7) dans les classes 1 et 2, indiquant une certaine homogénéité , malgré une certaine variabilité des rapports Al ₂ O ₃ /SiO ₂ et MgO/Al ₂ O ₃ .
86	proportions notables de phosphore (P ₂ O ₅) et en (CaO)	proportions notables en phosphore (P ₂ O ₅) et en chaux (CaO).
87	au zones de soudures	aux zones de soudures
89	l'hypothèse d'un recours ponctuel à la chauffe afin de limiter l'écrouissage des grains ne peut être totalement écartée.	l'hypothèse d'un recours ponctuel à la chauffe (recuit) afin de limiter l'écrouissage des grains ne peut être totalement écartée.
91	l'une des formes les plus qualitatives disponibles (Fig.60)	l'une des formes les plus qualitatives disponibles (Fig.59)

93	que l'on peut tirer de ce corpus	que nous pouvons tirer de ce corpus
98	À travers l'analyse d'un échantillon diversifié	À travers l'analyse d'un échantillonnage diversifié

b. Corrections des références bibliographiques

Pages	Informations	Références bibliographiques
13	Ces recherches aboutissent à la découverte de sites majeurs comme Bibracte (Mont Beuvray, Saône-et-Loire), Alésia (Côte-d'Or), Gergovie (Puy-de-Dôme), Murcens (Lot) ou Vertault (Côte-d'Or) (Buchsenschutz, 2015)	A. Cotton, 1957. Muri gallici. In: M. Wheeler et M. Richardson (éd.), Hill-Forts of Northern France, Oxford, pp. 159-216.
15	En 1956, l'archéologue allemand W. Dehn réalise la première synthèse à l'échelle européenne sur les habitats protohistoriques (publiée dans son article <i>Einige Bemerkungen zum « murus Gallicus »</i> en 1960) et redéfinit la notion d' <i>oppidum</i> celtique.	Dehn V.W., Marburg, 1960. Einige Bemerkungen zum „Murus Gallicus“. Germania 38, pp. 43-55.
15	Le perfectionnement des techniques de fouille et de prospection aide à mettre au jour de nombreux sites d'habitats jusque-là méconnus.	Buchsenschutz, O., 2015. L'Europe celtique à l'âge du Fer (VIII ^e -I ^{er} siècles). Presses universitaires de France (PUF), Paris.
15	En même temps, c'est le siècle des grandes expositions européennes, dont témoignent les catalogues, qui montrent alors un intérêt renouvelé pour les sociétés celtes au-delà des simples nécropoles et typologies chronologiques, en explorant divers aspects comme l'économie, l'habitat et la diversité de celui-ci, allant des <i>oppida</i> aux fermes isolées.	Buchsenschutz, O., 2015. L'Europe celtique à l'âge du Fer (VIII ^e -I ^{er} siècles). Presses universitaires de France (PUF), Paris.
18	Durant l'entre-deux guerres, les avancées dans l'étude des métaux anciens et des sites archéologiques liés à la métallurgie sont moins nombreuses. Quelques ouvrages marquants ont	Mangin, M., Dabosi, F., Domergue, C., Fluzin, P., Leroy, M., Merluzzo, P., Ploquin, A., Serneels, V., 2004. Le fer,

	néanmoins été publiés, comme <i>Le fer à l'époque mérovingienne : étude technique et archéologique</i> d'Édouard Salin et Albert France-Lanord, paru en 1943. Cette publication, bien que portant sur des artefacts plus récents, est un riche exemple de l'application des méthodes scientifiques à l'étude des métaux et de leurs possibilités.	Collection "Archéologiques." Errance, Paris. Hubert J., 1946. Compte rendu de : Édouard Salin et Albert France-Lanord, Rhin et Orient. T. II : Le fer à l'époque mérovingienne. Étude technique et archéologique. Bibliothèque de l'École des chartes, 106/1, pp. 140-142.
19	À partir des années 1950, et particulièrement à partir de 1970, la branche de l'archéologie dédiée à l'étude des productions métalliques ne cesse d'intégrer les avancées scientifiques et les nouvelles méthodes d'analyse pour répondre à diverses problématiques. C'est également entre ces décennies que la collaboration de plus en plus effrénée entre les « sciences dures » (dont la biologie et les mathématiques) et l'archéologie donne ainsi naissance à une nouvelle discipline nommée « archéométrie ».	Berranger, M., 2014. Le fer, entre matière première et moyen d'échange, en France, du VII ^e au I ^{er} siècle av. J.-C. Approches interdisciplinaires. Éditions universitaires de Dijon, Dijon. Bauvais, S., 2007. Evolution de l'organisation des activités de forge dans le nord du Bassin parisien au second Age du fer : études pluridisciplinaires de la chaîne opératoire en métallurgie du fer. Thèse de doctorat, Université de technologie de Belfort-Montbéliard et Université de Franche-Comté, Besançon. Caley, E.R., 1964. Analysis of ancient metals. International series of monographs of analytical chemistry. Pergamon, Oxford. Díaz-Andreu, M., 2024. The Oxford Handbook of The history of Archaeology. Oxford University Press, New-York.
19	Son intégration progressive dans les universités et les groupes de recherche contribue à dynamiser l'étude des métaux anciens, en lui apportant une reconnaissance accrue et une portée internationale.	Díaz-Andreu, M., 2024. The Oxford Handbook of The history of Archaeology. Oxford University Press, New-York.
19	Par la suite, la discipline intègre également des notions de statistiques et de science informatique.	Díaz-Andreu, M., 2024. The Oxford Handbook of The history of Archaeology. Oxford University Press, New-York.
21	Dans ce contexte, l'expérimentation archéologique a pris une place croissante : dans la lignée des	Crew, P., 1991. The experimental production of prehistoric bar iron. Historical Metallurgy 25, 21–36.

	reconstitutions menées par P. Crew dès les années 1990	
25	La présence de ces objets sur des sites de fouilles pose déjà question au XIX ^e siècle. Certains auteurs comme R. Smith et Sir Wollaston Franks se posent des questions sur leur nature, leur origine et leur fonction.	Smith, R., 1905. The ancient british iron currency. Proceedings of the Society of Antiquaries of London 20, 179–195.
27	A partir des années 1990, les <i>currency-bar</i> font partie d'études approfondies en Grande-Bretagne, notamment par P. Crew	Crew, P., 1994. Currency bars in Great-Britain, Typology and Function. In: Mangin, M. (Ed.), La sidérurgie ancienne de l'est de la France, dans son contexte européen : archéologie et archéométrie. Actes du colloque de Besançon, 10-13 Novembre 1993, ALUB. Diffusion Les Belles Lettres, Paris, pp. 345–350.
27	Crew est par ailleurs l'un des premiers à proposer une interprétation technique et fonctionnelle des extrémités des fers plats, en particulier les profils roulés, qu'il considère comme des marqueurs de qualité du métal, suffisamment épuré pour ne pas se fissurer lors de leur mise en forme (Berranger, 2007).	Crew, P., 1994. Currency bars in Great-Britain, Typology and Function. In: Mangin, M. (Ed.), La sidérurgie ancienne de l'est de la France, dans son contexte européen : archéologie et archéométrie. Actes du colloque de Besançon, 10-13 Novembre 1993, ALUB. Diffusion Les Belles Lettres, Paris, pp. 345–350.
28	Jusqu'au tournant des années 2000, l'étude des demi-produits protohistoriques reposait essentiellement sur trois catégories bien identifiées : les bipyramides, les fers plats à extrémité roulée et les barres quadrangulaires, et seules les deux premières catégories avaient réellement été étudiées en profondeur.	Berranger, M., 2007. Les demi-produits de fer au Ier millénaire a.C. en Europe continentale : potentialités d'études. In: Milcent, P.-Y. (Ed.), L'économie du fer protohistorique : de la production à la consommation du métal. Actes du XXVIII ^e colloque de l'AFEAF, pp. 133–143. Berranger, M., 2014. Le fer, entre matière première et moyen d'échange, en France, du VII ^e au I ^{er} siècle av. J.-C. Approches interdisciplinaires. Éditions universitaires de Dijon, Dijon. Berranger, M., Fluzin, P., 2013. Structuration et contexte des échanges en métallurgie du fer durant la Protohistoire. Une approche interdisciplinaire à partir des matières premières métalliques. In: L'âge du Fer en Aquitaine et sur ses marges.

		Mobilité des hommes, diffusion des idées, circulation des biens dans l'espace européen à l'âge du Fer. Actes du 35e colloque international de l'AFEAF, pp. 609–629.
29	Bien que la plupart des sites livrant des demi-produits soient datés du second âge du Fer ou de la période romaine, il en existe également pour les périodes médiévales. Cependant, il y a moins d'études sur le sujet. Les contextes de découvertes évoluent, les dépôts se font plus rares. Ils sont plutôt retrouvés sur des sites de production et de transformation, où ils sont souvent fragmentés ou sous forme de chute, ou en contexte de circulation, notamment sur des épaves de navires.	Gosselin, M., 2021. Qualités des alliages ferreux : une approche diachronique et statistique. Thèse de doctorat, Université Paris Nanterre, Paris
29-30	L'étude des outils et techniques employés pour réaliser les diverses formes de demi-produits représente une autre piste de recherche, qui pourrait bénéficier de collaborations avec des forgerons pour interpréter les traces de fabrication. Jusqu'ici, l'attention s'est principalement portée sur les demi-produits complets, mais ceux-ci présentent certaines limites : les traces de fabrication y sont plus rarement visibles et ils offrent peu d'informations sur le contexte artisanal. Il conviendrait donc d'accorder une place plus importante à l'étude des fragments et chutes, qu'il s'agisse de scories, de <i>gromps</i> ou de morceaux de demi-produits, en tenant compte non seulement de leur morphologie finale, mais aussi de leur cycle de vie, de leur production à leur usage, jusqu'à leur abandon.	Berranger, M., 2007. Les demi-produits de fer au Ier millénaire a.C. en Europe continentale : potentialités d'études. In: Milcent, P.-Y. (Ed.), L'économie du fer protohistorique : de la production à la consommation du métal. Actes du XXVIIIe colloque de l'AFEAF, pp. 133–143.
31	M.A. Cotton recensait une vingtaine de sites ayant livré des fiches en 1957 (Buchsenschutz et Ralston, 2014)	A. Cotton, 1957. Muri gallici, in M. Wheeler et M. Richardson (éd.), Hill-Forts of Northern France, Oxford, pp. 159-216.
31-32	Dans la plupart des publications consultées dans le cadre des recherches bibliographiques de ce travail, elles sont	Cahen-Delhaye, A., 1982. Découverte d'un « Murus Gallicus » à Rouveroy.

	<p>mentionnées de manière descriptive (nombre, dimensions générales, parfois croquis ou photographies), mais rarement analysées sur le plan technique ou métallurgique. Elles sont donc restées cantonnées au statut d'indices de reconnaissance, sans véritable réflexion sur leur mode de fabrication, leur logistique de production ou leur rôle structurel exact. Les données disponibles montrent pourtant une grande variabilité au sein de cette catégorie d'objets. La longueur des fiches oscille généralement entre 15 et 40 centimètres, avec une majorité d'exemplaires autour de 20–30 centimètres. Leur section est le plus souvent carrée (1–2 centimètres de côté), munie d'une pointe pyramidale ou rétrécie, tandis que la tête est le plus souvent discrète, aplatie ou absente. Leur implantation verticale au croisement des poutres assemblées à mi-bois est la disposition la mieux attestée, bien que des placements obliques ou en périphérie soient également documentés. Certaines fiches conservent des traces de bois ou apparaissent tordues sous la pression des pierres, confirmant leur rôle structurel. Sur certains sites, des scories de forge retrouvées au pied des remparts suggèrent une fabrication locale, comme à l'Impérial. Le nombre de fiches recensées varie fortement selon les sites, allant de quelques exemplaires isolés à plusieurs dizaines (jusqu'à 76 à Bovirolles, pour une masse totale de 4,5 kilogrammes de fer).</p>	<p>Archaeologia Belgica 247 (Conspectus MCMLXXXI), 55–59.</p> <p>Monin, M., 2015. Le murus gallicus de Lyon (Rhône). Bulletin de l'Association française pour l'étude de l'âge du fer, 33, pp. 67–71.</p> <p>Pieters, M., 2021. Du clou à la charpente: fabrication, mise en œuvre et tracéologie des clous de murus gallicus. L'exemple de Bovirolles. In: Delrieu, F., Féliu, C., Gruat, P., Kurzaj, M.-C., Nectoux, É. (Eds.), Les espaces fortifiés à l'âge du Fer en Europe. Actes du 43e colloque international de l'AFEAF (Le Puy-en-Velay, 30 mai–1er juin 2019). Collection AFEAF (3). AFEAF, pp. 115–118.</p> <p>Colin, A., 2010. Un murus gallicus du Ier siècle ap. J.-C. à Alésia, La Croix-Saint-Charles (Alise-Sainte-Reine, Côte-d'Or). In: Fichtl, S. (Ed.), Murus Celticus : architecture et fonctions des remparts de l'âge du Fer (actes de la table ronde internationale, Glux-en-Glenne, 11-12 octobre 2006). Glux-en-Glenne: Centre archéologique européen (Bibracte; 19), pp. 123–133.</p> <p>Debord, J., 1995. La fortification de l'oppidum de Villeneuve-Saint-Germain (Aisne). Revue archéologique de Picardie (1-2), 187–203.</p> <p>Viré, A., 1914. Les fouilles de l'oppidum de l'Impérial à Luzech (Lot). Revue des Études Anciennes 16 (1), pp. 86-88.</p> <p>Delage, F., Gorceix, C., 1923. L'oppidum de Villejoubert (rempart de la Tène III), commune de Saint-Denis-des-Murs (Haute-Vienne). Bulletin de la Société préhistorique de France, tome 20 (7–8), pp. 208-228.</p>
34	Ces différentes étapes peuvent être réalisées à proximité du lieu d'extraction ou sur le site de réduction directement.	Pleiner, R., 2000. Iron in Archaeology: The European Bloomery Smelters. Praha: Archeologický ústav AVČR, Prague

66	Dans certains artefacts très travaillés, avec un usage important d'additifs, les auteurs observent que les inclusions issues de la réduction peuvent devenir minoritaires.	Dillmann, P., L'Héritier, M., 2007. Slag inclusion analyses for studying ferrous alloys employed in French medieval buildings: supply of materials and diffusion of smelting processes. <i>Journal of Archaeological Science</i> 34, 1810–1823.
80	Cette structure s'accompagne de soudures internes, qui sont des indices de replis successifs de la matière sur elle-même, probablement dans un but d'homogénéisation et de renforcement mécanique.	Berranger, M., 2014. Le fer, entre matière première et moyen d'échange, en France, du VII ^e au I ^{er} siècle av. J.-C. Approches interdisciplinaires. Éditions universitaires de Dijon, Dijon. Cabboi, S., Dunikowski, C., Leroy, M., Merluzzo, P., 2007. Les systèmes de production sidérurgique chez les Celtes du Nord de la France. In: Milcent, P.-Y. (Ed.), <i>L'économie du fer protohistorique : de la production à la consommation du métal</i> . Actes du XXVIII ^e colloque de l'AFEAF. Bordeaux, pp. 35–62.
80	L'absence de structures fantômes caractéristiques du phosphore ne permet pas d'exclure la présence de cet élément dans le métal, car celles-ci dépendent en partie des conditions de fabrication du métal et des traitements appliqués, mais leur présence constitue un indice fiable de l'usage d'un fer contenant une teneur significative en phosphore.	Gosselin, M., 2021. Qualités des alliages ferreux : une approche diachronique et statistique. Thèse de doctorat, Université Paris Nanterre, Paris.
81	L'ensemble témoigne d'un assemblage par soudure fer-acier techniquement complexe,	Gosselin, M., 2021. Qualités des alliages ferreux : une approche diachronique et statistique. Thèse de doctorat, Université Paris Nanterre, Paris.
89	Toutefois, compte tenu du travail intensif de corroyage et de replis observé sur de nombreuses pièces, l'hypothèse d'un recours ponctuel à la chauffe afin de limiter l'écrouissage des grains ne peut être totalement écartée.	Gosselin, M., 2021. Qualités des alliages ferreux : une approche diachronique et statistique. Thèse de doctorat, Université Paris Nanterre, Paris.
91	Dans l'ensemble, les données issues de la littérature s'accordent pour souligner la qualité métallurgique élevée des barres à douille, obtenue grâce à un	Berranger, M., 2014. Le fer, entre matière première et moyen d'échange, en France, du VII ^e au I ^{er} siècle av. J.-C.

	travail de forge soigné et à des procédés d'épuration poussés.	Approches interdisciplinaires. Éditions universitaires de Dijon, Dijon. Bauvais, S., 2007. Evolution de l'organisation des activités de forge dans le nord du Bassin parisien au second Age du fer : études pluridisciplinaires de la chaîne opératoire en métallurgie du fer. Thèse de doctorat, Université de technologie de Belfort-Montbéliard et Université de Franche-Comté, Besançon.
91	Comme le rappellent Bauvais <i>et al</i> , « <i>les formes d'organisation interne que peuvent revêtir les activités d'un atelier de post-réduction ou d'un site producteur peuvent être multiples suivant leur intensité et leur vocation.</i> ».	Bauvais, S., Disser, A., Dillmann, P., 2018b. La métallurgie du fer à l'âge du Fer dans le bassin versant du Croult : organisation des productions et étude de provenance. Revue Archéologique d'Île-de-France 5, 453–506.

c. Errata catalogue analytique

Fiche analyses métallographiques

P.VCh11/5/2/78/7

Informations générales :

Zone	UF	Contexte	Attribution culturelle	
5	78	Eboulis rempart laténien	La Tène finale	
Longueur	Largeur	Epaisseur	Masse	Typologie
51,07 mm	4,57 mm	4,23 mm	4,7 g	Clou



Photographie de l'objet avant découpe

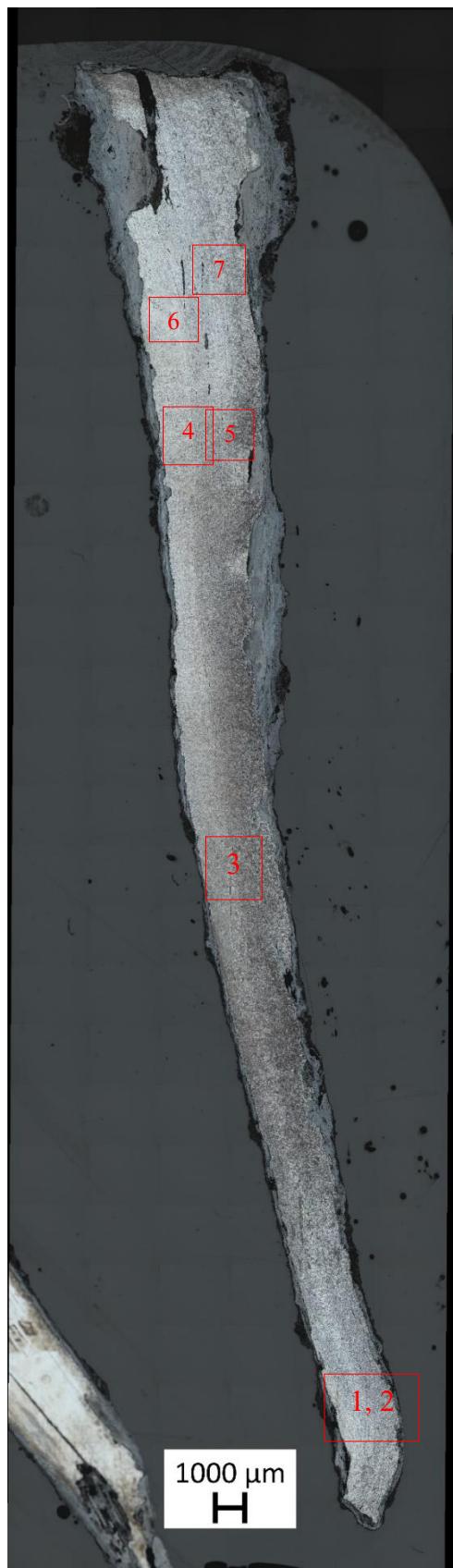
Observations macroscopiques :

Petit clou dont l'extrémité distale est pliée à 90°. Tige de section carrée et légèrement torsadée. E. Delye a interprété que la tête de ce clou était manquante. Corrodé. Une partie de la tige est manquante à cause de la corrosion. Des fragments ou des débris sont accrochés à la tête.

Observations microscopiques :



Mosaïque avant attaque au réactif

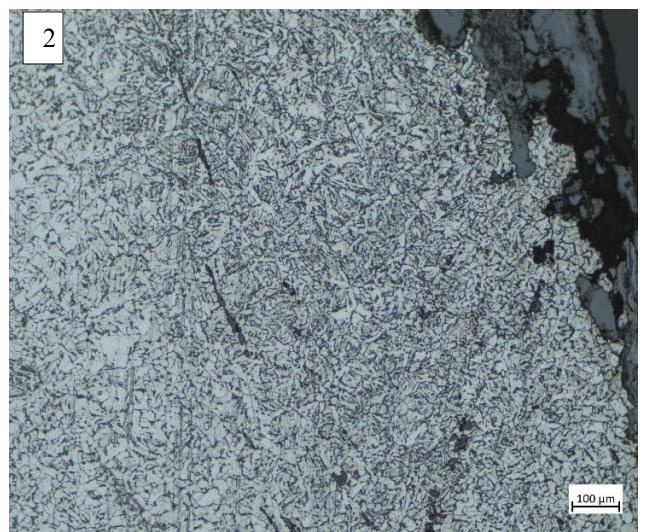
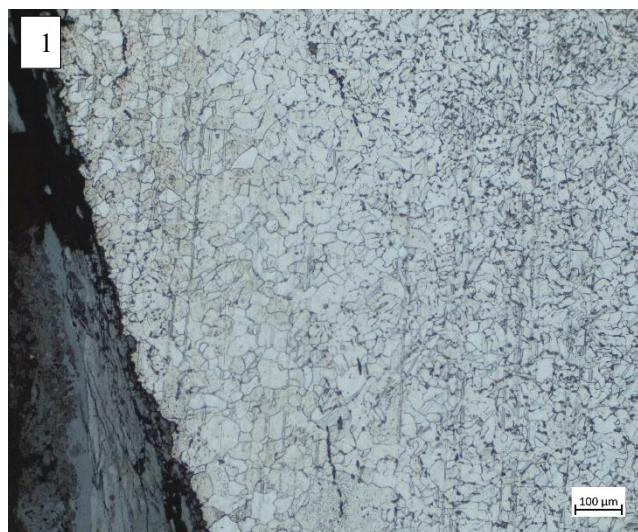


Mosaïque après attaque au Nital 4%



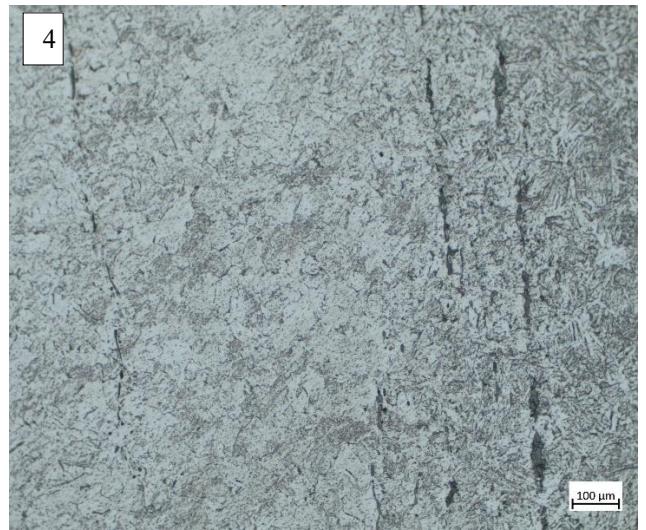
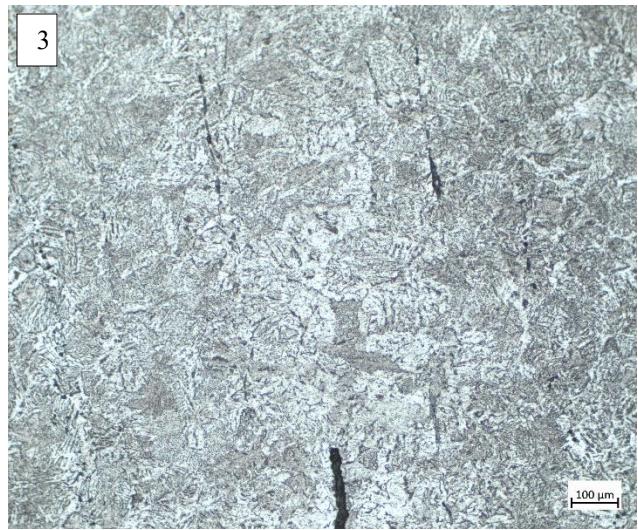
Mosaïque après attaque au Oberhoffer

Microographies



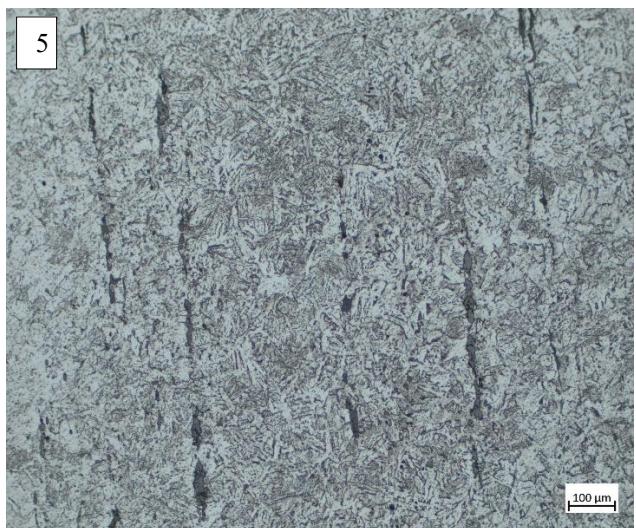
1 : Ferrite à petits et gros grains (gauche), acier à 0,1% de C environ.

2 : Ferrite aciculaire (0,2%-0,3% de C).

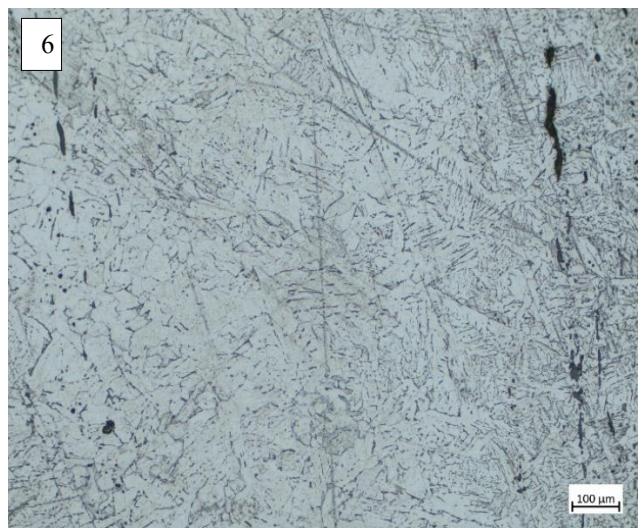


3 : Zone acierée.

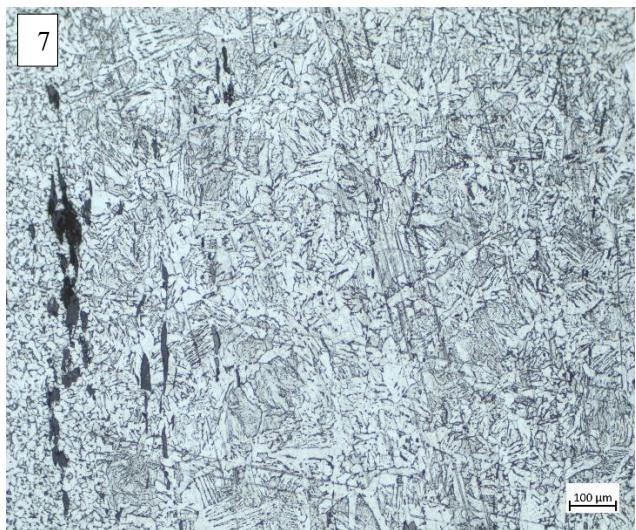
4 : Lignes d'inclusions et matrice acierée.



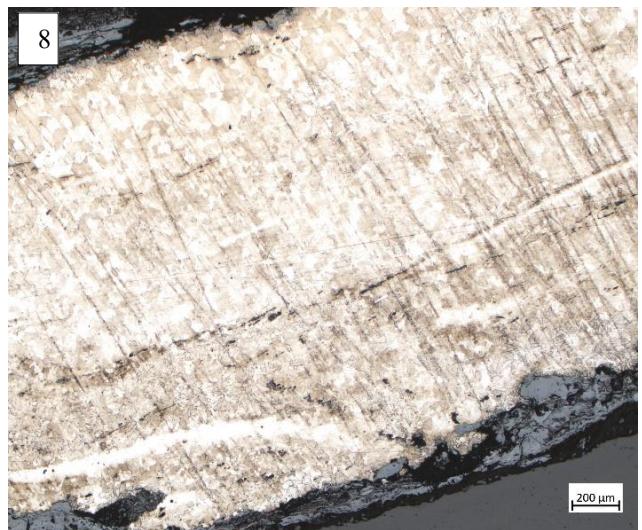
5 : Acier à 0,3-0,4% de C environ, avec structures de Widmanstätten et lignes d'inclusions.



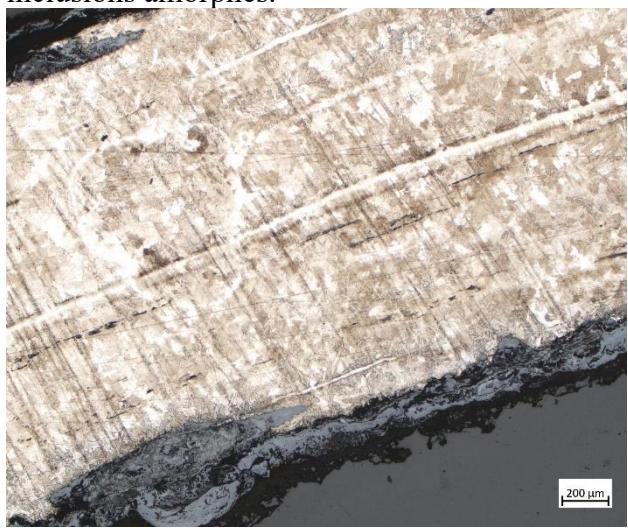
6 : Acier entre 0,2 et 0,3% de C environ.



7 : Acier à 0,3-0,4% de C avec structures de Widmanstätten , perlite sous forme lamellaire et inclusions amorphes.



8 : Potentielles lignes de soudure



9 : Lignes de soudure

Informations générales :

Zone	UF	Contexte	Attribution culturelle
5	84	Eboulis rempart carolingien	La Tène finale
Longueur	Largeur	Epaisseur	Masse
~ 170 mm	~ 15 mm	~ 15 mm	51,4 g
Typologie			Fiche

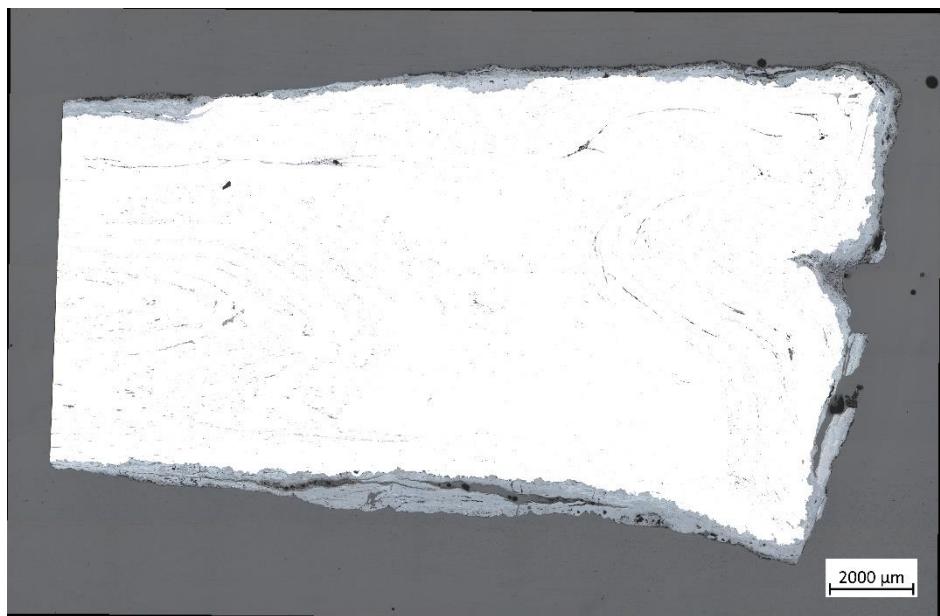


Photographie de l'objet avant découpe

Observations macroscopiques :

Fiche entière, corrodée et légèrement pliée dans sa partie distale. La tête est de section carrée et plate. Sur celle-ci se trouve une anomalie sous forme d'encoche.

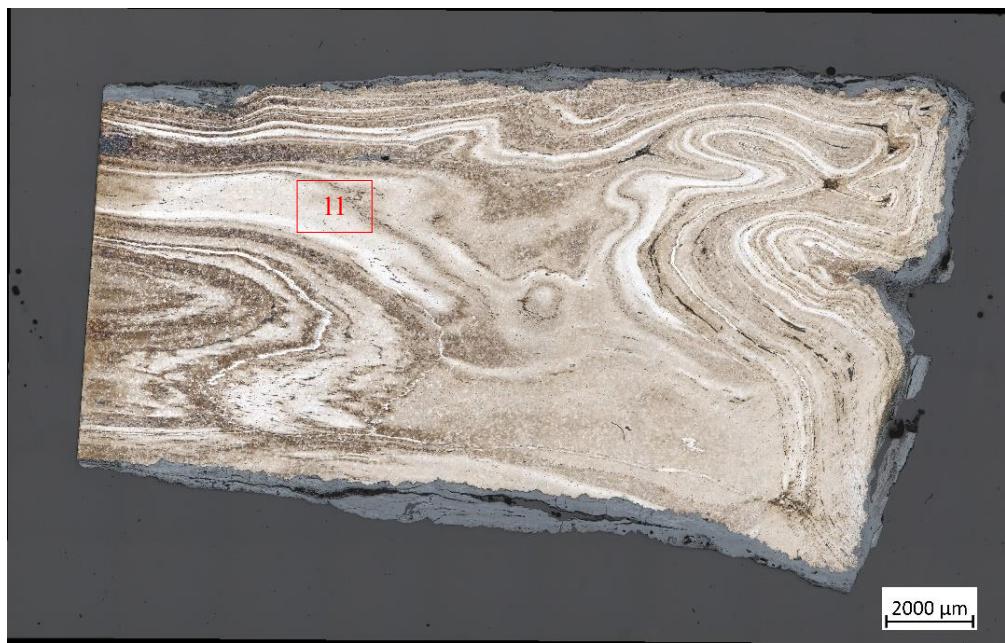
Observations microscopiques :



Mosaïque avant attaque au réactif

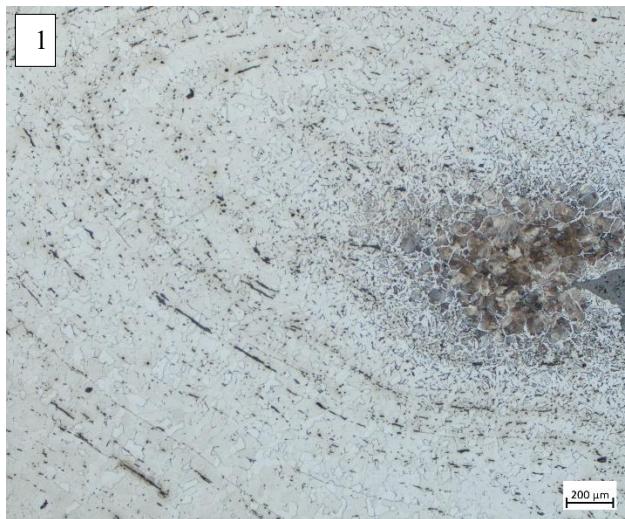


Mosaïque après attaque au réactif Nital 4%



Mosaïque après attaque au réactif Oberhoffer

Microographies



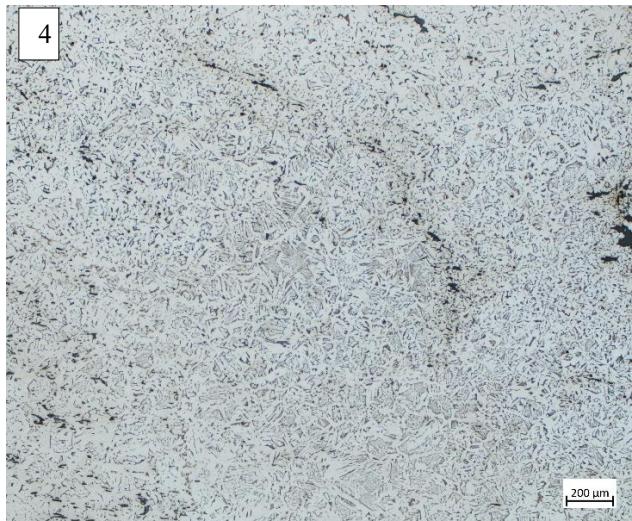
1 : Grains de ferrites entourant une zone d'acier eutectoïde à perlite nodulaire autour de ce qui semble être une soudure de repli (cémentation interne).



2 : Grains de ferrite déformés et écrouis au niveau du bord droit, vers un acier eutectoïde.



3 : Ferrite, lignes d'inclusions.



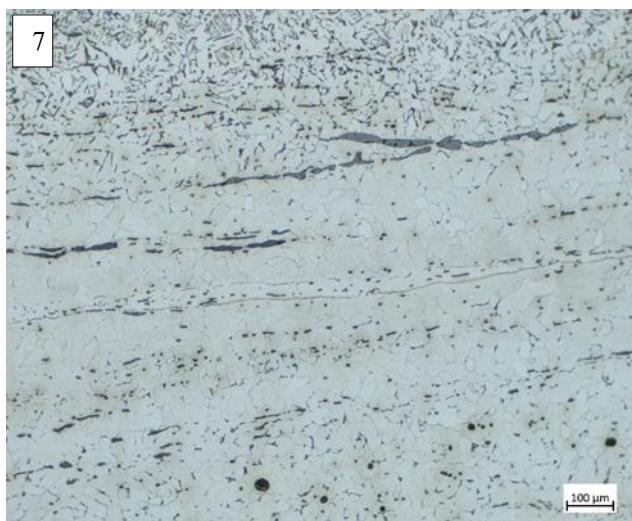
4 : Acier à 0,2-0,3% de C.



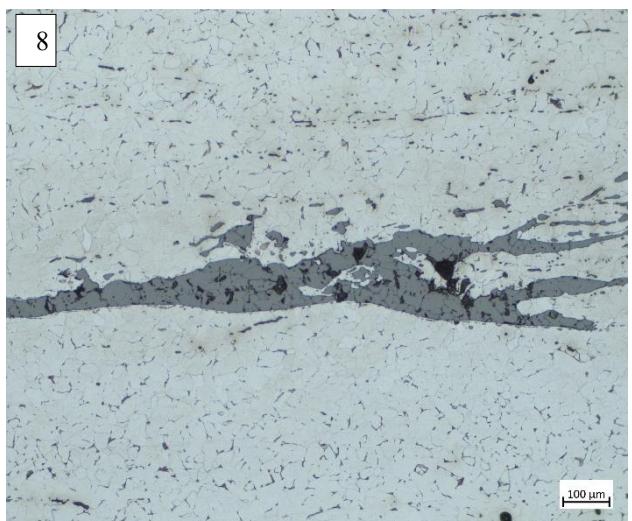
5 : Inclusion de wüstite globulaire dans la matrice métallique.



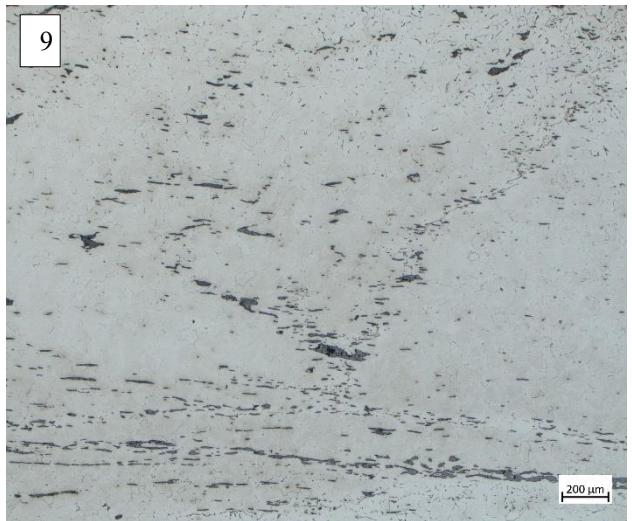
6 : Ferrite.



7 : Lignes d'inclusions, grains de ferrite équiaxe (centre), zone carburée (haut).



8. Inclusions de scorie peu déformée.



9 : Inclusions de scorie.



10. Gradation des teneurs en carbone du centre vers la périphérie de l'objet, ferrite (haut) et acier à environ 0,3%C.

Informations générales :

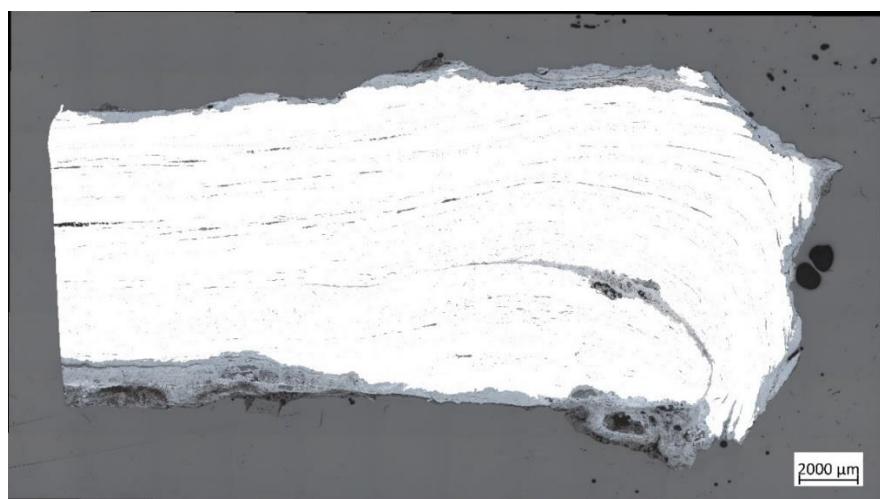
Zone	UF	Contexte	Attribution culturelle
5	84	Eboulis rempart carolingien	La Tène finale
Longueur	Largeur	Epaisseur	Masse
~ 180 à 200 mm	~ 15 à 20	~ 15 à 20	74,7 g
Typologie			
			Fiche



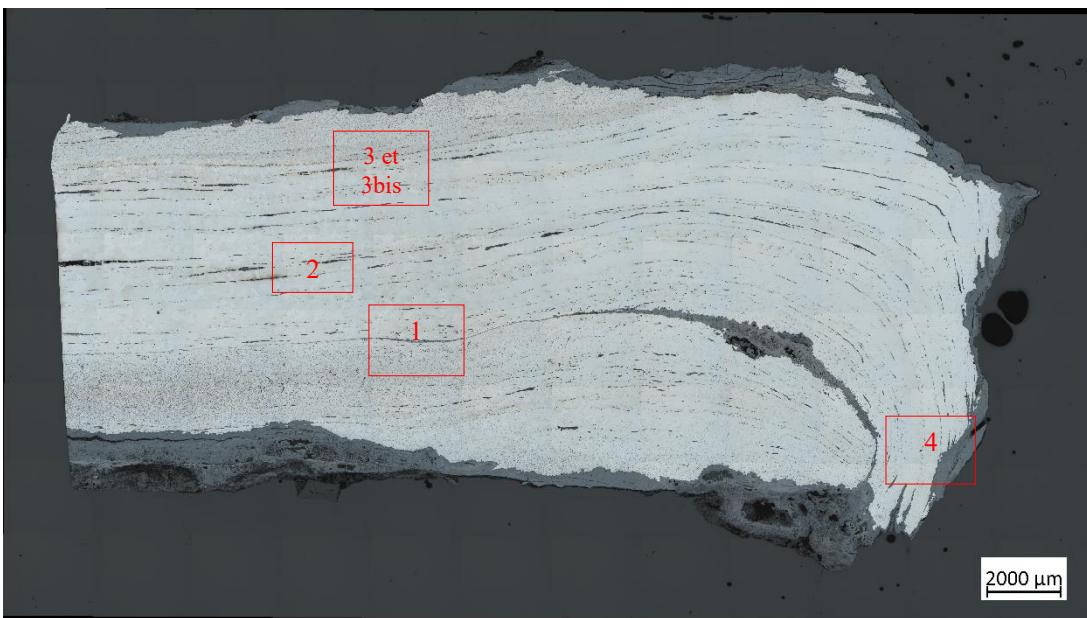
Photographie de l'objet avant découpe

Observations macroscopiques :

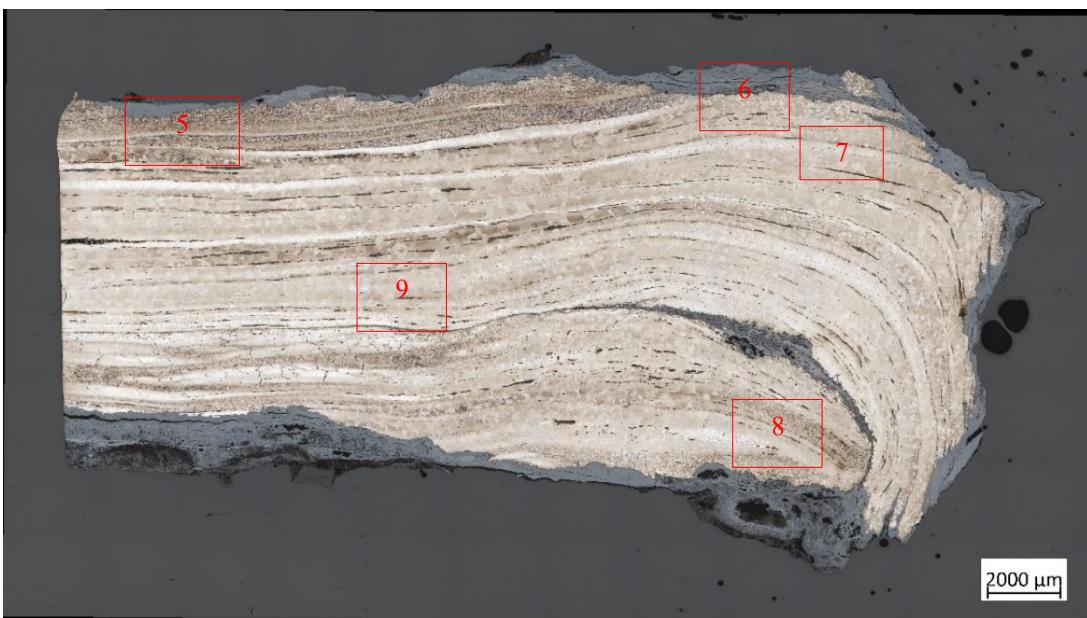
Cette fiche, conservée dans son entièreté, est très grande et lourde. Elle est cependant fortement pliée dans sa partie centrale et corrodée. Elle est de section carrée et présente une tête plate.

Observations microscopiques :

Mosaïque avant attaque au réactif

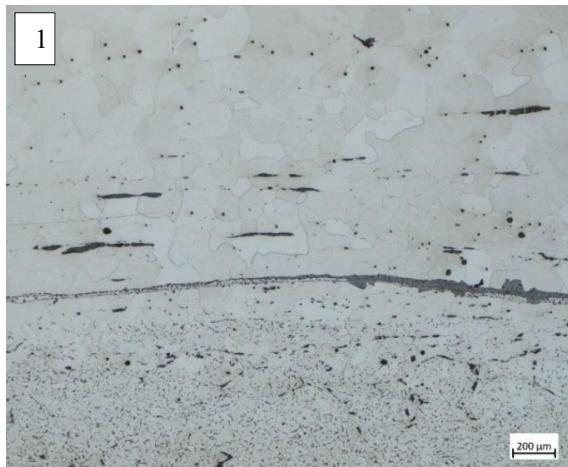


Mosaïque après attaque au réactif Nital 4%

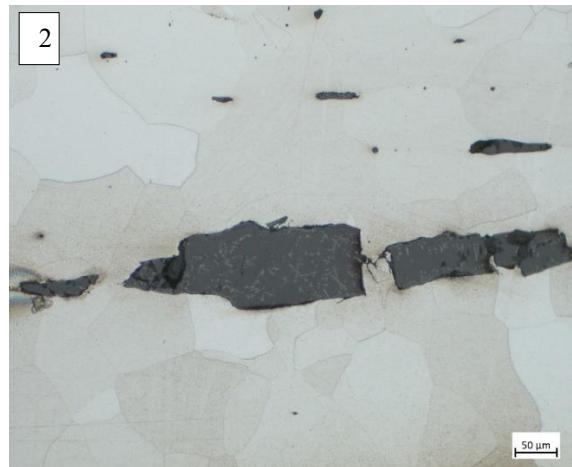


Mosaïque après attaque au réactif Oberhoffer

Microographies



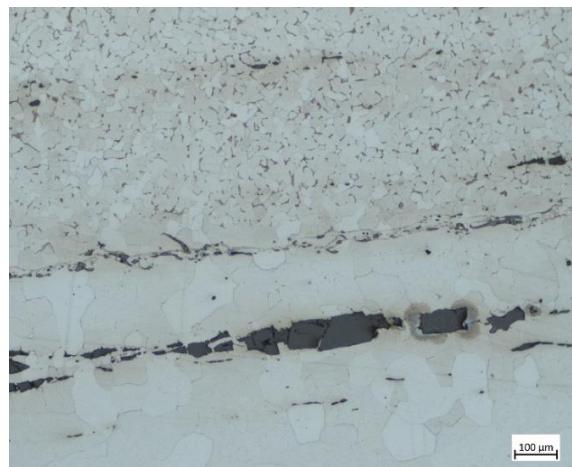
1 : Ferrite équiaxe (haut), ferrite à plus petits grains et aux joints de grains plus prononcés (bas), avec ligne de soudure et corrosion.



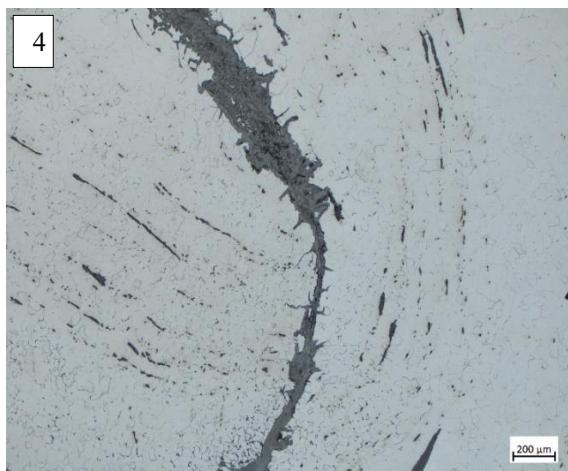
2 : Inclusion de wüstite sous forme dendritique dans une matrice ferritique.



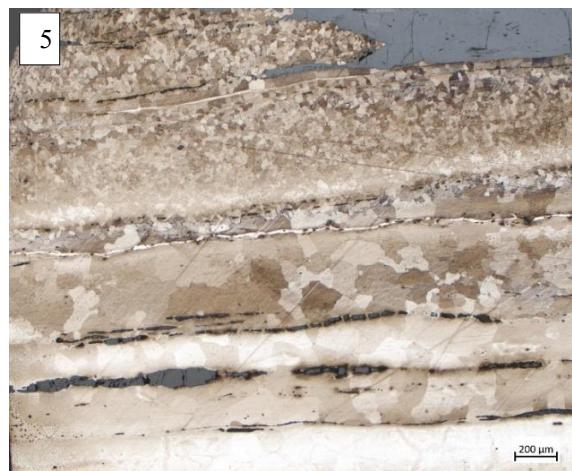
3 : Grains de ferrite de taille variable.



3bis : Ligne de soudure avec inclusions.



4 : Corrosion dans une soudure ouverte, ferrite légèrement écrouie.



5 : Lignes de soudure avec inclusions de scories.



6 : Ligne de soudure.



7 : Structures fantômes observées après attaque au réactif Oberhoffer.



8 : Structures fantômes observées après attaque au réactif Oberhoffer.



9 : Structures fantômes observées après attaque au réactif Oberhoffer.

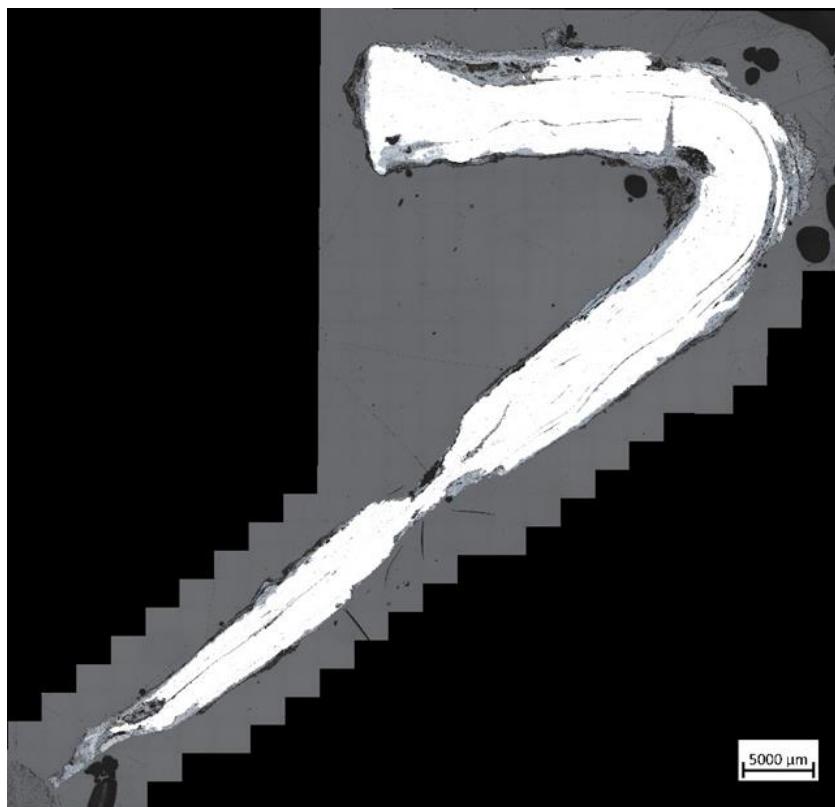
Informations générales :

Zone	UF	Contexte	Attribution culturelle
5	70	Eboulis rempart laténien	La Tène finale
Longueur	Largeur	Epaisseur	Masse
~ 90 à 10 mm	~ 5 à 20 mm	~ 5 à 20 mm	25,4 g
Typologie			
Clou			

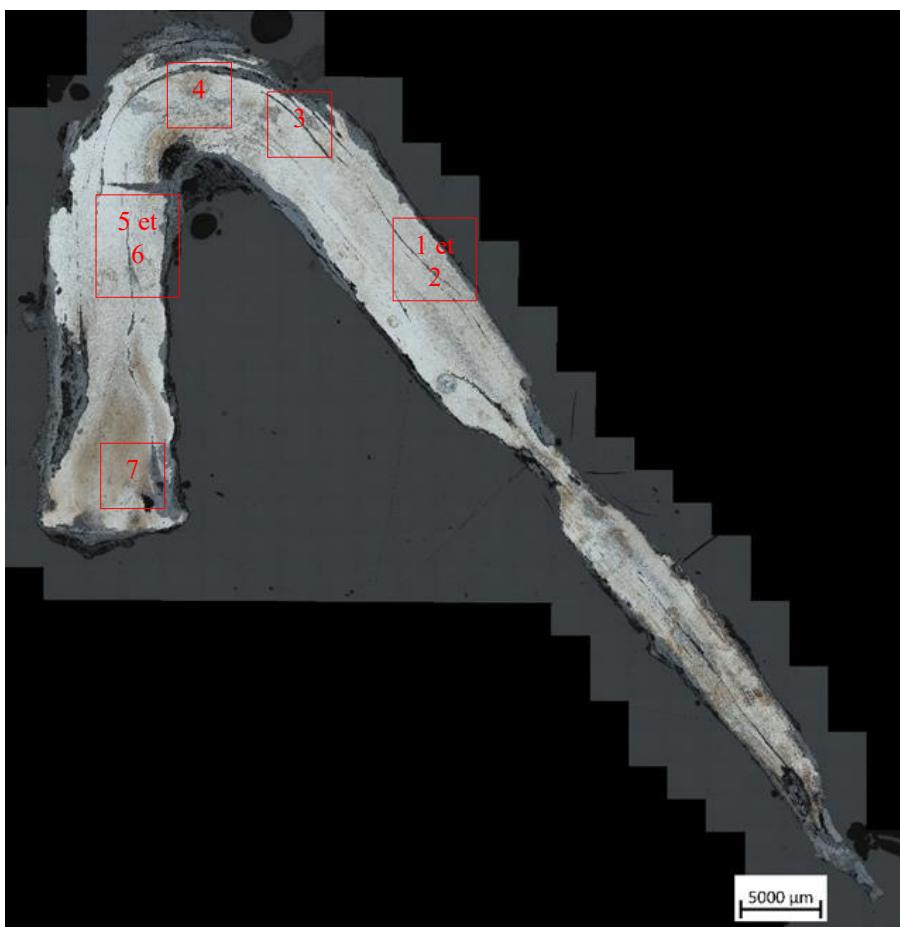
*Photographie de l'objet avant découpe***Observations macroscopiques :**

Clou conservé dans son entiereté mais très corrodé. Fortement plié sur lui-même dans sa partie supérieure. Tête rectangulaire. Sa section, assez large au niveau de la tête, s'amincit progressivement vers la pointe du clou, avec une partie de sa tige attaquée par la corrosion.

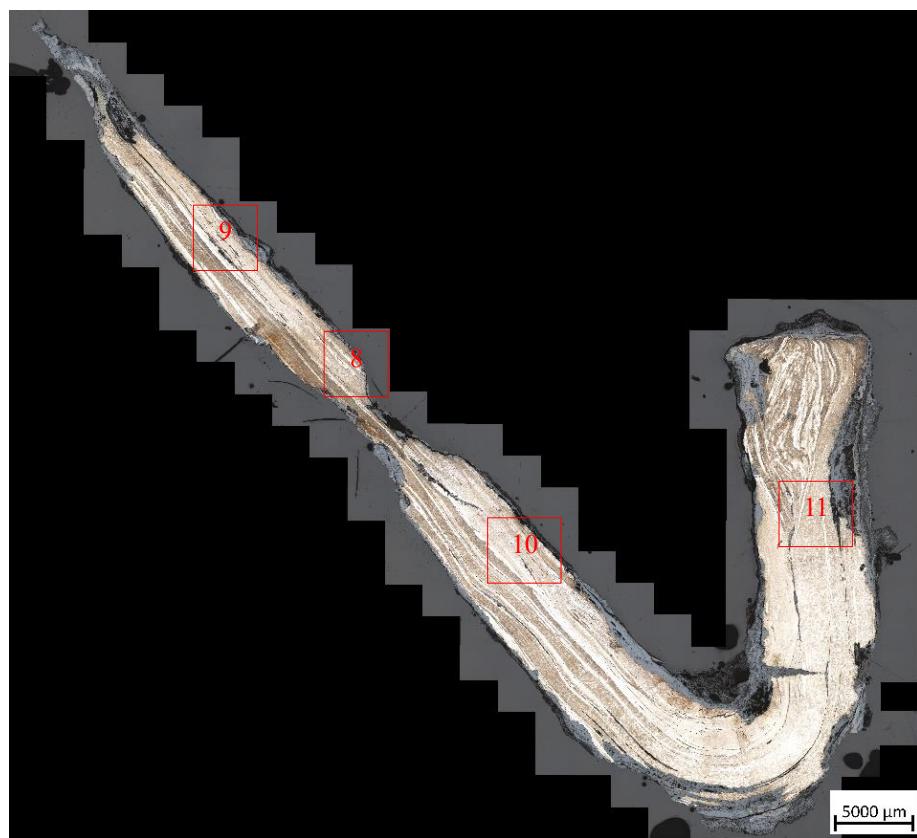
Observations macroscopiques :



Mosaïque avant attaque au réactif

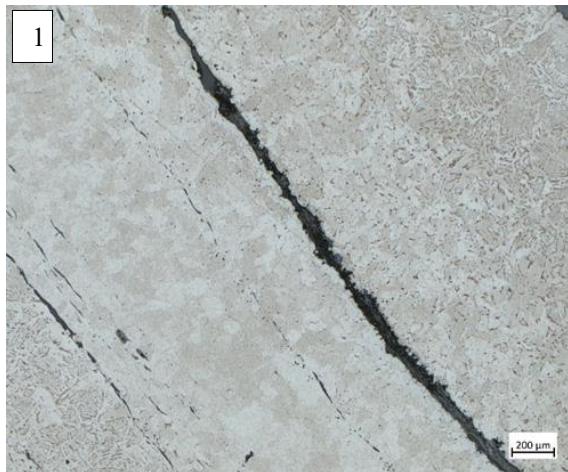


Mosaïque après attaque au réactif Nital 4%



Mosaïque après attaque au réactif Oberhoffer

Microographies



1 : Ligne de soudure corrodée, ferrite et acier à 0,3-0,4% de C.



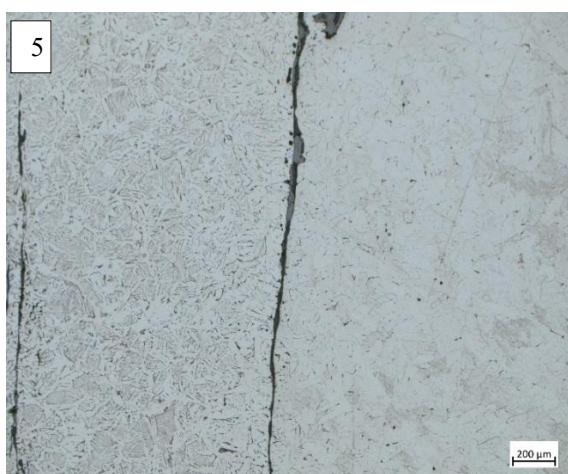
2 : Ferrite entourant une bande d'acier à 0,3-0,4% de C.



3 : Ferrite et bande d'acier à 0,4 % avec structures de Widmanstätten.



4 : Grains de ferrite et d'acier écrouis.



5 : Zone carburee (gauche) et zone ferritique (droite) de part et d'autre d'une soudure.



6 : Acier avec gradation de teneurs en carbone, de 0,2 à 0,6% environ.



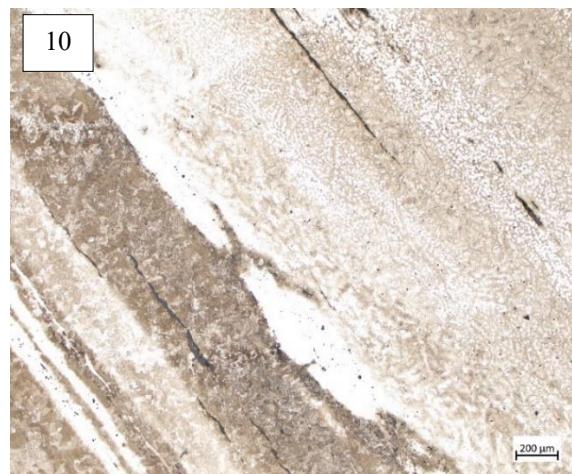
7 : Matrice métallique carburée.



8 : Structures fantômes observées après attaque au réactif Oberhoffer.



9 : Soudures révélées après attaque au réactif Oberhoffer.



10 : Acier carburé (gauche), fer doux phosphoreux (droite).



11 : Soudures entre différentes microstructures : ferrite phosphoreuse (gauche), acier plus fortement carburé (centre), acier moins carburé (droite).

Informations générales :

Zone	UF	Contexte	Attribution culturelle
5	79	Zone de circulation au niveau de la porte du rempart	La Tène finale
Longueur	Largeur	Epaisseur	Masse
~ 60 mm	~ 5 à 8 mm	~ 5 à 8 mm	7,6 g
		Typologie	
		Clou	

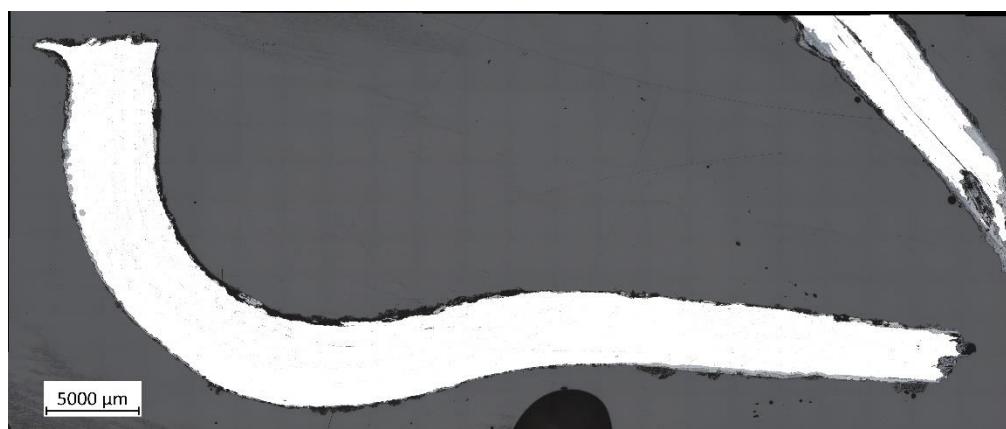


Photographie de l'objet avant découpe

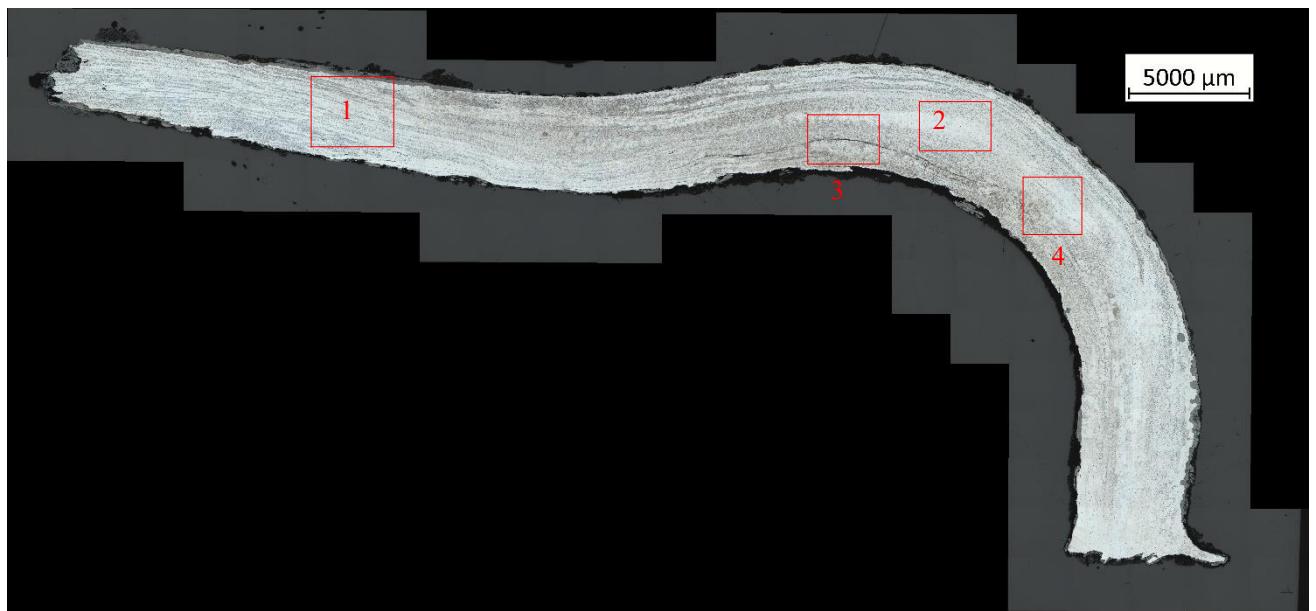
Observations macroscopiques :

Petit clou de section carrée, corrodé principalement au niveau de la tête, qui est manquante, et sur sa longueur. Sa tige est pliée à un angle de 90°.

Observations microscopiques :



Mosaïque avant attaque au réactif

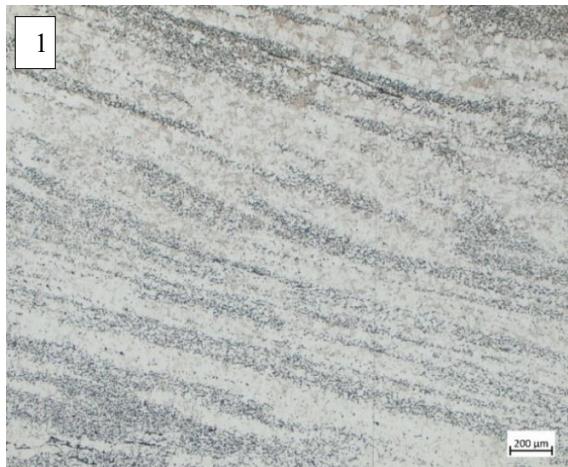


Mosaïque après attaque au réactif Nital 4%

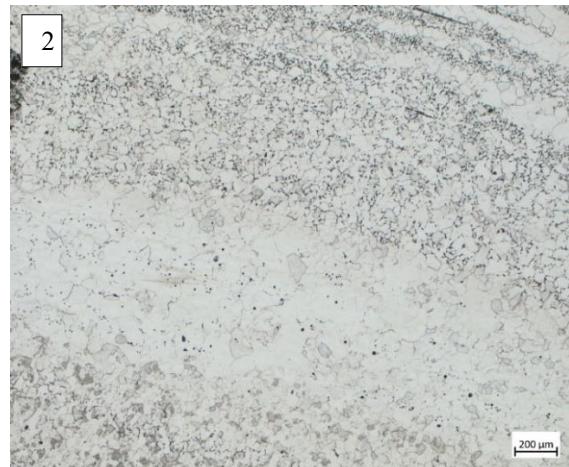


Mosaïque après attaque au réactif Oberhoffer

Microographies



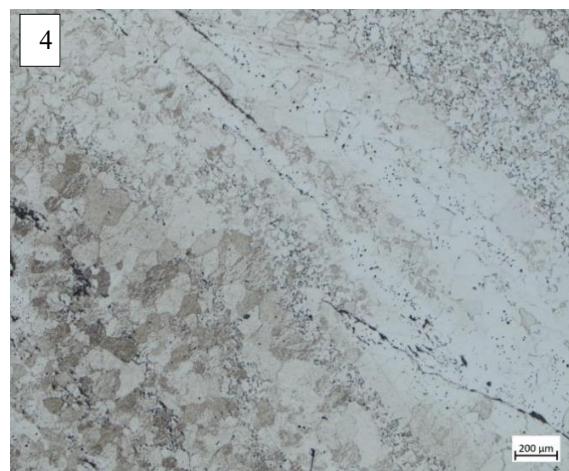
1 : Ferrite et acier de teneur en carbone inférieure à 0,1%.



2 : Grains de ferrite de taille variable.



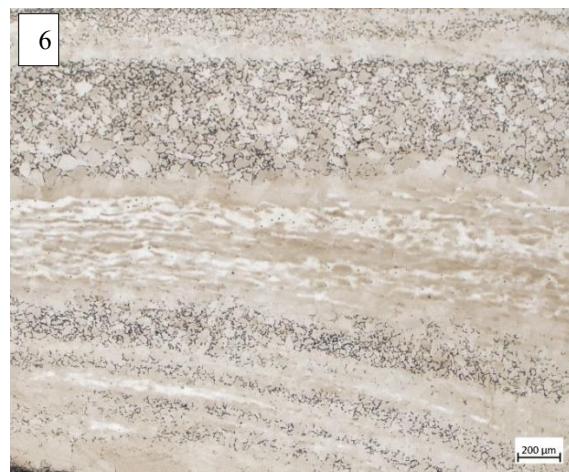
3 : Grains de ferrite équiaxes.



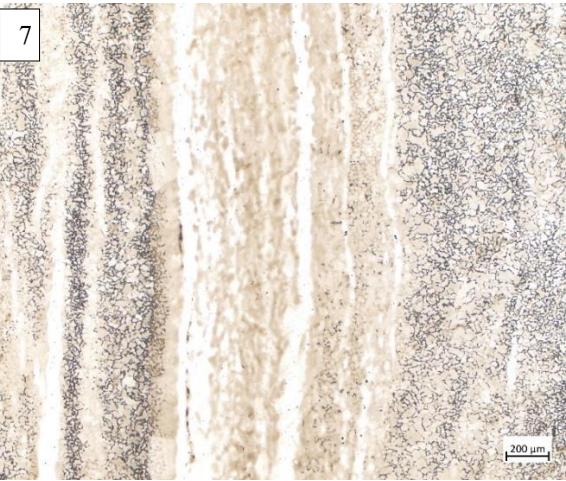
4 : Inclusions de scorie dans une matrice ferritique.



5 : Grains de ferrite de taille variables et soudures observées après attaque au réactif Oberhoffer.



6 : Structures fantômes observées après attaque au réactif Oberhoffer.



7 : Structures fantômes observées après attaque au réactif Oberhoffer.

Informations générales :

Zone	UF	Contexte	Attribution culturelle	
8	57 ou 166	Cœur et éboulis rempart carolingien	La Tène finale	
Longueur	Largeur	Epaisseur	Masse	Typologie
136,29 mm	7,89 mm	7,61 mm	31,7 g	Fiche

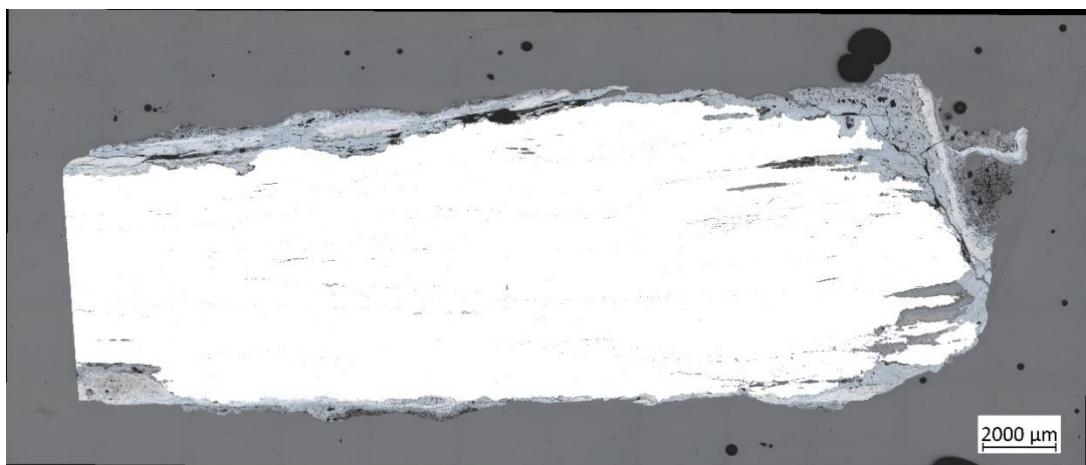


Photographie de l'objet avant découpe

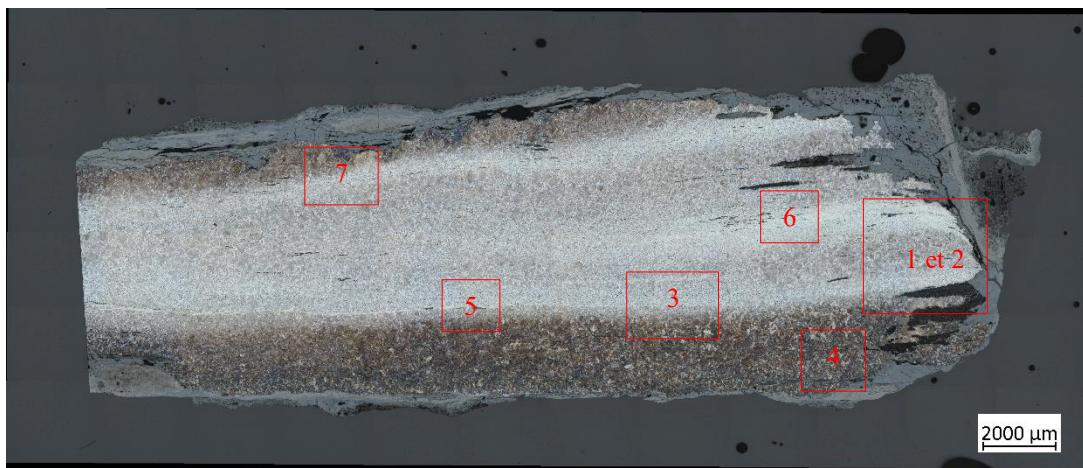
Observations macroscopiques :

Fiche entière de section carrée, corrodée, dont la tige a été fort touchée. Résidus ligneux.

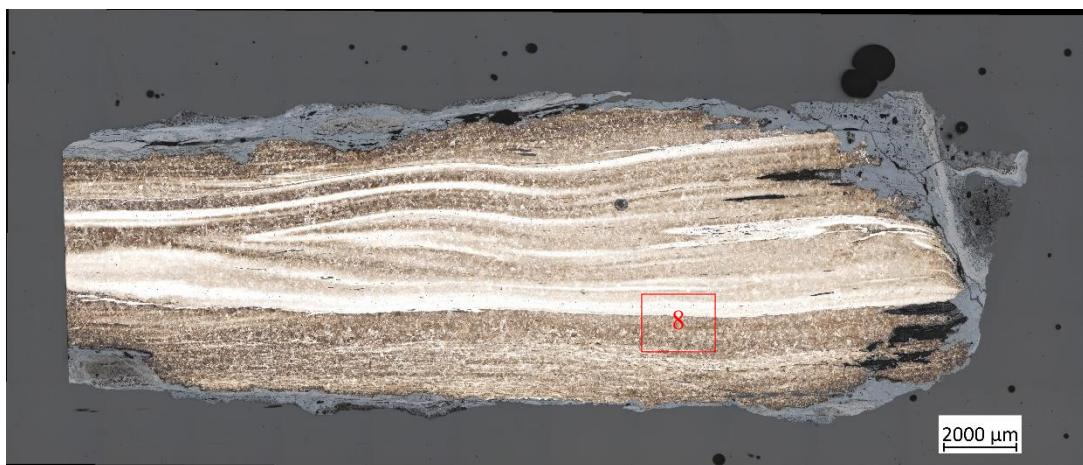
Observations microscopiques :



Mosaïque avant attaque au réactif

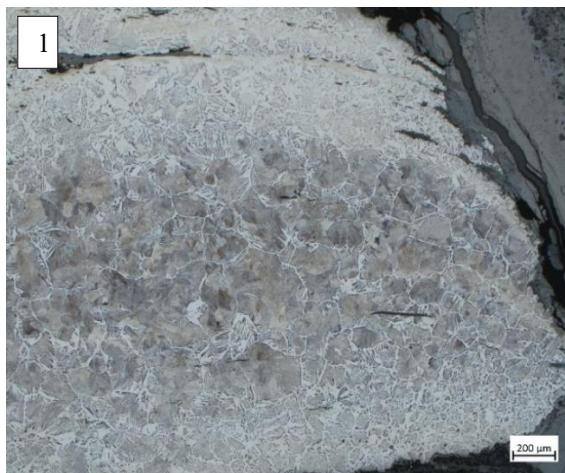


Mosaïque après attaque au réactif Nital 4%



Mosaïque après attaque au réactif Oberhoffer

Microographies



1 : Bande d'acier de 0,5-0,6% de C environ entourée d'acier moins carburé.



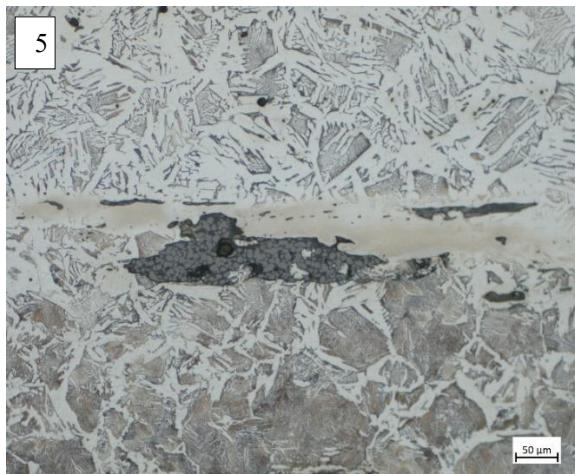
2 : Graduation d'acier à 0,3-0,4% de C vers de l'acier plus carburé (vue détaillée de l'image 1), avec soudure (haut).



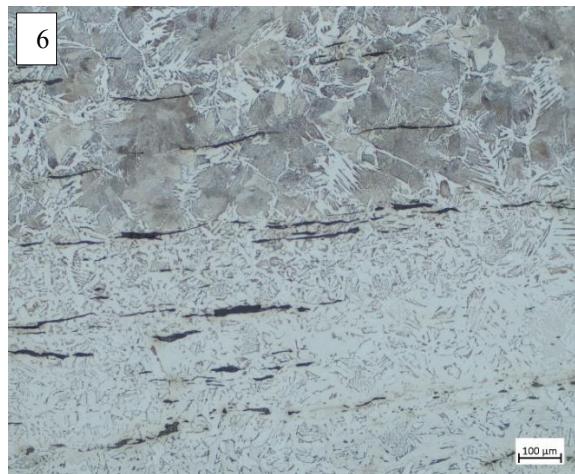
3 : Graduation d'un acier de 0,5% de C (haut) vers un acier eutectoïde à perlite nodulaire (bas). Ligne de soudure entre les deux.



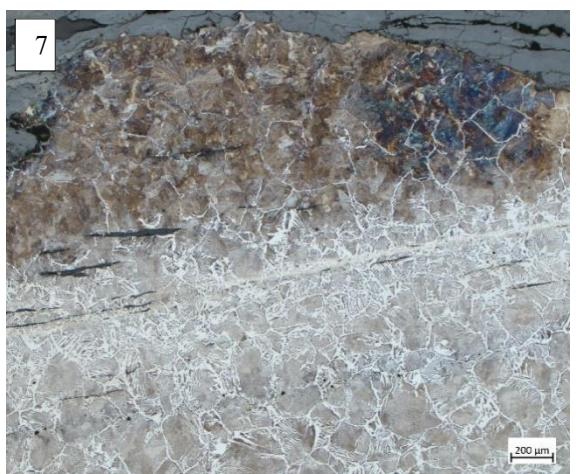
4 : Perlite sous forme nodulaire.



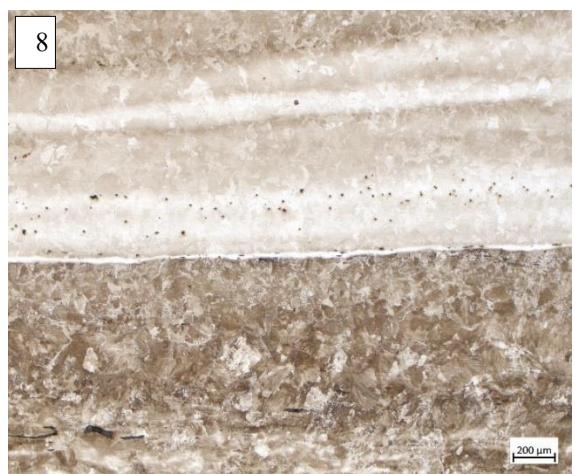
5 : Inclusion amorphe de wüstite globulaire dans une matrice d'acier, présentant des structures de Widmanstätten.



6 : Lignes d'inclusions dans le sens du martelage.



7 : Graduation d'un acier eutectoïde à perlite nodulaire (haut) vers un acier à 0,5-0,6% de C (bas). Ligne de soudure.



8 : Soudure révélée après attaque au réactif Oberhoffer.

Informations générales :

Zone	UF	Contexte	Attribution culturelle	
9	125	Humus moderne	La Tène finale	
Longueur	Largeur	Epaisseur	Masse	Typologie
93,23mm	/	/	28,1g	Fiche

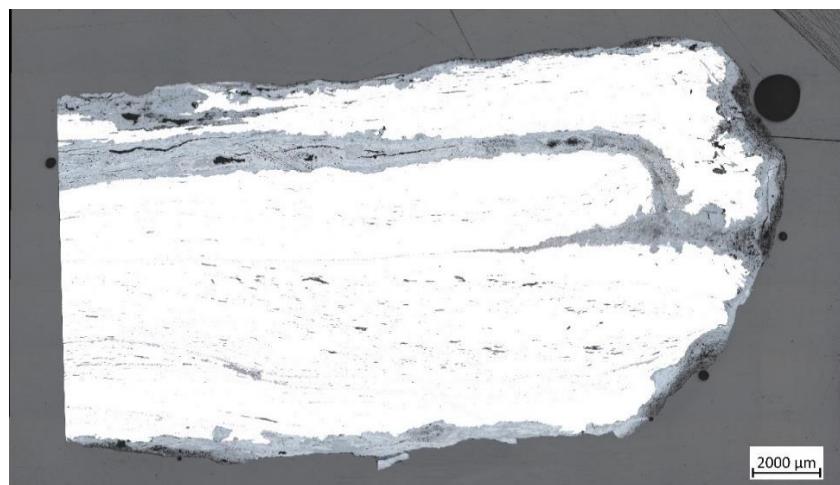


Photographie de l'objet avant découpe

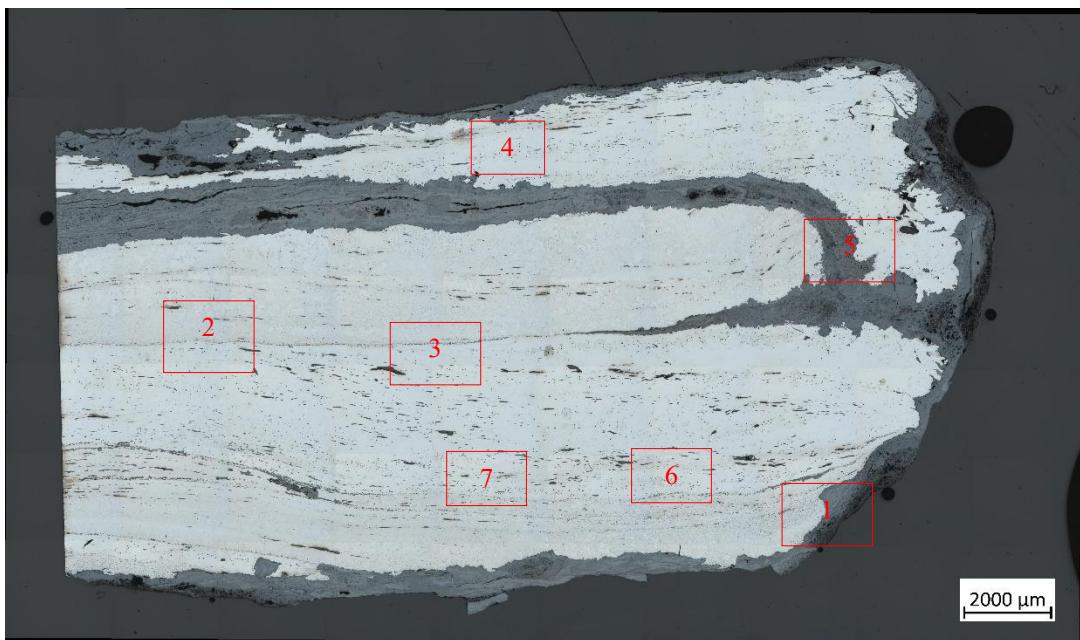
Observations macroscopiques :

Object trop corrodé pour en estimer la section. Présente un profil de fiche au niveau de la tête mais perd en épaisseur dans le reste de la section. L'extrémité est enroulée.

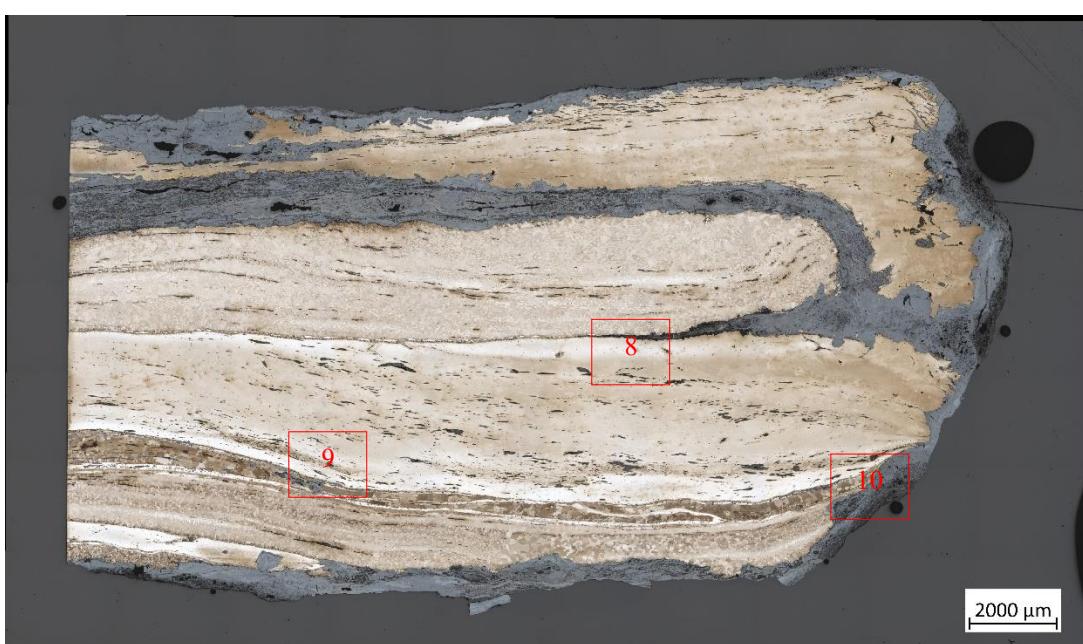
Observations microscopiques :



Mosaïque avant attaque au réactif



Mosaïque après attaque au réactif Nital 4%

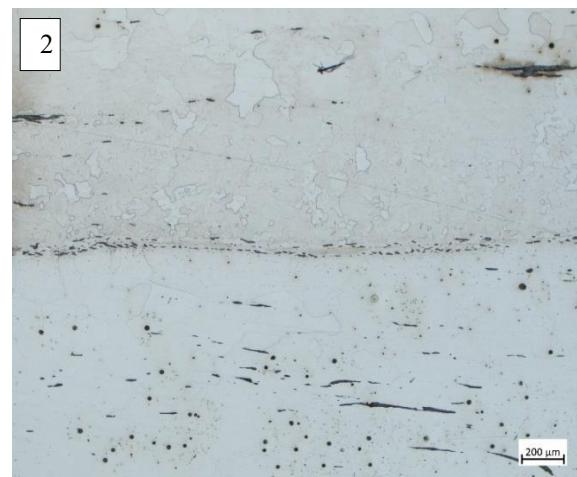


Mosaïque après attaque au réactif Oberhoffer

Microographies



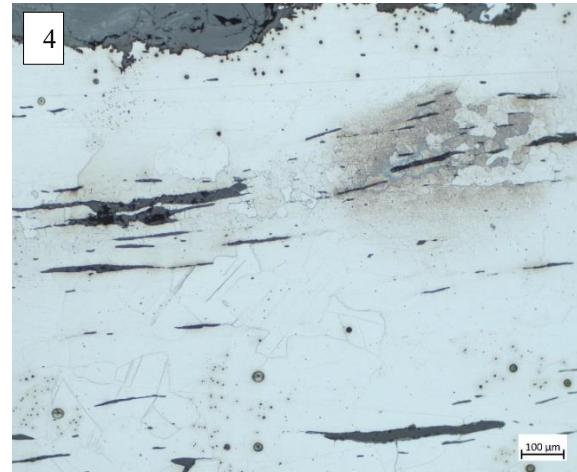
1 : Grains de ferrite de taille variable, acier à 0,1% de C et inclusions de scorie.



2 : Grains de ferrite de taille et de forme variables. Ligne d'inclusions avec wüstite globulaire le long d'une soudure.



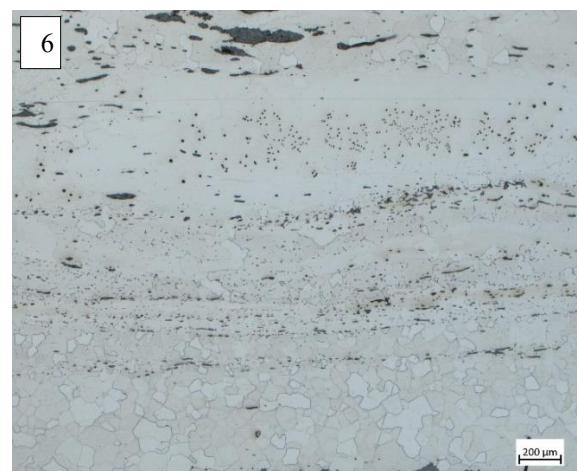
3 : Grains de ferrite de taille et de forme variables. Ligne d'inclusions avec wüstite globulaire le long d'une soudure.



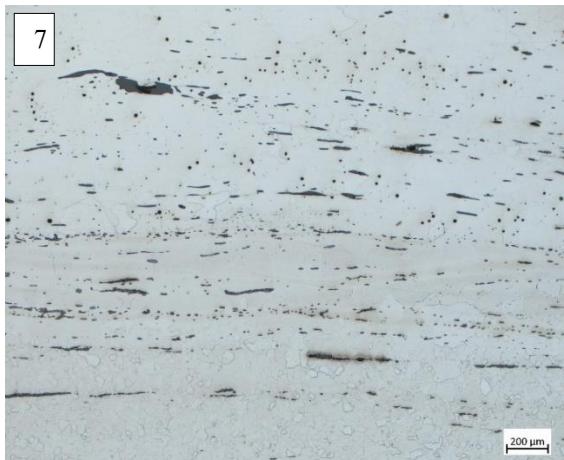
4 : Inclusions de scorie dans une matrice ferritique.



5 : Ferrite.



6 : Ferrite et inclusions.



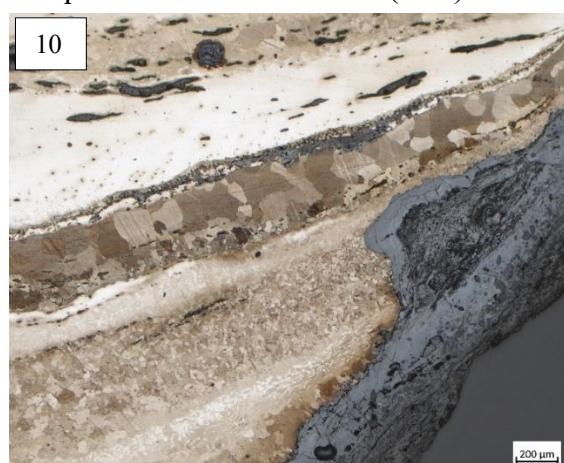
7 : Ferrite, inclusions et potentielles lignes de soudure.



8 : Structures fantômes observées après attaque au réactif Oberhoffer (haut).



9 : Graduation de fer à des taux de carbone variable.



10 : Graduation de fer à des taux de carbone variable, structures fantômes observées après attaque au réactif Oberhoffer (bas).

Informations générales :

Zone	UF	Contexte	Attribution culturelle	
10	142	Humus moderne	Indéterminé	
Longueur	Largeur	Epaisseur	Masse	Typologie
101,05 mm	9,99 mm	9,94 mm	38,6 g	Fiche

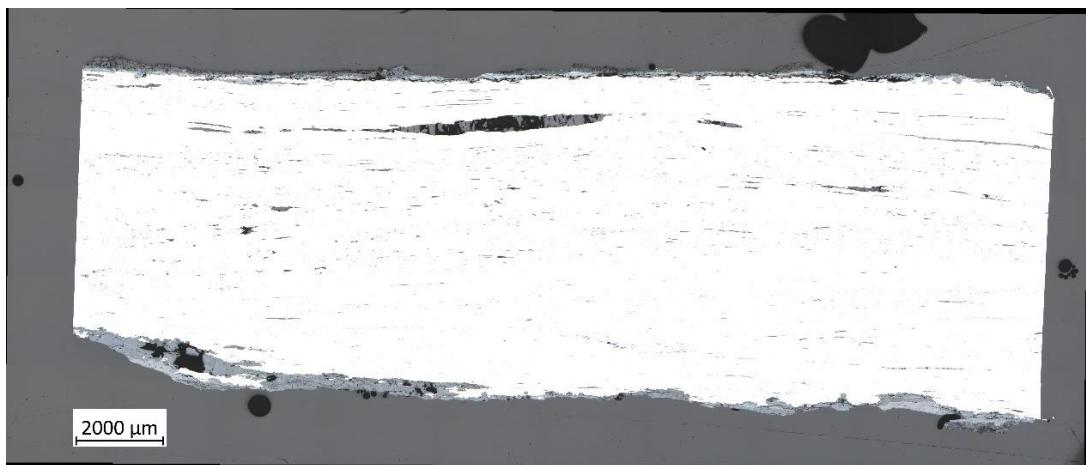


Photographie de l'objet avant découpe

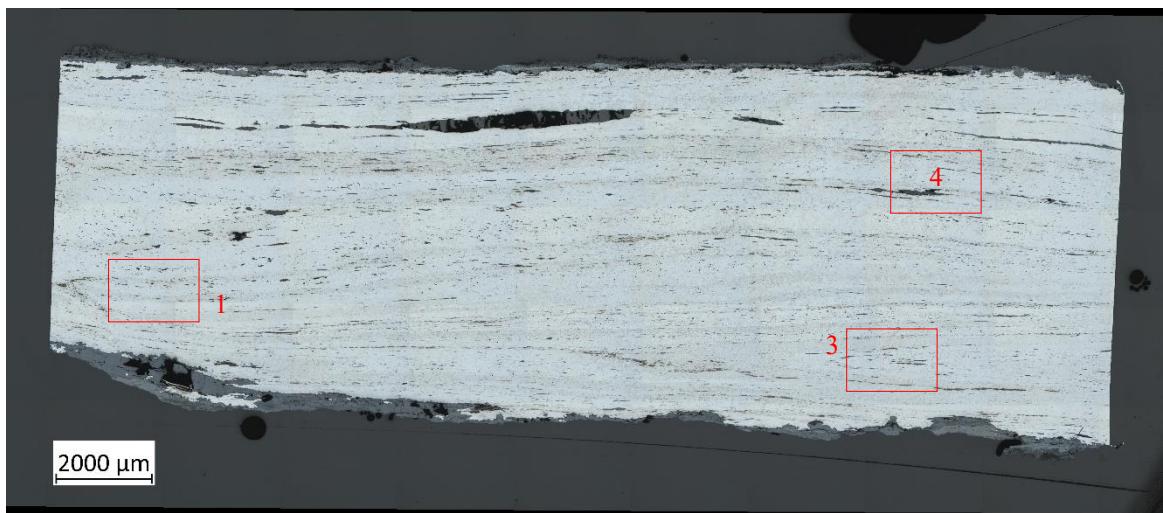
Observations macroscopiques :

Barre de section carrée (10x10mm) dans sa section la plus large et s'amincit vers la pointe (extrémité distale). L'extrémité proximale n'est pas terminée normalement par une tête homme mais par un rétrécissement de la section de l'objet.

Section 1 : Analyse métallographique



Mosaïque de la première section avant attaque au réactif



Mosaïque de la première section après attaque au réactif Nital 4%



Mosaïque de la première section après attaque au réactif Oberhoffer

Section 1 : Microographies



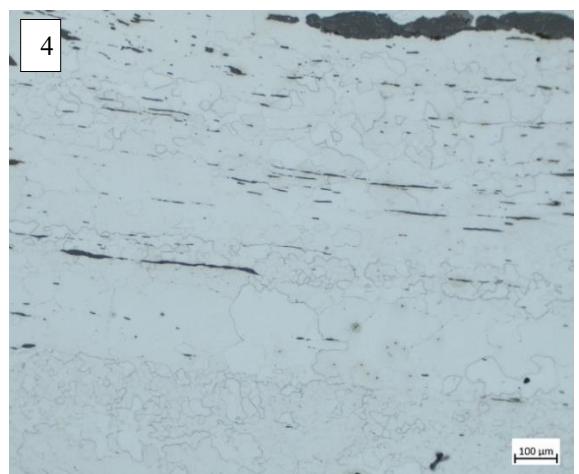
1 : Inclusions de scorie dans une matrice ferritique.



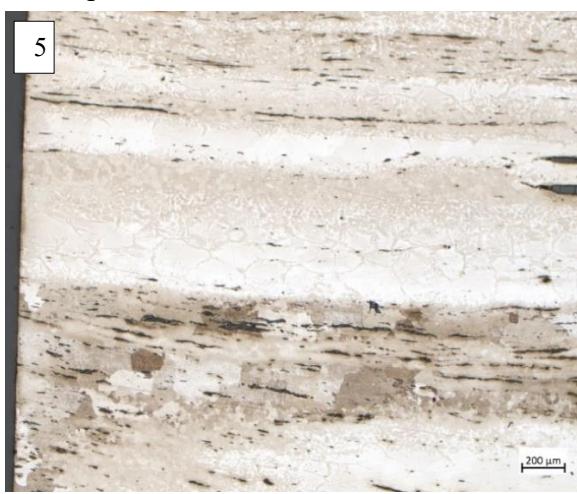
2 : Structures fantômes observées après attaque au réactif Oberhoffer.



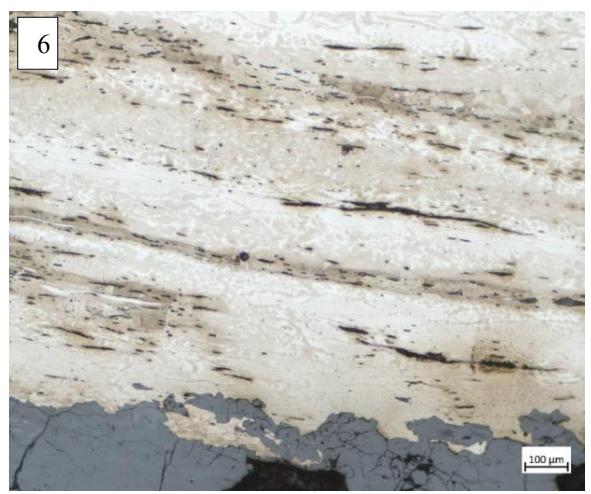
3 : Inclusions de scorie dans une matrice ferritique.



4 : Ferrite.



5 : Structures fantômes observées après attaque au réactif Oberhoffer.



6 : Soudure.

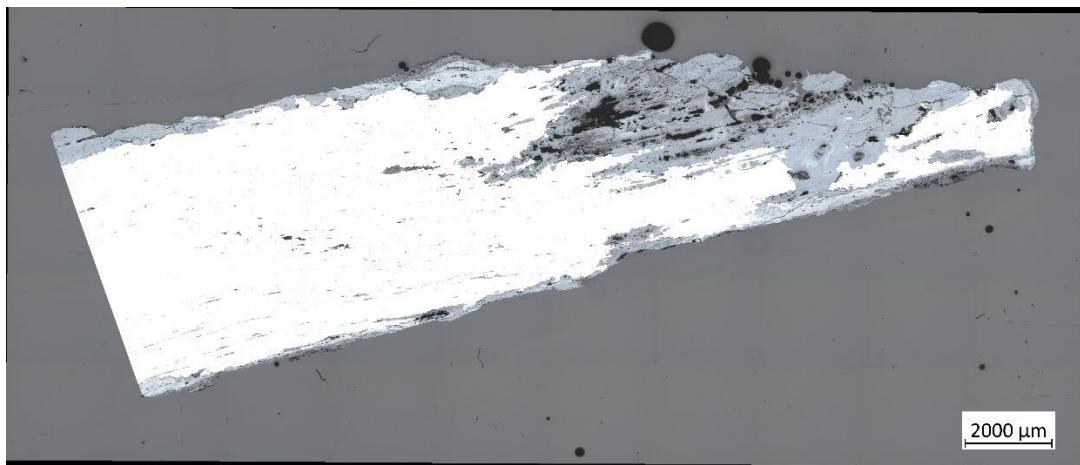


7 : Structures fantômes observées après attaque au réactif Oberhoffer.

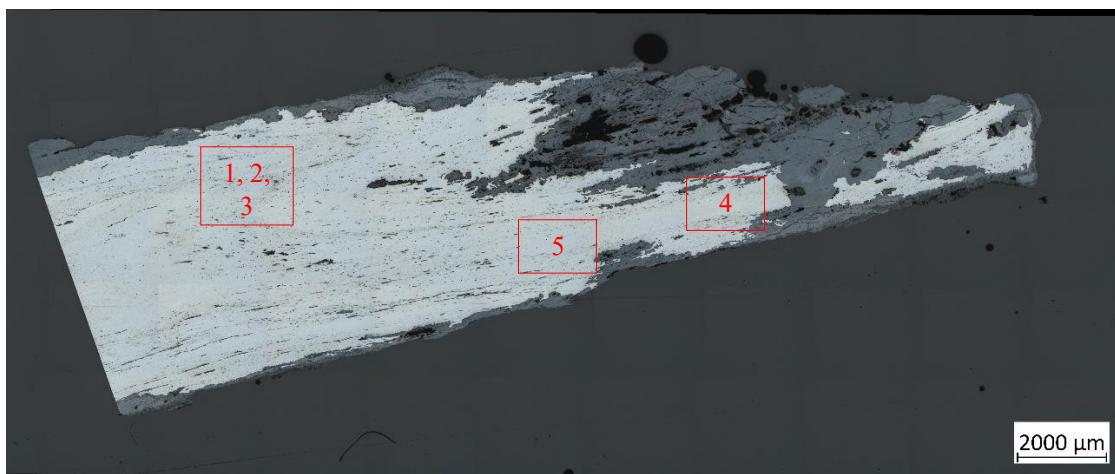


8 : Structures fantômes observées après attaque au réactif Oberhoffer.

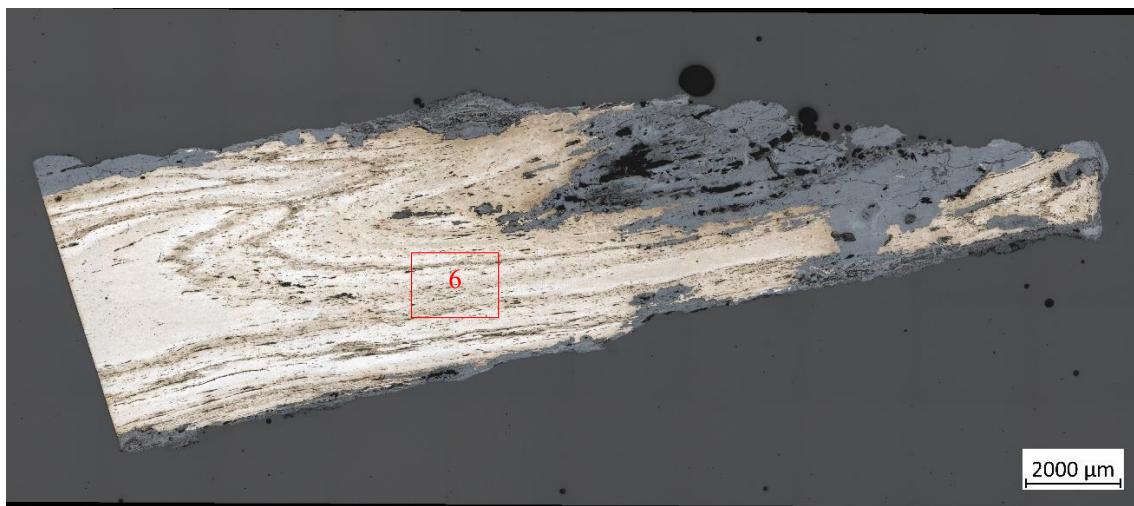
Section 2 : Analyse métallographique



Mosaïque de la seconde section avant attaque au réactif

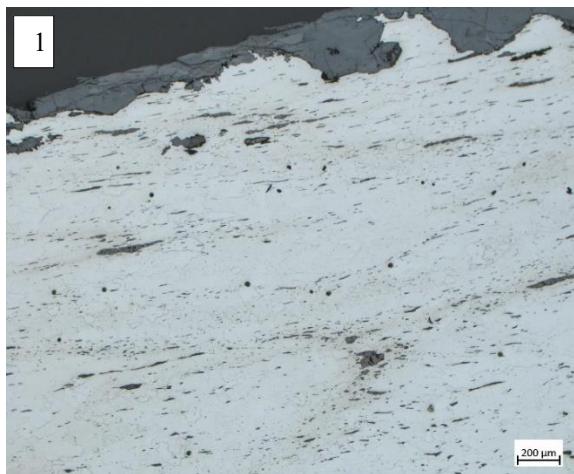


Mosaïque de la seconde section après attaque au réactif Nital 4%



Mosaïque de la seconde section après attaque au réactif Oberhoffer

Section 2 : Microographies



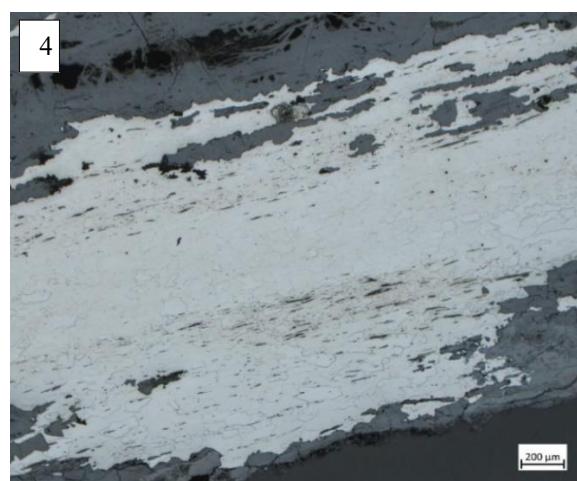
1 : Inclusions de scorie dans une matrice ferritique.



2 : Ferrite.



3 : Inclusion de scorie (aspect) dans matrice ferritique.



4 : Ferrite.



5 : Ferrite à grains légèrement étirés.



6 : Structures fantômes observées après attaque au réactif Oberhoffer.

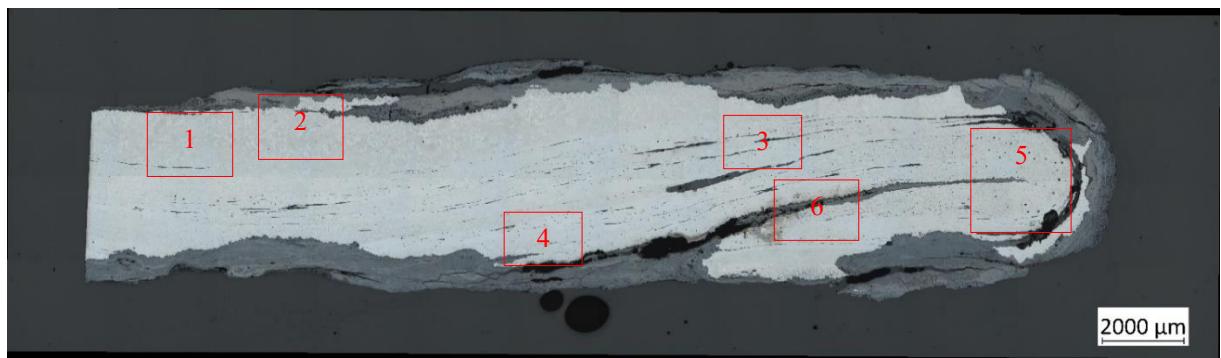
Informations générales :

Zone	UF	Contexte	Attribution culturelle	
Inconnue	Inconnue	Inconnu (dépôt ?)	La Tène finale ?	
Longueur	Largeur	Epaisseur	Masse	Typologie
171,5 mm	16 à 18 mm	4,2 à 5,9 mm	61 g	Barre à douille

*Photographie de l'objet avant découpe***Observations macroscopiques :**

Barre à douille en bon état (corrodée), assez régulière sur sa largeur, très longue par rapport au commencement de la douille, douille bien formée mais fragmentaire. Repli marqué au niveau de l'extrémité. Les traces de martelage sont encore visibles sur toute la surface.

Observations microscopiques : *Nature et caractéristiques du métal**Mosaïque avant attaque au réactif*



Mosaïque après attaque au réactif Nital 4%

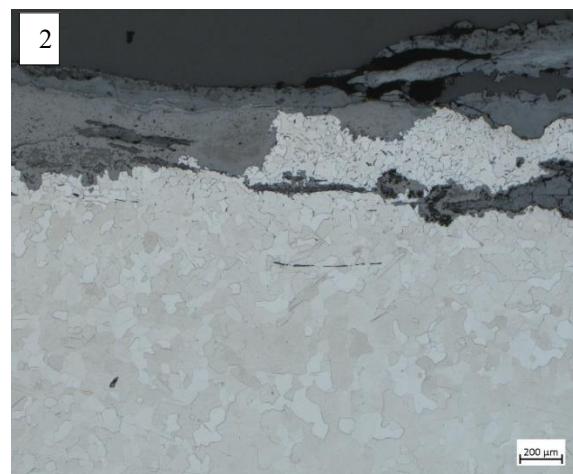


Mosaïque après attaque au réactif Oberhoffer

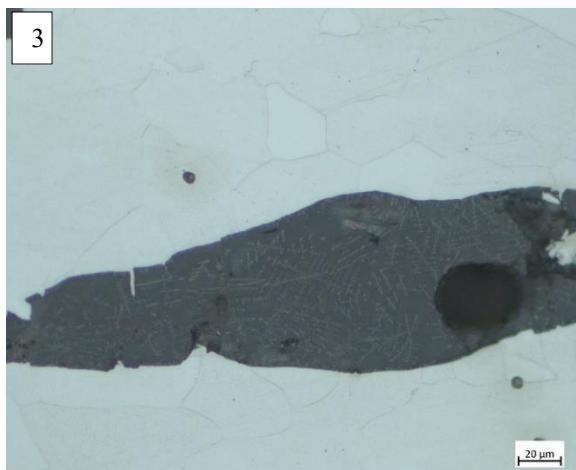
Microographies



1 : Ferrite.



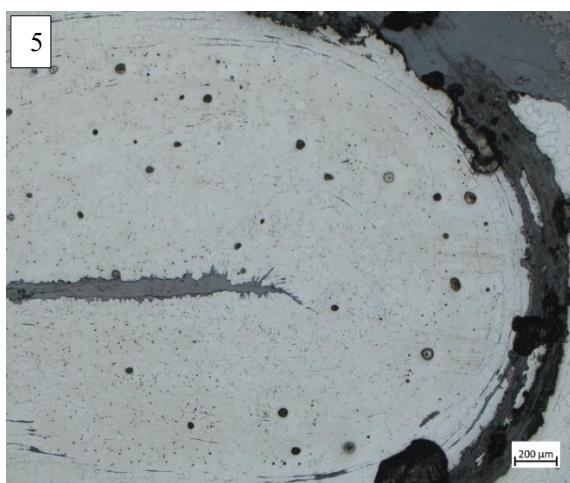
2 : Ferrite et zone plus carburée au-dessus.



3 : Inclusion de scorie avec dendrites de wüstite.



4 : Inclusions de scorie dans une matrice ferritique.



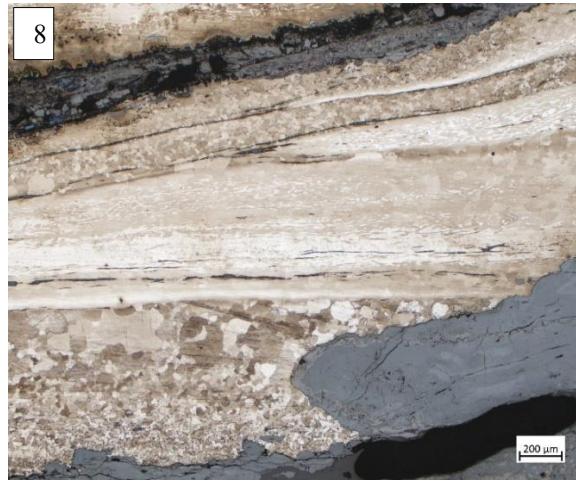
5 : Ferrite.



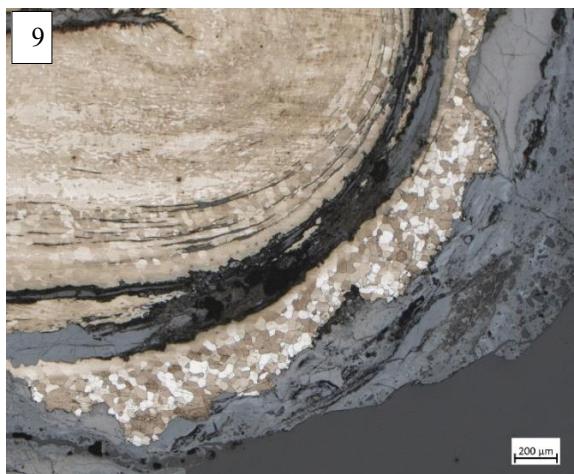
6 : Grains de ferrite localement plus carburés.



7 : Structures fantômes observées après attaque au réactif Oberhoffer.



8 : Structures fantômes observées après attaque au réactif Oberhoffer. Graduation de la teneur en carbone.



9 : Bande acierée.