



L'armure du XIII^e au XVII^e siècle en Europe : une approche matérielle. Production, nature et circulation du métal

Emilie Berard

► To cite this version:

Emilie Berard. L'armure du XIII^e au XVII^e siècle en Europe : une approche matérielle. Production, nature et circulation du métal. Histoire. Université de Cergy Pontoise, 2019. Français. NNT : 2019CERG0986 . tel-02492587v1

HAL Id: tel-02492587

<https://theses.hal.science/tel-02492587v1>

Submitted on 27 Feb 2020 (v1), last revised 28 Feb 2020 (v2)

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.



UNIVERSITE DE CERGY-PONTOISE
ECOLE DOCTORALE DROIT ET SCIENCES HUMAINES

THESE DE DOCTORAT

HISTOIRE / ARCHEOMATERIAUX

présentée en vue de l'obtention du grade de
DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE CERGY-PONTOISE

par

Emilie Bérard

L'armure du XIII^e au XVII^e siècle en Europe : une approche matérielle

Production, nature et circulation du métal

(Volume 1)

Soutenue le 29 Juin 2019 devant un jury composé de :

Luc Bourgeois	Université de Caen Normandie	Rapporteur
Ivan Guillot	Université Paris-Est Créteil	Rapporteur
Olivier Renaudeau	Musée de l'Armée	Examineur
Vincent Serneels	Université de Fribourg	Président
Philippe Dillmann	LAPA-IRAMAT CNRS/CEA	Directeur de thèse
Valérie Toureille	Université de Cergy Pontoise	Directrice de thèse
Catherine Verna	Université Paris 8 Vincennes-Saint-Denis	Directrice de thèse

Remerciements

Ce travail de recherche est le fruit d'un dialogue étroit et interdisciplinaire entre différents spécialistes issus des sciences humaines et sociales, du domaine de la conservation et de la restauration mais également des sciences analytiques. C'est dans ce cadre que, suite aux nombreux échanges et confrontations scientifiques, mes réflexions se sont construites. Je souhaiterais ainsi remercier toutes les personnes qui m'ont accompagnée durant ces années et qui ont, chacune à leur manière, contribué à la réussite de ce projet.

En premier lieu, mes remerciements s'adressent à mes directeurs de thèse, en commençant par Philippe Dillmann, qui m'a accueillie dans son laboratoire dès mes stages de master. Je souhaite vivement le remercier pour sa disponibilité, son enthousiasme mais également pour les nombreux et stimulants échanges que nous avons pu avoir sur le plan scientifique et parfois culturel (je n'oublierai jamais Franz Liszt). Ma reconnaissance va également à mes deux autres directrices de thèse, Catherine Verna et Valérie Toureille, pour leur accueil, leur confiance et leurs conseils. Le croisement de leurs trois points de vue, propres à chacune de leur discipline, m'aura permis d'enrichir grandement mes réflexions.

Je tiens également à remercier les rapporteurs de cette thèse, Ivan Guillot et Luc Bourgeois pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail. Merci également aux autres membres du jury Vincent Serneels et Olivier Renaudeau d'avoir accepté d'évaluer mes travaux ainsi que pour les nombreuses discussions engagées lors de la soutenance qui ont contribué à l'enrichir.

Ce projet de recherche a, en outre, bénéficié d'un soutien de la Fondation des Sciences du Patrimoine. Je souhaite ici remercier Anne Julie Etter ainsi qu'Emmanuel Poirault pour leur accompagnement durant ces années de thèse.

Ces travaux n'auraient pas pu voir le jour sans l'aide des nombreux chercheurs, conservateurs et restaurateurs qui m'ont accordé leur confiance en me donnant accès à leurs collections, et ont permis la réalisation des différents prélèvements. J'adresse mes sincères remerciements à Alan Williams, Camille Broucke, Antoinette Le Falher, Richard Dagonne et Pierre-Hippolyte Pénet, Marc Leroy et tous les membres du LAM, Armelle Querrien, Sophie Corson, Rachel Touzé, Jocelyn Martineau, Jacky Koch, Gérard Giuliano, Laurent Savarese, Françoise Gillot-Verges, Sébastien Jeandemange, Jean-Denis Laffite, Dominique Robcis, Emmanuel Plé, Arnaud Tixador,

Patrice Korpiun, Mathieu Linlaud, José Ferreira, Stéphane Lemoine, Loretta Rossetti et tous les membres du laboratoire Arc'Antique.

Je remercie également toutes les personnes qui ont contribué au développement des différentes méthodologies analytiques et qui ont pu m'aider dans l'acquisition et le traitement des analyses effectuées : Christophe Pécheyran, Gaelle Barbotin, Bernard Gratuze, Fai Tcha, Henrique Da Mota, Guillaume Sarah et Julien Flament pour les analyses et le développement des protocoles opératoires par LA-ICP-MS, Julie Bourgon et Eric Leroy pour les mesures MET et microsonde, Ivan Cotrebil et Stéphane Urvoy pour les mesures de microdureté.

Je souhaite à présent remercier tous mes collègues et collaborateurs du bâtiment 637 du CEA de Saclay, tant pour leur collaboration scientifique que leur bonne humeur et leur soutien. Merci à Stéphanie, pour nos nombreuses discussions autour d'un café ou d'une bière, à Enrique, pour avoir contribué à rendre mes premières analyses LA-ICP-MS et mes journées de prélèvements inoubliables, à Eddy, pour avoir soutenu les masses d'armes lors des mesures de diffraction des neutrons et être venu m'aider à sauver le MEB, à Florence, pour sa gentillesse, son aide au Raman quand j'en ai eu besoin et ses nombreuses histoires, à Sylvain, cameraman à ses heures, pour m'avoir aidée à déchiffrer certaines structures métallographiques, à Jean Charles, pour sa formation sur Adobe qui m'a fait gagner tant de temps, à Jean Paul, qui m'a aidée à rattraper ma résine. Merci également à Florian, Mickael, Delphine, Oli, Valérie, Adriana et tous les membres du LEEL pour leur aide, leurs conseils et leur bonne humeur.

Je n'oublie pas non plus tous les anciens doctorants et post doctorants du LAPA avec, par ordre de disparition : un grand merci à Marine, pour m'avoir conseillée quand j'étais « toute petite », à Alex pour son aide quand je suis arrivée en stage et après, à Sophie pour toutes nos échappées à Telecom et toutes nos discussions scientifiques (ou pas !), à Irene ma première colocataire de bureau (Moi Lolita !), à Charly, pour m'avoir suivie sur la piste de la brochantite au MEB et soutenu par son humour quand je faisais des « ptits trous », à Robin, pour cette virée mémorable à Cora et cette Charlotte au four, à Manon, ma seconde colocataire de bureau, qui a contribué à élargir mes connaissances sous endnote (dommage, on est passé à mendeley), à Emilande, (dernière survivante de la génération) pour sa bonne humeur, son soutien et pour m'avoir généreusement montré comment coller les échantillons et laissé un grand bout de sa paillasse pour m'exercer ! Merci également aux nouveaux : Mélissa, pour m'avoir révélé l'existence des flancs mous, Sibylle, Hélène, Djiby, Erika, Silvia, Charlotte, Manon et Mélissa (alias M&M's) pour leurs tiroirs toujours bien remplis et leur soutien aux pauses café.

Enfin, je souhaiterais remercier mes proches qui ont tous, à leur manière, contribué à l'aboutissement de ce projet. En particulier, je tiens à remercier tous ceux dont j'ai eu la chance de croiser le regard amical ce fameux 29 Juin ainsi que : Amélie, pour m'avoir soutenue lors de ce moment important et l'avoir immortalisé sous ses crayons, Nadège et Gabriel, pour m'avoir prêté leur imprimante à Nantes, Vlad, mon correcteur anglophone préféré (qu'Anubis te garde !), mon oncle, pour ses traductions germaniques, ma mère, pour avoir su cultiver ma passion des « vieilles pierres », mon père, pour m'avoir donné l'envie de comprendre, mes sœurs Cécile et Clémence, pour leur confiance en moi et leur soutien indéfectible, et enfin, Fabien, pour avoir tout partagé avec moi durant ces années, des séminaires d'histoire à Paris 8 le samedi matin, à mes grands moments de solitude sur R, et jusqu'à la dernière page de oui-oui.

Table des Matières

Introduction.....	9
Chapitre 1 : Problématique	24
I. Usages et port de l'armure	25
1) L'armure et l'évolution des pratiques de combat	25
2) L'équipement défensif dans les armées, reflet d'une inégalité sociale	28
3) L'équipement défensif en dehors des armées	32
4) Bilan	33
II. Les alliages ferreux anciens	35
1) Préparation du minerai et réduction du métal	35
2) Nature du métal	47
3) Les traitements thermiques et thermochimiques	52
4) Bilan	57
III. Fabrication des armures : centres de production et chaîne opératoire.....	58
1) Les centres de production	58
2) Chaîne opératoire de fabrication des armures.....	70
3) Bilan	98
IV. Approvisionnement en matières premières	102
1) Les sources d'approvisionnement	102
2) Retrouver la signature chimique des espaces sidérurgiques de production	107
3) Bilan	128
V. Bilan général et Problématique	130
Chapitre 2 : Description du matériel d'étude et réalisation des prélèvements	133
I. Constitution du corpus	134
1) Choix des pièces	134
2) Nature et emplacement des prélèvements.....	136
II. XIII^e siècle-XIV^e siècle	138
1) Défenses de tête.....	138
2) Plaques de brigandine et plaques de broigne ou d'armure	139
III. XV^e siècle.....	145

1) Eléments d'armures articulées	145
2) L'armure de Sainte Suzanne	147
IV. XVI^e siècle.....	150
1) Eléments d'armures articulées	150
2) L'armure de cavalier G40.....	155
3) L'armure de François de Montmorency	157
V. XVII^e siècle.....	160
1) Eléments d'armure articulée	160
2) Les cuirasses de Valenciennes	161
VI. Bilan : Représentativité du corpus d'étude	168
<i>Chapitre 3 : Stratégie d'étude des prélèvements.....</i>	<i>170</i>
I. Méthodologie analytique	171
II. Caractérisation de la structure du métal.....	174
1) Préparation des échantillons.....	174
2) Etude du métal	174
III. Analyses inclusionnaires	184
1) Quantification des éléments majeurs	184
2) Tri des inclusions	185
3) Discrimination chimique des deux filières de réduction	186
4) Quantification des éléments traces.....	187
5) Compatibilité de provenance	197
<i>Chapitre 4 : Résultats des analyses menées sur les échantillons</i>	<i>199</i>
I. Nature du métal	200
1) Résultats généraux	200
2) Caractéristiques métallurgiques : évolution historique	231
3) Synthèse sur la nature du métal.....	261
II. Provenance du métal	263
1) Différentes origines du métal	263
2) Comparaison avec les ensembles géochimiques de production	296
3) Exemples des armures semi complètes.....	306
4) Bilan	318
III. Procédé de réduction.....	320
1) Résultats généraux	320

2) Lieu de fabrication supposé des pièces	324
---	-----

Chapitre 5 : Nature, circulation et production du métal utilisé pour la fabrication des armures : synthèse et discussion328

I. Nature et qualité du métal, synthèse329

1) Nature du demi-produit livré aux armuriers	329
2) Le travail du métal : traitements thermiques et mécaniques	332
3) Comportement mécanique du métal	335
4) Bilan : une qualité de métal particulière pour les armures ?	343

II. Nature du métal et usage de l'armure352

III. Qualité de l'équipement défensif et richesse du porteur.....356

IV. Spécificités techniques et centres de production358

1) Centre de fabrication et nature du métal.....	358
2) Origine du métal.....	361

V. Organisation des productions au sein des ateliers.....373

1) La réalisation d'une armure complète	373
2) La réalisation de pièces en séries ou de qualité constante	382

VI. L'armure replacée dans l'histoire de la métallurgie du fer389

1) Nature du métal et filières de réduction	389
2) Diffusion du procédé de réduction indirecte	390
3) Filières de réduction et production des armures	393

Conclusion générale et perspectives395

Références bibliographiques403

Table des figures.....425

Table des tableaux.....438

Introduction

L'étude des sociétés anciennes peut être envisagée selon différentes approches. L'une d'entre elles consiste à s'intéresser aux relations entre les hommes et les objets. La création d'imposantes collections dans les musées d'ethnographie découle par exemple de cette volonté. Toutefois comme le faisait déjà remarquer M. Mauss dans les années 1930, le collectionnisme seul ne suffit pas car « tout objet n'est qu'un moment de l'acte industriel. Il s'agit de replacer l'objet à son rang et à sa portion congrue, il faut replacer l'objet technique dans son industrie, l'industrie dans son métier, le métier dans la société [...] Savoir ce qui se passe dans la tête des gens au moment où ils emploient un objet. » (M. Mauss, 2012)¹. Pour lui, l'objet n'existe que dans un contexte qui doit nécessairement être considéré.

Dans cette même perspective, la notion de « culture matérielle » a récemment été employée pour aborder la question de « la part matérielle des cultures » (L. Bourgeois et al., 2018). Dans les années 1960 et 1970 elle a été utilisée par les historiens et les archéologues pour mettre en avant l'intérêt porté à la matérialité et aux techniques. Pour J.-M. Pesez elle repose sur cinq mots-clefs : « nature, hommes, techniques, objet, consommation » (J.-M. Pesez, 1995, p. 225). Ainsi selon lui, cette notion interroge les contextes de production et d'utilisation des objets mais également l'impact de l'homme sur son environnement (J.-M. Pesez, 1997, p. 29). Récemment elle a fait l'objet d'une réflexion à l'occasion d'un colloque « La culture matérielle : un objet en question » qui se concentrait principalement sur la période médiévale. Dans la conclusion de cet ouvrage, l'étude de la part matérielle de la culture est envisagée comme une étape de la construction du discours historique partagée par plusieurs disciplines (L. Bourgeois et al., 2018, p. 237–242). Elle passe d'abord par la constitution de corpus et l'analyse des données dans chaque discipline. La confrontation des différentes sources permet par la suite de retracer les modes de production des objets, leurs usages pratiques ou symboliques et leurs trajectoires dans le temps, les espaces et les sociétés. Cette approche, qui consiste à restituer en quelque sorte la biographie des objets a, par exemple, été mise en œuvre dans l'ouvrage pionnier d'A. Appadurai (A. Appadurai, 1986). A terme, il serait possible d'intégrer ces résultats dans une réflexion historique plus large pour mettre en évidence « des particularismes locaux comme des transferts culturels et techniques » (L. Bourgeois et al., 2018, p. 241).

Nos travaux s'inscrivent dans cette démarche générale. Ils se sont concentrés sur l'étude d'un objet particulier : l'armure. Au Moyen Âge la guerre tenait une place de premier plan. Les armes

¹ Ce texte est extrait de notes de cours prises par J. Soustelle en 1927 et 1928 et conservées au musée de l'Homme.

étaient alors présentes de façon « tangible et quasi familière » (C. Gaier, 1979, p. 9). L'armure offrait une protection efficace contre les armes offensives connues et a naturellement évolué avec les pratiques militaires. Sa fabrication a fait la renommée de grands centres de productions internationaux comme les villes de Milan et de Nuremberg. Au-delà de son rôle militaire fonctionnel, elle représentait également pour son porteur, une marque de distinction sociale. Le métier des armes était alors considéré par la noblesse comme une vocation naturelle (V. Toureille, 2015). L'armement défensif est un bon observatoire pour étudier les aspects militaires, sociaux, politiques, mais aussi économiques et techniques de cette période. Ce sont ces deux derniers aspects qui nous ont plus particulièrement intéressés dans ce travail. Nous y reviendrons ultérieurement.

L'habit de guerre a grandement évolué durant les derniers siècles du Moyen Âge c'est pourquoi afin de pouvoir le définir et le nommer il nous paraît indispensable de retracer d'abord l'évolution globale de sa typologie.

❖ Typologie de l'armure

L'élaboration de ces classifications repose sur les études conjointes du vocabulaire ancien, des objets en eux-mêmes ou de leurs représentations sur lesquels nous reviendrons ultérieurement. Dans le cadre de notre sujet d'étude, le terme « armure » désigne l'ensemble des armes défensives qui couvrent le corps du combattant. Comme nous le verrons par la suite, cet équipement pouvait être variable en fonction de l'époque, de la place du combattant au sein de l'armée voire de son statut social. Toutefois cette partie n'a pas vocation à dresser une typologie exhaustive de l'armement défensif, d'ailleurs largement traitée par d'autres auteurs². Nous allons ici uniquement nous attacher à nommer, classer et décrire très brièvement les grandes catégories d'armes défensives retrouvées fréquemment entre le XIII^e siècle et le XVII^e siècle, afin de fixer le vocabulaire qui sera employé dans la suite de ce travail.

² E.E. Viollet-Le-Duc (E.-E. Viollet-Le-Duc, 1854) propose dans le « Dictionnaire raisonné du mobilier » une typologie très complète et richement illustrée. On cite également les travaux d'A. Demmin, contemporain de ce dernier. « Le guide des amateurs d'armes et d'armures anciennes par ordre chronologique depuis les temps reculés jusqu'à nos jours » (A. Demmin, 1869) s'adresse plutôt, lui, aux responsables de collections publiques ou à des collectionneurs privés. A la même période P. Lacombe a publié « Les armes et armures » (P. Lacombe, 1868) où il s'attache à décrire l'évolution de l'armement en fonction du contexte historique. Ces premières études anciennes aujourd'hui dépassées sont toutefois déjà riches d'enseignements. Elles ont été reprises puis complétées progressivement aux siècles suivants. Au XX^e siècle on cite notamment les travaux de Sir G.-F. Laking « A record of European armour and arms through seven centuries » (F. Laking, Guy, 1920), Claude Blair « European armour circa 1066 to circa 1700 » (C. Blair, 1958) L.G. Boccia « L'arte dell'armatura in Italia » (L. G. Boccia and E. T. Coelho, 1967), de F. Buttin (F. Buttin, 1971) « Du Costume militaire au Moyen Âge et pendant la Renaissance », ou de E. Oakeshott « European Weapons and Armours. From the Renaissance to the Industrial Revolution » pour la période moderne (E. Oakeshott, 1980), qui sont toujours aujourd'hui considérés comme des ouvrages de références. Ces premières bases posées, des études ponctuelles comme par exemple celle de J.-P. Reverseau « Style et typologie des harnois ducaux selon les comptes de la fin du XIV^e siècle » (J.-P. Reverseau, 1986) viennent préciser et enrichir certains points particuliers de la typologie de l'armure ou encore les articles de C. Gaier dans « Armes et combat dans l'univers médiéval » (C. Gaier, 2004).

Au XIII^e siècle, l'armure de corps peut être constituée de différents vêtements. Pour reprendre la classification donnée par C. Blair, nous trouvons tout d'abord l'armure souple faite de cuir non traité ou d'étoffes plus ou moins épaisses et rembourrées. Ensuite, les protections de mailles, tel le grand haubert constitué de petits anneaux entrelacés recouvrant la quasi-totalité du combattant, auquel dès le XIII^e siècle, on superpose des plaques de cuir bouilli ou de fer : jambières, brassards, cubitière ou encore cuirasse (C. Gaier, 2004, p. 173). Enfin on trouve l'armure rigide, en métal, cuir bouilli, écailles ou corne (C. Blair, 1958, p. 19). Ce dernier type peut également être subdivisé en trois sous catégories : larges plaques articulées seulement là où les mouvements du corps et des membres l'exigent, petites plaques attachées entre elles par des lacets de textiles ou de cuir et fixées à une étoffe formant ainsi une construction dite en « lamelle » ou, dernière catégorie, plaques fixées à une étoffe par des rivets métalliques ou une couture : les « cottes de plaques »³. C'est cette dernière construction qui est sans doute à l'origine de l'armure de plates. Dans sa forme la plus évoluée, cette dernière est constituée de plaques de métal morphologiquement adaptées aux formes du corps. L'armure de corps était ensuite complétée par une défense de tête, la plus complète étant le heaume et également par un bouclier appelé généralement écu, de forme triangulaire, à dessus droit et côtés arrondis (C. Gaier, 2004, p. 173).

Le XIV^e siècle constitue un siècle de transition entre les armures de mailles et celles de plates. Le haubergeon, vêtement de maille couvrant le buste du combattant, remplace ainsi le grand haubert, protégé par un surcot et renforcé de différentes plaques de fer (la « cotte de plate »), d'un colletin de maille, de harnois complets de jambe et de bras sans oublier les gantelets. Du côté des défenses de tête, le grand heaume est abandonné par les cavaliers au milieu du XIV^e siècle (C. Gaier, 2004, p. 173) et le bassinet devient la protection la plus populaire. Deux principaux types de bassinet sont recensés : la forme conique et la forme ovoïde (C. Gaier, 1995 a, p. 139). Il pouvait être complété par une collerette de mailles (le camail) qui protège la gorge et la nuque (C. Gaier, 2004, p. 173). Une nouvelle forme de bouclier apparaît également concurremment à l'écu, nommée la targe. Elle en diffère par sa forme, rectangulaire ou ovale et peut présenter une large encoche, utilisée par le cavalier pour y coucher sa lance durant la charge (C. Gaier, 2004, p. 173).

La brigandine, composée de petites plaques métalliques rivetées à une couche externe de cuir ou de toile épaisse, est, elle, un dérivé des armures de plates dont elle constitue un état amélioré. Elle était généralement portée avec une protection de tête nommée la salade (voir figure 1).

³ A ce sujet voir l'étude de B. Thordemann sur les armures de la bataille de Wisby (B. Thordeman, 2001)

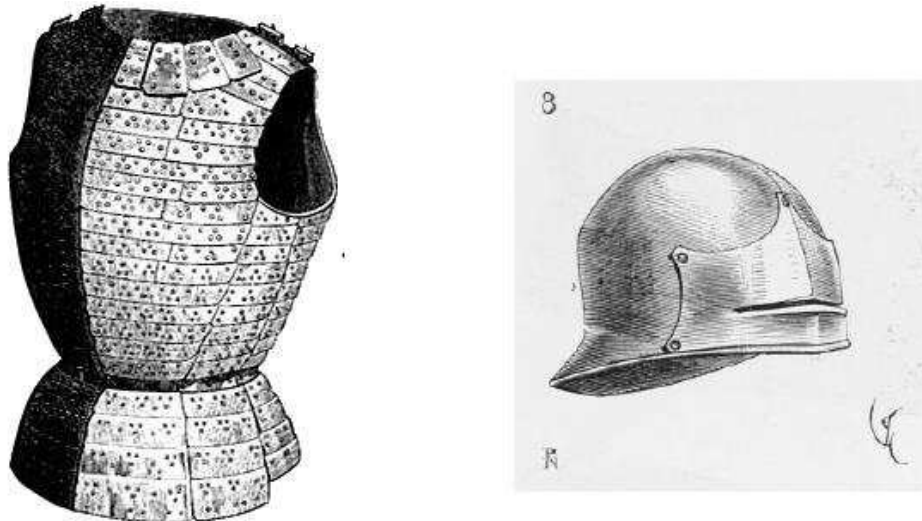


Figure 1 - A gauche brigandine, A droite salade. D'après (E. E. Viollet-le-Duc, 1873).

Cependant, le perfectionnement des armures de plates a surtout donné naissance à l'armure articulée des siècles suivants qui recouvre le corps du combattant de la tête aux pieds, rendant le port du bouclier inutile pour ceux qui la portaient. Elle est constituée d'un ensemble de pièces métalliques épousant chaque partie du corps qui sont savamment articulées entre elles (voir figure 2). Elle peut être décomposée en différents sous-ensembles à savoir : les protections du tronc (regroupant les éléments protégeant le torse, le dos et les épaules) des jambes (regroupant les défenses des hanches, des jambes genoux et des pieds), des bras (de l'avant-bras jusqu'au mains) du cou et de la tête (ces deux dernières catégories n'en formant parfois qu'une seule).



Figure 2 - Armure de combat de Claude de Vaudrey, réalisée vers 1495, travail milanais (Hofjagd- und Rüstammer, Vienne)

Dès lors, passé le XV^e siècle, si l'on ne tient pas compte des exigences spécifiques relatives aux harnois de joute ou de tournois⁴, l'armure ne connaît plus réellement d'évolution d'ordre morphologique mais plutôt d'ordre esthétique, au gré des goûts de la mode de l'époque. Ainsi, au cours du XVI^e siècle on rencontre des armures réalisées d'abord à des fins de représentation (même s'il n'est pas exclu que certaines aient pu être portées au combat), que l'historiographie a nommé « armure de parade ». En guise d'exemple, citons celle de Wilhem von Roggendorf fabriquée par l'armurier augsbourgeois très réputé Kolman Helmschmied (voir figure 3). L'armure prend ainsi place dans l'histoire du costume.



Figure 3 - Armure de Wilhelm Von Roggendorf. D'après (W. Boeheim, 1890)

Grâce à la diversité des décors réalisés, des spécificités stylistiques apparaissent propres à certains centres de fabrication au cours du XVI^e siècle. De l'armurerie allemande naît un style dit « maximilien » ornementé de cannelures reproduisant les plis du tissu dans un souci d'imitation de la mode vestimentaire (M. Pfaffenbichler, 2002, p. 268). Les ateliers milanais ont produit eux des armures aux riches et très prononcés décors repoussés qui s'apparentent à l'art du sculpteur. C'est pour cette période que les caractéristiques typologiques de l'armurerie française ont été mises en évidence, notamment par ses reconnaissables décors, alors qu'elle s'est dégagée des modèles italiens jusque-là prédominants⁵. Les armuriers français ont en effet produit des décors à plus faible

⁴ Nous discuterons plus en détails de cet équipement dans le Chapitre 1

⁵ Les publications de catalogues de quelques grandes expositions passées sont à ce sujet riches d'enseignements. Pour l'Italie se rapporter à « Heroic armor of the Italian Renaissance Filippo Negroli and his contemporaries » du Metropolitan Museum of Art (S. W. Pyhrr, J.-A. Godoy, and S. Leydi, 1998), et à l'exposition de Genève « Parures triomphales : le maniérisme dans l'art de l'armure italienne » (S. Leydi, 2003). Pour les armures françaises voir l'ouvrage « Armures des princes d'Europe sous l'égide de Mars » du Musée de l'Armée et notamment les articles de O. Renaudeau et de J. Reverseau (O. Renaudeau and J.-P. Reverseau, 2011)

relief mais très finement ciselés qui se rapprochent du travail des médailleurs (O. Renaudeau and J.-P. Reverseau, 2011, p. 17). Au XVII^e siècle le port de l'armure articulée complète est finalement abandonné.

Ce rapide survol de l'évolution de la typologie de l'armure nous révèle toute la complexité de cet objet. Tout d'abord pour l'identifier : le terme « armure » couramment employé, fait en effet référence non pas à une seule pièce mais bien à un ensemble d'éléments qui ont chacun subi des évolutions variées en fonction du temps. Cette question de vocabulaire se traduit aussi dans l'initiative du *Glossarium Armorum* (O. Gámbler, 1972) publié en 1972 par des experts reconnus dans le domaine. Il proposait de fixer une terminologie standardisée pour l'ensemble des pièces d'armures quelles que soient les langues utilisées afin d'y apporter une meilleure clarté. Toutefois, malgré ces bénéfices potentiels, ses principes ne furent pas adoptés par la suite. D'autres tentatives de classification, considérant à la fois les aspects typologiques, techniques et fonctionnels de l'arme, ont été entreprises plus récemment comme celles de M. Goll (M. Goll, 2013).

Comme nous l'avons évoqué, l'étude de l'armement défensif peut mobiliser différents types de sources : les sources textuelles, les sources iconographiques ainsi que les sources matérielles : les objets en eux-mêmes. Nous allons à présent nous intéresser à chacune de ces catégories.

❖ L'armure dans les textes

L'étude des armures pose d'abord un problème d'ordre lexicologique. Les termes que nous utilisons aujourd'hui pour désigner l'équipement défensif des combattants qui ont été présentés, ne recouvrent pas en totalité la signification qu'ils pouvaient avoir auparavant (J.-P. Reverseau, 2002, p. 127). Si l'acceptation contemporaine du terme « armure » ou de « harnois » désigne à présent une armure complète ce n'était évidemment pas le cas au Moyen Âge. Par ailleurs ce n'est qu'au terme d'une évolution sur plusieurs siècles que l'habit de guerre a pris la forme de l'armure complète épousant chaque partie du corps du combattant. Par conséquent, les différentes mentions retrouvées dans les textes reflètent aussi d'un point de vue lexicologique cette lente évolution.

Plusieurs sources textuelles sont de grand intérêt pour l'étude de l'armement ancien. C. Gaier en cite quatre principales : les sources narratives, les sources littéraires, les sources diplomatiques et les sources didactiques (C. Gaier, 1979, p. 61–82). Les premières décrivent les combattants et les combats. Elles livrent des informations sur l'origine de l'armement, son emploi et l'opinion que les contemporains en avaient. Les sources littéraires appartiennent au domaine de la fiction. Les épopées et les romans en particulier sont susceptibles d'éclairer l'équipement des combattants et les usages guerriers à condition que les auteurs aient situés leur héros dans un cadre proche du leur. Les sources diplomatiques, et plus largement les sources de la pratique, rassemblent

une vaste catégorie de documents comme les livres de compte, les inventaires de salles d'armes et d'arsenaux, les tarifs de péage et les recettes douanières, les testaments, les ordonnances militaires et les montres d'armes, les règlements corporatifs ou encore la correspondance privée. Enfin, les sources didactiques susceptibles de nous intéresser concernent les traités techniques qui décrivent les pièces d'armement. Les usages des tournois furent par exemple codifiés au XV^e siècle, ce qui a donné lieu à la rédaction de traités en présentant le déroulement et le type d'armement (C. Gaier, 1979, p. 81).

L'identification des différentes pièces défensives dans ces sources n'est pas aisée. La « précision technique »⁶ n'était en effet pas forcément de rigueur chez tous les auteurs. Pour en faire la démonstration, et illustrer la diversité des dénominations qu'il est possible de rencontrer dans les textes, nous nous sommes volontairement restreints à utiliser quelques exemples d'études françaises qui se sont intéressées au contenu de commandes ou d'inventaires d'armes et d'armures. Les remarques soulevées mériteraient évidemment d'être confrontées à d'autres types de sources ainsi qu'à d'autres langages pratiqués à la période médiévale, mais ce n'était pas le but de ce travail.

Dans un inventaire de l'équipement militaire détenus par les habitants de la ville de Troyes en 1474, Ph. Contamine relève que le terme le plus générique pour désigner l'équipement du combattant, toutes parties du corps confondues est celui d'*habillemens de guerre* (P. Contamine, 1996). Toutefois on peut bien évidemment rencontrer des mentions plus spécifiques se rapportant à un type de protection particulier. D. Robcis s'est lui intéressé aux achats d'armes et d'armures sous le principat de Jean Sans Peur à travers les documents comptables bourguignons. Au XIV^e siècle, il relève fréquemment un terme, propre aux armures de mailles : le *haubergeon*. Cependant on trouve parfois également mention de *cotte de fer ou d'acier* ou encore de *harnois de mailles*. Ces expressions bien que moins précises feraient aussi référence à des protections de mailles (D. Robcis, 1998). Pour les protections constituées de plaques de métal, on trouve mention de *plates* parfois accompagnées d'un qualificatif comme *de guerre* ou *à jouter* (D. Robcis, 1998). Ce terme demeure très imprécis quant au matériel désigné. D'après D. Robcis, il pourrait faire référence aux protections du buste mais également à la nature du matériau employé, puisque dans le cas des plates de joute il peut être question de cuir bouilli et non pas de métal. Au XV^e siècle on peut relever dans les achats la mention de *cuirasse* ou *cuirasse à armer* (P. Contamine, 1989, 1996), mais aussi fréquemment de *brigandine*, terme déjà défini précédemment.

L'armure articulée est, quant à elle, associée au terme de *harnois*. S. Painsonneau a étudié la production de l'armurerie tourangelles au XV^e siècle à travers différents types de documents (documents comptables, administration communale de la ville, minutes notariales)(S. Painsonneau,

⁶ Expression empruntée à C. Gaier (C. Gaier, 1979).

2004). Il souligne qu'il faut dissocier l'emploi du terme *harnois*, terme générique pouvant a priori désigner n'importe quel élément de l'armure articulée, de celui d'*harnois complet ou entier*, se rapportant à une armure complète. Les termes de *harnois de jambe* ou *harnois de bras* sont aussi rencontrés. Ces appellations font a priori référence à l'ensemble des protections des bras et des jambes et donc nécessairement à plusieurs éléments mais qui ne sont pas forcément spécifiés. La mention de *mesure* pouvait être associée à celle de *harnois complet* qualifiant ainsi une production sur mesure à destination des particuliers. Une autre expression relevée est celle de *harnois complets soudé*. S. Painsonneau propose que ce terme *soudé* devait probablement désigner la « superposition des pièces de métal qui assure une protection intégrale lors des mouvements » (S. Painsonneau, 2004, p. 66). Ph. Contamine qui a également rencontré cette mention, souligne, lui, que cette appellation devait peut être désigner un certain type de harnois et que des recherches complémentaires mériteraient d'être menées en ce sens (P. Contamine, 1989, p. 11, note 40).

Enfin, il n'est pas rare de trouver associé à la commande d'un *harnois complet* d'autres éléments d'armures notamment par le terme *garny*. S. Painsonneau formule ici deux hypothèses : cela correspond soit à un changement de composition dans l'armure complète (sans que nous puissions savoir précisément de quelle nature il est), soit à un rachat pour des pièces de rechange. L'achat de pièces isolées est aussi mentionné par D. Robcis ou Ph. Contamine. Cela laisse supposer une certaine facilité dans l'ajustement de pièces d'origines très diverses, et souligne le caractère composite de l'armure.

Ces quelques exemples révèlent bien la difficulté d'identifier précisément la nature de l'objet mentionné dans les sources écrites. Ainsi le mot *harnois* doit être accompagné du terme correspondant à la partie du corps protégée pour que l'on comprenne réellement quel élément il désigne. D'autres précisions peuvent être apportées pour le caractériser. Ces dernières permettent parfois d'éclairer en partie son mode de fabrication (comme la mention de *mesure*), mais d'autres fois soulèvent de nouvelles questions auxquelles il est impossible de répondre en tenant compte de ces seules informations (comme la mention *soudé*).

❖ Les sources iconographiques

Les sources iconographiques constituent de précieux témoignages visuels qui ont le mérite d'être relativement abondants. J-P Reverseau précise que les sources représentant des armes et armures sont principalement issues des supports suivants : les miniatures, les peintures murales ou peintures de chevalet, les portraits à partir du XVI^e siècle, les tapisseries et broderies, la sculpture et la sculpture funéraire et enfin les sceaux et monnaies (J.-P. Reverseau, 2002).

Outre la représentation des pièces en elles-mêmes, ces sources peuvent aussi illustrer les artisans qui les ont fabriqués. Par exemple, Le *Livre des frères Mendel* (XV^e-XVI^e siècles), présente des

portraits d'artisans nurembergeois, hébergés à l'initiative du riche marchand Konrad Mendel⁷. Parmi eux, on relève notamment des armuriers (W. Treue et al., 1965). Ce livre n'a pas pour but de décrire le travail des artisans mais bien de recenser ces derniers en les représentant dans l'exercice de leur métier comme l'illustre la figure 4 (W. Treue et al., 1965). Outre un foyer on peut relever sur la figure la présence d'un certain nombre d'outils (marteau, enclumes ...) mais également de pièces d'armures en cours de finition ou déjà finies.



Figure 4-Portrait d'un armurier. Issu de « Die Hausbuch der Mendelschen Zwölfbrüderstiftung » Mendel II, 29 r. (W. Treue et al., 1965)

De façon générale les sources iconographiques, si elles sont riches, doivent toutefois être utilisées avec beaucoup de précautions. En effet un certain nombre de conventions de représentations pouvaient exister et la subjectivité de l'artiste n'est pas à négliger. Ainsi elles doivent être soumises à l'analyse de l'historien et faire l'objet d'interprétations nuancées. Elles constituent toutefois des sources indirectes d'intérêt pour l'étude des armures.

⁷ Pour davantage d'informations sur le sujet on pourra se reporter à l'ouvrage suivant « Das Hausbuch der Mendelschen Zwölfbrüderstiftung zu Nürnberg - Deutsche Handwerksbilder des 15. und 16. Jahrhunderts » (W. Treue et al., 1965).

❖ Les objets

Les objets conservés peuvent avoir différentes origines. Ils peuvent être issus « d'anciennes collections dynastiques passées dans le patrimoine des états modernes, de fond d'arsenaux constitués dès le Moyen Âge ou de trouvailles archéologiques » (C. Gaier, 1979, p. 39).

Les premières collections d'armes et d'armures remontent au moins au XV^e siècle où certaines pièces censées avoir appartenu à des ancêtres glorieux sont conservées dans les arsenaux royaux et princiers. Cependant, si une volonté de cataloguer et de recenser les différents objets pouvait exister dans ces premières tentatives de rassemblement, c'est avant tout pour des raisons symboliques liées au prestige ou à la gloire historique des pièces, que ceux-ci ont d'abord été réalisés (F. Cognot, 2013, p. 23).

Ces premiers ensembles constituent le noyau primitif des futures collections de grandes ampleurs qui naîtront véritablement au XIX^e siècle, rassemblant des objets de provenances diverses. Un classement méthodique va alors être réalisé qui va conduire à la mise en place des premières typologies, comme celle décrite dans le *Dictionnaire raisonné du mobilier français de l'époque carlovingienne à la Renaissance* d'E.E Viollet le Duc longtemps restée une référence (E. E. Viollet-le-Duc, 1873). Il faut également préciser que le renouveau d'intérêt pour les armes anciennes à cette période a aussi donné lieu à la mise sur le marché de nombreux faux, remettant en question encore aujourd'hui l'authenticité de certaines pièces (J.-Y. Marin, 1999, p. 5).

Ainsi, le parcours même qui a mené à la création de ces collections, a fait que certains types de pièces ont été conservés plus largement que d'autres pour des raisons esthétiques, symboliques, ou simplement pour la curiosité que ces dernières inspiraient, au gré des goûts des collectionneurs. Par conséquent, elles ne peuvent être complètement représentatives de la diversité des pièces autrefois produites, les objets les plus prestigieux ayant eu plus de chance d'être conservés. De plus, les armures complètes, c'est-à-dire comptant l'ensemble des éléments produits à l'origine, restent rares même si les objets présentés ensemble dans les collections peuvent avoir une cohérence historique du point de vue de leur datation ou de leur provenance. Par ailleurs, il faut aussi relever la rareté des pièces originales conservées antérieures au XVI^e siècle. Or, comme précédemment expliqué, l'armure a subi des évolutions sensibles durant les derniers siècles du Moyen Âge pour aboutir au harnois complet des XV^e siècle et XVI^e siècle. Peu de témoins des étapes de transformations de l'armure ont survécu.

Les productions des différents centres de fabrication d'armures sont elles aussi représentées de façon inégale dans les collections muséales. Les pièces de facture italienne ou allemande sont en effet bien identifiées dans les collections. En revanche ce n'est pas forcément le cas des objets de fabrication française ou espagnole par exemple. Ceci peut s'expliquer de différentes façons. Tout d'abord par la nature des productions et des quantités générées, ce qui a forcément eu, d'une

manière ou d'une autre, une répercussion sur le nombre de pièces susceptibles d'avoir été conservées. Les centres germaniques et ceux d'Italie du Nord étaient, comme nous le verrons par la suite, des centres armuriers⁸ majeurs qui exportaient leur production dans de nombreuses régions d'Europe. Ensuite, les productions de certains centres ont pu être moins étudiées ou moins bien identifiées. Dans le cas de la France, aucun poinçon retrouvé sur une pièce ne peut être associé au travail d'un armurier car les registres sur lesquels ces marques étaient enregistrées n'ont pas été conservés (M. Bernard, 2012, p. 264). Toutefois les caractéristiques typologiques de l'armure française ont pu être mises en évidence à partir du XVI^e siècle⁹. Par ailleurs la pratique de la copie au Moyen Âge était courante. On fabriquait ainsi des armures qui sont dénommées dans les sources comme à la façon *d'Italie ou d'Allemagne*. Ces mentions constituent pour la pièce une sorte de publicité qui met ainsi en avant une forme ou une technique de fabrication particulière, imitant celle d'une production renommée (D. Robcis, 1998; P. Dillmann, L. Pérez, and C. Verna, 2011 a, p. 61). Ce type de copie doit cependant être bien différencié des reproductions frauduleuses qui ont pu être fabriquées à cette période comme plus tard par exemple au XIX^e siècle. Ainsi, on comprend bien qu'au sein des collections, l'origine de certaines pièces n'a pu être identifiée ou bien mal attribuée, reflétant ainsi un paysage inégal de la production armurière¹⁰ en Europe.

Enfin, au cours de leur vie en tant qu'objet de musée, les pièces ont pu subir différentes altérations. Ainsi les pratiques de restauration au XIX^e siècle et au début du XX^e siècle ont pu conduire à des modifications d'aspect, afin que ces dernières ressemblent à l'image de ce que l'on se faisait de l'armement médiéval. L'idée de l'armure étincelante du chevalier, le fameux « harnois blanc » a notamment pu conduire à la destruction du brunissage de certaines armures ou à un nettoyage trop abrasif, ce qui rend parfois les poinçons apposés sur les objets illisibles (F. Cognot, 2013, p. 111–112). Des remontages ou remplacements de certaines parties des objets ont pu être opérés sans qu'il y ait eu de notifications écrites conservées. L'étude de ces pièces suppose donc un examen attentif des objets au préalable pour discerner les restaurations ou altérations postérieures à leur période d'usage.

Malgré les quelques limites précédemment évoquées, le matériel issu des collections de musées constitue une première source de choix pour l'étude des armures tant par sa quantité que par sa diversité. Les objets issus de contextes archéologiques offrent un autre éclairage pour l'étude

⁸ L'expression de « centres armuriers » est employée par C. Gaier pour désigner les centres de fabrication des armures et plus généralement des armes (C. Gaier, 1995 b).

⁹ Voir à ce sujet l'ouvrage « Armures des princes d'Europe sous l'égide de Mars » du Musée de l'Armée et notamment l'article de O. Renaudeau et de J.-P. Reverseau (O. Renaudeau and J.-P. Reverseau, 2011)

¹⁰ L'expression de « production armurière » est employée par C. Gaier pour désigner les productions d'armures et plus généralement parfois d'armes (C. Gaier, 1995 b).

de l'armement ancien, car ils n'ont pas été conservés de manière délibérée depuis leur première période d'usage ou ont pu être perdus par leurs propriétaires. L'archéologie a ainsi mis au jour plusieurs ensembles de grande ampleur comme celui de de Chalcis (Grèce) ou de Valenciennes (France). Dans le premier cas, c'est plus de 400 pièces défensives datées entre le XIV^e et le XV^e siècles dissimulées dans la ville médiévale de Negroponte sur l'île d'Eubée avant la prise Ottomane de 1470 qui ont été retrouvées en 1840 (N. D. Kontogiannis, 2012). Le second ensemble cité compte plusieurs centaines de cuirasses datées du XVII^e siècle découvertes lors des fouilles de l'atelier d'un fondeur de la ville, munitionnaire du roi d'Espagne en 2007 (P. Korpiun et al., 2010). Malheureusement, comme nous allons le voir, ce type de découverte reste rare pour la période qui nous intéresse. Plusieurs facteurs en sont certainement responsables.

Tout d'abord, il était courant que les armures soient récupérées sur les champs de bataille (P. Contamine, 2002, p. 12; R. Figueres, 2008). Le site de la bataille de Visby (1361) en Suède constitue sur ce point une exception de taille puisque c'est plus de mille corps de combattants qui ont été retrouvés enterrés à la hâte à l'orée de la ville, certains corps ensevelis directement avec leurs armes et armures (B. Thordeman, 2001). La fouille de ce site a donc apporté de grands enseignements sur l'équipement défensif de cette période, la plupart des armures mises au jour appartenant à la famille des « cottes de plaques ».

Ensuite, la pratique d'inhumation du défunt avec ses armes, pratique héritée de divers peuples germaniques, si elle constitue une source d'information très enrichissante du point de vue archéologique, se perd au cours du Moyen Âge (P. Contamine, 1986, p. 310). L'offrande d'armes funéraires pouvait toutefois encore se pratiquer. Ainsi l'étude de testaments du XIV^e siècle a montré qu'une coutume répandue consistait à ce qu'au moment de son décès, le chevalier prenne des dispositions pour qu'une de ses armures, et une de ses montures soient conduites devant sa dépouille et ensuite offerte à l'église. Si la monture était généralement revendue, l'armure pouvait parfois demeurer auprès du défunt dans l'église (F. Lachaud, 2002). Bien que le temps n'ait pas forcément épargné ces vestiges, l'archéologue J-G. Mann a ainsi eu la chance de redécouvrir d'authentiques armures italiennes au Sanctuaire de Notre-Dame des Grâces près de Mantoue considérées jusqu'alors comme des figures votives peintes (J. G. Mann, 1930). Ce type de découverte reste évidemment exceptionnel.

Enfin, même si l'état d'altération est fortement dépendant du milieu d'enfouissement, les éléments d'armures issus de contexte archéologique présentent généralement un état de corrosion avancé pouvant conduire à une perte d'information partielle voire totale dans le pire des cas, sur le métal. De plus, comme expliqué précédemment, les plaques pouvaient être reliées entre elles par

des supports de cuir ou d'étoffe très rarement conservés¹¹. Aussi, quand retrouvées de façon éparse, les plaques d'armures peuvent poser des difficultés d'identification sur les sites et il semble fort probable que certaines d'entre elles aient pu être considérées comme de simples plaques de fer et ne pas être publiées en tant que pièces d'armures (A. Querrien and J. Blanchard, 2004).

Il est aussi à noter qu'en fonction de l'époque à laquelle remonte la mise au jour de l'objet, le contexte de découverte peut être très imprécis. C'est notamment le cas pour les trouvailles du XIX^e siècle, rentrées ensuite dans les collections de certains musées, qui ne mentionnent que très rarement voire pas du tout le site de découverte exact. Le harnois conservé au musée de l'Auditoire de la ville de Sainte Suzanne constitue un exemple parmi d'autres (O. Renaudeau, 2014).

❖ Méthodologie employée et présentation de la démarche

Comme nous venons de le voir, les armures sont des objets complexes et composites qui se décomposent en différents éléments. Leur nature précise peut ainsi être difficile à identifier dans les textes. Les objets conservés, qu'ils soient présentés comme des témoins de la vie matérielle ou comme de véritables œuvres d'art, constituent une autre source d'information historique. C'est cette dernière que nous avons choisi d'interroger dans ce travail. Bien que des études matérielles de ces objets aient déjà été réalisées dans le passé, (A. Williams, 2003; N. Dupras, 2012), ces dernières n'ont pas abordées ou très partiellement un certain nombre d'aspects majeurs du point de vue de leurs productions et de leurs utilisations. Par exemple, les techniques de fabrication des armures ont été essentiellement envisagées pour les XV^e et XVI^e siècles et ce uniquement pour les centres de production de plus grande importance. Par conséquent, les résultats ne permettent pas d'évaluer l'évolution globale de cet objet d'un point de vue technique. De même, les réseaux d'échanges, notamment en ce qui concerne l'origine du métal utilisé par les armuriers, demeurent peu étudiés. Ainsi, aucune approche globale n'a jusqu'ici pu comparer les aspects de production des armures (de l'origine du métal, son travail dans l'atelier jusqu'à la vente des pièces), avec l'usage des objets sur le plan militaire et social.

L'étude de la matière suppose en outre d'avoir recours à des outils appropriés. L'archéométrie s'avère ici d'un intérêt majeur car elle permet d'accéder à un grand nombre d'informations enregistrées dans les matériaux anciens, le plus souvent grâce au support de mesures instrumentées. Dans le cas des alliages ferreux anciens les investigations menées permettent de

¹¹ A ce sujet voir l'article de M. Rijkelijkhuisen (M. Rijkelijkhuisen and M. Volken, 2017)

déterminer la nature du métal employé (fer, acier, fer phosphoreux...), mais aussi les traitements thermiques appliqués par les armuriers (trempe, recuit...) afin de modifier et d'optimiser les propriétés mécaniques du métal (G. Pagès et al., 2011; P. Dillmann, L. Pérez, and C. Verna, 2011 b; S. Leroy et al., 2017; M. L'Héritier, I. Guillot, and P. Dillmann, 2019). De plus, les récentes méthodologies développées offrent la possibilité d'étudier les signatures chimiques liées aux procédés d'obtention des alliages ferreux, puis par comparaison avec des bases géochimiques de référence de remonter à la provenance de ces derniers (V. F. Buchwald and H. Wivel, 1998; M. P. Coustures et al., 2003; A.-M. Desaulty et al., 2008; E. Blakelock et al., 2009; S. Leroy et al., 2011; M. F. Charlton, 2015; A. Disser et al., 2016; P. Dillmann et al., 2017).

Nous avons ainsi choisi d'utiliser ce socle de connaissance pour étudier la nature et la qualité des productions issues des différents centres armuriers, mais également restituer les échanges liés aux fournitures de métal et les éventuels choix techniques opérés par les fabricants. Afin de rendre compte des évolutions morphologiques de l'armure notre étude s'est portée entre le XIII^e siècle (où l'emploi de plaques de fer défensives est récurrent) et le XVII^e siècle (où le port de l'armure articulée complète disparaît). De plus notre travail a volontairement fait abstraction de l'étude des protections de mailles constituées d'anneaux entrelacées, car elles relèvent de techniques de mise en forme bien différentes de celles des armures de plates ¹². Enfin, la restitution des échanges de métal et des savoir-faire nous a conduit à définir un cadre géographique large afin de rendre compte à la fois des productions de centres de grande importance (Italie du Nord, centres germaniques) et d'autres plus modestes moins étudiés jusqu'ici (comme c'est le cas des productions françaises). Il porte sur l'espace européen et plus particulièrement sur les régions de l'Italie du Nord, d'Allemagne, de la France et de l'Espagne actuelles.

Les méthodes d'analyses physico chimiques utilisées, si elles sont susceptibles de révéler des informations inédites, nécessitent néanmoins d'être intégrées aux autres approches d'études historiques pour réellement prendre tout leur sens. C'est pourquoi, si l'approche de ce travail est principalement archéométrique, elle s'inscrit dans une démarche globale interdisciplinaire. Nos résultats, issus de l'analyse des objets, seront par conséquent confrontés aux autres types de sources historiques précédemment présentées.

Cette thèse a été divisée en différents chapitres.

Le **premier** est dédié à une synthèse des données historiques et des travaux de nos prédécesseurs, dont l'objectif principal consistera à dégager les axes majeurs de réflexion de notre recherche. Nous nous attacherons par conséquent à décrire les contextes d'utilisation mais aussi de

¹² Pour des renseignements sur le sujet voir les auteurs cités dans la note 18 et également l'article de O. Binder « L'armure de maille », *Histoire Médiévale*, n° 14, 2001, p.18 à p.23

production des armures, ainsi qu'à présenter les différentes méthodes archéométriques développées pour l'étude des alliages ferreux anciens. Le **second**, se concentrera à décrire les objets intégrés dans le corpus d'étude afin de répondre aux questions posées dans le chapitre précédent. Le **troisième**, sera consacré à la présentation de la méthodologie archéométrique adoptée pour caractériser la nature des alliages employés, mais aussi déterminer l'hétérogénéité des fournitures de métal employées ainsi que leur provenance. Cette partie sera accompagnée de la description des techniques d'analyses utilisées, ainsi qu'à la présentation des méthodes expérimentales spécifiques mises en place dans le cadre de ce travail. Le **quatrième**, présentera les principaux résultats tirés de l'analyse du métal, en termes de nature, procédés d'obtention et provenance des alliages. Enfin, le **cinquième** sera consacré à discuter les résultats obtenus en les confrontant aux autres types de sources historiques disponibles afin de répondre aux objectifs posés dans le premier chapitre.

Chapitre 1 : Problématique

Ce premier chapitre dresse une synthèse des données historiques et des travaux de nos prédécesseurs. Il a été découpé en quatre grandes parties.

Dans la première, les contextes d'utilisation de l'armure du XIII^e au XVII^e siècles sont détaillés. La seconde décrit les caractéristiques générales des alliages ferreux anciens de la réduction du minerai de fer jusqu'aux traitements thermiques du métal. La partie suivante présente les différents centres de fabrication des armures en Europe ainsi que les étapes de fabrication pour réaliser ces objets. Nous aurons à cœur dans les deux parties précédentes de confronter les différents apports des sources textuelles mais aussi archéométriques sur le sujet. Enfin, la dernière s'intéresse aux sources d'approvisionnements en métal possibles. Le recours aux études archéométriques de provenance sur ce point particulier est également abordé. A l'issue de ce chapitre, les problématiques historiques de ce travail de recherche sont dégagées.

I. Usages et port de l'armure

1) L'armure et l'évolution des pratiques de combat

L'armure était un équipement indispensable de l'homme d'armes au Moyen Âge. Au XIV^e et XV^e siècles, l'homme d'armes peut être défini comme « un combattant noble, adoubé ou non, portant donc le titre de chevalier ou d'écuyer, caractérisé par ses armes, son armure et sa monture » (L. Forster, 2018, p. 81). La guerre tenait évidemment une place primordiale dans la vie de ces hommes. Elle se pratiquait sous différentes formes. Ph. Contamine recense ainsi la guerre « obsessive » qui passe par l'attaque et la défense de places et la guerre dite « guerroyante » où les groupes de combattants recherchaient d'abord un profit matériel immédiat. Elle se traduisait par des places perdues, reprises, par des pillages, de multiples rebondissements et d'« aventures ». Ainsi, dans ce schéma les batailles rangées occupent une importance moindre. Pour autant elles sont perçues comme le point culminant de la guerre, qui fait l'objet de toutes les craintes mais aussi de toutes les espérances (P. Contamine, 1986, p. 379). Des stratégies spécifiques ont ainsi été mises en place pour s'assurer la victoire.

Trois grands types de dispositifs militaires dans les batailles rangées sont évoqués par Ph. Contamine : la cavalerie montée, la cavalerie démontée et l'infanterie (P. Contamine, 1986, p. 380). Le succès de la cavalerie lourde reposait principalement sur l'effet de choc. Revêtus de l'armure et armés de lances, les groupes de cavaliers chargeaient pour enfoncer les lignes ou désarçonner la cavalerie adverse. Lors de la charge c'est la partie du bras gauche qui était la plus exposée, tandis que la droite permettait de caler la lance contre l'aisselle (L. Forster, 2018, p. 176), c'est pourquoi certaines armures de guerre, comme l'armure de Sainte Suzanne du XV^e siècle, présentent une dissymétrie au niveau des épaules. L'arrêt de cuirasse dont l'usage se répand au XIV^e siècle était fixé à droite du plastron et permettait au cavalier de reposer sa lance. Ainsi lors de l'impact, l'arrêt de la lance venait buter contre l'arrêt de cuirasse et permettait de faire absorber le choc non pas au seul bras du cavalier mais au couple homme cheval tout entier (C. Gaier, 2004, p. 175).

Il arrivait toutefois que dans certaines circonstances, par exemple quand le terrain choisi n'était pas propice aux charges à cheval, que ces derniers mettent pied à terre volontairement, pratique notamment adoptée par la chevalerie anglaise lors de ses affrontements contre les Ecossais à la fin du XIII^e siècle (O. Renaudeau, 2015, p. 41). Afin que l'homme d'armes puisse s'adapter à ces situations, l'armure devait d'offrir un bon compromis entre mobilité et protection. Ainsi les harnois fabriqués pour le combat de pied, possédaient des épaulières petites et symétriques afin de protéger de la même façon les deux bras et garantir au maximum la liberté de mouvement (L. Forster, 2018, p. 189). Puis, il y avait l'infanterie proprement dite. Ses formations pouvaient être variées en fonction

des traditions, de la nature du terrain ou encore de l'adversaire. Enfin, il arrivait qu'à ces trois principales combinaisons, d'autres éléments comme les gens de trait se rajoutent, ou encore à la fin du Moyen Âge l'artillerie de campagne (P. Contamine, 1986, p. 384).

La suprématie de la cavalerie lourde apparaît fortement liée à l'efficacité de son équipement défensif qui, ne cessant de se perfectionner, offrait une protection efficace contre les armes blanches et dans une moindre mesure contre les armes de trait notamment l'arc et l'arbalète (C. Gaier, 2004, p. 177). Il semblerait en effet, que ces dernières et l'armement défensif aient évolués de manière conjointe. L'introduction du grand arc anglais le « longbow » manié en masse sur les champs de bataille est généralement considéré comme un des phénomènes militaires les plus marquant du XIV^e siècle (C. Gaier, 2004, p. 28). Quant à l'arbalète, elle connaît à la fin du Moyen Âge une série de perfectionnements conduisant à un accroissement de sa puissance (C. Gaier, 1995 a, p. 159–182; V. Serdon, 2005). Le passage de l'armure de maille à celle de plate apparaît ainsi fortement lié à l'efficacité croissante des projectiles des arcs et arbalètes (M. Pfaffenbichler, 1992, p. 8; W. Swietoslawski, 1998). Cette hypothèse est notamment étayée par la présence d'un test de qualité, effectué sur certaines armures produites à la fin du Moyen Âge dont la solidité était éprouvée aux tirs de différentes arbalètes. Cette pratique est au moins attestée à la fin du XIV^e siècle dans plusieurs centres de fabrication comme cela est le cas en France ou en Italie. L'arbalète à croc était utilisée pour les essais sur les armures dites à « demi-épreuve » tandis que l'arbalète à tour ou à moufle plus puissante, pour ceux des armures dites « à toute épreuve » ou simplement « à épreuve ». Les flèches d'arc ou les projectiles lancés à la main pouvaient aussi servir à éprouver les armures de « demi-épreuve » (C. Buttin, 1901). La réussite au test était ensuite matérialisée par la frappe d'un poinçon sur la pièce à « demi-épreuve » voire de deux poinçons pour celles à « à toute épreuve ». Ces pratiques sont notamment attestées pour les pièces de harnois et les brigandines et seront réglementées dans la seconde moitié du XV^e siècle à Paris par exemple, où l'épreuve est mentionnée dans les statuts des armuriers de la ville en 1451 (C. Buttin, 1901).

Toutefois au cours des derniers siècles du Moyen Âge, l'infanterie est progressivement montée en puissance, occupant une place de plus en plus importante dans les combats. Le XIV^e siècle fut, de ce point de vue, un siècle annonciateur de changements. En effet la cavalerie lourde a subi un certain nombre de défaites, précédant la fin de sa suprématie. D'abord, face aux archers anglais dont les tirs répétés de centaines voire de milliers de flèches s'avéraient redoutables, particulièrement pour les montures, et infligèrent de lourdes pertes dans les rangs français par exemple lors de la bataille de Crécy en 1346 (R. Hardy, 2002). Ensuite, face à une infanterie bien organisée comme celle des Suisses par exemple, rangée en masse compacte et souvent armée de piques, transformant le mur des combattants en véritable « hérisson » contre lequel venaient se briser les charges de la cavalerie (C. Gaier, 1995 a). Ces corps armés, spécialisés et qualifiés comme

les piquiers suisses ou les lansquenets allemands ont fait leurs preuves et étaient recrutés dans les armées des souverains (O. Renaudeau, 2015). Ils possédaient des techniques de combat et un équipement militaire qui leur étaient propres, annonçant notamment les prémices de l'uniforme militaire moderne et avec lui du soldat (N. Le Roux, 2015, p. 93).

Par ailleurs, le développement de l'artillerie a également joué un rôle important dans l'évolution des pratiques de guerre¹³. Pour C. Gaier l'apparition des armes à feu marque le « seuil technologique majeur de cette période » (C. Gaier, 2002, p. 29) qui a pris véritablement son essor dans le courant du XV^e siècle. L'armure, à cette époque, était arrivée au sommet de son perfectionnement. Cependant elle s'avérait insuffisamment performante pour protéger efficacement contre ces nouvelles armes. En effet si l'armure complète était très efficace contre les armes de chocs, elle l'était moins contre les effets perforants (C. Gaier, 2004, p. 177). Pourtant les armuriers ont tenté d'y faire face en fabricant des armures capables de résister à l'épreuve des balles. La réussite au test n'était pas validée par un poinçon cette fois ci mais par l'empreinte laissée par les balles de l'arquebuse ou du pistolet utilisé (C. Buttin, 1901). Toutefois cette course entre l'armure et le projectile se serait soldée par l'augmentation de l'épaisseur de l'armure et donc de son poids, le plastron pouvant à lui seul peser 15 kilos (C. Gaier, 2004, p. 177). L'armure complète, habillant le combattant de « pied en cap » (C. Gaier, 2002, p. 32), trop encombrante, devint inefficace et finit par disparaître sur les champs de bataille au XVII^e siècle.

Comme nous venons de le voir, l'équipement défensif des combattants a évolué avec les usages guerriers dans les derniers siècles du Moyen Âge. Toutefois d'autres facteurs sont également à prendre en compte pour véritablement comprendre cette évolution. L'armure médiévale était en effet non seulement un objet de guerre mais également le reflet d'un rang social.

¹³ Sur le rôle de l'artillerie et ses usages voir à ce sujet la thèse de E. de Crouy-Chanel intitulée : « Le canon jusqu'au milieu du XVI^e siècle. France, Bretagne et Pays-Bas bourguignons » (E. de Crouy-Chanel, 2014)

2) L'équipement défensif dans les armées, reflet d'une inégalité sociale

Pour comprendre le sens que pouvait avoir le port de l'armure, il est sans doute utile de rappeler celui du verbe « armer » à cette époque. Un homme était dit « armé » uniquement s'il était revêtu d'une armure. Ainsi, un combattant « désarmé » pouvait très bien posséder des armes offensives mais ne portait pas d'armure (C. Gaier, 2004, p. 302). Or cet équipement coûtait cher¹⁴, et au prix de l'armure encore fallait-il rajouter le prix de la monture et des diverses armes offensives. De plus, les gouvernements urbains, royaux et princiers laissaient généralement le soin aux combattants de s'armer eux-mêmes, « selon son estat » ou « selon sa puissance ». Dès lors, on comprend bien que l'acquisition d'un équipement complet n'était pas accessible à tout le monde et réservé à une élite. Toutefois jusqu'au milieu XIV^e siècle même les hommes d'armes pouvaient posséder un équipement incomplet, l'absence de harnois de jambes ou de gantelet est parfois mentionnée (P. Contamine, 2002, p. 13). Par ailleurs les gens de pied étaient pour la plupart au moins sommairement protégés, sauf dans des cas extrêmes d'enrôlement d'urgence où des hommes très peu armés voire point du tout pouvaient être recrutés ¹⁵. Cependant il est vrai que dans l'ensemble, l'équipement de l'infanterie était beaucoup plus disparate et variait considérablement en fonction de la richesse de chaque combattant.

Ces inégalités sont d'ailleurs responsables de deux représentations extrêmes et irrémédiablement opposées. D'un côté l'homme d'armes est un combattant issu de la noblesse, monté, revêtu de l'armure et expert au maniement des armes. Il personnifie ainsi le combattant idéal, le chevalier (C. Gaier, 2004, p. 153),. De l'autre l'homme de guerre, l'homme du peuple, combat à pied « désarmé et tout nu » (C. Gaier, 2004, p. 302).

Il ne faut en effet pas oublier, pour bien comprendre la manière de faire la guerre au Moyen Âge et la valeur associée à l'équipement militaire, la part des mentalités. La vie noble est associée à différentes vertus comme la bravoure, la loyauté et l'honneur. Le port d'arme, tout comme le droit à faire la guerre sont alors considérés comme des distinctions naturelles (V. Toureille, 2015). La noblesse exerçait ainsi une toute autre forme de guerre que les gens du peuple fondée sur un certain nombre de normes, de conventions comme le fait de ne pas obtenir de rencontre des parties adverses sans consentement mutuel ou d'épargner les vaincus contre rançon. En somme, la guerre était un jeu réservé à une élite qui en fixait les règles, lui permettant de se mesurer à un adversaire désigné (C. Gaier, 1995 a, p. 305). Cette conception idéaliste est très bien illustrée par le rejet de

¹⁴ A titre d'exemple Ph. Contamine estime que pour la seconde moitié du XV^e siècle en France l'attirail militaire complet d'un homme d'arme représentait un capital d'une centaine d'écus soit le revenu annuel d'une belle seigneurie (P. Contamine, 1999, p. 550).

¹⁵ C. Gaier donne ainsi l'exemple de personnes mobilisées en 1212 en Angleterre qui sont congédiées car elles ne disposent pas d'arme (C. Gaier, 2004, p. 155).

l'utilisation de l'arc ou l'arbalète (Le concile de Latran de 1139 menaçait d'anathème ceux qui se servaient de cette arme contre les chrétiens) et plus tard aussi avec les armes à feu¹⁶. Le port de l'armure, d'autant plus renforcé par l'usage du cheval a ainsi distillé au sein de la noblesse un profond sentiment d'invulnérabilité et de supériorité. Les roturiers n'étaient pas traités avec les mêmes égards. Citons par exemple les propos du chroniqueur Lambert de Hersfeld à propos de la bataille de Hombourg et de la déroute de l'infanterie qu'il qualifie de « troupeau inepte, bon pour l'agriculture non pour la guerre ! » (C. Gaier, 2004, p. 153). Les gens de pied sont ainsi désignés par de nombreuses autres épithètes peu flatteuses comme la « piétaille » ou encore la « merdaille » (C. Gaier, 2004, p. 153).

Pourtant, passé le XIV^e siècle une vision plus pragmatique de la guerre s'instaure. Elle est directement à mettre en relation avec la volonté manifeste des pouvoirs royaux et princiers en place, de normaliser l'équipement militaire. Charles VII a notamment publié différentes ordonnances militaires, premiers jalons d'une série de réformes qui vont restructurer l'organisation des armées.

En 1445 est ainsi éditée la grande ordonnance sur les « compagnies d'ordonnances » qui pose les premières bases d'une armée permanente française. En effet le roi de France entend retenir à son service quinze compagnies de « gens de guerre » entretenues même en temps de paix. La cellule de base de ces compagnies la « lance » est ainsi composée de l'homme d'armes, cavalier cuirassé qui a sous ses ordres un page, un coutillier ainsi que deux archers montés, assistés d'un valet ou d'un page. Chaque compagnie est de plus constituée de 100 lances (P. Contamine, 2004).

Deux autres ordonnances vont être publiées à la suite de celle-ci. L'une est vouée à créer les francs archers, soit huit milles hommes qui doivent s'exercer aux manèges des armes et se tenir à la disposition du roi contre une exemption fiscale. En 1451 un acte royal précise leur équipement militaire constitué d'une jacque ou d'une brigandine, d'une salade, d'une dague, d'une épée d'un arc ou d'une arbalète (P. Contamine, 2004, p. 305). L'autre dite « petite ordonnance » crée les « compagnies de petites ordonnances » ou encore appelées « mortes-payes soit des troupes de garnisons qui, installées de façon permanente, défendent les territoires repris aux anglais. L'organisation de ces dernières, d'abord basée sur le même système que la grande ordonnance, sera progressivement transformée pour diminuer le nombre d'hommes montés. En effet l'usage du cheval était, il faut le reconnaître, assez peu utile pour des garnisons immobilisées, même si les hommes d'armes se rebutaient à servir sans monture, du fait de l'incontestable abaissement social qu'ils y voyaient (P. Contamine, 2004).

¹⁶ Pour reprendre un exemple donné par C. Gaier « Jean Bouchet » estime à propos des hacquebutes qui firent tant de mal aux gentilshommes français à Pavie que les chrétiens devraient s'en servir uniquement contre les infidèles » (C. Gaier, 2004)

Un autre aspect de la réforme de l'armée concerne l'investissement dans la puissance de feu. Le roi a en effet choisi de développer l'artillerie qui a joué un rôle majeur dans les dernières batailles de la guerre de Cent Ans comme celles de Formigny (1450) et de Castillon (1453) (V. Toureille, 2015). Les successeurs de Charles VII se sont attachés à consolider cette première armée par l'ajout de nouvelles ordonnances (la grande ordonnance complétée par quatre autres sous Louis XI et Charles VIII), l'ensemble de textes finalement réunis en un seul sous Louis XII¹⁷.

On retrouve la même tendance au sein des armées bourguignonnes à quelques petites différences près. Les lances des compagnies d'ordonnances créées par Charles le Téméraire comptent six hommes (trois archers à cheval, un piquier et deux gens de trait à pied par homme d'armes). En outre ces ordonnances décrivent précisément l'équipement que chaque homme doit détenir selon son rang, prérequis au recrutement (F. Delpu, 2013).

Dans l'ensemble, ces réformes traduisent plusieurs faits : d'une part l'augmentation du nombre de gens de trait dans les armées, d'autre part un contrôle plus ferme de celles-ci en termes d'effectif mais aussi d'équipement. Un combattant présentant un équipement défaillant lors d'une « revue », pouvait ainsi voir ses gages réduits ou être renvoyé de l'ordonnance. Le roi s'assure de cette façon du nombre d'hommes prêts à combattre dont il dispose, même si dans les faits les compagnies ne seront pas toujours complètes. De plus, en établissant ces ordonnances le roi présente son autorité militaire réaffirmée : il est le seul du royaume autorisé à effectuer « des rassemblements de gens de guerre » et donc à faire la guerre, interdisant ainsi toute forme de guerre privée (F. Delpu, 2015).

Ces ordonnances en sont un premier exemple pour la France, l'intervention de l'État en matière de contrôle de l'équipement militaire s'est progressivement intensifiée. De plus cette volonté d'organisation centralisatrice s'est aussi traduite par la prise en charge financière du matériel de guerre. Déjà dès le XIII^e siècle des arsenaux à l'usage des collectivités sont mentionnés, rassemblant le matériel d'artillerie amassé par le souverain ou les princes (C. Gaier, 2004, p. 163). La comptabilité des Pays Bas bourguignons y regroupe aussi bien les arcs, les arbalètes, les flèches et carreaux, les « engins » de guerre collectifs (catapultes...) avec leurs projectiles, les machines de sièges que les « habillemens de guerre », donc les armes offensives et armures (C. Gaier, 1973, p. 88–113). Si c'était rarement le cas auparavant, à la fin du Moyen Âge l'équipement individuel a commencé en effet à être pris en charge par les gouvernements urbains, royaux et princiers. Dès le XV^e siècle de larges commandes d'armures sont passées par les souverains pour équiper certaines de

¹⁷ Voir L'article de F. Delpu « Les textes de l'ost, du milieu du XV^e siècle au début du XVI^e siècle » (F. Delpu, 2015), les travaux de V. Bessey « Construire l'armée française : textes fondateurs des institutions militaires. De la France des premiers Valois premiers Valois à la fin du règne de François Ier » (V. Bessey, 2006) ainsi que ceux de Ph. Contamine : « Guerre, État et Société à la fin du Moyen Âge, Etude sur les armées des rois de France 1337-1494 » (P. Contamine, 2004)

leurs troupes (C. Gaier, 1973, p. 89; P. Contamine, 1986, p. 326–327). L'armurerie tourangelles recevait par exemple au XV^e siècle des commandes royales très strictes pour équiper « certains gens de guerre » ou pour des dons à des individus, témoignant ainsi de la volonté du souverain d'équiper ses armées avec un matériel homogène et de bonne qualité (S. Painsonneau, 2004). Quand elle ne le finançait pas elle-même, la royauté a pu prendre des dispositions pour faciliter l'acquisition de nouvel équipement pour les gens de guerre à son service. Ph. Contamine souligne ici le rôle joué par Jacques Cœur. Son intervention se manifesta notamment par l'importation d'armures italiennes par l'intermédiaire de Gênes et la prise de mesures des gens de guerre afin de faciliter leur acquisition d'armures. (P. Contamine, 1989). Enfin sur la longue durée il est à noter que l'intervention du roi fut plus marquée en faveur des gens de pied qu'en faveur des gens d'armes, réputés nobles, donc pour lesquels le port d'armes répondait à une exigence naturelle (P. Contamine, 2002, p. 326).

Ainsi l'armure qui jusqu'alors revêtait un caractère symbolique fort d'appartenance à une élite sociale, a progressivement perdu cette valeur au profit d'une approche plus pragmatique, répondant aux besoins de guerre. On assiste alors à une diversification de l'équipement défensif selon le groupe d'appartenance du combattant. Les lansquenets allemands, par exemple, étaient vêtus le plus souvent d'une bourguignotte et d'une demi armure partiellement noircie qui leur recouvraient le torse (J.-P. Reverseau, 1996), tandis que les piquiers suisses eux portaient rarement d'équipement défensif mis à part une salade ou une calotte métallique dissimulée par leur coiffe (N. Le Roux, 2015, p. 97). Par ailleurs la prise en charge financière des pouvoirs royaux et princiers a progressivement permis une répartition plus homogène de l'équipement militaire, spécifique à chaque corps de l'armée. Des descriptions narratives du XV^e siècle relatives à la reconquête de villes normandes par les Français illustrent ce phénomène en insistant sur l'uniformité de l'équipement des combattants (P. Contamine, 1999). Dès lors pour reprendre une formule de C. Gaier « le problème des ressources en matière d'armement passait des individus aux États. Il n'y aura plus de soldats pauvres mais des pays pauvres. » (C. Gaier, 2004, p. 166).

3) L'équipement défensif en dehors des armées

a) Milieux ruraux et urbains

Les armes n'étaient pas uniquement présentes au sein des armées. D'après Ph. Contamine il ne serait en effet pas juste d'imaginer que les gouvernants aient systématiquement tenu à désarmer les populations (P. Contamine, 1996). Il est difficile d'évaluer quantitativement la part de l'équipement détenu par les non combattants. En milieu rural les populations sont volontiers décrites comme sous équipées et sans armure (C. Gaier, 2004, p. 157). Toutefois en ville la situation semble différente. En effet il était courant que les cités prennent des mesures pour garantir leur propre sécurité, mesures qui pouvaient d'ailleurs être favorisées par les rois ou les princes, s'assurant ainsi qu'elles étaient capables de subvenir à leur défense mais également de porter assistance à leurs armées en cas de besoin (P. Contamine, 1996).

Ainsi les bourgeois pouvaient posséder des pièces d'armement. C'était par ailleurs parfois une obligation, qui si elle n'était pas respectée, pouvait priver les contrevenants de leurs droits politiques, comme c'était le cas dans les anciennes principautés belges. Ainsi on imposait aux bourgeois d'acquérir des armes personnelles et de les conserver chez eux afin de pouvoir assurer la défense de la cité (C. Gaier, 1973, p. 66). A Paris en 1467, les sujets des métiers de la ville regroupés sous 61 bannières devaient également posséder un équipement défensif. La brigandine la jacque, la salade ou encore le harnois blanc sont ainsi cités (P. Contamine, 1996).

Un recensement de l'armement détenu par les habitants de Troyes de 1474 montre que ces derniers possèdent majoritairement un équipement défensif opérationnel, les pièces démodées ou en mauvais état apparaissent comme minoritaires. Par ailleurs, même s'il semble de façon générale que la fortune personnelle de chacun semble avoir un lien avec la valeur de l'équipement possédé, Ph. Contamine fait remarquer que les habitants aux moyens plus modestes sont pour autant loin d'être complètement désarmés. La possession de haubergeon, de salade, ou d'autres pièces d'équipement défensives est ainsi recensée auprès d'un cordonnier ou encore un barbier (P. Contamine, 1996).

Les villes pouvaient aussi passer elles-mêmes des commandes d'armures. La cité tourangelles a notamment honoré des contrats conclus avec des municipalités environnantes (S. Painsonneau, 2004, p. 78)

Ces quelques exemples nous montrent que les puissants et les combattants n'étaient pas les seuls à posséder un équipement défensif. Les bourgeois et habitants des villes pouvaient également disposer d'un équipement semble-t-il loin d'être obsolète. Toutefois les preuves dont nous disposons à ce sujet sont beaucoup plus rares. Il est donc difficile de savoir ce qu'il en était réellement sur l'ensemble des populations urbaines et rurales.

b) Cérémonies

L'armure n'était pas uniquement portée à la guerre, elle pouvait aussi l'être en différentes occasions et cérémonies comme lors des chasses ou des joutes. Jusqu'au XV^e siècle on se servait à l'occasion des joutes et des tournois de harnois de guerre complétés par certaines pièces mobiles de bataille (J.-P. Reverseau, 1996, p. 69). C'est à partir du milieu du XV^e siècle qu'apparaissent les premières armures dédiées spécifiquement à la joute. Les chocs importants qui advenaient lors des combats à cheval justifient l'épaisseur importante des pièces d'armures et par voie de conséquence leurs poids¹⁸, tout comme la persistance du port du heaume au XV^e siècle, pourtant abandonné sur les champs de bataille (J.-P. Reverseau, 1996, p. 69; P. Contamine, 1999). A cette occasion, les armures pouvaient faire l'objet de prêt ou de location (C. Gaier, 1973, p. 106)

L'armure pouvait aussi être portée dans d'autres cérémonies comme les mariages ou encore lors de parades funéraires. En témoigne par exemple une commande d'harnois effectuée à l'armurier Augsbourgeois Anton Peffenhauser pour la famille impériale et le défunt Charles Quint (J.-P. Reverseau, 1996). De plus l'armure pouvait aussi être considérée comme une offrande funéraire. En effet comme déjà signalé, l'étude de testaments du XIV^e a montré qu'une pratique répandue consistait à ce qu'au moment du décès, un des destriers et une des armures du chevalier soient conduits devant sa dépouille puis offerte à l'établissement ecclésiastique où il avait souhaité être enseveli (F. Lachaud, 2002).

4) Bilan

Au terme de cet exposé, nous souhaiterions poser un premier bilan. Du point de vue de l'histoire militaire et de la guerre, il apparaît que les différentes évolutions morphologiques de l'armure peuvent être mises en relation avec l'évolution des pratiques de guerre, comme l'utilisation massive de l'arc anglais par exemple, les fameux « longbows » et du perfectionnement de l'arbalète sur les champs de bataille, ou encore l'introduction de nouvelles armes offensives comme les armes à feu.

Si l'usage premier de l'armure était de protéger le combattant elle avait également, de la même façon qu'un vêtement, un autre rôle : celui de distinguer socialement son porteur. Nous l'avons vu, la noblesse a longtemps revendiqué le combat à cheval et en armure comme une distinction naturelle, affirmant ainsi son ascendant social. L'infanterie, longtemps restée dans l'ombre de ces cavaliers impétueux a pourtant fini par occuper une place indispensable sur les champs de bataille. Bénéficiant des réformes mises en place par les souverains, de nouvelles formes

¹⁸ A titre d'exemple un harnois de joute daté de 1556 conservé au Musée de l'Armée pèse 48kg (J.-P. Reverseau, 1996, p. 70). Ph Contamine estime qu'un harnois de guerre entier pèse lui entre 28 et 30kg (P. Contamine, 1999)

de combat comme celles des piquiers suisses, mais également des progrès de l'artillerie, elle est devenue la « reine des batailles » (C. Gaier, 2002, p. 35). L'équipement défensif, suivant cette vision plus pragmatique de la guerre, se diversifie alors non pas en fonction de la richesse de chacun mais de la place occupée dans l'armée. D'un objet dont la possession était revendiquée par une élite, symbole de la chevalerie, l'armure est devenue au XVI^e siècle pour certains cas un bien de consommation anonyme, produit massivement pour équiper des troupes de combattants sans rang de naissance ni fortune, mais qui sont des professionnels de guerre.

En dehors des champs de bataille les puissants n'étaient pas les seuls à posséder un équipement défensif puisque les bourgeois et habitants des villes pouvaient également disposer d'un équipement opérationnel. De plus le port de l'armure n'était pas uniquement réservé aux usages guerriers. Ainsi on rencontre cet objet lors de divertissements comme les joutes ou de cérémonies prestigieuses comme les mariages. Ce type de réalisation donne lieu à un commerce d'objets de luxe à destination d'une élite. Toutefois il n'est plus question ici de perfectionner un objet de guerre mais bien de réaliser un objet artistique, richement décoré, à très haute valeur ajoutée qui réponde aux goûts de ces riches commanditaires. Cette volonté de se faire voir et représenter en armure luxueuse, et cela même lorsque cette dernière commence à se faire désuète sur les champs de bataille, traduit bien la persistance forte de ce symbole, cher à la noblesse.

Suite à ces différents constats il est légitime maintenant de se pencher sur l'influence que ces facteurs ont eu sur la fabrication des armures. En effet l'armure a dû répondre à la fois à des bouleversements d'ordre militaires mais aussi sociaux. Par quels moyens les armuriers ont-ils fait face à ces changements ? L'évolution de la typologie nous apporte une première réponse d'ordre morphologique. En effet les armuriers ont su sans aucun doute développer un savoir-faire particulier pour battre la tôle et la mettre en forme afin que celle-ci épouse les contours du combattant. Sans cela l'armure articulée de la fin du Moyen Âge n'aurait pu voir le jour. Cependant le travail des alliages ferreux demande également une attention particulière au choix des matériaux employés ainsi qu'aux traitements thermiques appliqués pour obtenir la qualité finale souhaitée. Qu'en est-il alors de ces matériaux ? Des choix particuliers ont-ils été faits ? Des savoir-faire spécifiques ont-ils été mis en œuvre pour les travailler ?

Pour répondre à cette question il est d'abord nécessaire de comprendre comment étaient produits et utilisés les alliages ferreux à cette époque.

II. Les alliages ferreux anciens

1) Préparation du minerai et réduction du métal

Les alliages ferreux sont issus de la réduction de minerai de fer. Pour reprendre la définition donnée par A. Disser, on désignera un minerai de fer comme « une roche contenant des composés ferrugineux dont la nature et les quantités sont jugées propices à une exploitation dans des contextes technique et économique donnés » (A. Disser, 2014). Nous reviendrons ultérieurement sur la localisation des différents gisements qui ont pu être utilisés dans le cas de la fabrication d'armures. Cette partie a uniquement vocation à décrire la chaîne opératoire de réduction c'est-à-dire la succession d'opérations dévolues à la réduction de composés ferrugineux en métal, puis à la mise en forme de ce dernier afin d'obtenir dans un premier temps un demi produit¹⁹.

Après extraction le minerai était généralement concassé en modules grossiers centimétriques afin de séparer les parties les plus riches en matières ferrugineuses des plus pauvres (gangue). Puis il pouvait subir une opération de lavage afin d'éliminer les éventuelles parties meubles de la gangue. Un traitement thermique pouvait ensuite être réalisé. Il consistait à chauffer le minerai dans des foyers en aires ouvertes (donc en atmosphère oxydante) ou dans un fourneau à quelques centaines de degrés afin d'éliminer certains composés comme l'eau, les carbonates ou encore le soufre (V. Serneels, 1993). L'ensemble de ces opérations permettait à terme de concentrer le minerai en composés ferrugineux. Ensuite venait l'opération de réduction proprement dite.

a) La filière directe

Jusqu'à la fin du XIII^e siècle en Europe occidentale la filière dite « directe » était employée. La réduction s'opérait dans un bas fourneau où la température n'excédait pas les 1400°C donc à une température inférieure à la température de fusion du fer. Celui-ci était récupéré sous forme solide. Le produit obtenu, la « loupe », était une masse de fer chargée en scories piégées dans le métal. Sa teneur en carbone était fortement hétérogène allant d'un alliage totalement ferritique (%C<0,02%) à fortement carburé (%C>0,8%)²⁰. A l'issue de la réduction la masse métallique subissait une succession de chauffes dans un foyer ouvert entre lesquelles elle était fortement martelée. Cette opération

¹⁹ Pour de plus amples précisions le lecteur pourra par exemple se rapporter aux auteurs et travaux suivants qui se sont fortement intéressés à cette question (P. Crew, 1991), (V. Serneels, 1998), (P. Fluzin, A. Ploquin, and V. Serneels, 2000), (M. Leroy et al., 2000), (M. Mangin, 2004), (R. Pleiner, 2000, 2006), (S. Bauvais, 2007), (S. Bauvais and P. Fluzin, 2009), (M. Benvenuti et al., 2016)

²⁰ Elle pouvait même aller, dans des conditions exceptionnelles, jusqu'à la production de fonte à teneur supérieure à 2%.

avait pour buts de compacter le métal mais également d'éliminer en grande partie les scories adhérentes et piégées à l'intérieur de celui-ci. Ensuite le métal était mis en forme pour obtenir le demi-produit désiré²¹. Le nombre et la taille de ces inclusions de scories dépendaient de la qualité de l'épuration.

Pendant les derniers siècles du Moyen Âge, l'usage de l'énergie hydraulique se développe pour mécaniser une partie de la chaîne opératoire sidérurgique : marteaux et soufflets sont alors actionnés par la force de l'eau. Le marteau hydraulique dont la présence est attestée au moins dès le XII^e siècle chez les Cisterciens (C. Verna and P. Benoit, 1990; C. Verna, 1995) a ainsi considérablement modifié les conditions de productions du métal : la force de l'eau venant se substituer à celle de l'homme (P. Benoit, 1999). Son utilisation a contribué à élargir la production de la filière directe (C. Verna, 2000). Les forges hydrauliques ont été mises à profit pour la fabrication de demi produit de morphologie standard comme la fabrication de barres à destination de la construction gothique (P. Benoit, 1998).

La filière directe était ainsi capable de produire toute une gamme de matériau de qualité bien définie en fonction des objectifs recherchés. Toutefois la ventilation des fourneaux, en augmentant sensiblement la température atteinte, a également été à l'origine d'un nouveau procédé de réduction qualifié « d'indirect »

b) La filière indirecte

La filière indirecte est, par opposition avec la précédente constituée de deux étapes : la réduction proprement dite, suivie d'un affinage. Bien que plusieurs variantes de ce procédé existent (C. Verna, 2000; P. Dillmann, L. Pérez, and C. Verna, 2011 a, p. 42), nous décrivons dans la suite de ce paragraphe, la forme « stabilisée » du procédé : le procédé wallon.

Avec la mobilisation de la force hydraulique pour la ventilation des fourneaux l'augmentation de la température va faciliter la diffusion du carbone dans le métal. Ceci va provoquer l'apparition de fonte liquide, un alliage composé principalement de fer et de carbone, ayant un point de fusion de 1150°C environ, inférieur à celui du fer. La fonte est récupérée en sortie du « haut-fourneau » à l'état liquide (J.-F. Belhoste, 2001, p. 578). Elle contient toujours plus de 2% de carbone.

La séparation avec la gangue du minerai se faisait facilement, puisque cette dernière sous forme de « laitier » de densité moindre flottait à la surface de la fonte. La fonte était alors coulée sous forme de gueuses : barres de longueurs variables. La forte teneur en carbone, si elle abaisse considérablement la température de fusion par rapport à celle du fer ou de l'acier, rend impossible le

²¹ On parlera bien ici de demi produit c'est-à-dire d'un produit intermédiaire (barre, bande de métal ...) qui pourra être commercialisé ou retravaillé pour mettre en forme un objet. La mise en forme des éléments d'armure en eux-mêmes sera détaillée dans la partie suivante

forgeage de la fonte qui s'avère trop cassante. Pour obtenir un fer ou un acier, il conviendra alors d'oxyder le carbone de cette fonte dans une étape postérieure à la réduction nommée affinage.

L'affinage s'opère sous une atmosphère oxydante avec du charbon de bois à des températures allant de 1150 à 1400°C. Cette opération se fait donc plutôt en phase solide ou pâteuse générant un grand nombre de particules de secondes phases dans le produit. L'oxydation du carbone pouvait être poussée jusqu'à l'obtention de fer totalement décarburé ou si elle était interrompue, avant d'avoir retiré tout le carbone, un acier. On obtenait alors un acier par décarburation. Cette pratique est par exemple attestée au XVI^e siècle dans le Dauphiné (P. Dillmann, L. Pérez, and C. Verna, 2011 a, p. 44)

Ainsi par procédé de réduction indirecte, il faudra entendre dans la suite du chapitre une association d'un foyer de réduction appelé « haut fourneau » construit pour obtenir exclusivement de la fonte liquide récupérée par coulée périodique à la base du four, avec un foyer d'affinage où la fonte était décarburée pour donner du fer (ou éventuellement de l'acier) forgeable, comme c'était le cas du procédé wallon. L'intérêt principal du haut fourneau est qu'il permet de produire un métal très homogène (la fonte), en grande quantité²², bien épuré et qui contient presque la totalité du fer contenu dans le minerai initial (J.-F. Belhoste, 2001, p. 578). Toutefois il faut garder à l'esprit que l'étape d'affinage nécessaire pour produire un alliage ferreux forgeable pouvait potentiellement diminuer la productivité de cette filière, au moins à l'origine de celle-ci (P. Dillmann and M. L'Héritier, 2017).

c) Réduction du fer et innovation technique

L'étude de la diffusion de procédé de réduction indirecte, décrit dans le paragraphe précédent, est d'un grand intérêt en histoire des techniques car elle soulève de nombreuses questions relatives à la définition d'une innovation, à la transmission des savoirs et savoir-faire ou encore à l'adaptation des systèmes techniques. Les sources écrites donnent à ce sujet de précieux renseignements. Toutefois elles demeurent parfois insuffisantes pour saisir la définition exacte des procédés mis en jeu. Par ailleurs elles ne révèlent souvent que les premières mentions de ces derniers et reflètent surtout le temps de l'irruption de l'innovation, lorsque celle-ci est déjà installée et rarement celui de son processus qui passe par une série de modifications techniques, d'ajustements sur un temps plus long (C. Verna, 2000). Sur ce terrain, l'apport des sciences archéologiques et archéométriques est majeur par la mise au jour des structures en place et la caractérisation des déchets de production. Elles apportent des éclairages sur la chaîne opératoire

²² La production d'une tonne par jour est considérée comme habituelle sous forme de gueuse de 150kg à 500 kg. A la même époque au XIV^e siècle la production hebdomadaire des forges hydrauliques est comprise entre 500kg et une tonne (P. Dillmann and M. L'Héritier, 2017) (D. Arribet-Deroin, 2010), (C. Verna, 2001 a, p. 85)

mais également sur la diffusion du procédé grâce à la datation des sites et l'identification du procédé par l'analyse des objets.

Ainsi les plus anciennes preuves d'existence du procédé de réduction indirecte sont archéologiques. Elles sont localisées en Suède dans le Bergsland (G. Magnusson, 1985) et en Allemagne dans le comté de la Marck (N. Björkenstam and S. Fornander, 1985) à la fin du XIII^e et au début du XIV^e siècle. Le procédé diffuserait ensuite en Europe au cours du XV^e siècle et XVI^e siècle. On le retrouve en Wallonie au XIV^e siècle, dans certaines régions du royaume de France à la fin du XIV^e siècle et en Angleterre au cours des XV^e siècle et XVI^e siècle (P. Dillmann and M. L'Héritier, 2017). Le cas de l'Italie du Nord est, lui, plus particulier. En effet des installations spécifiques de réduction du minerai de fer étaient en place dès le XIII^e siècle. Les ateliers de *furnus* couplés à ceux de la *fusina*, fonctionnaient grâce à l'énergie hydraulique. Le *furnus* réduisait le minerai de fer, traité ensuite dans la *fusina*. Cette seconde installation permettait de transformer la masse hétérogène qui sortait du fourneau en toutes sortes de produits homogènes qui pouvaient être commercialisés, et notamment de l'acier fortement réputé (J.-F. Belhoste, 2001, p. 536). Toutefois, si la production de fonte était probablement possible dans ces ateliers rien n'indique à ce stade qu'elle ait été habituelle, comme c'était le cas dans les hauts fourneaux wallons (M. Arnoux, 2001). Les premières certitudes de l'utilisation du procédé de réduction indirecte dans les alpes italiennes remontent donc plutôt au début du XVI^e siècle (J.-F. Belhoste, 2001, p. 585). D'autres régions ne l'ont réellement adopté que bien plus tard. Par exemple au Sud de la France dans l'aire pyrénéenne et de la Catalogne, le procédé direct ne cédera pas sa place à la filière fonte avant le XIX^e siècle (C. Verna, 2001 a).

Aussi on constate à travers ces exemples que l'implantation de ce nouveau procédé ne s'est pas faite de façon rapide et homogène. En effet l'adoption ou le rejet d'une innovation technique peut être lié à de multiples facteurs, pas seulement techniques, mais aussi économiques, politiques et sociaux. Par exemple, les coûts d'installation des nouveaux équipements nécessaires à l'établissement de la filière indirecte étaient loin d'être négligeables, particulièrement pendant les temps de crises de la fin du Moyen Âge, et peuvent expliquer certaines réticences (P. Dillmann and M. L'Héritier, 2017). Par ailleurs, la permanence de techniques fondées sur le maintien de la filière directe dans certaines régions comme dans le sud de la France s'impose comme un choix rationnel rapporté en particulier à la qualité du produit (C. Verna, 2000; J. Cantelaube and O. Codina, 2011).

De plus, si les occurrences recensées de l'utilisation du procédé de réduction indirecte définissent la chronologie de diffusion de ce nouveau procédé, elles ne révèlent pas son utilisation concrète pour la production d'objets forgés, et donc son importance au sein du marché du fer. Les études archéométriques s'avèrent ici d'une grande aide car elles permettent, par l'analyse des inclusions non métalliques contenues dans le métal, de discriminer les deux procédés de réduction.

d) Discrimination chimique des deux filières

Les deux filières présentent des conditions thermodynamiques différentes qui vont déterminer la réduction de certains composés. Le diagramme d'Ellingham illustre le comportement de différents oxydes. Ainsi, certains éléments ne sont réductibles qu'à des températures très élevées. C'est le cas par exemple de Ca, Mg ou Al.

Les conditions thermodynamiques qui règnent dans les fourneaux ne suffisent pas à la réduction des oxydes tels que CaO, MgO, Al_2O_3 , K_2O , quels que soient les procédés. Ils sont donc éliminés dans le laitier dans le cas du procédé de réduction indirecte tandis qu'ils font partie des inclusions piégées dans le métal pour le procédé direct. Des inclusions se forment également lors du procédé de réduction indirecte lors de l'affinage mais elles proviennent dans ce cas d'éléments réduits dans la fonte.

Le phosphore par exemple est généralement présent en plus grande quantité dans le procédé indirect que dans le procédé direct lorsque le minerai utilisé en contient. Dans un premier temps l'oxyde phosphorique est en effet totalement réduit : le phosphore va être concentré dans un eutectique ternaire dans la matrice métallique de la fonte et va donc être un des éléments les plus importants de l'alliage après le fer et le silicium. Ensuite, lors de l'étape d'affinage, il va s'oxyder donnant lieu à un fort pourcentage de phosphore au sein des inclusions. In fine, il est donc l'un des composants majeurs des inclusions la plupart des autres éléments ayant été éliminés dans le liquide de scories. Dans le cas du procédé direct, la quantité d'oxyde de phosphore est comparable à celle issue du minerai, il n'est donc pas en quantité vraiment supérieure par rapport aux autres éléments.

Le silicium, lui, n'est jamais réduit dans le procédé de réduction directe, il se retrouve donc dans les inclusions. Dans le procédé indirect, le silicium est généralement en partie réduit puis ré-oxydé durant l'étape d'affinage mais il reste présent en moins grande quantité dans les inclusions dû à la perte dans le laitier. Le cas du fer est encore différent. Dans le procédé direct une réduction locale très forte peut subvenir laissant des inclusions avec des quantités plus faibles d'oxyde de fer. Et dans le cas du procédé indirect lors de l'affinage une grande partie du fer est ré oxydée ce qui donne naissance à des inclusions avec de grande quantité d'oxyde de fer.

Ainsi pour un même minerai, on peut avoir des compositions significativement différentes des inclusions en fonction du procédé considéré. Toutefois il est à noter que les interactions décrites par la thermodynamique sont valables uniquement à l'équilibre lorsque le milieu est homogène ce qui n'est pas notre cas. C'est pourquoi ces considérations ont fait l'objet de vérifications, par la caractérisation physico-chimique d'objets anciens et le recours à des reproductions expérimentales afin de cibler le comportement des éléments majeurs lors de la réduction (V. F. Buchwald and H. Wivel, 1998; P. Crew, 2000; V. Serneels, 2002; P. Dillmann and M. L'Héritier, 2007; A.-M. Desautly, 2008; E. Blakelock et al., 2009; J. Humphris et al., 2009).

Des observations de fontes anciennes ont ainsi révélé la présence de phases non oxydées (inclusions ou précipités) contenant du titane du vanadium et/ou du fer en fortes teneurs avec parfois du chrome. Or le titane, le vanadium et le chrome formeraient des carbures très stables en raison de leurs grandes affinités pour le carbone. Ainsi lors de l'affinage, ce pourrait être l'oxydation de ces phases qui serait à l'origine de la forte concentration en chrome, vanadium et titane dans certaines inclusions du procédé de réduction indirect. Les oxydes seraient en effet plus stables que les carbures pour une température inférieure à 1230°. (P. Dillmann, 1998).

En plus de vérifier le comportement des différents éléments un autre des enjeux de ces démarches expérimentales reposait sur l'identification des phénomènes de pollutions extérieures. Prenons tout d'abord le cas de la filière directe : au cours de la réduction une partie de la paroi du foyer altérée sous l'effet de la chaleur, peut rentrer en fusion et venir se mélanger au liquide silicaté issu de la partie fusible du minerai. Ce phénomène peut notamment engendrer une pollution sur la composition finale des scories et des inclusions de réduction. A-M. Desaulty a montré que les éléments Si, Al, Ti, V, Zr, Ba, Rb et Cr avaient plus de chances d'être touchés par ce phénomène (A.-M. Desaulty, 2008, p. 258). Le charbon de bois peut aussi être à l'origine d'autres pollutions. En effet la partie incombustible du charbon va venir former des cendres, susceptibles d'être intégrées en quantité variables dans la scorie. Les éléments principalement affectés seraient Ca, K, P, Mg, Na, Sr, Ba et Rb (A.-M. Desaulty, 2008, p. 258). Enfin il est aussi possible que d'autres ajouts aient été réalisés pour favoriser l'opération de réduction, comme des ajouts calciques (A. Disser, 2014, p. 61). L'opération de réduction et d'affinage peut aussi faire l'objet d'ajouts issus du charbon ou de la paroi du foyer dans le cas de la filière indirecte.

Par ailleurs, lorsque les demi-produits sont forgés, d'autres pollutions peuvent être apportées. Leurs origines sont diverses. Elles peuvent provenir des cendres du charbon de bois utilisé, également des parois du foyer de forge et d'éventuels ajouts argilo-sableux destinés à protéger le métal de l'oxydation de surface. Leur emploi est abordé par différents auteurs comme V. Serneels (V. Serneels, 1993, p. 49–51), J.-C. Leblanc (J.-C. Leblanc, 2002), P. Fluzin (P. Fluzin, 2002), ou A. Disser (A. Disser, 2014, p. 67). Ces composés incorporés dans le métal peuvent venir former de nouvelles inclusions qui ne seront pas caractéristiques des procédés de réduction. Il convient donc d'abord de pouvoir les différencier des inclusions formées lors de la réduction ou de l'affinage.

i. Tri et détermination de familles d'inclusions

Une méthode de tri a d'abord été proposée par Ph. Dillmann et M. L'Héritier (P. Dillmann and M. L'Héritier, 2007). En considérant un certain nombre de rapports élémentaires, ils ont réussi à mettre en évidence des inclusions de forge grâce aux ajouts employés à la composition chimique distincte. Les auteurs ont par exemple pu montrer un enrichissement en aluminium qui paraît fortement relié à la taille des inclusions. Les plus petites semblent plus touchées par ce phénomène. Ainsi les inclusions trop éloignées du modèle linéaire défini par les couples d'oxydes sélectionnés ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-K}_2\text{O-CaO-MgO-SiO}_2$) sont considérées comme non représentatives du système de réduction et sont éliminées.

Les sources de pollution peuvent être fortement variables en fonction des modes opératoires suivis. Ainsi, en suivant cette démarche, la prise en compte de ces phénomènes de pollution impose de considérer un nombre important de rapports élémentaires. C'est pourquoi d'autres auteurs ont proposé de nouvelles méthodologies basées sur des traitement multivariés comme A. Disser et al. (A. Disser et al., 2014) et M. Charlton et al. (M. Charlton et al., 2012). Nous allons à présent détailler la marche à suivre propre à ce type d'approche.

ii. Transformation des données

Pour effectuer ce type de traitement les auteurs ont effectué une transformation des données, afin d'accorder un poids comparable aux éléments d'intérêt quel que soit leur variance. Baxter et al. ont recensé les transformations les plus courantes : (M. J. Baxter and I. C. Freestone, 2006) :

1) Standardization :

$$X_{ij} = \frac{(x_{ij} - \bar{x}_j)}{S_j}$$

2) Logged:

$$X_{ij} = \text{Log}(x_{ij})$$

3) Log-Ratio ou centred-log ratios ²³

$$X_{ij} = \text{Log} \frac{x_{ij}}{g(x_i)}$$

Avec :

X_{ij} : valeur transformée pour chaque variable pour la composition « i »

x_{ij} : valeur de chaque variable pour la composition « i »

$\bar{x}_j$: moyenne de la $j^{\text{ème}}$ variable

²³ Aussi appelée « centred-log ratios » (J. Aitchison, 1982), de plus à chaque fois que nous évoquerons ces transformations logarithmiques à l'avenir, il sera question de logarithme en base e (népérien)

S_j : écart-type de la $j^{\text{ème}}$ variable

$g(xi)$: moyenne géométrique de l'ensemble des variables considérées pour la composition « i »

Le choix de la transformation la plus appropriée a engendré de nombreux débats (D. Tangri and R.-V.-S. Wright, 1993; J. Aitchison, C. Barceló-Vidal, and V. Pawlowsky-Glahn, 2002; M. J. Baxter and I. C. Freestone, 2006). Sans entrer dans des détails qui nous éloigneraient de notre propos initial, la transformation « Log-Ratio » est notamment défendue par J. Aitchison pour des raisons mathématiques. Les données de compositions sont en effet liées entre elles par une relation puisque leur somme est égale à une constante (1 ou 100). L'auteur argumente ainsi que cette contrainte ne nous permet pas de les manipuler comme n'importe quelles données, car cette spécificité a une influence singulière sur les matrices de variance-covariance utilisées dans les méthodes statistiques qui seront employées ultérieurement comme l'Analyse en Composantes Principales²⁴. Baxter et al. ont abordé le sujet sous un autre angle de vue en se basant sur des considérations pratiques à travers des exemples concrets. Leur article (M. J. Baxter and I. C. Freestone, 2006) conclue que la méthode de « Standardization » mettrait plus en avant les différences absolues entre les variables, tandis que la transformation « log-ratio » privilégierait, elle, les écarts relatifs.

Dans le cas spécifique des inclusions de scories, plusieurs auteurs ont mis en avant que les teneurs absolues n'étaient pas représentatives de la filiation chimique des inclusions de scories (S. Leroy, 2010, p. 142; A. Disser, 2014, p. 116). Elles sont, en effet, fortement influencées par d'autres facteurs comme la proportion en oxydes de fer et les phénomènes d'enrichissement des éléments dans la scorie lors de la réduction (A. Disser, 2014, p. 115). En revanche, les rapports élémentaires constituent eux de bons candidats puisque les composés non réduits sont généralement affectés de la même manière par ces phénomènes. La transformation logarithmique permet en outre d'éviter la prédominance de certaines variables sur d'autres, même si initialement les éléments possèdent des teneurs absolues très différentes. C'est pourquoi la méthode des « Log-Ratio » est préférée par ces auteurs.

Les données transformées se présentent sous la forme du tableau 1. Les colonnes sont représentées par les variables (les « X_{ij} » définis précédemment). Les lignes représentent les individus du jeu de données soit les « n » inclusions analysées. Nous souhaitons à présent déterminer la variabilité de ce jeu de données : c'est à dire déterminer quels sont les individus semblables (susceptibles dans notre cas de représenter des familles d'inclusions homogènes comme

²⁴ Pour davantage de précisions sur ces principes mathématiques le lecteur pourra notamment se référer aux références suivantes : (J. Aitchison, 1982), (K. G. van den Boogaart and R. Tolosana-Delgado, 2013)

celles de la réduction) de ceux qui sont très différents (susceptibles d'être associés par exemple aux inclusions issues des opérations de post-réduction).

Tableau 1 - représentation schématique des données transformées par Log-Ratio

	X1	X2	3	...	Xp
1	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃		X _{1p}
2	X ₂₁	X ₂₂	X ₂₃		X _{2p}
3	X ₃₁	X ₃₂	X ₃₃		X _{3p}
....					
n	X _{n1}	X _{n2}	X _{n3}		X _{np}

Différentes méthodes statistiques peuvent être mise en œuvre pour cela. La Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) et l'Analyse en Composantes Principales (PCA) en sont deux exemples qui ont été utilisés pour l'identification des ajouts.

iii. Description et application de la CAH et l'ACP

Elles font partie des méthodes non supervisées, c'est-à-dire qu'on part du principe qu'aucune information n'est prise en compte a priori sur le jeu de données. La CAH permet de souligner les similarités d'individus en fonction d'un nombre donné de variables. Pour cela des distances²⁵ entre les différents individus sont calculées. Ces dernières vont ensuite être utilisées pour rassembler les individus de manière itérative en fonction de leurs similarités (distance faible), et selon un algorithme de classification particulier²⁶. Le nombre de classes finales retenues peut être défini par un indicateur appelé variation de l'inertie interclasse, qui traduit l'agglomération à partir de laquelle la dispersion des distances n'évolue plus de manière significative ou en fonction du résultat attendu (M. J. Baxter, 2006). L'opérateur doit ensuite valider la cohérence des groupes formés sur la représentation graphique qui est présentée, appelée dendrogramme. Sur ce dernier chaque branche correspond à un individu du jeu de données initial. La hauteur des branches est proportionnelle à l'éloignement de ces derniers. Ainsi plus deux individus seront semblables et plus ils seront proches sur le dendrogramme.

L'ACP est quant à elle basée sur la mesure de la variance du jeu de données. Géométriquement l'ACP effectue un changement de repère. À partir d'un nombre fixé de variables,

²⁵ Ces distances peuvent être calculées selon différentes méthodes. Dans le cas des variables quantitatives ce sont les distances euclidiennes qui seront privilégiées.

²⁶ Ces méthodes déterminent la façon dont les groupes sont formés et agglomérés entre eux. La méthode Ward basée sur la maximisation de la variance interclasse a par exemple été privilégiée par A. Disser (A. Disser, 2014, p. 122)

l'objectif de cette méthode est de présenter sous une forme réduite de composantes, un maximum de variabilité. Les composantes principales calculées vont être des combinaisons linéaires des variables initiales. La première composante principale calculée est choisie pour porter le plus de variance du jeu de données. La seconde devra respecter deux conditions : contenir le maximum de variance résiduelle et être orthogonale à la première composante. Les autres composantes seront choisies selon ce même principe. L'ACP met également en évidence des relations entre les variables et permet de juger de leur influence sur la variabilité observée. Davantage de détails sur les principes mathématiques de ces méthodes pourront être trouvées dans K. G. van den Boogaart et al. (K. G. van den Boogaart and R. Tolosana-Delgado, 2013).

L'ACP et la CAH ont par exemple été mises en œuvre dans (A. Disser et al., 2014). Les auteurs ont couplé une Classification Ascendante Hiérarchique à une Analyse en Composantes Principales afin de déterminer différentes familles d'inclusions au sein de tirants de cathédrale. La vérification de ces résultats et l'interprétation des familles constituées par la CAH sont ensuite basées sur l'analyse des bivariés correspondants.

Une fois que ce tri des inclusions est effectué, les inclusions restantes sont liées soit à la réduction du minerai dans le cas de la filière directe, soit à l'étape d'affinage dans le cas de la filière indirecte. L'étape suivante consiste à mettre en place une méthode de discrimination entre les deux procédés en se basant sur la composition de ces inclusions.

iv. Méthodes de discrimination des deux filières

Ph. Dillmann et al., (P. Dillmann and M. L'Héritier, 2007) ont proposé un diagramme de discrimination entre les deux procédés, qui regroupe les analyses d'inclusions d'un corpus de références constitué d'un grand nombre d'objets archéologiques dont le contexte historique prouvait clairement par quel type de procédé (direct/indirect) ils avaient été fabriqués. Pour le réaliser une normalisation des données a été effectuée. Afin d'obtenir une composition macroscopique de la scorie, les compositions sont en effet transformées sous forme d'une moyenne pondérée par la surface. Ceci permet de conférer des « poids » différents aux inclusions en fonction de cette dernière. Cette transformation permet d'obtenir un résultat global pour chaque échantillon de la composition des inclusions.

$$\%E^* = \sum_{i=1}^n (\%E_i^* \times \frac{Si}{St})$$

$\%E_i$: pourcentage massique de l'élément considéré (oxyde) dans l'inclusion numéro « i »

Si : surface de l'inclusion considérée

St : Surface totale occupée par les inclusions

Cette approche a offert un premier outil pour la discrimination des deux procédés. Toutefois une zone de recouvrement des deux nuages de point est présente. Par conséquent dans certains cas non favorables l'identification du procédé de réduction ne pourra être réalisée.

Cette méthode a été complétée par (A. Disser et al., 2014) en considérant qu'un nombre plus important d'éléments pouvait s'avérer discriminant pour les deux procédés. De plus une approche statistique multivariée a également été mise en place.

A la première normalisation par la surface les auteurs ont ajouté une pondération par le fer. En effet comme expliqué précédemment la teneur en fer va dépendre principalement des conditions de réduction dans le fourneau et par conséquent est susceptible de fortement varier. Ceci risque d'influencer les teneurs des autres éléments qui vont être comparées pour différencier les deux procédés. Afin de s'affranchir de cette variabilité les teneurs sont ainsi normalisées par la teneur en oxyde de fer :

$$\%E^{**} = \frac{\%E_i^* \times 100}{100 - \%E_{FeO}^*}$$

Les auteurs ont ensuite mis en place un modèle de discrimination basé sur l'emploi de la régression logistique. Ce type de modèle est utilisé pour expliquer les valeurs d'une variable Y qui ne peut prendre que deux modalités (« non » : 0 ou « oui » : 1, dans notre cas « 0 » pour le procédé direct, « 1 » pour le procédé indirect). Selon les modèles de régression linéaires classiques Y s'exprime de la façon suivante :

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 \dots + \beta_n X_n$$

Y ne peut prendre comme valeur que 0 ou 1, tandis que les paramètres ($\beta_0, \beta_1 \dots \beta_n$) sont des coefficients qui décrivent le modèle. $X_1, X_2, \dots, X_n$ représentent les variables. On introduit alors une variable p à modéliser qui traduit la probabilité que $Y = 1$

Le modèle linéaire généralisé s'exprime alors de la façon suivante :

$$g(p) = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 \dots + \beta_n X_n$$

La fonction g est une fonction lien qui transforme la variable p en une variable susceptible de décrire correctement la réponse des phénomènes observés (A. Disser, 2014, p. 213). Un exemple de réponse est donné figure 5. On comprend alors clairement à travers ce dernier que le modèle de droite s'avère plus adapté pour décrire correctement les données observées, une modélisation linéaire simple comme présenté à gauche n'y suffit pas.

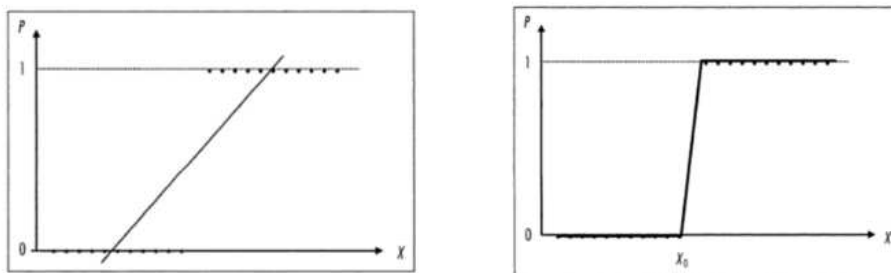


Figure 5 - Deux exemples de modélisation d'un phénomène s'exprimant de façon bimodale : A gauche droite de régression « classique » (fonction affine) ; A droite, modélisation « idéale » du phénomène. D'après (A. Disser, 2014, p. 212)

Dans le cadre spécifique de la régression logistique elle prend la forme d'un *Logit*

$$g(p) = \text{Logit}(p) = \text{Log} \left(\frac{p}{1-p} \right)$$

Avec p : probabilité qu' $Y = 1$

Les coefficients ($\beta_0, \beta_1 \dots \beta_n$) peuvent être déterminés en utilisant un jeu de variables ($X_1, X_2, \dots, X_n$) de référence pour lesquelles la valeur de Y est connue. Ensuite quand un nouveau jeu de variables ($X_1, X_2, \dots, X_n$) est utilisé, la probabilité p peut être calculée en utilisant l'équation précédente.

Dans notre cas la régression logistique est appliquée en utilisant comme variables les pourcentages d'oxydes suivants :

$$\begin{aligned} \text{Logit}(p) = & \beta_0 + \beta_{MgO} \times \%E_{MgO}^{**} + \beta_{Al_2O_3} \times \%E_{Al_2O_3}^{**} + \beta_{SiO_2} \times \%E_{SiO_2}^{**} + \beta_{P_2O_5} \times \%E_{P_2O_5}^{**} \\ & + \beta_{K_2O} \times \%E_{K_2O}^{**} + \beta_{CaO} \times \%E_{CaO}^{**} + \beta_{MnO} \times \%E_{MnO}^{**} \end{aligned}$$

Par conséquent quand $p > 0,5$ l'échantillon est considéré comme issu du procédé de réduction indirecte et quand $p < 0,5$ du procédé direct. Toutefois les auteurs ont mis en évidence sur un jeu de données de référence que la détermination était fautive pour 2,9% des échantillons. Par conséquent afin de diminuer le risque d'erreur il a été choisi de fixer un seuil T : $T_{\text{direct}}=0,3$ et $T_{\text{indirect}}=1-T_{\text{direct}}=0,7$. Lorsque $p < 0,3$ l'échantillon sera donc associé au procédé direct et lorsque $p > 0,7$ à l'indirect. Même si de cette manière une zone d'indétermination apparaît pour les échantillons dont la valeur de p appartient à l'intervalle $[0,3-0,7]$, soit pour 3,6%, le nombre de mauvaises prédictions s'avère alors nul, ce que les auteurs estiment à juste titre comme préférable.

Cette méthode sert donc d'alternative à la précédente. Toutefois elle présente aussi une zone d'indétermination mais qui s'avère être plus clairement définie. Le modèle permet en effet d'obtenir une estimation chiffrée de cette zone et ainsi de s'affranchir de l'appréciation visuelle.

v. Exemple d'application : le cas des fers de construction dans l'architecture gothique

Afin d'illustrer l'apport de ces méthodologies aux questionnements historiques, nous avons choisi de présenter les résultats d'une étude récente (P. Dillmann and M. L'Héritier, 2017) qui s'est intéressée à la part du fer issu de ce procédé dans les renforts métalliques de différentes cathédrales du Nord de la France. Ces fers propres à la construction ne sont pas d'une qualité particulière et demeurent morphologiquement proches des barres issues des ateliers de réduction (M. L'Héritier and P. Dillmann, 2009; M. L'Héritier et al., 2013). L'approche archéométrique met ainsi en évidence l'impact du procédé indirect dans le marché du fer en barre. Aussi, loin de montrer un remplacement massif du procédé de réduction direct par le procédé indirect, les analyses relèvent la concomitance des deux procédés et cela même jusqu'au XVI^e siècle où la filière indirecte est largement implantée en Europe du Nord. De plus, les auteurs mettent en évidence que l'importance du procédé de réduction indirecte n'est réellement manifeste sur le marché qu'à la fin de la guerre de Cent Ans, auparavant elle semble à relativiser.

2) Nature du métal

a) **Définir et identifier les alliages ferreux médiévaux**

Deux termes reviennent régulièrement quand il s'agit de définir et nommer les alliages ferreux anciens. Celui de « fer » et celui d'« acier ». Le matériau « acier » au Moyen Âge pouvait être désigné selon différentes appellations comme *calibs*, *aciarium*, *acerium*, *acer*. Il était reconnu et apprécié pour ses propriétés notamment par sa dureté, sa cassure et son tranchant (C. Verna, 2001 a; P. Dillmann, L. Pérez, and C. Verna, 2011 a, p. 11)²⁷. De plus il pouvait être obtenu de plusieurs manières. Si la loupe issue de la filière directe est hétérogène, et notamment en teneur en carbone, il était possible de tirer avantage de cette hétérogénéité en fonction des objectifs recherchés. Différentes stratégies ont pu être mises place. La loupe pouvait être traitée dans sa globalité et transformée en demi produit qui reflétait alors directement son hétérogénéité. Ses différentes parties pouvaient également être triées par des opérations mécaniques pour séparer les produits plus ou moins carburés et obtenir des aciers plus homogènes. C'est le cas par exemple d'aciers produits en Styrie (P. Braunstein and E. Landsteiner, 2011). Par la suite, les différentes masses triées pouvaient être soudées entres elles et ainsi contribuer à la diversification finale des demi-produits

²⁷ Depuis Aristote l'acier est défini comme un fer ayant subi différents traitements. En effet les métaux sont pour lui formés d'un mélange de terre et d'eau, diversement combinés, ce qui explique leurs propriétés différentes de fusibilité et de ductilité. L'acier est ainsi fabriqué « par séparation des scories *terreuses* du fer au moyen de fusion successives ». Le *De mineralibus* d'Albert le Grand au XIII^e siècle, se place en conformité avec cette définition puisqu'il désigne l'acier comme un fer épuré, dur et très sec. Il peut ainsi présenter différents niveaux de qualité du fait des multiples états du fer auquel il est associé (J. Mandosio, 2011).

obtenus. La loupe pouvait aussi être volontairement carburée pour obtenir des masses de fer entièrement constituées d'acier. En fonction de la qualité finale du matériau recherché des ateliers de production spécifiques pouvaient être mis en place. Certaines filières ont pu rechercher la diversité et la spécificité des matériaux quand d'autres se destinaient à la production en série de produits de qualité standard (J.-F. Belhoste, 2001, p. 544). L'acier pouvait également être produit par décarburation de la fonte, et par d'autres procédés comme la cémentation dont nous reparlerons, ou encore par un procédé qualifié de co-fusion²⁸. Ainsi en Italie la fonte pouvait aussi être utilisée pour carburer du fer. Cette pratique est attestée en Lombardie en particulier dans la zone de Brescia pour produire de l'acier. Elle est décrite par Biringuccio au XVI^e siècle. Elle nécessitait la fusion initiale de fonte dans un creuset à laquelle des morceaux de métal peu carburés étaient ajoutés. Le produit final semble être de teneur intermédiaire entre les deux matériaux précurseurs, soit à un acier de bonne qualité (P. Dillmann, L. Pérez, and C. Verna, 2011 a, p. 47).

Ainsi, quand l'acier est nommé, il lui est souvent associé une désignation particulière qui sert à qualifier la qualité du matériau. Cette dernière peut se rapporter à la région ou à l'atelier qui l'a fabriqué donc aux conditions techniques de son obtention. Mais il pouvait aussi se cacher dans les appellations du fer *ferrum*. En effet parfois il est simplement désigné comme un fer particulier. Dans les Pyrénées on parle ainsi de « fer cédat » ou de « fer fort » qui sont en fait des aciers de carburation variées (C. Verna, 2001 a, p. 109, 2017, p. 227–239; J. Cantelaube, 2005). Il pouvait même se confondre avec le terme « ferrum » qui ne désignait alors, non pas une qualité de métal particulière, mais un niveau d'échange dans une transaction donnée. Pour autant cela ne signifie pas que sa qualité soit ignorée ou jugée sans importance, simplement elle est identifiée par d'autres critères. En effet, le fer est d'abord celui d'un marchand et de son réseau de producteurs auquel l'acheteur peut se fier (P. Dillmann, L. Pérez, and C. Verna, 2011 a, p. 22; C. Verna, 2017, p. 237–238). Lorsque l'acier s'éloigne de son lieu initial de production là encore les appellations étaient susceptibles de varier. Il pouvait alors être simplement désigné dans les textes comme un fer de qualité supérieure (P. Braunstein and E. Landsteiner, 2011, p. 430),

Un moyen sûr d'identifier le métal à son lieu de fabrication d'origine, même s'il avait parcouru une longue distance, résidait dans l'apposition de marques. S'il était facile de contrefaire une marque, il était en effet plus difficile de reproduire la qualité du matériau dont on souhaitait détourner l'identité. Des expertises pouvaient être mises en place afin de contrôler la nature des matériaux qu'on suspectait issus de contrefaçon (P. Dillmann, L. Pérez, and C. Verna, 2011 a, p. 20).

Ainsi, du fait de la complexité et la multitude des appellations employées, parfois les textes ne permettent pas d'identifier clairement la qualité de métal dont il est question. Fort heureusement

²⁸ En référence à J.-F. Belhoste, « La fabrication de l'acier eu temps de Biringuccio » Congrès Biringuccio, Siennese, 1992

les objets ont conservé cette mémoire qu'il est possible d'interroger à l'aide des outils de la métallurgie moderne.

b) Métallurgie contemporaine

En métallurgie contemporaine on parle d'acier pour désigner les alliages ferreux qui contiennent, entre 0,02 et 2% de carbone en pourcentage massique (V. Serneels, 2011). En effet, la solubilité du carbone dans la ferrite (fer alpha) ne dépasse pas 0,02%. Si le carbone est présent en quantité supérieure à celle qui peut être dissoute, des cristaux non-métalliques, des carbures de fer appelés cémentite (Fe_3C) se forment. La perlite est un agrégat de lamelles juxtaposées de deux constituants : la ferrite et la cémentite. En fonction de la teneur en carbone des changements drastiques des propriétés physiques des matériaux sont observés. Ces dernières peuvent être caractérisées par différentes grandeurs comme la dureté (résistance du métal à une pénétration locale), la ténacité (capacité d'un matériau à résister à la propagation d'une fissure) ou encore la ductilité (capacité du métal à se déformer sans se rompre). Différentes méthodes existent pour déterminer ces grandeurs. Toutefois dans la littérature associée aux fers anciens c'est principalement la dureté qui a été mesurée, car les mesures sont faciles à mettre en œuvre. Dans la suite lorsque nous parlerons de dureté il s'agira uniquement de la dureté Vickers. Elle est caractérisée par la taille de l'empreinte faite sur le matériau par un indenteur sous une charge donnée (exprimée en g ou en kg) durant quelques secondes.

En dessous de 0,1% de carbone le métal a une faible dureté. Il peut facilement être déformé plastiquement. Entre 0,2% et 0,8% la dureté de l'alliage augmente tandis que sa déformabilité diminue. Au-dessus de 0,8% on passe ensuite dans le domaine des aciers hypereutectoïdes tandis que passé les 2% de carbone on entre dans le domaine des fontes, il est alors très difficile de provoquer une déformation plastique efficace de l'alliage. Toutefois la fonte possédant un point de fusion bas il est possible d'effectuer des moulages.

La teneur en carbone peut être estimée par métallographie. Cette méthode étudie la structure du métal à l'échelle de quelques dizaines de μm à l'aide d'une attaque chimique. Pour visualiser la distribution en carbone, le réactif Nital est utilisé (acide nitrique dans éthanol). Ce dernier possède une action différente en fonction de l'orientation des grains mais aussi de la nature des phases présentes, révélant ainsi la microstructure du matériau étudiée ensuite à l'aide d'un microscope optique. L'hétérogénéité des fers anciens en teneur en carbone pose notamment problème quand il s'agit de caractériser le matériau. Cette dernière se traduit à différentes échelles, du centimètre à quelques dizaines de micromètre.

Afin de considérer cette hétérogénéité, certains auteurs ont proposé de calculer un taux moyen de carbone pondéré par la surface de l'échantillon étudié en coupe transversale (G. Pagès et al., 2011). Des classes de teneurs distinctes en carbone sont ainsi établies : <0,1 ; 0,1-0,3 ; 0,3-0,5 ; 0,5-0,7 ; 0,7-0,9. (S. Leroy et al., 2017) Le calcul s'effectue ensuite de la façon suivante :

$$\%C = \sum_{i=1}^n p_i \times x_i$$

Avec

p_i : proportion de surface occupée par une classe

x_i : moyenne de teneur carbone pour une classe donnée

Cette approche permet de comparer les teneurs en carbone pour des classes d'objets différentes et d'effectuer un classement visible en fonction de la surface carburée. Afin de quantifier l'hétérogénéité de la teneur en carbone un écart-type moyen peut être calculé (S. Leroy et al., 2017). En considérant ces deux paramètres les auteurs ont ainsi proposé un graphique qui tient compte de la teneur en carbone du métal mais également de son hétérogénéité (voir (S. Leroy et al., 2017)).

D'autres éléments comme le phosphore peuvent se retrouver en solution solide dans le métal et également influencer sur ses propriétés. Ils peuvent notamment le durcir²⁹. Le phosphore est un élément à très mauvaise réputation en sidérurgie contemporaine. Le fer phosphoreux est ainsi plus dur mais cassant. Cependant on le retrouve dans les fers et aciers anciens a des teneurs parfois importantes (de l'ordre du %), et certaines études ont permis de montrer que des gestes techniques spécifiques permettaient de le mettre en forme relativement facilement (J. W. Stewart, J. A. Charles, and R. Wallache, 2001; E. Vega, P. Dillmann, and P. Fluzin, 2002).

L'hétérogénéité en phosphore dans le métal peut être mise en évidence dans certaines conditions après attaque au réactif Nital. On peut observer des structures dites « structures fantômes » car elles n'apparaissent qu'en faisant légèrement varier la mise au point du microscope. L'observation de ces structures est expliquée par le diagramme d'équilibre fer phosphore. En effet, la solubilité du phosphore dans l'austénite et la ferrite est différente. La limite de solubilité dans l'austénite est plus faible. Ainsi, dans un domaine de température donnée où l'austénite (γ) et la ferrite (α) coexistent, si le matériau est refroidi assez rapidement le phosphore contenu dans l'austénite n'aura pas le temps de migrer vers la ferrite créant des variations de concentrations. Le

²⁹ Voir par exemple (T. lung and J.-H. Schmitt, 2017)

réactif Oberhoffer permet également de rendre compte de la présence de phosphore (J. W. Stewart, J. A. Charles, and E. R. Wallach, 2000).

Un autre facteur est susceptible d'influencer les propriétés mécaniques du métal. Il s'agit des inclusions non métalliques. Quel que soit le type de procédé utilisé (direct ou indirect) au moins une étape se produisait à l'état solide donnant naissance à des particules de seconde phase. Ces dernières peuvent jouer le rôle de sites d'amorçage de rupture dans le métal (A. Juhin, 2005). Afin d'estimer leur impact L'Héritier et al. estiment le taux d'inclusion et de porosité visible sur la surface métallique. Ce paramètre, témoin de la valeur ajoutée du matériau ; est désigné sous le terme de « propreté inclusionnaire » (M. L'Héritier et al., 2005)

$$I(\%) = \frac{S_{incl}}{S_{tot}}$$

Avec :

$I(\%)$: propreté inclusionnaire estimée en pourcentage

S_{incl} : surface occupée par les inclusions

S_{tot} : surface totale de l'échantillon

Un dernier facteur peut grandement modifier les propriétés mécaniques du matériau. Il s'agit de la température.

3) Les traitements thermiques et thermochimiques

a) *Description dans les textes*

Une fois le métal produit, c'est à la forge, sous l'action combinée du foyer et du marteau de l'artisan, que les objets prenaient forme. La forge est un atelier où se déroule l'ensemble des opérations postérieures à la réduction (mise en forme, soudures...). Le martelage du métal pouvait s'effectuer à chaud comme à froid. Le travail à froid contribuait à augmenter la dureté du métal jusqu'à le rendre très difficile à travailler. Il était donc souvent nécessaire dans le travail de forge d'alterner des phases de travail à froid avec des phases de chauffe (P. Fluzin, 1983; B. R. Price, 2000). Pour déterminer la bonne température de travail le forgeron devait sûrement se fier à la couleur du métal chauffé (J. Cantelaube, 2005). En effet en fonction de la température atteinte l'acier prend une teinte différente allant du jaune pâle au rouge cerise.

Le forgeron avait également la possibilité d'effectuer un traitement thermique pour durcir le matériau. La trempe est un de ces moyens. Connue depuis la protohistoire, la trempe consiste à refroidir brutalement le métal chauffé à une certaine température dans un liquide (N. Dieudonné-Glad, 2011). Ce type d'opération est par exemple décrit par le moine Théophile dans un traité nommé la *Schedula* entre 1120 et 1125, dans le cadre de la fabrication de limes. Il est précisé que ces dernières sont en acier *calibs*. La trempe ne peut en effet produire l'effet de durcissement attendu dans un fer exempt de carbone, un fer « mou »³⁰.

L'action en elle-même de tremper le métal à chaud dans l'eau donnée par le terme *extinguere aequa liter in aqua* est traduite par N. Dieudonné-Glad par « éteignez là toute entière dans l'eau ». Cependant elle évoque une représentation mentale bien différente d'aujourd'hui. Ainsi le verbe *temperare* utilisé dans ce traité est traduit non pas par « tremper » mais par « tempérer », car il renvoie directement à la manière dont la matière était perçue avec en particulier les quatre tempéraments, déjà évoqués, qui définissaient son caractère, ses propriétés intimes (N. Dieudonné-Glad, 2011). Les limes sont ensuite doucement séchées sur le feu. En effet l'acier trempé pouvait devenir cassant. Cette chauffe permettait ainsi d'adoucir le matériau.

Enfin, un traitement thermochimique pouvait être utilisé. Il s'agit de la cémentation. Il consiste à « transformer » le fer en acier afin de le durcir. Pour les périodes anciennes cette opération consiste à mettre en contact le métal avec une source de carbone appelée ciment à chaud durant quelques heures. Une description de cette pratique est également donnée dans le traité de Théophile sur la fabrication de limes. Ces dernières sont cette fois ci constituées de fer « mou » *molli ferro*. Puis, elles sont mises en étroit contact avec de la graisse et du cuir, et recouvertes d'argile. La chauffe de l'ensemble est ensuite opérée jusqu'à ce que le « cuir brûle ». Si l'opération est effectuée

³⁰ L'explication physique du phénomène sera donnée dans la partie suivante

avec succès elle permettait de transformer le fer en acier qui pouvait ensuite subir une opération de trempe. Les limes sont en effet trempées dans l'eau à l'issue de ce traitement et séchées au feu (N. Dieudonné-Glad, 2011).

Si ces pratiques sont connues les textes y faisant référence sont rares. Lorsque c'est le cas, il peut s'avérer difficile de déterminer précisément la nature du geste. Par exemple à Montsaunès, un contrat collectif soumis entre la collectivité villageoise et le forgeron établit que ce dernier doit « enputer » c'est à dire faire la pointe (C. Verna, 2001 b). D'après C. Verna, cette opération serait liée à un traitement thermique³¹ pour fortifier les parties tranchantes de l'outil (cémentation ou trempe).

Ces opérations demeurent de plus inidentifiables sur les objets eux-mêmes à l'œil nu. En revanche, nous allons voir que les analyses métallographiques permettent aisément de les détecter.

b) Métallurgie contemporaine

La métallographie qui permet d'estimer la teneur en carbone va également permettre de révéler les traitements thermiques appliqués. Le martelage du métal crée un écrouissage des grains, et augmente la densité des dislocations (T. Lung and J.-H. Schmitt, 2017). Ceci a pour conséquence directe d'augmenter la dureté du métal jusqu'à le rendre très difficile à travailler. Il était donc souvent nécessaire dans le travail de forge d'alterner des phases de déformation plastique avec des phases de chauffe afin notamment d'adoucir le métal. Ce type de traitement thermique est appelé recuit. La structure finale du métal à l'issue du traitement dépend de différents paramètres comme : la température, le taux d'écrouissage ainsi que la durée de la chauffe (G. Murry, 1998). En fonction de ces conditions il est possible d'observer une recristallisation des grains, une croissance des grains ou encore un changement de la forme de la perlite qui se transforme en perlite globulaire³².

De plus, il existe également des traitements thermiques spécifiques pour durcir le métal. La trempe est un de ces moyens. La trempabilité d'un acier peut être définie comme la capacité de durcissement du matériau, ou encore comme son aptitude à subir la transformation martensitique (ou bainitique) (G. Murry, 1998) Lorsqu'un durcissement conséquent est observé, l'acier est dit « trempable ». En pratique, cela se produit dans le cas des aciers anciens lorsque la teneur en carbone est supérieure à 0,2-0,3% (V. Serneels, 2011).

³¹ Le texte établit en effet une relation étroite entre le l'opération à effectuer et une consommation spécifique de charbon (C. Verna, 2001 b)

³² On différencie différentes formes de recuit comme celui de restauration qui permet une annihilation des dislocations mais qui n'entraîne pas la formation de nouveaux grains, de recristallisation qui crée de nouveaux grains, ou encore de globulisation qui permet la formation de la perlite globulaire. Les différentes formes de recuit sont décrites de manière plus détaillée par exemple dans l'article de G. Murry (G. Murry, 1998).

A partir du domaine austénitique et pour une teneur en carbone donnée lors de refroidissement très rapide ($>100^{\circ}\text{C/s}$), le carbone n'a généralement pas le temps de diffuser hors des grains d'austénite et se retrouve piégé formant ainsi une solution sursaturée de carbone dans le fer alpha : la martensite (G. Murry, 1998). Cette dernière se présente sous la forme d'aiguilles ou en lattes. Elle a une très grande dureté pouvant aller jusqu'à 900 Hv, fortement dépendante de la teneur en carbone initiale du matériau. Mais elle est également très fragile et donc potentiellement cassante. La trempe peut être suivie d'un revenu, c'est-à-dire une chauffe de quelques centaines de degrés qui provoque la précipitation du carbone sous forme de carbures (G. Murry, 1998). Il permet d'éliminer une partie des tensions du matériau, d'en diminuer la fragilité et d'améliorer les propriétés mécaniques du métal. Toutefois, ce traitement doit être bien maîtrisé, sans quoi les effets du durcissement peuvent être complètement annulés.

Une vitesse de refroidissement moyennement rapide (de l'ordre de 100°C/min) pourra donner une autre phase la bainite. Ce constituant se présente sous la forme d'un agrégat de plaquettes de ferrite et de particules de cémentite dont l'aspect diffère suivant la température à laquelle il s'est formé (G. Murry, 1998). La bainite possède une dureté intermédiaire inférieure à celle de la martensite. Elle peut être difficile à différencier de la martensite tempérée au microscope optique. Dans ce cas il faut utiliser les techniques de microscopies électroniques (B. L. Bramfitt and A. O. Benscoter, 2002).

En fonction de la vitesse de refroidissement, toute une gamme de structures aux propriétés différentes peut ainsi voir le jour (voir figure 7). La perlite nodulaire constituée de perlite très fine, qui se présente sous la forme de nodules, est obtenue lors d'un refroidissement modéré. Si la vitesse est encore plus faible, une perlite très fine sous forme de lamelles de cémentite fortement rapprochées peut se former. Plus le refroidissement sera lent et plus les lamelles auront ainsi tendance à s'éloigner jusqu'à se rapprocher de l'état d'équilibre observé sur le diagramme de phase Fe-C.

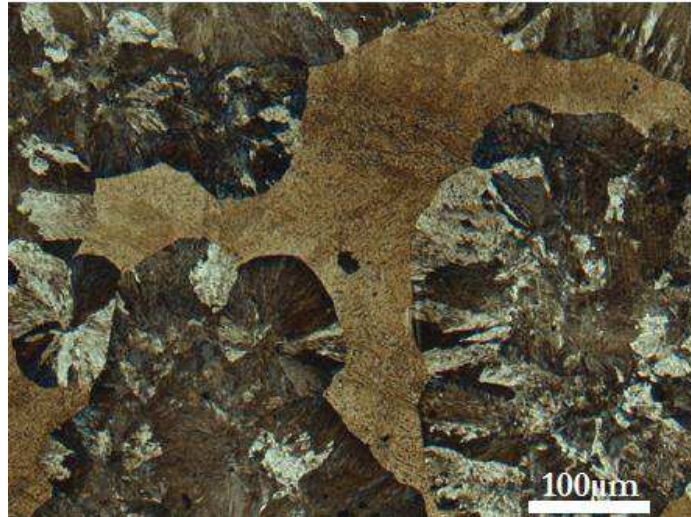


Figure 6 - Exemple de structure de trempe hétérogène (perlite nodulaire, martensite et bainite) (S. Leroy, 2010)
Micrographie obtenues après attaque au réactif Nital 3%

Dans le cas des fers anciens, la structure finale est dépendante de la nature et l'hétérogénéité du matériau refroidi, du liquide de refroidissement utilisé mais également de la façon d'opérer la trempe (plusieurs aller-retours dans le liquide ou un seul...) qui va directement influencer la vitesse de refroidissement (voir un exemple sur la figure 7).

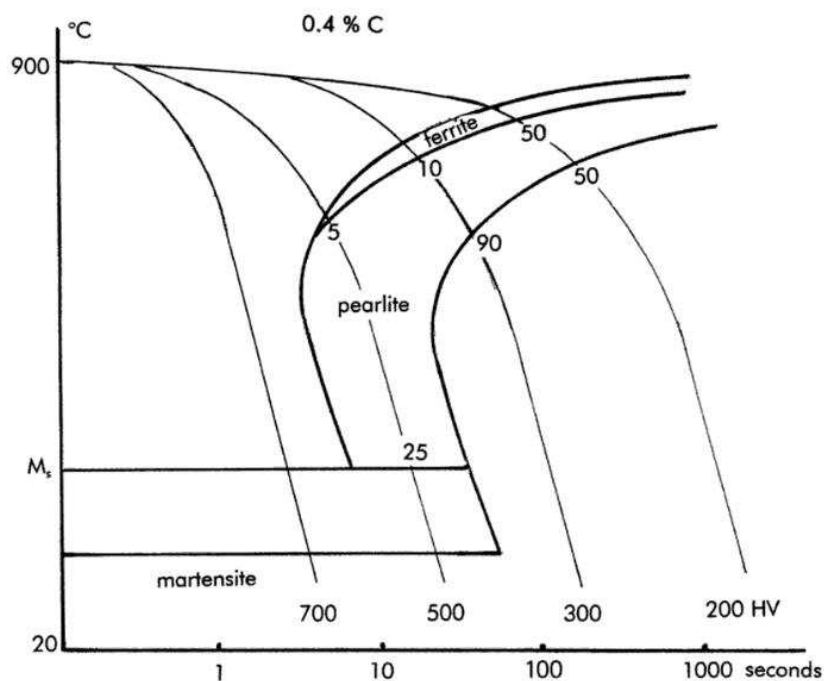


Figure 7 - Diagramme CCT (Continuous Cooling Transformation diagram) pour un acier à 0,4% de carbone. L'acier a ici été chauffé à 900°C puis refroidi à différentes vitesses. Une vitesse très rapide est requise pour obtenir de la martensite, à une vitesse plus modérée plusieurs phases peuvent se former à la fois ferrite, perlite et martensite. A une vitesse faible uniquement de perlite et de la ferrite sont formées. Diagramme Issu de (V. F. Buchwald, 2005, p. 157)

Lors d'une surchauffe (comme dans le cas d'une soudure) suivi d'un refroidissement relativement rapide à partir du domaine austénitique, on peut voir apparaître une structure différente dite de Widmanstätten, qui comporte une structure aciculaire (en aiguille) de ferrite.

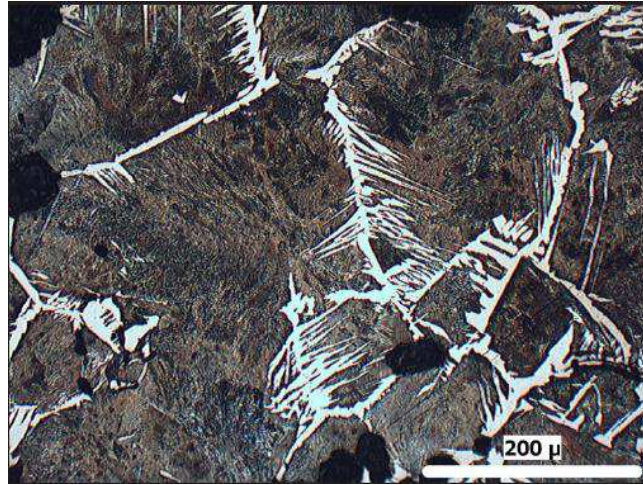


Figure 8 - Exemple de structure de Widmanstätten (A. Disser, 2014) avec ferrite aciculaire. Micrographie obtenue après attaque au réactif Nital 3%

Un autre type de traitement thermochimique déjà évoqué, pouvait également être réalisé afin de transformer le fer en acier et ainsi durcir le matériau : la cémentation. Lors du contact du métal avec la source de carbone à chaud, le carbone va ainsi progressivement diffuser au sein du matériau donnant naissance à un gradient de teneur en carbone (P. Dillmann, L. Pérez, and C. Verna, 2011 a, p. 31).

4) Bilan

Cette partie avait pour objectif de présenter la fabrication, la nature et les principales propriétés des alliages ferreux anciens. Le minerai de fer devait d'abord être réduit. Jusqu'à la fin du XIII^e siècle la filière dite « directe » était employée. Elle avait lieu dans un bas fourneau. La filière indirecte est, par opposition avec la précédente, constituée de deux étapes : la réduction proprement dite, effectuée dans un haut fourneau qui permettait d'obtenir un produit intermédiaire, la fonte, suivie d'un affinage de cette dernière. Bien que plusieurs variantes de ce procédé existent nous ne considérerons dans ce travail que les formes « stabilisées » du procédé, tel le procédé wallon. La coexistence de ces deux filières a été mise en évidence par exemple dans les fers de construction utilisés dans l'architecture gothique, et cela même jusqu'au XVI^e siècle.

La nature du métal obtenue suite à la réduction pouvait être variable. Différentes stratégies ont pu être mises place pour en tirer parti, donnant naissance à une grande diversité de produits. Ainsi quand l'acier ou le fer sont nommés dans les sources écrites, il leur est souvent associé une désignation particulière qui sert à qualifier la qualité du matériau. La nature précise du métal est cependant difficile à percevoir dans ces sources. Les analyses métallographiques apportent ici un éclairage intéressant, puisqu'elles révèlent sa microstructure. Ainsi, il a été montré que les alliages ferreux anciens sont généralement très hétérogènes en teneur en carbone. En plus du carbone, d'autres facteurs comme la présence de phosphore, la taille des grains, la présence d'inclusions non métalliques pouvaient modifier le comportement mécanique de l'alliage. Les propriétés du métal pouvaient être également transformées par des traitements thermiques comme la trempe ou la cémentation.

Toutes ces opérations étaient connues par les artisans du métal au Moyen Âge. Nous allons à présent voir comment elles ont été utilisées par les armuriers. Pour cela, nous allons nous intéresser à la fabrication des armures en elles-mêmes, en commençant par présenter les principaux centres de fabrication.

III. Fabrication des armures : centres de production et chaîne opératoire

1) Les centres de production

Dans cette partie nous avons synthétisé les données historiques concernant la répartition des centres de fabrication d'armures ainsi que la nature de leur production. Les sources écrites utilisées par les historiens sont de différentes natures. Les sources législatives et normatives forment un premier ensemble. Elles s'attachent à décrire la réglementation de la profession des armuriers en vigueur dans chacun des centres, et mettent en évidence un cadre juridique et institutionnel dans lequel les armuriers sont censés exercer leur travail. Cependant, elles présentent l'inconvénient majeur de véhiculer une image figée de la société. Ainsi, l'histoire des métiers a maintenant à cœur de confronter cette vision théorique aux actes pratiques (J.-P. Sosson, 1990, p. 340). Pour cela, les historiens ont à leur disposition d'autres types de sources comme les sources comptables, les sources judiciaires, ou encore celles issues de la correspondance des armuriers (C. Gaier, 1979).

Ainsi, nous allons d'abord essayer de dresser une vision d'ensemble de l'importance relative des centres de fabrication d'armures européens. Nous nous concentrerons ensuite sur les aspects normatifs qui réglementent les métiers.

a) Présentation générale

Durant notre période d'étude, la fabrication de tout type d'armement était largement répandue dans les villes (C. Gaier, 1995 b). Toutefois ce n'est réellement qu'à la fin du XIII^e siècle et au cours des siècles suivants que des preuves tangibles attestent la renommée internationale de certains centres de fabrication (C. Blair, 1958, p. 53). La faible quantité de sources disponibles tout comme la rareté des pièces conservées auparavant expliquent sans doute ce constat. C'est en tout cas à cette période que les premières preuves connues à ce jour d'une réelle organisation de la production armurière naissent. La production d'armement a donné naissance à des spécialisations bien distinctes et à tout autant de professions qui pourtant se retrouvent aujourd'hui confondues sous le terme générique « d'armurier ». Nous ne considérerons pour notre part sous ce terme que les personnes œuvrant dans la production d'équipement défensif.

Afin de refléter le paysage de cette armurerie, il est de notre point de vue nécessaire de prendre en compte au moins deux paramètres. D'une part, le volume de la production et des exportations qui déterminent la place du centre par rapport à ses concurrents sur le marché de l'armurerie, et la nature des commandes auxquelles répondent les armuriers, d'autre part. Il apparaît, en effet, que deux principaux types de commandes pouvaient exister. La première pour des

armures qualifiées par plusieurs auteurs de « haute qualité » (M. Pfaffenbichler, 2002) s'adressait à des particuliers. Ces réalisations étaient effectuées à partir des mesures du client et pouvaient ainsi donner lieu à l'établissement d'un « patron »³³ (C. Gaier, 1973, p. 274). La seconde répondait aux besoins d'une clientèle moins aisée pour la réalisation de pièces plus ordinaires ou aux commandes effectuées par les gouvernements royaux ou princiers (F. Menant, 1988, p. 132). Ce dernier type se traduit souvent par des commandes massives³⁴ en termes de nombre de pièces et peut être associée à une fabrication en série³⁵ c'est-à-dire une production de pièces en grand nombre, standardisées et éventuellement de différentes tailles afin de pouvoir plus facilement les ajuster aux combattants³⁶. Ce type de production est parfois réalisée à un coût moindre voire à très bas coût. A titre d'exemple, deux batteurs de Strasbourg auraient fabriqué vers 1595, 100 demi armures de piétons qu'ils proposaient à la vente pour 300 florins, ce qui aurait permis par comparaison d'après l'auteur, l'achat d'un seul harnois complet sur mesure voire de deux, à cette période (P. Terjanian, 1995, p. 172). Toutefois, toute production anonyme n'était pas forcément de bas de gamme. Ainsi, un autre batteur strasbourgeois réalise à la même période une armure de cavalier complète qu'il espère vendre à 200 florins pièce sans pour autant avoir reçu de commande particulière qui indiquerait une fabrication sur mesure (P. Terjanian, 1995, p. 172).

C. Gaier a proposé une classification des différents centres de fabrication d'armures en fonction de l'importance à la fois de leur production mais aussi de leur réputation dans la production d'armes au XV^e siècle (C. Gaier, 1995 b, p. 244). Il met ainsi en évidence trois types de centres : les centres internationaux, les centres secondaires, et enfin les centres d'influence purement locale dont les sources ne font que peu mention (voir tableau 2).

Tableau 2 - Classification des centres armuriers européens au XV^e siècle par C. Gaier (C. Gaier, 1995 b, p. 244)

Centres internationaux	Centres secondaires
Italie du Nord Allemagne	Principautés belges France Espagne

³³ C'est ainsi qu'aurait procédé en 1464 François Missaglia, grand armurier milanais, pour réaliser trois armures de guerre au Duc de Bourgogne (C. Gaier, 1973, p. 274)

³⁴ F. Menant évoque des commandes de plusieurs centaines voire milliers de pièces

³⁵ Ce terme en « série » pour qualifier ce type de production a notamment été utilisé par F. Menant pour qualifier l'armement lombard, mais également par C. Gaier et par S. Painsonneau (S. Painsonneau, 2004, p. 74) (C. Gaier, 1973, p. 274) (F. Menant, 1988, p. 127)

³⁶ C'est l'hypothèse que pose S. Painsonneau pour les productions tourangelles satisfaisant les commandes royales (S. Painsonneau, 2004, p. 74). C. Gaier pense lui que les boutiques d'armuriers devaient contenir des stocks de « prêt à porter » destinés aux hommes plus ordinaires (C. Gaier, 1973, p. 275)

Cette synthèse, bien qu'elle puisse être précisée par des travaux plus récents, nous paraît bien refléter le paysage actuellement connu de l'armurerie européenne à la fin du Moyen Âge. C'est pourquoi nous avons choisi d'en reprendre ici les grandes lignes et d'y ajouter quelques compléments pour présenter les différents centres³⁷ (voir Figure 9), tout en gardant bien évidemment à l'esprit que toute tentative de classification présente le défaut inévitable d'être dépendante des données publiées jusqu'ici. Elle pourra donc être amenée à être révisé par des études ultérieures. Toutefois, notre but n'est pas d'être exhaustif mais de mettre en évidence une vision d'ensemble de la répartition de la production armurière en fonction des types de production³⁸.



Figure 9- Localisation des principaux centres de production évoqués dans cette partie

i. L'Italie du Nord :

La Lombardie était au Moyen Âge un des pôles majeurs de production d'armes en Europe. Dès le XII^e siècle les armuriers lombards trouvent en Orient des débouchés très rentables (P. Contamine et al., 2003, p. 183). Toutefois, c'est seulement au XIII^e siècle que la région commence à

³⁷ La Suisse est également citée par C. Gaier en tant que centre secondaire. Toutefois, l'auteur la cite surtout pour sa production d'armes offensives. Par conséquent, comme il est difficile de se faire à ce jour une idée de l'importance de sa production en matière d'armes défensives nous avons décidé de l'exclure de ce classement.

³⁸ Par souci de commodité dans cette partie nous reprenons les expressions employées par C. Gaier comme « Allemagne », « Italie », « France » ou encore « Principautés belges » pour désigner des espaces géographiques de production bien qu'ils relèvent de différentes entités politiques en fonction de la période considérée.

exporter massivement des armures vers l'Europe. Dès lors sa place de producteur international d'armures ne fait plus aucun doute (C. Blair, 1958, p. 53).

La ville de Milan en était le centre principal. La production d'armes y est attestée depuis au moins le XI^e siècle (M. Pfaffenbichler, 1992, p. 6) et a pris progressivement de l'ampleur. Nous savons notamment grâce aux archives Datini de Prato que les productions milanaïses étaient exportées dans nombre de pays d'Europe et plus spécialement en France et en Espagne depuis au moins la fin du XIV^e siècle (C. Blair, 1958, p. 79; F. Morenzoni, 2001; P. Braunstein, 2001). Cette tendance a continué à s'accroître au cours des siècles suivants. Des exportations aussi bien en Allemagne qu'en Angleterre sont ainsi recensées (voir figure 10). La ville était également capable de répondre à des commandes importantes. Elle fut par exemple en mesure de fournir 4000 armures de cavalerie et 2000 pour l'infanterie en seulement quelques jours pour la bataille de Maclodio en 1427 (M. Pfaffenbichler, 1992, p. 13). L'armurerie milanaïse aurait atteint son apogée dans les années 1450 et compte des familles d'armuriers célèbres à l'instar des Missaglia et plus tard des Negrolis³⁹. A cette époque, la production s'articule à deux niveaux : production de série répondant aux commandes d'États pour équiper les troupes et production de haute qualité répondant, elle, à des commandes de particuliers, destinée à une clientèle aisée (F. Menant, 1988, p. 135). Au XVI^e siècle, s'est développée la production d'armures richement décorées, considérées parfois comme de véritables objets d'art, dont les créations milanaïses très prisées témoignent.

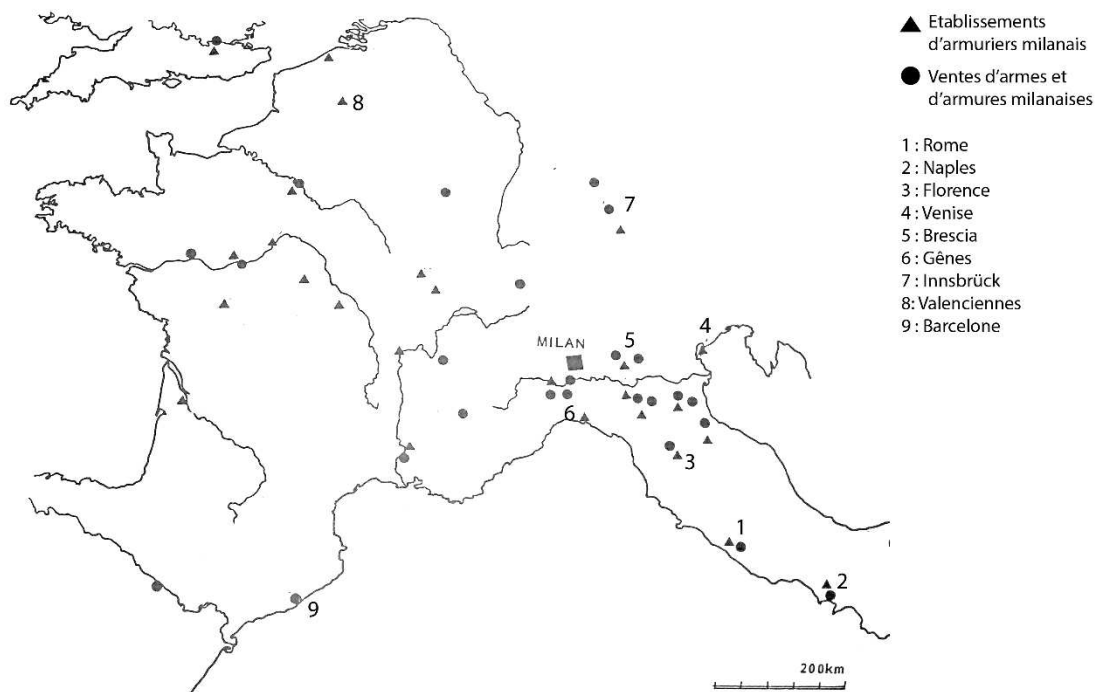


Figure 10- Exportations milanaïses au XV^e siècle. D'après F. Menant (F. Menant, 1988, p. 134)

³⁹ Pour des détails sur les familles d'armuriers milanaïses le lecteur pourra se référer aux ouvrages suivants : (S. W. Pyhrr, J.-A. Godoy, and S. Leydi, 1998), (S. Leydi and J.-A. Godoy, 2003)

Le deuxième pôle d'importance en Italie du Nord est représenté par la ville de Brescia. Brescia a longtemps constitué la principale rivale de Milan. Toutefois, en comparaison bien moins d'informations sont disponibles à ce jour sur l'activité armurière brescienne, ce qui nous incite à rester prudent sur les conclusions. Brescia a profité de l'appui des Visconti avant que Venise n'en fasse son arsenal. En réalité, les armureries milanaise et brescienne sont fortement liées puisque de nombreux armuriers établis à Brescia étaient originaires de Milan. Toutefois, bien qu'elle comptât des clients de haute importance, Brescia aurait été plus spécialisée dans la production d'armures pour équiper les troupes (F. Menant, 1988, p. 135).

Cependant, d'après C. Gaier, l'activité armurière de l'Italie du Nord ne se limitait pas à ces deux seuls centres. Les rôles de Venise, Florence ou Gênes, bien que moins bien étudiées jusqu'ici, sont également à prendre en compte et mériteraient d'être précisés. Gênes aurait été par exemple réputée pour la fabrication de cuirasses que lui achetait le marchand international Jacques Cœur (C. Gaier, 1995 b, p. 246). Ainsi, il est possible de voir l'Italie du Nord comme une constellation de centres armuriers capable de produire des armes à une échelle internationale, dominée par un centre principal : la ville de Milan.

Cette région a donc su, à la fois satisfaire à la demande en matière d'armement défensif à une échelle locale mais également établir une solide réputation à l'échelle internationale, la plaçant en tête de cortège des centres armuriers européens. Au XVI^e siècle, pourtant, la montée en puissance des centres germaniques est venue fortement la concurrencer (M. Pfaffenbichler, 1992, p. 13).

ii. L'Allemagne

Avant le XV^e siècle, on ne trouve que peu de références aux armures allemandes en dehors de l'Allemagne alors que les épées allemandes sont fréquemment rencontrées dans les textes anglais ou français dès le XIII^e siècle. Toutefois, à partir de 1450, les productions armurières allemandes ont commencé à fortement concurrencer l'Italie (C. Blair, 1958, p. 92). Les grands centres de productions allemands étaient repartis en deux principaux lieux : la Westphalie et l'Allemagne du Sud.

Cologne constitue le centre majeur de la Westphalie. Des fabricants d'armes y sont mentionnés dès le XIII^e siècle. Cependant, c'est à la fin du XIV^e siècle que la fabrication d'armures a connu un développement considérable (M. Pfaffenbichler, 2002, p. 266). Au début du XV^e siècle et jusqu'à la fin du XVI^e siècle, le nombre d'ateliers aurait oscillé entre 40 et 60. Au cours du XVI^e siècle plus d'une centaine d'armuriers auraient exercé (P. Terjanian, 2005). La ville se serait spécialisée dans le développement d'une production d'armures à bas prix, de faible ou moyenne qualité. Elle a été, par exemple, préférée pour équiper les grandes armées royales du XVI^e siècle comme celle du roi d'Angleterre Henri VIII. Ce dernier aurait ainsi acheté 1200 harnois à Cologne en 1539 (M.

Pfaffenbichler, 2002, p. 266). Cependant, d'autres types de production sont attestées comme la fabrication d'harnois de joute. Elles sont malheureusement moins bien connues (P. Terjanian, 2005). Cologne exportait ses productions dans de nombreuses villes comme Anvers, Liège, Francfort, Strasbourg, Main, mais également au Danemark, en Suède et probablement en Russie. A partir de la seconde moitié du XVI^e siècle, elle a également exporté plus au sud, vers d'autres centres comme Nuremberg et Augsbourg (P. Terjanian, 2005).

L'Allemagne du Sud compte elle comme centre d'importance aussi bien les villes impériales de Nuremberg et d'Augsbourg mais également les cités princières de Landshut et d'Innsbruck. A ce titre Nuremberg, qualifiée de « métropole des métiers du métal au XV^e siècle » par Ph. Braunstein (P. Braunstein, 2003, p. 95) peut être considérée comme le chef de file de cette région du point de vue de l'importance de sa production, notamment reflétée par le nombre élevé de ses maîtres batteurs. Ils sont ainsi estimés à 200 au XVI^e siècle (M. Pfaffenbichler, 2002, p. 267) et entre 1501 et 1550 plus d'une centaine de compagnons seraient devenus maîtres batteurs (P. Terjanian, 1995, p. 74). A partir du XV^e siècle, Nuremberg semble d'abord connu pour la fabrication massive d'armures à destination des troupes. On lui associe, par exemple, un grand nombre d'armures de lansquenets conservés (J.-P. Reverseau, 2011, p. 36). Toutefois quelques ateliers se sont orientés vers une production de qualité. Valentin Siebenbürger, fameux armurier du milieu du XVI^e siècle, compta notamment parmi ses clients beaucoup de membres de la famille impériale (M. Pfaffenbichler, 2002, p. 269).

Augsbourg accède au rang des grands centres de fabrication d'armure dans la seconde partie du XV^e siècle. Le succès de cette ville semble lié à celui de la famille Helmschmid dont la renommée peut être rapprochée de celle des Missaglia en Italie (C. Gaier, 1995 b, p. 246). Les Helmschmid ont sans aucun doute bénéficié de l'appui de Charles Quint, qui en avait fait ses armuriers favoris. Sa mort en 1558 coïncide avec la baisse sensible de production d'armures de haute qualité à Augsbourg. La production d'armures pour équiper les troupes serait ainsi devenue vers le milieu du XVI^e siècle l'activité dominante de la ville et le nombre d'atelier a très fortement diminué entre 1560 et 1571 (M. Pfaffenbichler, 2002, p. 269). Augsbourg a ainsi progressivement perdu sa place de centre de renommée internationale.

Enfin les villes de Innsbruck et Landshut, réputées pour leurs armures de grande qualité à la fin du XV^e siècle se distinguent d'Augsbourg et Nuremberg par le fait d'être des villes de cours. Cette particularité a certainement eu une influence non négligeable sur le travail des armuriers, puisqu'elle leur garantissait le contact avec une clientèle de haut rang (M. Pfaffenbichler, 1992, p. 17).

A présent que les grands centres traditionnels de production de portée internationale ont été brièvement présentés, tournons-nous vers les centres secondaires. Compte tenu des données

actuelles dont nous disposons, il semble que ces derniers aient pu exercer une certaine influence sur un marché plus restreint.

iii. Les centres secondaires

G. Gaier cite d'abord dans cette catégorie les « principautés belges »⁴⁰ qui sont constituées de la Belgique actuelle, le Luxembourg et le nord de la France. Une tradition notable armurière s'est développée dans cette région à la fois en matière d'armement défensif, offensif mais aussi d'artillerie (C. Gaier, 1973). Elle possédait ainsi une activité suffisante pour subvenir à la majorité de ses besoins propres sans recourir massivement aux importations⁴¹. Tournai et Bruxelles ont notamment connu une prospérité importante dans la fabrication d'armures (C. Gaier, 1973, p. 241).

Ensuite nous trouvons les centres français. Les villes de Paris puis de Tours au XV^e siècle ont connu une armurerie prospère. Des études récentes se sont attachées à mettre en lumière l'activité de ces pôles jusque-là restés dans l'ombre de leur imposants voisins.

L'armurerie parisienne connaît une montée en puissance au XIII^e siècle et atteint son apogée au tournant du XV^e siècle. Tout au long de cette période elle bénéficie en effet des commandes royales et princières. D. Robcis indique par exemple que les principaux fournisseurs de Jean sans Peur en matière d'armes et d'armures étaient parisiens, loin devant ceux des principautés du Nord ou encore de l'Italie ou de l'Allemagne (D. Robcis, 1998, p. 43). M. Bernard, qui traite de l'armurerie parisienne dans sa thèse, précise toutefois qu'il est fort possible que les armuriers parisiens aient reçus des commandes à destination d'une clientèle moins prestigieuse, toutefois les documents à ce sujet restent rares. Cependant l'auteur indique qu'au moins un document, à savoir un contrat désigné comme un « marchié », fait état d'une commande de taille importante de plusieurs centaines de pièces à fournir dans un délai de moins de 3 mois à destination de deux armuriers parisiens en 1384 (M. Bernard, 2012, p. 226,244). M. Bernard appelle ainsi à revaloriser la place de l'armurerie parisienne « dans la mesure où les plus grands personnages du royaume faisaient appel à des armuriers et à des fourbisseurs parisiens ». Le phénomène d'importation massif d'armures italiennes ou allemandes couramment admis jusque-là est pour l'auteur également à relativiser (M. Bernard, 2012, p. 417). Toutefois, au cours du XV^e siècle, la ville a connu une perte de vitesse en raison des conflits entre Armagnacs et Bourguignons, qui ont transporté une partie de la cour à Bourges, privant ainsi les armuriers d'une bonne partie de leur clientèle, mais également des

⁴⁰ Expression employée par C. Gaier par souci de commodité malgré son caractère anachronique puisque, comme il le précise, cet espace recouvre différentes entités politiques (pour la période étudiée par C. Gaier : les comtés français de Flandre et d'Artois, le Tournaisis, ainsi que les terres d'Empire : duchés de Brabant et de Limbourg, comtés de Hainaut, de Namur, de Looz, de Luxembourg et principauté de Liège) (C. Gaier, 1973).

⁴¹ Pour plus de détails sur les productions de cette région se rapporter à « L'industrie et le commerce des armes dans les anciennes principautés belges du XIII^e à la fin du XV^e siècle » (C. Gaier, 1973)

productions tourangelles qui sont venues fortement concurrencer les productions parisiennes (M. Bernard, 2012, p. 48). Le XVI^e siècle est signe de renouveau. L'armurerie française connaît alors un nouvel essor notamment avec la production de luxueuses armures d'un style particulier⁴².

Le développement de l'armurerie à Tours au XV^e siècle découle, elle, d'une volonté royale. En effet Charles VII décide d'y implanter en 1440 un centre armurier de grande importance. La ville répondait ainsi à la fois à des commandes privées d'armures sur mesure à destination des particuliers mais également aux commandes royales plus massives destinées à équiper les troupes (S. Painsonneau, 2004). S. Painsonneau émet à ce sujet l'hypothèse de l'existence d'une éventuelle fabrication en série pour y répondre (S. Painsonneau, 2004, p. 74). La production tourangelles atteint son apogée sous le règne de François I^{er} puis décline progressivement pour finir par perdre sa place de principal fournisseur du royaume (E. Reppel, 2016, p. 193).

D'autres villes françaises comme Lyon ou Bordeaux ont certainement eu une influence dans ce domaine, toutefois cela reste à préciser. En effet, si Lyon par exemple a connu une grande expansion commerciale de part ses foires, l'importance de cette ville en tant que productrice d'armures n'est pas encore bien déterminée.

L'Espagne comptait aussi un certain nombre de centres armuriers, à l'instar des villes de Burgos, Séville ou encore Eugui, un important centre d'armures de haute qualité au XVI^e siècle (M. Pfaffenbichler, 1992, p. 23). Toutefois les productions armurières espagnoles, bien qu'ayant certainement eu un rôle important, demeurent mal connues⁴³.

A ces centres mentionnés par C. Gaier dans la catégorie des « centres secondaires » il nous semble approprié d'en ajouter quelques-uns. En Angleterre, Londres possédait une communauté d'armuriers attestée dès le XIV^e siècle. Par la suite, l'atelier de Greenwich créée sous l'impulsion d'Henri VIII a établi une certaine renommée dans la fabrication d'armures de haute qualité au XVI^e siècle. Par ailleurs, une étude qui s'est intéressée à la production armurière de Strasbourg a démontré que l'importance de ce centre devrait également être revalorisée. La ville compte, en effet, une trentaine de maitres batteurs actifs au XVI^e siècle ce qui la place en terme d'effectif à égalité avec un centre comme Landshut (P. Terjanian, 1995, p. 75–74). De plus des armuriers très prisés par l'Empereur Maximilien I^{er} ont exercé dans cette ville, à l'instar de Hans Seusenhofer (P. Terjanian, 1995, p. 198). Strasbourg semble donc occuper une place non négligeable dans les centres de fabrication germaniques, après les villes de Nuremberg, Cologne, Innsbruck et Augsbourg (P. Terjanian, 1995, p. 71). En outre, elle constitue un relais pour la vente d'armes et d'armures de

⁴² Voir pour cette période les travaux de G.-M. Leproux « les métiers de l'armure à Paris au XVI^e siècle » dans *Armures des princes d'Europe sous l'égide de Mars* (G.-M. Leproux, 2011)

⁴³ Le lecteur pourra notamment se tourner vers l'article de J. Mann « Notes on the Armour worn in Spain from the tenth to the fifteenth century » (J. G. Mann, 1933)

facture plus lointaine comme celles de Nuremberg ou d'Augsbourg, notamment grâce à ses foires (P. Terjanian, 1999).

Comme nous l'avons déjà mentionné, cette synthèse est loin d'être exhaustive. D'autres centres mériteraient sûrement d'y trouver leur place. Nous n'avons détaillé ici que les plus connus, en attendant que d'autres études plus approfondies voient le jour pour compléter voire redéfinir ce paysage de l'armurerie.

b) Métiers et réglementations

Un des moyens pour aborder l'organisation professionnelle des armuriers consiste à étudier les réglementations associées à leur métier. De façon générale, les réglementations des métiers s'attachent à définir les conditions de formation des apprentis ainsi que les modalités d'accès à la maîtrise, à contrôler la durée du travail et le nombre d'ouvriers que peut employer un maître, à formuler des restrictions quant au volume de production, ou à l'action commerciale des ateliers, à protéger les métiers de la concurrence étrangère et à contrôler la qualité des pièces. La hiérarchie des métiers classique est ainsi fondée sur trois grandes catégories d'acteurs : le maître, le valet et l'apprenti (P. Bernardi, 2009, p. 39). Ces mesures peuvent être regroupées sous la forme de textes appelés « statuts ». Ce type de source a été très largement privilégié pour l'étude de l'histoire des métiers (J.-P. Sosson, 1990). Dans le cadre de l'armurerie, l'analyse de ces textes met ainsi en évidence différentes tendances dans l'organisation professionnelle des principaux centres de production. Nous donnerons dans les paragraphes suivants quelques précisions sur la réglementation de deux d'entre eux : Milan et Nuremberg.

i. Milan

Pour le XII^e et le XIII^e siècle les réglementations milanaïses demeurent mal connues (F. Menant, 1988, p. 145). Au XV^e siècle, nous savons que des mesures vont être prises pour protéger les marques des armuriers contre les contrefaçons (F. Menant, 1988, p. 145). Cependant, pour l'auteur les textes laissent volontairement une grande liberté d'exécution aux armuriers, afin de donner la priorité au commerce international et permettre la formation de grandes entreprises à l'instar de celle des Missaglia (F. Menant, 1988, p. 143). Au XVI^e siècle, les données à ce sujet sont plus nombreuses. Des textes réglementant la profession en 1587 ont ainsi été conservés (S. Leydi, 2003, p. 26).

Les travailleurs de l'armurerie étaient recensés dans des listes distinctes, selon leur catégorie. Ainsi, les conditions pour s'inscrire sur le rôle des maîtres indépendants paraît avoir été la possession

d'un atelier, huit ans de pratique au moins auprès d'un maître agréé, le passage d'un examen afin de prouver la maîtrise de son art et le paiement d'une taxe de 30 liras si le nouveau maître était citoyen milanais, de 60 s'il était étranger. La hiérarchie professionnelle est décrite par S. Leydi de la façon suivante : garçon d'atelier ou apprenti (en formation), ouvrier salarié (a achevé sa période d'apprentissage mais pratiquait sous les ordres d'un maître indépendant), maître dépendant (qui possède le titre de maître mais n'a pas d'atelier) et maître indépendant (à la tête de son propre atelier et qui possède un poinçon). Parmi les contraintes citées pour devenir un maître armurier indépendant, la plus importante paraît avoir été la possession d'un atelier car il impliquait un investissement financier considérable. La réglementation stipule également que « personne ne pouvait vendre des armes étrangères avec des armes milanaïses »⁴⁴.

Si la réglementation milanaise apparaît finalement assez peu contraignante, la ville de Nuremberg présente un tout autre système.

ii. Nuremberg

La production nurembergeoise était en effet encadrée par une réglementation assez stricte. Un article de A-F von Reitzenstein reprend celle de 1478 complétée de quelques ajouts postérieurs. L'auteur s'attache ainsi à en dégager les principales caractéristiques (F. von Reitzenstein, Alexander, 1959, p. 55–56)⁴⁵. Chaque apprenti devait servir son maître au moins 4 ans avant de pouvoir passer un examen pour devenir maître batteur. Il lui était alors demandé de réaliser un type de pièce en particulier (défense de tête ou plastron ou défense du bras, de jambe ou bien des gantelets) qu'il serait uniquement autorisé à produire par la suite. S'il voulait fabriquer l'ensemble de ces pièces dans son futur atelier, il se devait de passer l'examen pour chacune d'entre elles (F. von Reitzenstein, Alexander, 1959, p. 55–56). De plus chaque maître armurier n'était autorisé qu'à employer un apprenti à la fois et un nombre très restreint de compagnons⁴⁶, ce qui limitait considérablement la taille des ateliers et complexifiait davantage la production d'armure complète issue d'un même atelier. Ces réglementations semblent ainsi privilégier la spécialisation des maîtres batteurs et l'association entre ateliers. De plus la qualité des pièces était contrôlée par des jurés. Deux contrôles étaient effectués un avant le polissage et l'autre après. La qualité de la pièce était ensuite certifiée par l'apposition du poinçon de la ville. En plus de celui-ci, le maître armurier pouvait y apposer son poinçon. Les pièces réalisées en fer ne faisaient pas l'objet de contrôle et ne portent donc pas la

⁴⁴ S. Leydi précise : « il était surtout interdit de mélanger des pièces provenant de Milan et de Brescia dans un même lot » (S. Leydi, 2003, p. 34).

⁴⁵ Issus de Alexander von Reitzenstein, 1959. "Die Ordnung der Nürnberger Plattner", *Waffen- und Kostümkunde*, p. 54–73. "Alt Ordnung der platner" 1478-1509; " Neue Ordnung der platner " 1499-1624, *Stadtarchiv Nürnberg Cod man 73*

⁴⁶ Deux compagnons pour la réglementation de 1385, quatre pour celle de 1507, réduit à trois en 1574 (M. Pfaffenbichler, 1992, p. 27)

marque de la ville, seules les armures réalisées en acier devaient être marquées (M. Pfaffenbichler, 1992, p. 30). Enfin la réglementation interdisait le commerce de pièces à moitié finies ou produites en dehors de la ville.

iii. Bilan

Ainsi, à travers l'exemple des villes de Milan et de Nuremberg nous pouvons voir s'opposer deux systèmes normatifs. Le premier peu contraignant, accorde une grande place au commerce et offre aux armuriers la possibilité d'être polyvalents. La qualité des pièces est alors garantie essentiellement par la marque du fabricant (F. Menant, 1988, p. 135). Le second, est régi par une réglementation plus développée, en termes d'accès au métier, de hiérarchie, de spécialisation, et de contrôle des produits finis. Pour preuve, la qualité des pièces est attestée par la marque de la ville apposée conjointement avec celle de l'armurier responsable de la fabrication de la pièce.

A présent si l'on considère la production armurière de façon plus large, on observe une grande diversité de fonctionnement. Ainsi, le système parisien s'apparente plutôt à celui de ces voisins germaniques qui compte une réglementation des métiers développée et complexe. (M. Bernard, 2012, p. 264). Les anciennes principautés belges, notamment les villes de Tournai et Bruxelles se situent elles dans un cas intermédiaire où des spécialités demeurent sous un cadre normatif moins contraignant que celui de Nuremberg (M. Bernard, 2012, p. 171).

De façon générale la pratique de l'estampillage des pièces est largement citée dans les centres de production. La marque de l'armurier et ou de la ville de fabrication était en effet un gage de qualité, censée attestée que les pièces avaient subi un contrôle. À Augsbourg, par exemple, les pièces conformes à la qualité exigée étaient marquées du poinçon de la ville, tandis que celles présentant un léger défaut devaient être estampillées d'une marque spéciale apposée à l'intérieur de l'objet (A. Williams, 2003, p. 364). Toutefois, certains centres ou armuriers très reconnus comme le centre d'Innsbruck, associé à la cour, n'ont pas eu recours à ces pratiques jugées sans doute inutile au regard de leur réputation (M. Pfaffenbichler, 2002, p. 276). La ville de Cologne, malgré l'importance de sa production ne semble pas non plus avoir fait apposer de marques sur ses pièces (P. Terjanian, 1995, p. 164), cependant, la qualité de ces dernières pouvait faire l'objet de contrôles (P. Terjanian, 2005). Enfin, il faut préciser que les réglementations ne sont pas toutes issues de regroupement de professionnels. A Tours, par exemple, elle est dictée directement du roi qui entend contrôler la nature et la qualité des productions⁴⁷ (S. Painsonneau, 2004, p. 48).

⁴⁷ Deux grands types de réglementations sont généralement recensées dans les métiers médiévaux. On distingue « les métiers jurés, organisés en communauté, dont les membres liés par serment, se sont dotés eux même de leur loi ; les métiers réglés obéissant à un certain nombre de règles édictées par la municipalité ou le pouvoir seigneurial ». (P. Bernardi, 2009, p. 31).

La diversité des fonctionnements évoquée ici pour le domaine de l'armurerie, rejoint celle relevée de façon générale dans l'organisation des métiers au Moyen Âge (P. Bernardi and C. Verna, 2001). Cependant, comme nous l'avons déjà évoqué, les sources normatives ne peuvent constituer l'unique grille de lecture des métiers, car elles véhiculent une image figée de leur organisation et plus généralement du monde du travail. Il convient de les confronter à d'autres types de sources afin de mesurer l'écart entre normes et réalité. (J.-P. Sosson, 1990, p. 340). Comme l'argumente J-P. Sosson, la rigidité de ces règles est à reconsidérer car elles pouvaient être aisément contournées par certains. Pour l'armurerie, nous citerons ici l'exemple d'Anton Peffenhauser. Grand armurier et marchand d'armes et d'armures d'Augsbourg du XVI^e siècle à l'instar des armuriers italiens, il fit importer de Nuremberg 300 armures, ce qui était alors rigoureusement interdit par les réglementations du métier. Sa position dominante lui permit d'ignorer l'amende qu'on lui avait infligé (M. Pfaffenbichler, 2002, p. 275).

Une autre façon d'appréhender la réalité de l'organisation professionnelle armurière réside dans l'examen des objets en eux-mêmes. La mise en évidence de leur mode de fabrication est de ce point de vue éclairante et propose à l'historien une nouvelle source d'information.

2) Chaine opératoire de fabrication des armures

Cette partie est dédiée à la présentation des différentes étapes de fabrication des armures, de la réception du métal dans l'atelier jusqu'au travaux de finitions de l'armure.

a) Filière de réduction

Pour rappel nous savons qu'il existait deux filières pour la fabrication des alliages ferreux au moins à partir du XIII^e siècle : les procédés de réduction direct et indirect. Si nous avons pu voir la part retenue par le procédé indirect pour la fabrication de barres de métal à destination de l'architecture gothique dans le paragraphe précédent, des questions spécifiques peuvent se poser relatives à son utilisation pour la production d'armures. Les armuriers répondaient en effet essentiellement à deux types de commandes : des commandes de particulier d'armures réalisées « sur mesures » et des commandes plus massives de pièces pour équiper les troupes armées. La part dédiée à ce dernier type de production a augmenté durant les XVI^e et XVII^e siècles avec la prise en charge plus accrue des gouvernements urbains, royaux et princiers, en matière d'équipements défensifs. La difficulté pour les armuriers était ici de pouvoir délivrer un nombre important de pièces (plusieurs centaines voire milliers) en un temps limité⁴⁸. Il est toutefois difficile d'évaluer les capacités de production d'un atelier compte tenu du fait que le nombre d'employés mobilisés pour la commande, les possibilités de sous-traitance ainsi que la durée précise pour honorer le contrat ne sont pas forcément connus. Cependant, on peut supposer dans ce genre de cas qu'il était souhaitable pour eux de disposer d'une quantité importante de matière première à bon prix.

Or, il faut rappeler ici qu'une fois bien implanté le procédé indirect était capable de produire du métal en grande quantité et à moindre coût (P. Dillmann and M. L'Héritier, 2017). Par conséquent il est possible de se demander si le métal issu de cette filière aurait pu être privilégié dans le cas de ces productions massives d'équipements dédiés aux troupes. C'est notamment l'hypothèse que pose A. Williams, qui a étudié un nombre important d'armures issues des principaux centres de fabrication européens (A. Williams, 2003, p. 889). Malgré de premières études sur le sujet (A. Williams, 1991; D. Starley, 1999), cette question demeure aujourd'hui toujours irrésolue.

⁴⁸ Par exemple l'Empereur Maximilien a effectué en 1495 une commande massive de 1000 pièces d'infanterie aux armuriers de Nuremberg délivrée dans l'année. D'autres commandes de volume équivalent ou supérieur ont été passées par l'Empereur aux armuriers d'Innsbruck en 1508, 1509, 1554 (A. Williams, 2003, p. 596-455–460)

b) Préparation du métal pour la fabrication des armures

L'armurier se servait de tôles en alliages ferreux, qu'il pouvait sans doute acheter ou mettre en forme lui-même. Ainsi à Paris, on rencontre le terme de « platier » au XV^e siècle, qui semble désigner un artisan se consacrant à la fabrication de plate de métal (M. Bernard, 2012, p. 119). Pour la fabrication de petites plaques de métal demandant peu de mise en forme comme pour les plaques de broigne ou de brigandine, on peut supposer qu'un martelage à la main était suffisant. Toutefois, la question est tout autre dans le cas des pièces de harnois articulé où l'épaisseur de la tôle était beaucoup plus fine. Le marteau hydraulique a ainsi pu être utilisé pour la réalisation de demi-produits sous forme de tôles à destination de l'armurerie. Ainsi, près de Tours au XV^e siècle est signalée la présence de *moulin à fourbir* encore appelés *moulin à harnois*, qui sont également rencontrés dans de nombreux autres centres de production (S. Painsonneau, 2004, p. 81). Si le fourbissage renvoie au polissage des pièces pour leur conférer un aspect lisse et brillant, il est possible que ces installations utilisaient également l'énergie hydraulique pour actionner des marteaux de forge et ainsi confectionner des tôles d'armures (P. Benoit, 1998; S. Painsonneau, 2004, p. 82).

En Italie du Nord, on peut noter la présence de *fusinae* à tôles les *fusinae a scartando* dédiées à la mise en forme de ce demi-produit. Pour J-F Belhoste leur développement est surement lié à l'importante demande en tôles dans le secteur de l'armurerie (J.-F. Belhoste, 2001, p. 551, 557). On pourra également citer les « Hammerwerke » de la région du Haut Palatinat qui produisaient entre autres des barres de fer ordinaire (« Schieneisen ») mais aussi des tôles (« Blech ») (J.-F. Belhoste, 2001, p. 550, 557).

À Nuremberg, et de façon générale dans l'empire germanique, à partir de la fin du XV^e siècle, une division du travail pour la fabrication des plates d'armures et leur mise en forme est mentionnée dans la réglementation. Les batteurs d'armure ne transformaient qu'occasionnellement le métal en tôle, le travail de mise en forme de celui-ci était dédié à une profession particulière, celle des marteleurs (*Hammermeister*) (P. Terjanian, 1995, p. 132). Les métiers de batteurs et de marteleurs semblent toutefois très liés. Les batteurs de Nuremberg ne possèdent pas d'atelier de marteleur jusqu'à la fin du XV^e siècle mais, en 1498, un batteur a obtenu le droit de posséder « un marteau ». En 1548 un document stipulait que les marteleurs, dans la mesure où ils sont de Nuremberg ou des alentours, travailleront pour les batteurs de Nuremberg afin d'éviter l'augmentation de batteurs-marteleurs. Ainsi, les marteleurs issus notamment des localités voisines de Dutzenreich et Laufenholz, devaient fournir un matériau de qualité aux armuriers nurembergeois⁴⁹. Un blason devait être apposé sur ce produit afin d'en garantir la qualité. Les batteurs nurembergeois avaient

⁴⁹ Notion de qualité du matériau dont nous reparlerons ultérieurement

interdiction de vendre ce matériau en dehors de Nuremberg. Cette mesure avait été prise dans le but d'éviter que celui-ci ne devienne un objet commercial à part entière et que des armures fabriquées avec ce matériau par des armuriers étrangers puissent être vendues de manière frauduleuse comme des pièces fabriquées à Nuremberg. Toutefois, il est précisé que l'armurier avait aussi la possibilité de fabriquer son propre matériau (F. von Reitzenstein, Alexander, 1959).

Tous ces exemples tendent à nous faire deviner l'importance stratégique de l'énergie hydraulique mis à la disposition pour le fonctionnement des marteaux et moulins hydrauliques nécessaires pour la fabrication du métal, mais également la division de gestes techniques entre différents spécialistes. L'étape suivante consistait bien évidemment à mettre en forme le métal.

c) Mise en forme des pièces

i. Généralités

Nous ne connaissons pas de texte qui décrirait précisément la fabrication des armures. La plupart des savoir-faire semble, en effet, avoir été transmis oralement, ils appartiennent donc au domaine des savoirs tacites, non écrits (C. Verna, 2017, p. 395). A défaut de texte, d'autres sources comme l'iconographie apportent un certain nombre d'éléments de réflexions, que les reproductions expérimentales et les études archéométallurgiques peuvent venir compléter. Ainsi, les données croisées à ce jour sont suffisamment nombreuses pour que nous puissions avoir une idée générale du processus d'élaboration des armures⁵⁰.

L'armurier se servait de tôles en alliages ferreux. Pour des protections comme les brigandines ou autres dérivés des cottes de plaques, les plaques de métal devaient être découpées, sommairement mises en forme, ajustées à la bonne taille puis imbriquées les unes aux autres et fixées à un support de tissu ou de cuir. La fabrication d'une armure articulée demandait un travail plus poussé de la tôle, que nous nous proposons de décrire en détails.

Des reproductions expérimentales de ces techniques a été mis en œuvre par N. Dupras lors de ces travaux de doctorat (N. Dupras, 2012). Ce dernier s'est intéressé à la fabrication des armures en Europe en se concentrant essentiellement sur celles produites entre 1400 à 1500 en Allemagne et en Italie. Son approche a consisté à réaliser un relevé méticuleux des traces de martelage encore visibles sur certaines pièces puis à proposer une restitution des techniques de mise en forme des différents éléments constituant une armure articulée. Il les a ensuite mis en application au travers

⁵⁰ C. Ffoulkes dans « The armourer and his craft from the XIth to the XVIth century » est un des premiers à s'être intéressé à cette question. Les ouvrages de C.Blair « European armour circa 1066 to circa 1700 », (C. Blair, 1958), M.Pfaffenbichler « Armourers » (M. Pfaffenbichler, 1992) et de C.Gaier « L'industrie et le commerce des armes dans les anciennes principautés belges du XIII^e à la fin du XV^e » (C. Gaier, 1995 a) proposent de bonnes synthèses quant à cette question.

d'expérimentations afin d'en tester la faisabilité. Nous allons ici résumer quelques-unes de ses conclusions.

La première étape consiste à découper la tôle à la taille souhaitée. Ceci pouvait être réalisé à l'aide de grandes cisailles. Les retouches, elles, pouvaient être effectuées au marteau et au burin. Ensuite, l'armurier devait mettre en forme cette tôle pour obtenir la pièce souhaitée. Pour ce faire il se servait de différentes enclumes et formes. L'auteur met en évidence deux principales techniques de martelage qui permettent de donner du volume à une plaque de métal :

- « Doming » : que nous traduirons par « Elévation par étirement ». La tôle est travaillée directement sur l'enclume (voir (N. Dupras, 2012))
- « Raising » : que nous traduirons par « Elévation par compression ». La tôle est travaillée au bord de l'enclume (voir (N. Dupras, 2012)). Cette technique présente l'avantage par rapport à la précédente de minimiser l'amincissement de l'épaisseur du métal

Une troisième technique pouvait être mise en application pour introduire non pas du volume mais des courbes, appelée par l'auteur « Curling » que nous traduirons par « Courbure ». La tôle pouvait être travaillée de l'extérieur comme de l'intérieur (voir (N. Dupras, 2012)).

Ensuite, une étape d'aplanissement pouvait être effectuée afin de gommer les traces de martelage (voir (N. Dupras, 2012)) elle n'était cependant pas obligatoire. Avant que prenne place le réel travail de décoration des éléments comme des cannelures ou des « plis » pouvaient être ajoutés. Les bords tranchants des pièces pouvaient être repliés sur eux même et soutenus par un fin tube de métal ou laissés creux.

ii. Comparaison des productions allemandes et italiennes

Un des principaux enjeux de la thèse de N. Dupras consistait à identifier et à classer les traces de martelage laissées par les outils utilisés par les armuriers. Ceci avait notamment deux buts principaux : d'abord comprendre comment le métal avait été travaillé, pour identifier des possibles styles de travail d'un armurier, et ainsi reconnaître une « main » ou une *signature*. Ensuite envisager d'où la pièce pouvait provenir par l'identification de marques laissées par une certaine catégorie d'armurier, une « école ».

N. Dupras a essayé de dégager des particularités dans les marques de travail laissées par les armuriers allemands et italiens. Par exemple les allemands semblent aplanir de façon moins importante les défenses de têtes étudiées (10 allemandes, 10 italiennes) ce qui laisserait des traces d'outils plus accentuées sur les pièces (N. Dupras, 2012, p. 245). Le travail de courbure (technique appelée « curling » par l'auteur), observé sur 63 éléments d'armures (32 allemandes et 31

italiennes), laisserait lui aussi des marques spécifiques. Pour l'illustrer nous avons entrepris, en nous basant sur les données relevées par N. Dupras de classer les éléments d'armures étudiés en 9 catégories (voir tableau 3) afin de pouvoir comparer les deux corpus allemand et italien étudiés.

Tableau 3 - Répartition des différents éléments étudiés par N. Dupras (N. Dupras, 2012)

Eléments	Italie	Allemagne	Eléments pris en compte
Défense de bras	5	7	"vambrace", "couter", "polder mitten", "canon", "arm"
Défense de jambe	16	3	"Legs", "Cuisse & polyen", "greave", "cuisse"
Gantelet	2	4	"Gauntlet"
Plastron	2	4	"Breastplate"
Dossière	0	7	"Backplate", "cuilet"
Epaulière	3	4	"pauldron"
Défense de tête	2	2	"Jousting helm", "Tilting helmet", "sallet", "bevor"
Chanfrein	0	1	"Chanfron"
Soleret	1	0	"Sabatons"

Sur la figure 11, une part plus importante de marques rectangulaires est effectivement remarquable dans le cas des éléments d'armures italiens pris dans leur ensemble, par rapport aux pièces allemandes qui présentent des marques plus fines et étroites. L'auteur met ici en évidence une différence d'outil utilisé. Il est toutefois à noter que ce ne sont pas les mêmes types d'éléments qui ont été comparés dans les deux cas. Les défenses de jambes sont en effet majoritaires dans le cas des pièces italiennes. Or, ce sont elles qui régulièrement semblent présenter des marques rectangulaires (voir figure 12). Ainsi, la différence observée tient peut-être aussi à ce facteur.

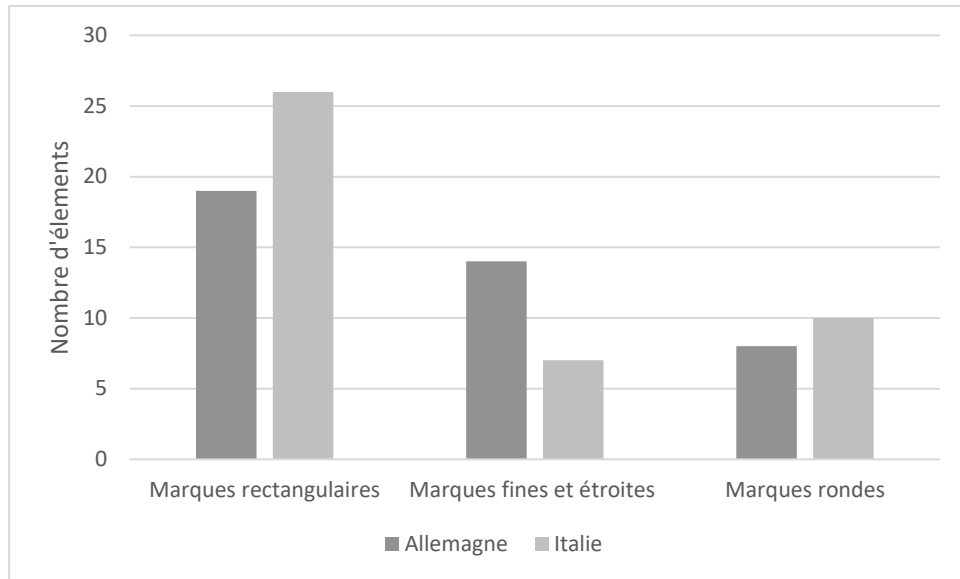


Figure 11- Répartition des types de marques relevées pour les éléments allemands et italiens. Graphique basé sur les données de (N. Dupras, 2012, p. 281)

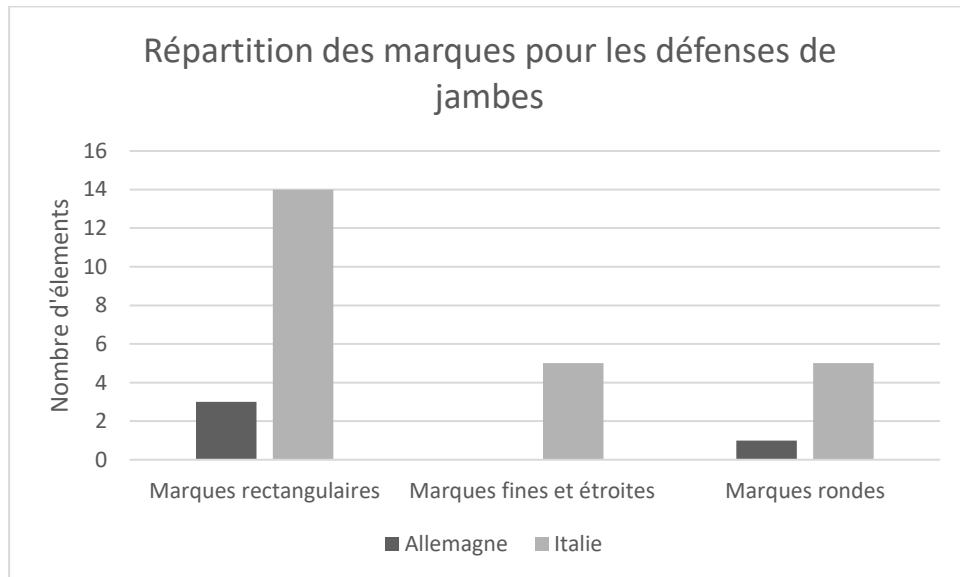


Figure 12- Répartition des marques observées pour les défenses de jambe. Graphique basé sur les données de N.Dupras (N. Dupras, 2012, p. 281)

La même remarque peut être faite par les différences observées dans la réalisation des plis et des cannelures par l'auteur (N. Dupras, 2012, p. 259). La dernière comparaison réalisée relève la présence ou l'absence de repli visible uniquement sur des défenses de tête, au centre de celles-ci que l'auteur appellent « combs ». La comparaison a été faite sur 7 pièces allemandes et 12 pièces italiennes. Les résultats visibles figure 13 montrent, comme l'auteur le constate, que les pièces allemandes présentent des marques parallèles, et qui dépassent rarement le replis effectué (matérialisé par la catégorie « Outside comb ») tandis que les exemplaires italiens portent des marques parallèles et obliques et qui peuvent dépasser la bordure du repli. N. Dupras relève également la présence de « wide bands of marks to either side » que nous traduirons par « larges

bandes de marques sur un côté » représentées par la catégorie « Marks bands », non visibles sur les éléments d'armures allemands.

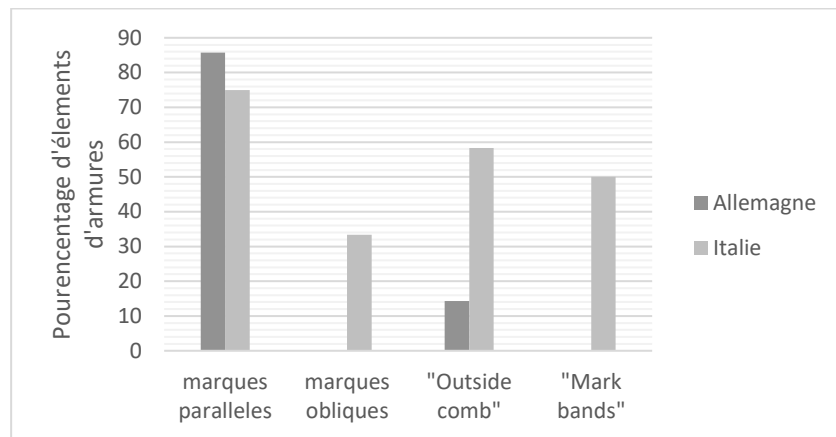


Figure 13 - Répartition des marques relevées sur les replis des défenses de tête étudiées. D'après les données de (N. Dupras, 2012, p. 284)

Ces observations tendent à mettre en évidence des différences dans les techniques de martelage ainsi que dans les outils utilisés par les armuriers. Cependant il est à regretter que ces comparaisons n'aient pas pu être menées sur un nombre plus important de pièces, afin d'augmenter la représentativité du corpus mobilisé. Par ailleurs, N. Dupras émet quelques réserves quant à la lecture des marques. L'aplanissement opéré par les armuriers peut parfois complètement effacer les traces du travail effectué, tout comme les traitements ultérieurs de restauration, ou encore les processus de corrosion. De plus, parfois plusieurs lectures des traces laissées par martelage sont possibles. Dans ce type de cas, l'auteur indique qu'il faut prendre en compte le contexte et surtout le type de pièce que l'on considère pour pouvoir trancher (N. Dupras, 2012, p. 121). Pour conclure, l'approche envisagée ici nous paraît fort intéressante du fait de son originalité et des résultats proposés. Toutefois, il semble que l'interprétation de ces marques demande d'abord un apprentissage minutieux qui passe par l'observation visuelle d'un nombre important de pièces.

iii. Une étude de cas : L'armure « AVANT »

L'armure AVANT a été étudiée par N. Dupras dans son ensemble. Armure fabriquée à Milan en 1440, elle est conservée au Musée de la ville de Glasgow. Cette armure présente l'avantage d'être d'un point de vue extérieur, très homogène et pourtant signée de la main de différents maîtres italiens. Le haut de la cuirasse a été réalisé par Giovanni Corio, le bas par Ambrogio Corio frère de Giovanni travaillant dans le même atelier, les épaulières par Bellino Corio, les défenses de bras par Dionisio Corio et les défenses de jambes par Giovanni da Garavalle, qui travaillait sous contrat pour Giovanni Corio⁵¹. Les observations de l'auteur relèvent ainsi que : alors même que Giovanni et

⁵¹ L'identification des marques a été réalisée par Boccia (L. G. Boccia, 1982)

Ambrogio travaillent dans le même atelier et sont frères, ils ont des techniques de travail bien différentes, matérialisées par les marques qu'ils ont laissées derrière eux. La partie supérieure du plastron présente des marques bien définies, combinaison de marques d'élévation par étirement de l'intérieur et d'aplanissement de la tôle. Au contraire, la partie inférieure du plastron est très lisse, révélant qu'elle a été aplanie de façon plus régulière. Pour autant, les deux ensembles de la cuirasse réalisée s'emboîtent parfaitement, tout comme les autres éléments de l'armure, pourtant travaillés différemment (N. Dupras, 2012, p. 236).

Ceci met en évidence plusieurs choses : d'abord qu'une même armure au rendu final très homogène a très bien pu être fabriquée par plusieurs armuriers. Ensuite, qu'il serait possible en étudiant de près les marques que chaque armurier a laissé, de mettre en évidence des signatures personnelles ancrées dans la matière (N. Dupras, 2012, p. 269). Toutefois, il faudrait pour cela disposer d'un corpus de pièces marquées dont l'auteur est clairement identifié pour constituer une base de données de référence. Ceci constitue en soi une première difficulté car beaucoup de pièces ne portent pas de poinçon qui permettrait d'en identifier l'origine ou le fabricant.

Les différentes techniques de mise en forme que nous venons de décrire, reflètent la complexité d'élaboration des pièces d'armures. Toutefois, la forme des pièces n'était pas le seul facteur sur lequel l'armurier pouvait travailler. En effet, dans le cas de pièces d'armement défensives comme le sont les armures, on peut supposer qu'une attention particulière pouvait être apportée à la résistance des pièces fabriquées. La présence de tests dans le cas d'*armure à l'épreuve* mentionnée dans les sources est un argument qui va dans ce sens. Pour gagner en résistance, les armuriers devaient d'une part être sensibles à la nature et à la qualité du métal utilisé, et, d'autre part, maîtriser des gestes techniques particuliers comme celui de la trempe.

d) Nature du métal

Nous n'avons que très peu de mentions dans les sources écrites qui se rapporteraient à la nature du métal utilisé pour fabriquer les armures. Les rares textes qui évoquent ce sujet sont principalement issus des différentes réglementations, et font surtout référence à des matériaux acérés. Ainsi, à Nuremberg, un document de 1497 mentionne qu'un matériau spécifique doit être utilisé pour la fabrication des armures susceptibles d'être marquées, dénommé le « Zeug » et confectionné par les marteleurs (F. von Reitzenstein, Alexander, 1959)⁵². L'interprétation du terme « Zeug » s'avère, comme nous allons le voir, complexe. Dans les sources écrites les désignations des

⁵² Cité dans Alexander von Reitzenstein, 1959. "Die Ordnung der Nürnberger Plattner", Waffen- und Kostümkunde, p. 54–73. "Alt Ordnung der platner" 1478-1509 ; " Neue Ordnung der platner " 1499-1624, Stadtarchiv Nürnberg Cod man 73.

alliages ferreux sont en effet multiples. Ces dernières peuvent faire référence, non pas à la nature ou à la qualité du demi produit, mais à l'atelier ou à la région qui l'a fabriqué (P. Dillmann, L. Pérez, and C. Verna, 2011 a, p. 22; C. Verna, 2017, p. 217–235). Une enquête approfondie du sens des mots s'avère par conséquent indispensable avant de pouvoir conclure ⁵³. C'est pourquoi nous ne présenterons ici que des pistes de réflexions.

Dans le cas du « Zeug », la réglementation précise qu'il devait être constitué « nicht anders denn von halb stählernem Zeug » que nous avons traduit par « au moins à moitié d'acier ». Toutefois l'armurier avait aussi la possibilité de fabriquer son propre matériau dénommé « gewellten Zeug », « durch das Wellen (Verschweißen) von Stahl und Eisen » que nous traduirons par « en soudant du fer avec de l'acier »⁵⁴. Il n'est pas facile de comprendre quelle était la nature exacte de ce matériau. A. Williams, qui s'est intéressé à la question, émet deux hypothèses : l'association de fer avec de l'acier pourrait suggérer qu'une soudure aurait été réalisée entre les deux matériaux lors de la forge de la tôle par l'armurier dans son propre atelier. Toutefois, la référence « à moitié d'acier » n'implique pas forcément une soudure et peut aussi renvoyer selon lui à un acier faiblement carburé (A. Williams, 2003, p. 591).

De plus s'il s'agit bien d'une soudure de plusieurs lopins de métal, on peut se demander quel aurait été l'intérêt d'utiliser ce type de matériau « mixte ». Certains auteurs suggèrent que cela aurait pu faciliter le travail de mise en forme des éléments d'armure tout en garantissant une résistance suffisante de l'objet final (P. Terjanian, 1995, p. 132). Pour d'autres, ce sont les propriétés défensives de l'armure qui en auraient été améliorées (N. Baptiste, 2016, p. 204). Ainsi, N. Baptiste argumente que le terme de « *harnois complets soudé* » ou de « *harnois soudé* » déjà évoqué, pourrait renvoyer à un mode de fabrication spécifique de ces harnois basé sur l'emploi de ce type de matériau « mixte ». Le métal utilisé serait ainsi constitué de plusieurs feuilles de métal amalgamées aux propriétés différentes, offrant un harnois à la fois résistant et souple (N. Baptiste, 2016, p. 204) L'auteur appuie cette hypothèse sur les phénomènes de délaminations observées visuellement sur toute la surface de certaines pièces armures. Pour lui ce sont les marques d'anciennes soudures donc de défauts que l'altération progressive des pièces avec le temps met en évidence. Cette hypothèse mériterait toutefois d'être vérifiée par l'examen de la structure métallographique du métal.

Dans d'autres centres, comme à Augsburg, la réglementation de 1562 établit que pour prouver la qualité des pièces réalisées le métal devait être de l'acier trempé et la pièce testée avant d'être polie (A. Williams, 2003, p. 364). A Landshut, celle de 1479 stipule que les pièces devaient être réalisées en acier (A. Williams, 2003, p. 553).

⁵³ A titre d'exemple, l'enquête menée sur le terme *merlaria* par C. Verna lui a permis de conclure qu'il désignait un produit brut issu de la réduction (C. Verna, 2001 a, p. 106–108)

⁵⁴ A. Williams y fait référence sous le terme « welded métal » (A. Williams, 2003, p. 591)

Il convient ici de faire quelques remarques. D'abord, si la réglementation fait état de la nécessité d'utiliser un matériau aciéré, cela n'implique pas forcément que ce fut le cas pour les raisons évoquées p.66. Par ailleurs l'appellation « acier » reste très vague car, comme nous l'avons vu p.47, des matériaux de qualité très diverses pouvaient circuler sur le marché du fer. A ce sujet, la référence à l'emploi d'un matériau « mixte », comme c'est le cas de Nuremberg, semble donner de plus amples indications quant à la nature du métal. Toutefois la signification exacte des termes demeure inconnue et sujette à des interprétations.

De plus qu'en est-il précisément des traitements thermiques ? Comme nous l'avons vu, les alliages ferreux peuvent subir différents traitements thermiques au cours de l'étape de fabrication des pièces. Pendant les phases de mise en forme la tôle devait être suffisamment déformée pour épouser les formes anatomiques. Or, le martelage répété du métal à froid durcit celui-ci jusqu'à le rendre très difficile à travailler. Il devait donc être nécessaire d'alterner des phases de déformation plastique avec des phases de chauffe. C'est notamment ce que précise N. Dupras, qui constate que bien que les techniques d'élévation par étirement et compression pouvaient être mises en œuvre à froid, l'armurier devait sûrement introduire des phases de chauffe dans son travail afin de pouvoir continuer à déformer le métal. Enfin, à terme, le métal pouvait subir un traitement thermique particulier pour obtenir le compromis souhaité entre résistance et ductilité du matériau. Malheureusement, là encore, aucun texte à notre connaissance ne décrit précisément les pratiques mises en place par les armuriers. Dans ce cas, ces informations ne sont accessibles qu'en allant interroger directement le métal.

La plupart des études s'étant intéressées à cette question ont privilégié les analyses métallographiques. Une autre technique, la diffraction des neutrons, a été utilisée dans quelques cas. L'étude métallographique fine du métal nécessite la prise de prélèvement de taille millimétrique sur les objets. Au contraire le principal avantage de la diffraction des neutrons réside dans le fait que ce soit une méthode non invasive, donc adaptée à l'étude d'objets patrimoniaux. Elle donne une appréciation globale de la nature des phases contenues dans le matériau, comme la ferrite, la cémentite, la martensite mais également des phases relatives aux inclusions comme la wustite ou la fayalite, et d'autres relatifs au degré de corrosion des objets (goethite, magnetite et hematite) (F. Grazi, F. Civita, and A. Williams, 2011), (A. Fedrigo et al., 2015), (S. Leever, 2006), (F. Salvemini et al., 2013), (D.-C. Creag, 2005). Toutefois elle est soumise à un certain nombre de limites non négligeables. Ainsi, elle ne révèle que la teneur moyenne des phases en présence. La structure métallographique précise de la pièce, comme la présence de matériau composite, ne peut être accessible. De plus elle ne permet pas non plus une analyse de la composition chimique des inclusions qui permet d'étudier les procédés de réduction ainsi que la provenance du métal comme

nous le verrons. Enfin, pour obtenir des résultats exploitables les analyses sont assez longues (plusieurs heures) et exigent que la pièce puisse être déplacée ce qui n'est pas toujours envisageable dans le cas de pièces de musées, c'est pourquoi les études métallographiques ont été jusqu'ici privilégiées.

Les études recensées dans la suite du paragraphe rassemblent les résultats d'analyses métallographiques de quelques pièces isolées comme (C. W. Brewer, 1981; N. Girault, 2003), et les études de A. Williams menées sur des armures produites entre le XIV^e siècle et le XVII^e siècle en Europe sur un large corpus de pièces (plus de 800 éléments), concentrées dans un ouvrage principal (A. Williams, 2003). Des informations complémentaires et spécifiques aux armures de Greenwich sont disponibles dans A. Williams and A. De Reuck (A. Williams and A. De Reuck, 1995).

i. Echantillonnage des prélèvements

Du fait de l'hétérogénéité des fers et aciers anciens les auteurs préconisent, quand c'est possible, d'échantillonner les prélèvements sur une coupe transversale (au niveau des bords d'une pièce par exemple) et de multiplier les lieux de prélèvements, même si la prise d'échantillon est souvent restreinte dans le cas de pièces muséales (A. Williams, 2003, p. 19–24). Dans le cas contraire A. Williams précise par exemple qu'il a étudié des échantillons en partie détachés de la surface à l'intérieur des pièces suite à des phénomènes de corrosion. Ainsi, il est fort possible comme le relève d'ailleurs l'auteur, que les résultats issus des échantillons qui n'ont pas pu être étudiés en coupe transversale soient de ce fait moins représentatifs de la structure globale du métal des pièces étudiées (A. Williams, 2003, p. 507).

ii. Nature du métal

Dans la littérature des alliages ferreux anciens deux éléments sont fréquemment recherchés afin de discuter de la nature du métal : le carbone et le phosphore.

Le métal a été classé en trois catégories par A. Williams en fonction du taux de carbone relevé . (A. Williams, 2003, p. 61).

- « IRON » : fer forgé avec une quantité négligeable de carbone
- « LOW-CARBON STEEL » : qui contient entre 0,1 et 0,3% de carbone
- « MEDIUM-CARBON-STEEL » : qui contient plus de 0,4% de carbone

De plus, une teneur moyenne en carbone de l'échantillon a été estimée par l'auteur, à partir de micrographies prises au microscope optique et comparées avec des atlas de métallographie, sur environ les deux tiers des échantillons. Pour ceux qui présentaient une teneur en carbone trop hétérogène cette évaluation n'a pas été faite.

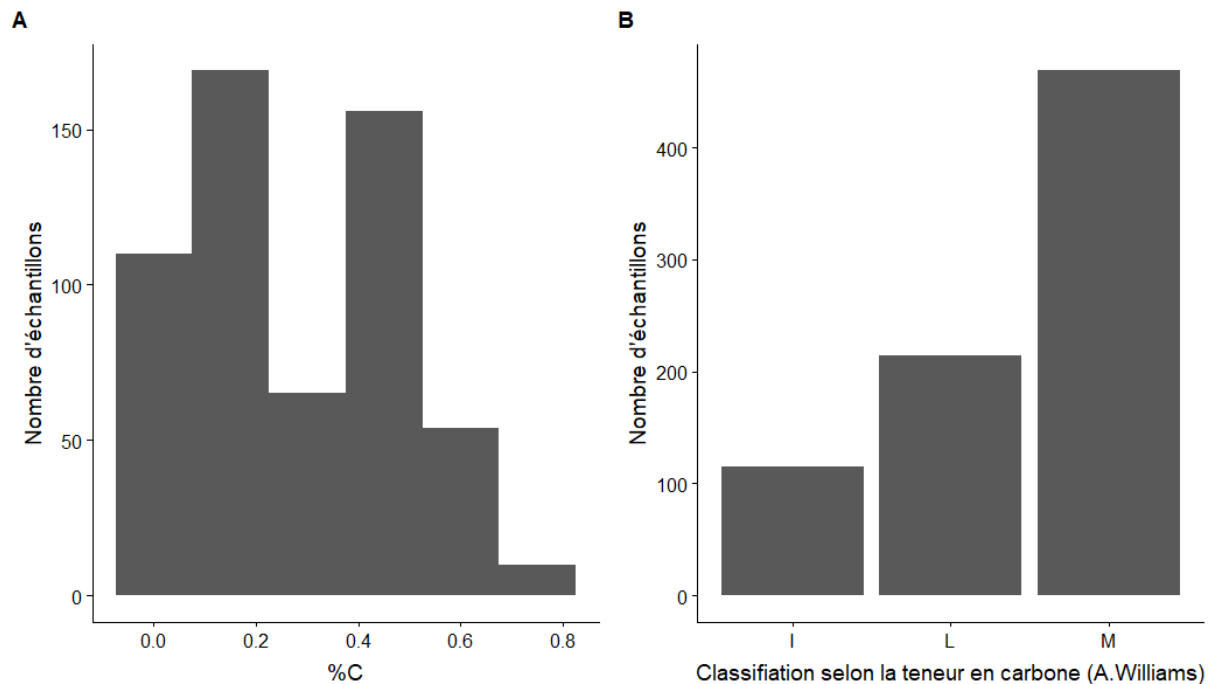


Figure 14 -Teneur en carbone sur le corpus global. A : Teneur moyenne en carbone donnée par A. Williams sur 564 échantillons. B : Classification des échantillons selon leur teneur en carbone. Graphique réalisé d'après les résultats d'A. Williams

La figure 14 présente respectivement à gauche la teneur en carbone estimée par A. Williams et à droite la classification déduite par ce dernier. La majorité des échantillons est moyennement carburée (entre 0,2% et 0,4% de carbone), les teneurs au-dessus de 0,6% restent rares.

La classification établie par l'auteur (« Iron », « Low carbon steel », « Medium carbon steel ») résume cette tendance mais présente de notre point de vue quelques inconvénients. Les aciers à teneur supérieure à 0,4% ne sont en effet pas différenciés. Or, les propriétés du métal et notamment sa dureté évoluent avec la teneur en carbone. Des spécificités en termes de choix de matériaux peuvent ainsi ne pas être mises en évidence.

Une autre étude s'est intéressée à la nature du métal de plusieurs dizaines de plaques de brigandine (79) datées du XIV^e au XV^e siècle ainsi que des plaques d'armures (11) datées entre le XV^e siècle et le XVI^e siècles issus du château de Hohenfels (Dambach, Alsace). Deux plaques de brigandine ainsi que cinq pièces d'armures : un plastron, un gorgerin, une spallière, et deux lames de braconnières ont été étudiées par métallographie en coupe transversale par N. Girault lors de ses travaux de master (N. Girault, 2003).

Un résumé des principales observations métallographiques effectuées par l'auteur sont présentées dans le tableau 4.

Tableau 4 - Résumé des principales observations métallographiques effectuées par N.Girault. D'après (N. Girault, 2003)

Désignation de la pièce	Structure observées	Indice de soudure	Structures fantômes
Plaque 50	Ferrite et une bande marginale à 0,3% de carbone		
Plaque 73	Structure composite : une bande en ferrite et une bande entre 0,3-0,4% de carbone		
Plastron (ech1)	Structure composite : une bande de ferrite et une bande entre 0,2-0,4% de carbone	X	
Plastron (ech2)	Acier à hauteur de 0,1% et une bande marginale à 0,3% de carbone		
Gorgerin (ech1)	Ferrite Deux feuilles de métal		X
Gorgerin (ech2)	Ferrite Deux feuilles de métal	X	X
Spallière	Acier à 0,5-0,7% de carbone Une bande marginale à 0,3% de carbone		
Braconnière 15 (Lame supérieure)	Acier homogène entre 0,3 et 0,4% de carbone		
Braconnière 15 (Lame inférieure)	Structure composite : une bande de ferrite et une bande entre 0,2-0,3% de carbone		
Braconnière 16	Structure composite : une bande de ferrite et une bande entre 0,2 de carbone	X	X

Les résultats révèlent un métal faiblement à moyennement carburé sans traitement thermique particulier évident. Seule la spallière semble ici faire exception avec un taux de carbone plus élevé à hauteur de 0,6%.

De plus, la présence de phosphore est détectée sur trois des échantillons étudiés. Ceci prouve que du fer phosphoreux pouvait être employé pour la réalisation de pièces d'armures. La présence de phosphore ne semble malheureusement pas avoir été systématiquement recherchée par A. Williams sur les objets étudiés (A. Williams, 2003, p. 23). Néanmoins, l'auteur a analysé la composition de la matrice métallique de 68 échantillons par MEB-EDS. Des teneurs notables en phosphore supérieures ou égales à 0,1%mass ont été détectées sur 7 d'entre eux (3 armures italiennes et 4 allemandes), preuve que du fer phosphoreux pouvait être utilisé (A. Williams, 1991). Toutefois la part de ce type de matériau semble difficile à estimer.

iii. Hétérogénéité du métal

L'hétérogénéité du métal à l'échelle d'une même tôle d'armure peut être estimée lorsque plusieurs échantillons ont été effectués sur une même pièce. N. Girault a ainsi révélé des hétérogénéités structurelles sur différentes pièces étudiées. Ainsi, sur le gorgerin, les deux échantillons prélevés sont de nature ferritique tandis que, sur le plastron, l'un présente une structure « composite » de ferrite et d'acier, l'autre est un acier d'une bonne homogénéité de teneur en carbone (autour de 0,1%). Ceci pose la question de la représentativité d'un seul prélèvement par objet. Ensuite à l'échelle de l'échantillon l'hétérogénéité du métal est importante à considérer car elle peut parfois être rapprochée, non pas de l'hétérogénéité de la loupe initiale mais d'une qualité spécifique de métal utilisé (voir p.47).

La classification de A. Williams présentée (« Iron », « Low-carbon steel », « Medium-carbon-steel » ne rend malheureusement pas compte de l'hétérogénéité en teneur en carbone du métal⁵⁵. Cependant, sur une quarantaine d'échantillons, l'auteur a relevé la présence de structures métallographiques particulières constituées de plusieurs bandes de métal en teneur en carbone différentes qu'il a appelé « banded steel ». La micrographie présentée par l'auteur p. 373 montre un échantillon présentant deux bandes de métal distinctes. La bande la plus claire correspond à de la ferrite, la plus foncée à un mélange de martensite et de ferrite donc à un acier moyennement carburé et trempé (A. Williams, 2003, p. 373). L'alignement d'inclusions au centre pourrait être le résultat d'une soudure de deux lopins de métal différents. Toutefois, il n'est pas possible d'en être certain sans avoir pu analyser la composition chimique des inclusions.

Ce type de microstructure rappelle la description du « Zeug » nurembergeois ou encore du « gewellten Zeug » que les armuriers avaient le droit de fabriquer eux-mêmes en « soudant » du fer avec de l'acier (voir p.77). A. Williams a notamment montré que sur les 12 échantillons d'armures qu'il a étudié, associées à l'armurier Lorenz Helmschmied, les trois quarts présentaient ce type de structures (A. Williams, 2003, p. 361). Cependant, ce type de matériau a été rencontré par l'auteur aussi bien dans des armures allemandes qu'italiennes, preuve que ce n'est pas *a priori* une spécificité d'un seul centre de fabrication. De plus, ces structures ne sont détectables que sur un échantillon observé en coupe transversale, ce qui n'a pas pu être le cas pour l'ensemble des prélèvements étudiés par l'auteur. Ainsi, il est possible que ces dernières soient présentes sur un nombre plus important de pièces.

Des structures de ce type, qualifiées de « composite » ont également été mises en évidence par N. Girault sur trois éléments. Elles se présentent sous la forme de bandes de fer et d'acier

⁵⁵ Pour rendre compte de ce phénomène une solution aurait été de considérer une moyenne pondérée par la surface comme celle décrite p.40

nettement séparées, dont les positions sur les faces extérieures ou intérieures des pièces varient. N. Girault émet l'hypothèse qu'elles pourraient être le résultat d'une cémentation d'un lopin initial de métal qui aurait été ensuite aplani, effaçant ainsi les traces du gradient de teneur en carbone. Toutefois, il pourrait aussi s'agir d'une soudure de deux lopins ou de deux tôles de métal. Malheureusement, sans analyse inclusionnaire, il apparaît difficile de trancher sur la question, ce que précise d'ailleurs l'auteur (N. Girault, 2003).

iv. Traitements thermiques

N. Girault a mis en évidence des phénomènes de décarburation en surface de plusieurs plaques d'armure. Il les attribue à une chauffe de la pièce qui aurait pu être effectuée afin de déposer un métal protecteur comme l'étain. Ceci aurait aussi pu provoquer la recristallisation des grains de ferrite à cet endroit qui apparaissent peu écrouis (N. Girault, 2003, p. 109). En revanche, aucune occurrence de trempe n'a été mise en évidence par l'auteur.

A. Williams a classé les traitements thermiques relevés en différentes catégories (A. Williams, 2003, p. 17)

- « FULL -QUENCHING » : correspond à une vitesse de refroidissement très élevée formant une structure de martensite complète, (avec parfois des zones ferritiques là où la teneur en carbone n'était pas suffisante pour former de la martensite). Généralement cette structure est observée pour une trempe réalisée dans de l'eau.
- « FULL –QUENCHING AND TEMPERING » L'étape précédente augmente considérablement la dureté du métal et donc peut le rendre cassant. C'est pourquoi elle est très généralement suivie d'un revenu afin d'abaisser les tensions enregistrées dans le matériau.
- « OVERTEMPERING » : lorsque le revenu est trop poussé, cela a pour effet d'annuler complètement les effets de durcissements de la trempe. A l'issue de ce type de traitement, on obtient une structure de particules de cémentite globulaire dispersées dans la matrice métallique. Toutefois, l'auteur signale que ce type de structure peut ressembler très fortement à celle de la perlite globulaire obtenue après recuit (A. Williams, 2003, p. 438).
- « SLACK-QUENCHING » : correspond à une vitesse de refroidissement élevée formant des structures variables comme de la perlite fine, de la bainite ou encore de la martensite. Ce type de structure peut être observé lorsque le métal est refroidi dans un autre liquide que l'eau (comme de l'huile, ou du plomb fondu), ou lorsque la trempe n'est pas opérée immédiatement ou est interrompue ce qui peut se traduire par exemple par plusieurs va-et-vient dans le liquide. Cette technique présente l'avantage de réduire le risque de cassure en introduisant des phases moins dures que la martensite. Par ailleurs, la dureté obtenue étant

inférieure à celle obtenue dans le cas d'une trempe « complète » l'opération de revenu était inutile. L'auteur précise toutefois que si la teneur en carbone est hétérogène dans le métal alors la durée nécessaire pour former de la martensite sera variable, par conséquent les microstructures observées peuvent aussi varier en fonction de la teneur en carbone de l'échantillon dans l'échantillon et pas uniquement en fonction de la façon d'opérer la trempe (A. Williams, 2003, p. 18).

Partant de ces considérations A. Williams définit trois grands ensembles (A. Williams, 2003, p. 61) :

- Les aciers « HARDENED » : « H » qui auront subi un traitement thermique « efficace » pour les durcir. Généralement une structure de martensite complète est observée.
- Les aciers « ATTEMPTED-HARDENING » : « T » qui auront subi un traitement thermique dans le but de les durcir mais qui ne présentent pas une structure de trempe complète. Le métal peut comporter une ou plusieurs des phases suivantes : perlite très fine, perlite nodulaire, bainite ou encore martensite.
- Si aucune des structures décrites n'a été relevé le métal est supposé « AIR-COOLED » : « A » refroidi à l'air par l'auteur.

Nous avons relevé que ce dernier range dans la catégorie « T » les structures de perlite très fine observées. Lorsque cette dernière n'a pas pu être résolue au microscope, il mentionne alors la présence d'« irresolvable carbides ». Or, pour observer de telles structures le refroidissement dans un liquide ne semble pas obligatoire, dans certains cas, un refroidissement à l'air peut suffire à les observer (A. Williams, 2003, p. 691). Par conséquent s'il est vrai que la présence de perlite très fine témoigne d'un refroidissement plus rapide que s'il était réalisé lentement dans les conditions d'un diagramme d'équilibre, il nous apparaît difficile de s'assurer que ces structures témoignent réellement d'un acte délibéré pour durcir le matériau.

La figure 15 présente la distribution des traitements thermiques basée sur la classification développée par A. Williams sur l'ensemble du corpus étudié. Il apparaît qu'une majorité des échantillons n'a pas subi de traitement thermique particulier destiné à durcir le métal. La part d'acier ayant subi une trempe atteint toutefois les 50% pour les échantillons du XV^e siècle. Elle diminue ensuite progressivement jusqu'au XVII^e siècle.

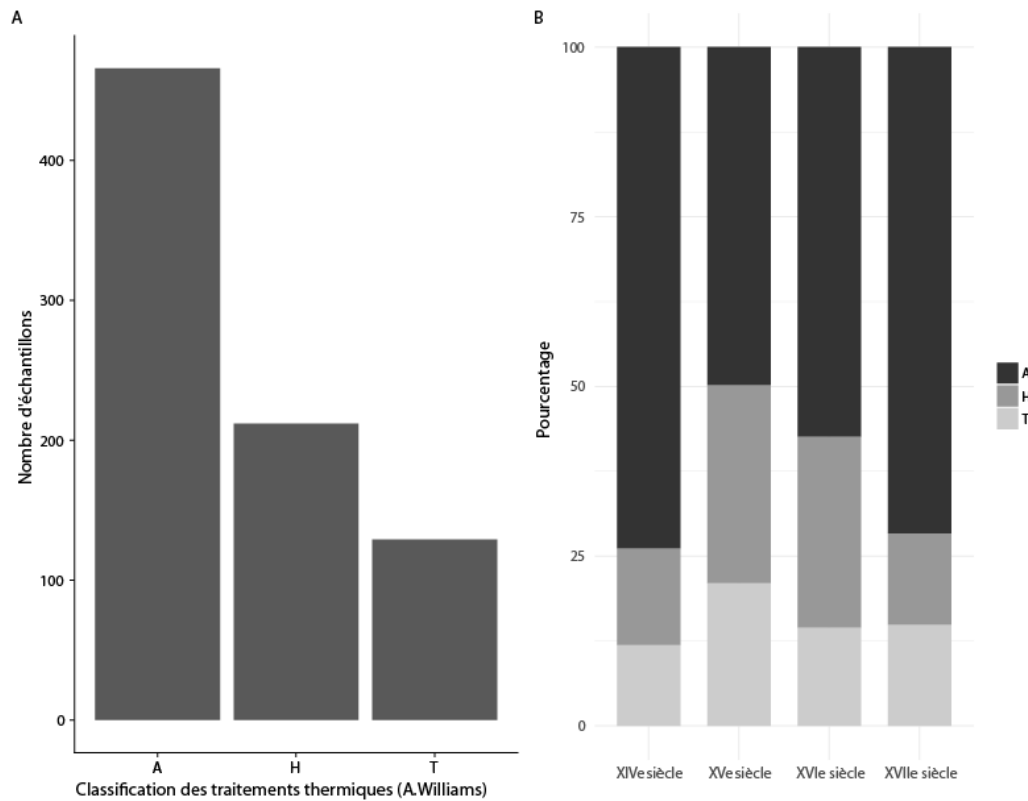


Figure 15 - Distribution des traitements thermiques sur l'ensemble du corpus (A) et en fonction de la période d'étude (B) d'après les études de A. Williams « A » air cooled, H : « Hardened », « T » « Attempted-hardening »

v. Dureté du métal

A. Williams a pu effectuer des analyses de microdureté Vickers (A. Williams, 2003, p. 5) sur environ un tiers des échantillons analysés. Une dizaine de mesures a été effectuée et une moyenne a été calculée.

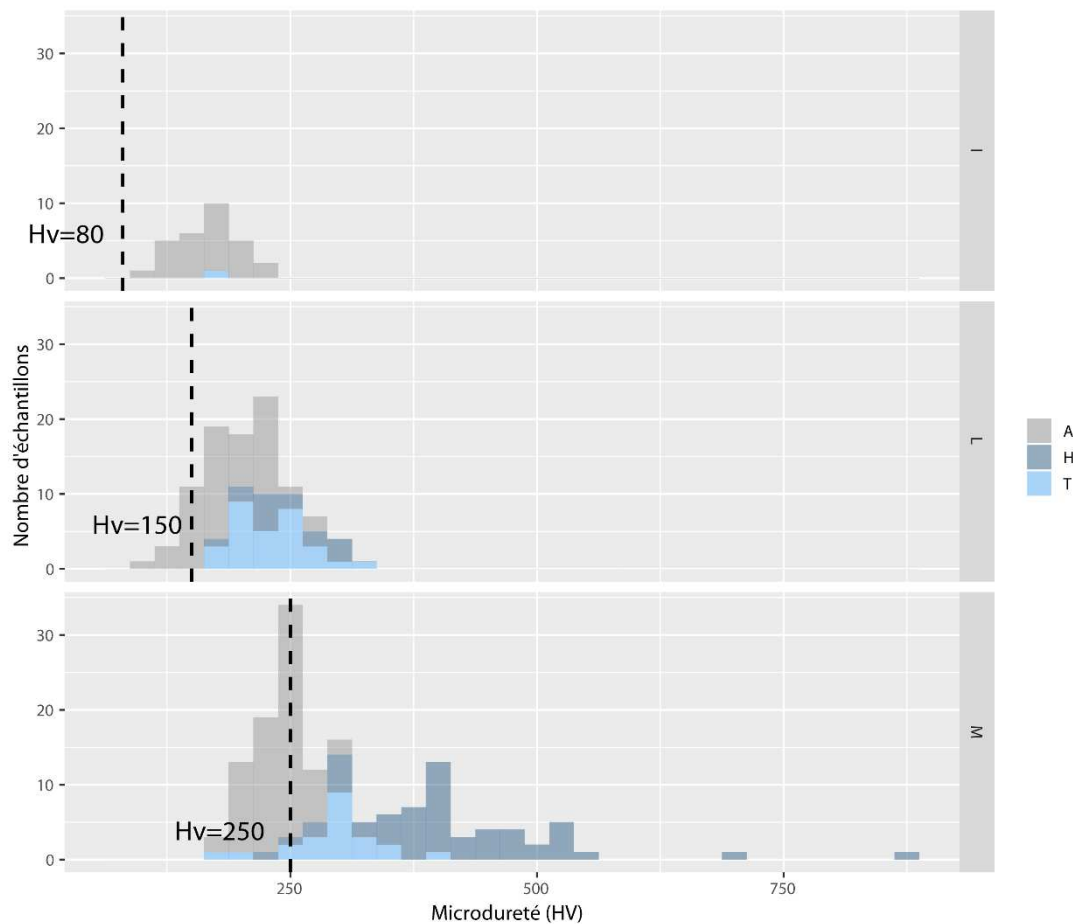


Figure 16 - Distribution de la microdureté Vickers mesurée avec une masse de 100g, en fonction du taux de carbone et du traitement thermique relevés par A. Williams « I » : Iron, « L » : Low carbon steel, « M » : Medium carbon steel. En pointillé valeurs attendues pour des alliages homogènes (V. F. Buchwald, 2005, p. 67). « A » air cooled, H : « Hardened », « T » « Attempted-hardening »

La figure 16 présente la distribution des duretés observées en fonction du taux de carbone contenu dans le métal et du traitement thermique appliqué. La catégorie « I » recense les matériaux très faiblement carburés (<0,1% de carbone). La dureté de ce type de métal, s'il est homogène, est de l'ordre de 80 à 100Hv (V. F. Buchwald, 2005, p. 67). On est alors surpris de constater que l'ensemble des échantillons analysés possède une dureté au moins supérieure à 100Hv et plutôt centrée autour de 150 Hv. Certains échantillons possèdent même une dureté très importante pour de la ferrite, supérieure à 200Hv. A. Williams a émis plusieurs hypothèses pour expliquer ce phénomène. Par exemple pour l'échantillon HJRA406 c'est pour lui le taux d'inclusions très important qui pourrait expliquer une augmentation de la dureté (Hv=179), rendant le métal plus fragile (A. Williams, 2003, p. 313). Pourtant, sur la micrographie présentée, le métal comporte sur une moitié de l'échantillon de larges grains de ferrite dépourvus d'inclusions. De plus, l'auteur ne précise pas si cette dureté importante a été relevée sur une partie de la surface de l'échantillon seulement ou sur sa totalité. Par ailleurs, les taux d'inclusions n'ont pas été quantifiés de manière systématique, ce qui ne permet pas de s'assurer du rôle de ces impuretés sur les propriétés physiques du matériau.

La dureté élevée du métal pourrait aussi être causée par un refroidissement par trempe suivi d'un vieillissement du matériau, soit un léger revenu, comme l'auteur l'argumente pour l'échantillon CH 13 issu d'un bassin italien daté de 1360, où il note la présence de carbures difficiles à résoudre (A. Williams, 2003, p. 69). Le vieillissement par trempe est un phénomène recensé en métallurgie moderne dans les aciers (M. Grumbach, 1993). Il consiste à chauffer le métal dans le domaine ferritique, aux environs de 700°C, température où la solubilité du carbone est grande, puis à effectuer un retour à l'équilibre par un refroidissement rapide. Le refroidissement brutal maintient une partie du carbone en sursaturation et, si un léger revenu autour de 100°C est effectué, les atomes peuvent venir se rassembler autour des dislocations, précipitant sous la forme de carbures de fer (M. Grumbach, 1993) et provoquant une augmentation de la dureté du métal. Toutefois, si la chauffe est trop poussée en temps ou en température un phénomène de survieillissement peut avoir lieu contribuant à annuler l'effet de trempe.

Ce phénomène est notamment gouverné par la taille des précipités qui peuvent se former. Quand la taille de ces derniers augmente, la dureté globale du matériau diminue. Les carbures basse température ou carbures epsilon submicrométriques sont responsables d'une augmentation de la dureté tandis que les carbures grossiers et la cémentite intragranulaire provoquent un adoucissement de la matrice (N. Lavoie, 2001, p. 40).

Une étude des années 50 s'était intéressée à ce phénomène (J. D. Fast, 1950). Elle revêt pour nous un intérêt particulier car les essais de vieillissement ont été effectués sur du fer à bas taux de carbone ($\%C < 0,1$) ne comportant pas d'autres éléments d'alliages comme c'est le cas pour les aciers modernes. Les résultats montrent qu'une augmentation maximale de la dureté (189 Hv) est notable pour des aciers contenant 0,04% de carbone suite à un maintien à 100°C.

Par conséquent, il apparaît tout à fait possible que les armuriers aient effectué ce type de traitement thermique sur des matériaux à bas taux de carbone, ce qui pourrait expliquer la dureté importante observée pour certains échantillons. Toutefois, pour s'en assurer, il faudrait prouver la présence de ces carbures submicrométriques autour des dislocations.

Sur la figure 16, la catégorie des « Low carbon Steel » possède des duretés comprises entre 100 et 300Hv pour les aciers trempés. Enfin, la catégorie des « Medium carbon steel » (dont la dureté typique d'un acier homogène à 0,5-0,7 % de carbone pourrait se situer autour de 250 Hv), possède un domaine d'existence très étendu de 170 à 868 Hv, mais centré autour de 250. La présence d'acier avec une dureté supérieure à 500Hv reste très exceptionnelle. Au-delà de 500Hv l'acier devait en effet surement être considéré comme trop cassant et donc impropre pour l'usage qui lui était réservé, comme le suppose l'auteur (A. Williams, 2003, p. 156).

La nature du métal utilisé, tout comme les traitements thermiques appliqués pour la fabrication des armures pouvaient ainsi être variables, comme l'ont montré les études présentées. A. Williams a tenté de comparer la nature des productions allemandes et italiennes, afin de mettre en évidence d'éventuelles spécificités.

vi. Comparaison des productions allemandes et italiennes

A. Williams a mis en évidence une importante baisse de matériaux trempés au XVI^e siècle (plus de 95% de métal non trempé), qui n'est pas observée sur les pièces de fabrication allemande (voir figure 17).

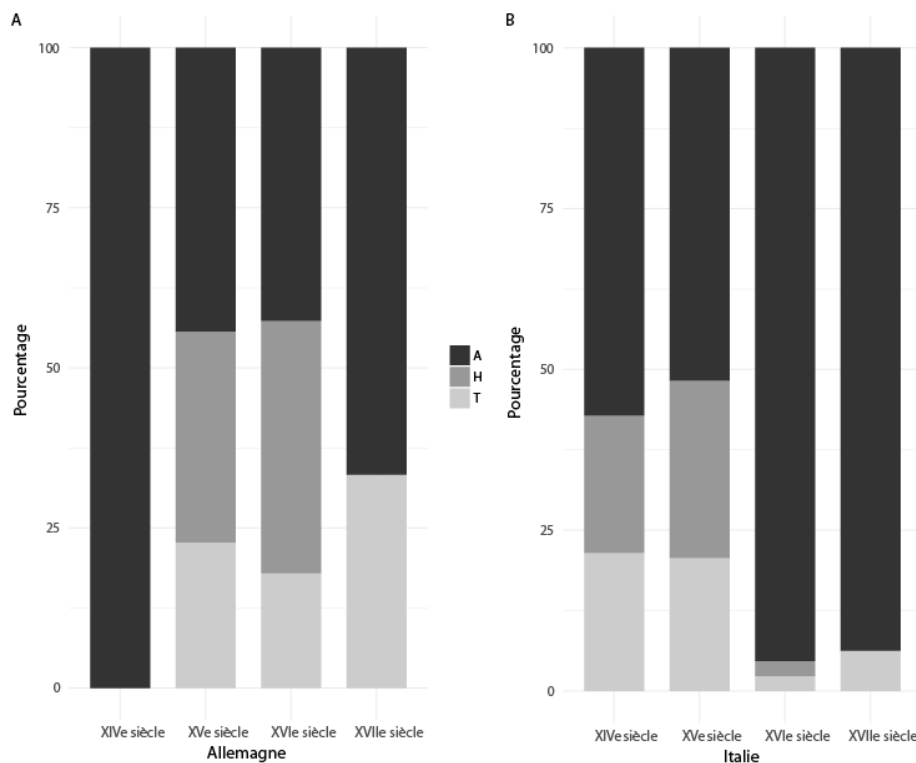


Figure 17 - Evolution des procédés de trempe mis en jeu pour les échantillons étudiés en fonction de la période, d'après les données de A. Williams. « A » air cooled, H : « Hardened », « T » « Attempted-hardening »

L'auteur a essayé d'expliquer ce constat. La quasi-totalité des armures italiennes du corpus du XVI^e siècle présentant des dorures, il a établi un parallèle entre le peu d'occurrences de trempe au XVI^e siècle et la mise en place de la dorure au mercure dont la pratique se serait généralisée à la fin du XV^e siècle (A. Williams, 2003, p. 203). Cette technique nécessite la chauffe de l'amalgame or/mercure déposé sur la pièce aux alentours de 300°C pour évaporer ce dernier. Aussi, les armuriers italiens auraient peut-être estimé incompatible cette opération avec la trempe du métal, la chauffe en abaissant inévitablement la dureté. Ainsi au XVI^e siècle la priorité de leurs clients reposant davantage sur l'esthétique de la pièce fabriquée que sur sa solidité, ils auraient simplement jugés inutile de tremper le métal (A. Williams, 2003, p. 203).

Au contraire, l'auteur mentionne qu'en Allemagne on rencontre plus fréquemment des armures dorées et trempées. Il explique ceci par une différence dans la manière d'opérer la trempe. Les armuriers allemands auraient privilégié la trempe par « Full Quenching and tempering » au contraire des armuriers italiens qui auraient davantage utilisé la trempe par « Slack Quenching ». Dans le cas des pièces allemandes, l'opération de revenu après trempe aurait ainsi été couplée avec celle de la dorure au mercure, afin d'éviter d'annuler complètement les effets du durcissement par refroidissement rapide, l'adoucissement du métal étant plus facile à contrôler durant une opération de revenu que durant une trempe par « Slack Quenching ». Toutefois, pour déterminer si le travail de dorure peut avoir un lien avec le traitement thermique appliqué, ce qui peut sembler probable, il faudrait pour cela vérifier que c'est bien une dorure au mercure qui a été appliquée sur chacune des armures étudiées.

De plus, d'un point de vue métallographique, A. Williams différencie l'opération de « Slack Quenching » de celle du « Full Quenching and tempering » par la variabilité des structures métallographiques observées dans l'échantillon. La présence de perlite, notamment, indiquerait que la trempe n'a pas été complète. Toutefois, comme précisé précédemment, des structures hétérogènes de trempe peuvent apparaître lorsque le métal, lui-même possède une teneur hétérogène en carbone, elles ne dépendent donc pas uniquement de la manière d'opérer la trempe. De plus, des hétérogénéités de trempe ont également été relevées à plusieurs reprises par l'auteur dans le cas d'armures allemandes comme pour le gantelet Chi3633 (A. Williams, 2003, p. 518). Par conséquent, il apparaît difficile de relier de façon certaine ces observations métallographiques à un traitement thermique italien spécifique. Enfin, il n'est pas exclu que les différences observées entre ces deux régions de production soient causées par un effet de corpus. La taille du corpus italien étudié par l'auteur pour le XV^e siècle, qui comprend l'essentiel des échantillons trempés, étant deux fois moins importante que celle de l'Allemagne au XVI^e siècle.

A. Williams a aussi cherché à comparer les productions des villes de fabrication, principalement celles des villes allemandes. Il apparaît que Nuremberg présente la part de matériaux les moins carburés aussi bien au XV^e siècle qu'au XVI^e siècle par rapport à ses voisines Augsbourg, Innsbruck ou Landshut, où les aciers moyennement carburés sont très majoritaires (classe « M »). De plus, la ville de Nuremberg semble n'avoir que peu pratiqué l'opération de trempe sur ses pièces par rapport aux villes de d'Augsbourg, Innsbruck ou Landshut (voir figure 18).

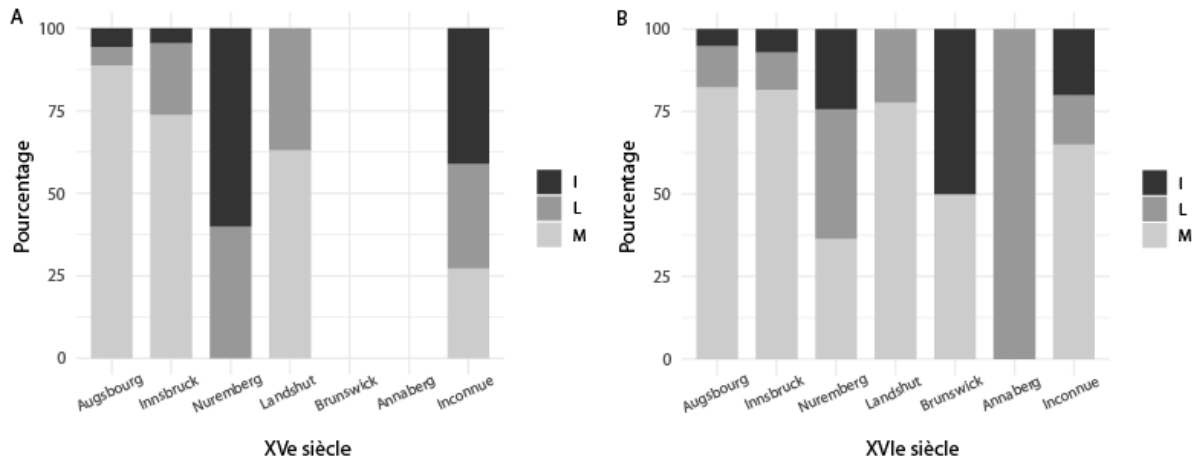


Figure 18 - Evolution de la teneur en carbone (catégories I « Iron », L « Low carbon steel », M « medium carbon steel ») des échantillons étudiés dans les villes de production allemandes pour les XVe et XVIe siècles. D'après les résultats d'A. Williams

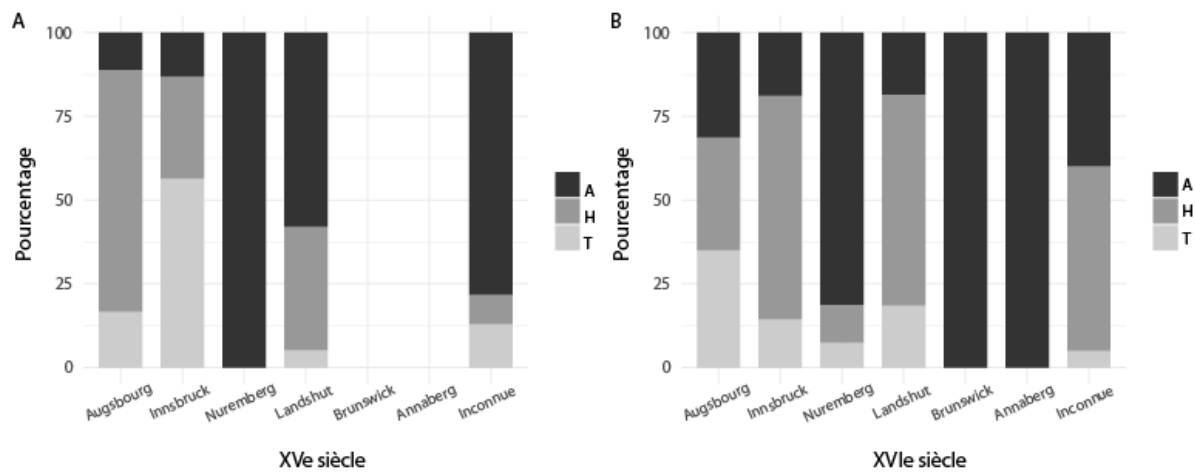


Figure 19 - Evolution des procédés de trempe mis en jeu pour les échantillons étudiés dans les villes de production allemandes. D'après les résultats d'A. Williams. « A » air cooled, H : « Hardened », « T » « Attempted-hardening »

Les trois quarts des armures de Nuremberg étudiées par l'auteur portent une marque de la ville ou d'un armurier. L'auteur relève la part importante de métal ferritique ou faiblement carburé sur ces pièces, ce qui est en contradiction avec les réglementations connues précisant qu'un matériau constitué « à moitié d'acier » devait être utilisé (A. Williams, 2003, p. 593). De plus, les armures de munitions, destinées à l'infanterie, seraient davantage fabriquées à partir d'un métal faiblement carburé (A. Williams, 2003, p. 593–597). Il émet ainsi l'hypothèse que des armures de basse qualité fabriquées en dehors de la ville auraient pu être importées par des armuriers et revendues avec une marque de Nuremberg après avoir peut-être subi une amélioration sommaire, bien que cela semble également prohibé par la réglementation (A. Williams, 2003, p. 597). Toutefois, il faudrait pouvoir déterminer la provenance du métal pour conforter cette hypothèse.

vii. Une étude de cas : L'armure « AVANT »

A. Williams a eu l'opportunité d'étudier plusieurs éléments d'une même armure et notamment l'armure AVANT, déjà présentée et étudiée par N. Dupras (A. Williams, 2003, p. 79–87). 9 prélèvements ont été réalisés et étudiés en coupe transversale. Les résultats sont rassemblés sur le tableau 5. L'ensemble des éléments présente une bonne homogénéité du point de vue de la teneur en carbone, excepté pour deux d'entre eux. L'échantillon 2, qui révèle un taux de carbone nettement supérieur (0,7) et l'échantillon 1, nettement inférieur aux autres (0,1). A. Williams suppose que le métal de l'échantillon 2, très carburé, a sûrement été jugé comme d'une trop grande dureté par rapport aux autres, c'est pourquoi il aurait subi un léger revenu. Toutefois, aucune mesure de dureté n'a malheureusement pu être réalisée sur les éléments de cette armure pour confirmer cette hypothèse. De plus, sur l'ensemble des éléments étudiés, 8 sont identifiés comme « HARDENED », tandis qu'un seul semble avoir été refroidi à l'air libre (l'échantillon 2). Toutefois, l'échantillon 3 est le seul des échantillons classés dans la catégorie « HARDENED » (A. Williams, 2003, p. 62) à ne pas présenter des structures typiques de trempe comme la martensite.

Par ailleurs, aucun prélèvement n'a pu être réalisé sur la partie fabriquée par Ambrogio Corio, par conséquent les observations faites par N. Dupras sur les parties supérieure et inférieure du plastron ne peuvent pas malheureusement être vérifiées du point de vue de la métallographie. L'armure semble présenter une relative homogénéité dans son ensemble, comme le fait remarquer l'auteur. De son point de vue, il est cohérent que les pièces produites par un même armurier soient toutes traitées de la même façon. Il va même plus loin, suggérant que même si les éléments d'une même armure étaient réalisés par des ateliers différents, l'armurier qui assemblait la pièce donnait à toutes les parties le même traitement thermique final (A. Williams, 2003, p. 25).

Cela semble être effectivement le cas pour les parties réalisées par Dionisio Corio (défenses du bras) et Giovanni da Garavalle (défenses des jambes), qui semblent très homogènes du point de vue de la nature et de la qualité du métal (acier moyennement carburé et trempé). Toutefois, cela ne semble pas être applicable pour les pièces signées par Bellino Corio. Sur les trois éléments marqués de son poinçon, trois structures différentes de métal sont observées : un acier fortement carburé, un acier très faiblement carburé ainsi qu'un acier moyennement carburé et trempé. Si N. Dupras avait mis en évidence des différences dans la manière de mettre en forme le métal entre armuriers, ici, il semble qu'un même armurier (ou son atelier) ait utilisé des matériaux de qualité variable et qu'il a thermiquement traité différemment.

Bien que l'auteur ne le mentionne pas, ces différences de pratiques pourraient correspondre à des pratiques d'ateliers distinctes, à une différence d'approvisionnements en métal ou encore être liées à l'usage des diverses parties de l'armure. Les analyses de dureté auraient pu amener des

précisions supplémentaires pour caractériser ces matériaux, il est regrettable qu'elles n'aient pas pu être menées dans ce cas.

Pour conclure, de notre point de vue, ces résultats montrent que différentes pratiques d'ateliers peuvent exister. L'armure peut présenter un rendu final très homogène alors même que le métal utilisé pour fabriquer l'ensemble des pièces pourra avoir été choisi et travaillé de façon différente. Par conséquent, ces analyses révèlent l'intérêt de multiplier les lieux de prélèvements sur une même armure. Ces observations n'auraient en effet pas pu être faites si un seul prélèvement avait été effectué.

Tableau 5 - Caractéristiques des différents éléments de l'armure AVANT. D'après les résultats donnés par A. Williams (A. Williams, 2003, p. 62), « A » air cooled, H : « Hardened », « T » « Attempted-hardening » (A. Williams, 2003, p. 81–87)

Numéro d'échantillon	Nom de l'échantillon	Élément d'armure étudié	Armurier	%C	Traitements thermiques	Phases observées
1	39-65e br	Plastron	Giovanni Corio	0,4	H	Martensite et Ferrite
2	39-65e rp	Epaulière droite	Bellino Corio	0,7	A	Perlite et Carbures globulaires
3	39-65e lp	Epaulière gauche	Bellino Corio	0,1	H	Ferrite et Carbures
4	39-65e lpr	Epaulière gauche (partie de renforcement)	Bellino Corio	>0,4	H	Martensite et Ferrite
5	39-65e ler	Défense du coude	Dionisio Corio	>0,4	H	Martensite, Perlite nodulaire et Ferrite
6	39-65e lv	Avant-bras gauche	Dionisio Corio	0,5	H	Martensite et Ferrite
7	39-65e rv	Avant-bras droit	Dionisio Corio	0,5	H	Martensite et Ferrite
8	39-65e lc	Cuissard gauche	Giovanni da Garavalle	0,4	H	Martensite et Ferrite
9	39-65e lg	Jambière	Giovanni da Garavalle	0,5	H	Martensite

D'autres armures ont fait l'objet d'une analyse métallographique de plusieurs éléments (A. Williams, 2003, p. 25). Des hétérogénéités en termes de microstructure et de dureté sont très souvent recensées. L'auteur les attribue à l'hétérogénéité du métal utilisé. Toutefois, compte tenu de la diversité des produits circulant dans le marché du fer, il nous semble aussi possible qu'elles puissent être liées à des pratiques d'ateliers ou à des approvisionnements en métal différents. Une étude de provenance des matériaux utilisés pourrait permettre d'éclairer ce dernier point.

e) Finitions, décorations et assemblage

. Le polissage permettait d'offrir à l'armure un état de surface lisse et brillant, d'ailleurs responsable de l'aspect des fameux « harnois blancs » où le métal était apparent. Cette étape pouvait être réalisée manuellement à l'aide de limes de tailles différentes ou de meules hydrauliques dans des *moulin à fourbir* ou encore appelés *moulin à harnois* (S. Painsonneau, 2004, p. 81).

Par la suite le type et la richesse des décorations dépendaient évidemment de la nature de la commande. Ainsi, les armures réalisées pour les hommes de troupe ou pour les combattants les moins aisés ne recevaient qu'une décoration sommaire voire aucune décoration. N. Dupras indique qu'il existe trois types de décorations. Les méthodes dites « additives » qui vont ajouter de la matière, celles dites « réductives » qui vont en ôter, et celles qui vont travailler le métal par martelage.

Les méthodes additives consistent à appliquer sur l'élément d'armure un composé comme des alliages d'or de cuivre ou encore une peinture. Par exemple le brunissage de certaines pièces peut être le résultat d'un dépôt de noir de fumée mélangée à de l'huile qui a été évaporée (M. Pfaffenbichler, 1992), ou bien, simplement, d'une peinture ou d'un vernis. Ce type de pratique pouvait servir à dissimuler les surfaces imparfaites non polies, comme dans le cas des armures de lansquenets (P. Terjanian, 1995, p. 111). Parfois, différentes couches pouvaient être superposées. C'est le cas d'une dorure particulière allemande de la fin du XVe siècle appelée « Goldschmelz » décrite par M. Pfaffenbichler. Une fine couche de cuivre était déposée pour faciliter l'adhésion de l'or sur le fer, puis par-dessus, un amalgame d'or et de mercure. Le mercure était ensuite progressivement évaporé, laissant l'or adhérer à la surface pour obtenir la dorure finale.

Les méthodes réductives consistent, elles, à creuser la matière comme par exemple dans le cas d'une gravure. Cette dernière pouvait être réalisée à l'acide ou à l'aide d'outils tranchants pour inciser le métal. Enfin, le métal pouvait être travaillé par repoussage et ciselure. Cette méthode consiste à enfoncer le matériau pour produire des décors en relief. Ensuite, ceux-ci étaient généralement embellis par la technique de la damasquinerie. Une série de traits entrecroisés gravés au burin était réalisée puis de fins fils d'or ou d'argent étaient martelés par-dessus pour donner une impression de fins motifs incrustés dans l'acier (O. Renaudeau, 2011).

A ces trois grandes familles de méthodes décoratives, nous souhaitons ajouter les traitements thermiques qui pouvaient conférer une couleur particulière au métal dans un but uniquement esthétique. A ce titre, l'aspect dit « bleu » était particulièrement recherché. Pour obtenir cette couleur, le métal devait être chauffé aux environs de 320°C puis immédiatement trempé (M. Pfaffenbichler, 1992). Par ailleurs, il n'est pas certain que l'ensemble de ces décorations était réalisé par les armuriers eux-mêmes. On sait par exemple que les armuriers parisiens ont noués

des liens étroits avec certains orfèvres qui savaient travailler l'acier ou encore avec des peintres (G.-M. Leproux, 2011).

Une fois les décorations achevées, on procédait à l'assemblage des différents éléments aux moyens de rivets et de sangles. Dans le cas des pièces les plus luxueuses une véritable production sur mesure était réalisée. Un parfait ajustement du harnois à son propriétaire était en effet recherché, qui devait sans doute nécessiter des prises de mesures au préalable et quelques retouches avant le rendu final. Cependant dans le cas des armures plus communes, un tel soin n'était pas recherché. S. Painsonneau suggère à ce sujet que, dans le cas des commandes royales destinées à équiper les combattants du roi, les armuriers tourangeaux devaient produire des harnois de différentes tailles qui pouvaient ensuite être ajustés au moyen de sangles à chacun de ses futurs propriétaires (S. Painsonneau, 2004, p. 74). Cette hypothèse rejoint celle de C. Gaier qui va même jusqu'à avancer à ce sujet que les boutiques des armuriers devaient renfermer des harnois pré-fabriqués en différentes tailles qu'il qualifie de « prêt à porter », destinés à la majorité des hommes d'armes (C. Gaier, 1995 b, p. 275).

f) La question du recyclage et du emploi

Cette question est intéressante à aborder dans le cas des pièces d'armures pour plusieurs raisons. L'armure a en effet pu appartenir à différents propriétaires, et à ce titre, a pu faire l'objet d'ajustements. Ainsi, on sait que l'équipement militaire comme les pièces défensives était régulièrement récupéré sur les champs de bataille pour être réutilisé (P. Contamine, 2002, p. 12). De plus, l'étude de certains testaments du XIV^e siècle a révélé que les armures apparaissaient à titre de legs. Les armes et armures étaient en effet considérées comme des biens précieux et pouvaient être transmises à au moins un des membres de la famille (F. Lachaud, 2002). Un autre indice de réutilisation de pièces est matérialisé par une formule relevée par S. Painsonneau. Cette formule est employée par les habitants de Loches demandant aux habitants de Tours de leur prêter du « vieil harnois », « pour s'armer et défendre la ville, armement qu'ils promettent de rendre une fois le danger passé » (S. Painsonneau, 2004, p. 78). Même s'il est difficile de savoir précisément ce qui se cache derrière cette appellation, on imagine qu'elle peut désigner un matériel d'occasion mais sans doute fonctionnel, puisque les habitants doivent le restituer. A Paris, M. Bernard fait référence à un chaudronnier qui essaye de revendre une salade usagée qu'il a tenté de remettre au « goût du jour » (M. Bernard, 2012, p. 213). Ces quelques exemples révèlent bien qu'un marché de l'occasion existait en matière de pièces défensives, pas nécessairement tenu par les armuriers eux-mêmes. Si la réutilisation de pièces d'armure semble probable, qu'en est-il du recyclage ? Comment le mettre en évidence ?

La pratique du remploi et du recyclage des alliages ferreux a déjà été relevée au Moyen Âge, notamment dans l'architecture gothique (M. L'Héritier and P. Dillmann, 2009). Les auteurs distinguent ainsi trois types de remplois d'objets et un type de recyclage que nous avons choisi de reprendre ici :

- Type 1 : Le remploi d'un objet sans changement de forme (réutilisation de l'objet tel quel dans un autre contexte)
- Type 2 : Le remploi d'un objet sans changement de volume mais un changement de forme (modifications partielles de l'objet)
- Type 3 : Remploi de pièces différentes par leur soudage à chaud pour réaliser un objet de plus grandes dimensions.
- Type 4 : Recyclage des métaux ferreux par récupération de lopins de métal de taille plus ou moins grande, pour les placer dans un foyer, les souder ensemble et ainsi recréer une forme. A l'issue de l'opération on obtient une loupe de fer poreuse qu'il faudra marteler de la même façon que lors de l'étape d'épuration d'une loupe de la réduction. Cette opération engendre une perte de matière mais fait économiser l'opération de réduction du minerai. À l'époque qui nous occupe, la métallurgie du fer ne sait en effet pas atteindre le point de fusion de ce métal. Par conséquent les pratiques de fusion des matériaux ferreux sont à exclure dans le cadre du recyclage

Un indice mis en évidence par ces auteurs de la présence de fer de remploi dans les sources historiques est donné par la mise en œuvre de « vieux fers » dans des comptes de fabriques. Toutefois, cette appellation ne permet pas de savoir de quel type de récupération il s'agit. Pour en avoir une meilleure idée, deux types de démarches sont mises en place. La première dite « Analyse formelle » consiste à observer l'objet pour détecter d'éventuelles traces de son ancien emploi. La deuxième appelée « Analyse du métal » repose sur l'analyse métallographique et inclusionnaire du métal.

Ainsi une hétérogénéité marquée de la teneur en carbone dans l'objet de part et d'autre d'une ligne de soudure, ou la variation de la teneur en phosphore peuvent donner de premières pistes quant à un possible recyclage. Toutefois, l'analyse inclusionnaire, parce qu'elle va être capable, selon la méthode présentée auparavant, de déterminer des groupes d'inclusions de compositions chimiques distinctes (voir p. 41), s'avère être ici le plus puissant des outils. Ainsi, elle va permettre de mettre en évidence la présence de soudure, ou de lopins de métal d'origines différentes, qui pourraient, dans le cas de cette étude, signer un remploi de type 3 voire 4. Les positions des lopins et des soudures permettent ensuite de faire la distinction entre ces deux

derniers types. En conclusion, les auteurs estiment que le fer recyclé par agglomération et corroyage ou ajout de matière représente au moins 10% des usages des fers dans les bâtiments étudiés (M. L'Héritier and P. Dillmann, 2009).

Le remploi de type 2, défini par les auteurs dans le cas de fers employés dans l'architecture gothique, pourrait ainsi refléter la réparation des armures. S. Painsonneau évoque, par exemple, le cas de brigandines *relevées et mises au point* (S. Painsonneau, 2004, p. 84). Par contre, nous n'avons pas, à notre connaissance, de preuve qui traduirait la remise en forme complète d'un élément d'armure obsolète pour en fabriquer un nouveau. Cette hypothèse n'est toutefois pas à écarter. De même, il est possible que des tôles d'armures aient été récupérées et transformées pour un autre usage. C'est l'hypothèse que formule une étude pour la réalisation de ventilations planes percées de trous (T. Lazar et al., 2016).

Si ces types de remplois ont sans doute été courants, ils ne viennent pas directement perturber la signature chimique du métal. Mais qu'en est-il du recyclage ? A. Williams émet à ce sujet une hypothèse concernant le métal « Zeug » que les armuriers nurembergeois ont le droit de fabriquer dans leur propre atelier en « soudant » du fer avec de l'acier. Pour lui, si un marteau hydraulique n'était pas nécessaire pour réaliser ce matériau celui-ci devait déjà être sous forme de tôle. Cette dernière pouvait provenir de pièces d'armures obsolètes ou de chutes de tôles qui étaient recyclées et qui auraient été soudées entre elles (A. Williams, 2003, p. 591). Par conséquent si les armuriers pouvaient effectivement retransformer des armures endommagées, ou des morceaux de tôles potentiellement issues de provenance diverses, ceci tendrait à complexifier la signature chimique du métal final. Toutefois, ces opérations devraient pouvoir être détectées au moins en partie si des analyses inclusionnaires sont menées.

3) Bilan

a) **Organisation du travail**

Nous venons de voir au terme de cette partie que la nature des productions tout comme la réglementation des différents centres de fabrication d'armures étaient diverses. Compte tenu de ces informations, qu'est-il possible de conclure à ce stade sur les pratiques d'ateliers et l'organisation du travail ?

La réglementation milanaise ne traite pas de la question de la spécialisation. Les maîtres milanais à la tête de leur atelier sont donc *a priori* capables de réaliser n'importe quelle pièce qui constitue une armure. Pour autant leurs ouvriers semblent eux plus spécialisés. Pour preuve, F. Menant cite plusieurs contrats d'embauche qui spécifient que l'employé sera affecté à la réalisation d'une tâche ou d'une pièce particulière (F. Menant, 1988, p. 143). Une autre façon d'apprécier ce phénomène consiste à regarder la liste des personnes requises à l'ouverture d'un nouvel atelier. En 1592 à la demande des Medici qui souhaitent se voir attribuer ses services, Giacomo Filippo Piatti explique que pour fabriquer une armure complète une douzaine d'hommes lui est nécessaire, à savoir : « deux hommes pour le plastron de première forge, un pour les brassards, un pour la salade (en plus des brunisseurs et de nombreux garçons d'atelier) ». Cependant il est possible que ces mentions estiment simplement le nombre d'hommes nécessaire à la réalisation des différentes tâches. Giacomo Filippo Piatti précise également que sa propre personne ne peut pas être comptée dans la liste car il ne peut accomplir aucune tâche de sa main, étant trop occupé à superviser le travail des autres armuriers qui travaillent dans son atelier (S. Leydi, 2003, p. 33). La division du travail et la supervision des maîtres sont ainsi devinées dans les poinçons retrouvés sur certaines pièces où l'ouvrier et le maître qui a dirigé la réalisation de l'ensemble des pièces ont pu chacun apposer leur poinçon (F. Menant, 1988, p. 143).

Toutefois, en l'absence de telles marques, Sylvio Leydi souligne ici la difficulté d'identifier la *signature* d'un atelier quand plusieurs mains sont inévitablement intervenues avec, sans doute, leurs savoir-faire propres. Le contrôle du maître ne devait surement pas toujours suffire à produire une armure d'une homogénéité finale parfaite entre tous ses éléments. Enfin, l'association entre différents ateliers avait également cours à Milan. Elle a pu être mise en évidence à plusieurs reprises notamment pour répondre à des commandes importantes (F. Menant, 1988, p. 144). L'armure dite « AVANT » en est aussi un très bon exemple. Cette dernière présente extérieurement une remarquable homogénéité. Pour autant, elle est signée de la main de différents maîtres. N. Dupras a tenté de mettre en évidence des spécificités dans la mise en forme du métal par chacun des armuriers. Toutefois, l'identification de *signature* par cette voie reste aujourd'hui délicate en l'absence de corpus de référence. Ce type de spécificité pourrait être dégagé en étudiant la nature

du métal d'armures produites dans un même atelier ou par le même maître. Ainsi, pour l'armurier Lorenz Helmschmied, A. Williams a pu relever que sur 12 échantillons d'armures produites de sa main, les trois quarts présentaient des structures en bandes de fer et d'acier. Toutefois, ce type de matériau semble aussi avoir été employé dans d'autres centres, il ne peut donc pas constituer une *signature* en soi pour identifier un atelier.

A l'instar des armuriers italiens, d'autres centres semblent aussi avoir adopté une certaine polyvalence des armuriers. Ainsi d'après Marion Bernard, il est fort probable que les ateliers parisiens loin d'être ultra spécialisés ou cantonnés à la réalisation d'un élément d'armure en particulier avaient adopté cette organisation, en dépit de ce que les appellations professionnelles, trop réductrices, pourraient laisser croire au premier abord (M. Bernard, 2015, p. 67). Même s'il devait exister une forme de fractionnement des tâches au sein des ateliers, il est « plus juste de l'envisager comme un mécanisme naturel d'adaptation et d'optimisation de la production » (M. Bernard, 2015, p. 67). Les maîtres à la tête des ateliers importants devaient certainement garder une certaine forme de polyvalence.

La réglementation de Nuremberg présente une vision de la gestion des ateliers très différente. Leur taille semble bien plus faible qu'à Milan, puisque la réglementation empêchait la formation de grands ateliers à l'instar des armuriers italiens. La ville comptait en tout cas un nombre très élevé de maîtres batteurs, estimé rappelons-le à 200 au XVI^e siècle⁵⁶. La spécialisation des maîtres à la tête de leurs ateliers pour la réalisation d'un élément d'armure particulier, semble encouragée par les réglementations qui plébiscitaient manifestement l'association entre ateliers pour la production d'armures complètes. La qualité des produits finis est, elle, garantie par la marque de l'armurier mais aussi et parfois uniquement par la marque de la ville, preuve que le travail des armuriers semble ici plus encadré. Cependant, ce cadre normatif pourrait être nuancé, notamment par les analyses métallographiques effectuées par A. Williams, qui tendent à montrer qu'un grand nombre de pièces marquées étaient pourtant fabriquées en fer alors que seules les pièces réalisées en acier devaient l'être selon la réglementation.

Pour conclure, que ce soit au sein même des ateliers, ou du fait de l'association de plusieurs ateliers, pour la fabrication massive d'équipement de guerre comme pour celle à forte valeur ajoutée, la réalisation des armures passait par une multitude de mains différentes. Ainsi, la complexité de l'armure semble de nouveau transparaître quand il s'agit de sa fabrication.

⁵⁶ En comparaison à la même période S. Leydi estime que le nombre de maîtres propriétaires de leurs ateliers ne dépassait pas la cinquantaine au plus (S. Leydi, 2003)

b) Spécificités techniques et centres de production

Nous avons vu dans la partie précédente, qui présentait les principaux centres de production, que certains d'entre eux avaient connu un rayonnement plus retentissant que d'autres. Un des arguments avancés pour expliquer un tel contraste de réussite repose sur le savoir-faire des grands maîtres armuriers italiens et allemands, qui produisaient des pièces de meilleure qualité. En gage de cela on trouve les nombreuses mentions des contemporains qui en louent la supériorité (M. Bernard, 2012, p. 331). Cet argument est également étayé par le débauchage d'armuriers issus de ces régions par les dirigeants de l'époque. Ainsi, sous l'impulsion d'une volonté politique, des armuriers issus de Lombardie, des terres d'Empire mais également de Flandre furent vivement encouragés à venir s'installer à Tours pour en développer la production armurière durant les XV^e siècle et XVI^e siècle (S. Painsonneau, 2004, p. 25; E. Reppel, 2008). Henri VIII a effectué la même démarche auprès d'armuriers milanais et également bruxellois pour le centre de Greenwich (A. Williams and A. De Reuck, 1995, p. 27).

De façon générale, les armuriers font effectivement partie d'une catégorie de métier très recherchés à laquelle on attribue une grande valeur. Les armuriers détiennent, en effet, des connaissances techniques particulières, nécessaires à la bonne exécution de leur travail, acquises durant un long apprentissage (C. Billot, 1988, p. 227; F. Menant, 1988, p. 143). De plus, la guerre à la fin du Moyen Âge occupe une place de premier plan. Les métiers de l'armement sont par conséquent reconnus comme indispensables. Toutefois, on ne peut pas nier la plus grande notoriété dont jouissent à la fois les marchandises et les fabricants de certains centres de production. Un des éléments qui le prouve est relatif à l'importance de leurs exportations, notamment en ce qui concerne les commandes massives d'éléments d'armures à destination de l'armée. Ainsi en nous basant sur la définition donnée par Ph. Braunstein, nous nous trouverions en présence dans ce cas d'une véritable industrie de fabrication d'armures. En effet, pour lui « ce qui distingue l'industrie de l'artisanat à toute époque c'est la commercialisation d'une production massive en série de qualité constante » et il ajoute « l'industrie c'est l'esprit d'entreprise, le sens de l'organisation, le goût pour l'innovation » (P. Braunstein, 1998, p. 25–27). Comment expliquer ces différences de réussite des différents centres armuriers européens ?

C. Gaier qui a comparé la production des anciennes « principautés belges » à celle de ses voisins germaniques et surtout italiens pose la question en ces termes : « L'hypothèse d'un écart technologique doit-elle être envisagée ? » (C. Gaier, 1973, p. 314). Si tel est le cas des preuves de la virtuosité du travail de ces armuriers devraient avoir été conservées dans la matière et permettraient de les différencier des autres productions. Les analyses métallographiques montrent que les armuriers des centres de plus grande importance que sont l'Italie du Nord et l'Allemagne du Sud savaient sans aucun doute tirer parti de la nature du métal employé pour obtenir la résistance

souhaitée des pièces, puisqu'ils maîtrisaient et appliquaient un certain nombre de gestes techniques comme les opérations de trempe destinées à durcir le métal. Cependant les productions des centres en dehors de l'Allemagne et l'Italie n'ont été que très peu étudiées. Ainsi, rien ne prouve qu'ils étaient les seuls à savoir le faire, ni que ce type de savoir-faire ait conditionné leur réussite. Toutefois l'absence de réels corpus de comparaison pour les autres centres de fabrication nous empêche ce jour de répondre à cette question.

D'autres critères sont avancés par plusieurs auteurs pour expliquer ces différences de notoriété. Reprenons à ce propos un exemple de Ph. Braunstein. Ce dernier indique que le phénomène publicitaire n'est sans doute pas à négliger dans la réussite des Allemands dans le secteur de la mine et la métallurgie (P. Braunstein, 2003, p. 69), phénomène qui a aussi pu jouer un rôle dans le domaine de l'armurerie. Pour C. Gaier, le succès économique de certains centres tiendrait plus à une meilleure organisation du travail et de l'écoulement des produits qu'à une supériorité d'ordre technique (C. Gaier, 1995 b, p. 315). Enfin, pour M. Pfaffenbichler, l'implantation géographique a également eu sans doute un rôle conséquent. La disponibilité en matières premières (fer/charbon), l'accès aux routes internationales de commerce mais également à l'eau pour actionner les marteaux hydrauliques et les moulins de polissage sont tout autant de facteurs à prendre en compte (M. Pfaffenbichler, 1992, p. 13).

Par conséquent, pour cerner ces différents enjeux, il nous semble à présent nécessaire de nous intéresser plus finement à la provenance de la matière première utilisée par les armuriers pour la fabrication de leurs pièces, à savoir le métal.

IV. Approvisionnement en matières premières

1) Les sources d'approvisionnement

Que savons-nous de l'approvisionnement en métal des armuriers ? Il est à noter que les données dont nous disposons sont inégales en fonction des régions considérées. Si la ville de Milan connaît une situation géographique très favorable, grâce à la présence d'une activité sidérurgique très dynamique en Lombardie, les réseaux d'approvisionnements de villes armurières françaises comme Paris ou Tours restent beaucoup plus flous. Aussi, nous nous proposons de voir tour à tour le cas des villes de Milan, de Cologne puis de Nuremberg pour lesquels nous disposons de sources plus abondantes. Nous verrons ensuite qu'il est possible de se tourner vers les réseaux marchands du fer et de ses dérivés afin d'établir des pistes de réflexions pour les centres dont les approvisionnements sont moins bien connus.

a) Milan et la Lombardie

Au moins à partir du XIII^e siècle, la Lombardie constitue une des zones majeures de production sidérurgique au Moyen Âge, qui s'ouvre à un commerce interrégional et international (F. Menant, 1988; P. Contamine et al., 2003, p. 181). Les sites où est exploité le minerai communiquent en particulier avec les grandes villes que sont Bergame et Brescia (P. Braunstein, 2003, p. 180). Pour autant ces villes ne vont jamais réussir à dominer la production de leurs vallées : le grand marché du fer se tenait ainsi en Valcamonica à Pisogne. Toutefois, Milan exerçait une influence toute autre et draine vers elle une grande partie de l'activité métallurgique de la région, et notamment celles de la Brianza et de Busto Arsizio (F. Menant, 1988, p. 140). C. Gaier précise qu'il est toutefois difficile d'identifier précisément les productions qui venaient de l'arrière-pays, qu'il s'agisse de minerais, de métaux ou encore de demi-produits tant les activités commerciales et industrielles des villes et des campagnes étaient enchevêtrées (C. Gaier, 1995 b, p. 245). Néanmoins, il est clair que les dérivés aciérés trouvent un de leur principaux débouchés dans l'armement, et notamment dans la fabrication des armures (F. Menant, 1988, p. 133; J.-F. Belhoste, 2001, p. 555). Dès lors, le secteur de l'armement et celui de la métallurgie du fer semblent très liés, ce qui n'est guère surprenant.

Certains armuriers lombards ont ainsi compris tout l'intérêt que revêtait le contrôle de cette matière première abondante et de grande qualité. La famille Missaglia fait à ce sujet figure d'exemple. Les Missaglia apparaissent à Milan à la fin du XIV^e siècle et vont devenir les armuriers milanais les plus connus du XV^e siècle. La réussite de leurs affaires et le soutien ducal leur a permis de ne pas se limiter à la seule production d'armures. Ainsi, ils ont obtenu le droit d'exploiter deux sites

miniers, et vont établir aux alentours de 1460 des forges entre Côme et Lecco, qui produisaient de l'acier (F. Menant, 1988, p. 142; J.-F. Belhoste, 2001, p. 567).

De plus, le métal produit dans les vallées avait également vocation à voyager loin. Il était ainsi expédié vers Gênes, qui le redistribuait dans toute la méditerranée. On le retrouve à Narbonne et à Barcelone (R.-H. Bautier, 1960, p. 10)⁵⁷. Il était également exporté vers le nord par les cols alpins pour y gagner la Bourgogne et peut-être Paris et la Flandre. On devait sans doute le retrouver également sur les routes qui menaient à l'Allemagne du Sud (J.-F. Belhoste, 2001, p. 549). Toutefois, à travers l'exemple de Brescia, Ph. Braunstein a souligné le problème majeur que pose le commerce à longue distance de l'acier : celui d'assurer un approvisionnement régulier. L'auteur relève ainsi les difficultés rencontrées par Lorenzo Ciampelli à Brescia pour fournir les quantités de produits demandés par la compagnie Datini à Pise. Les quantités disponibles pour l'exportation peuvent, en effet, être faibles et leur appropriation soumise à une forte concurrence (P. Braunstein, 2001).

D'autres régions produisaient également un acier réputé, comme celle du massif rhénan, distribuée dans la ville de Cologne.

b) Cologne et le massif rhénan

La région autour de Cologne produisait entre le XIII^e siècle et le XV^e siècle un acier sans doute aussi abondant et réputé que celui des vallées bergamasques et brescienes (J.-F. Belhoste, 2001, p. 548). Le minerai était principalement issu du Siegerland et du Westerwald, dans le massif rhénan (C. Gaier, 1973, p. 197). Le système du *Verlag* établit des relations entre les villes industrielles de petites et moyennes importances et la ville de Cologne. Selon ce système, les produits semi-finis sont fournis aux métiers organisés de Cologne, et des approvisionnements sont programmés en fonction d'une demande lointaine sous contrôle des marchands (P. Braunstein, 2003, p. 59). Le fer issu de cette région faisait également l'objet d'un important commerce vers les Pays Bas, la France mais aussi l'Angleterre (C. Gaier, 1973, p. 197)

Les armuriers de Cologne se fournissaient en métal directement dans la ville, dans un lieu appelé *Kaufhaus*, et n'avaient pas le droit de l'acheter en dehors (P. Terjanian, 2005). Il est probable, qu'au cours de ces ventes, en plus du métal issu de la région ils aient eu accès à celui d'autres centres sidérurgiques de production comme la Styrie, via une autre ville au commerce florissant : Nuremberg.

⁵⁷ On le retrouve également aux péages suisses (F. Morenzoni, 2001). La mention de « fer de Lombardie » est aussi rencontrée à Albi dans la deuxième moitié du XIV^e siècle (A. Vidal, 1906, p. 224) et (C. Verna, 2001 a)

c) Nuremberg et le Haut Palatinat

Nuremberg est également situé non loin d'un espace sidérurgique prospère, celui des massifs miniers du Haut-Palatinat. Le minerai extrait était riche en phosphore (V. F. Buchwald, 2008, p. 211). La ville d'Amberg et de Sulzach accordèrent dès le XIV^e siècle un certain nombre de privilèges aux « Hammer masters » produisant le métal, notamment à travers la signature d'un accord en 1387. Selon ce dernier, le procédé de réduction direct « Rennfeuerbetrieb » était le seul procédé de réduction autorisé (V. F. Buchwald, 2008, p. 211). Les « Hammerwerke » de la région produisaient des barres de fer ordinaire de différentes épaisseurs (« Schieneisen »), des tôles (« Blech ») et tout une gamme d'autres produits (J.-F. Belhoste, 2001, p. 550, 557; V. F. Buchwald, 2008, p. 213). Si la production de fer sous forme de barre ou de tôle semble attestée, en revanche ce n'est pas le cas de celle de l'acier (P. Braunstein and E. Landsteiner, 2011, p. 430). Toutefois, comme nous l'avons vu, les qualités des fers et aciers anciens étaient très variables et les désignations pour identifier ces produits également (P. Dillmann, L. Pérez, and C. Verna, 2011 a). Par conséquent, que l'acier ne soit pas explicitement nommé ne signifie pas pour autant que la région ne produisait pas des alliages aciérés.

La production, la transformation et la distribution du fer issus des martelleries du Haut Palatinat étaient également organisées selon le système du *Verlag* (W. von Stromer, 1991, p. 46). Les armuriers de Nuremberg bénéficiaient d'une relation très privilégiée avec cet espace sidérurgique. En effet, l'article de A-F von. Reitzenstein sur la réglementation des armuriers nurembourgeois précise que le matériau était principalement issu de la région du « Oberpfalz », le Haut Palatinat. Ensuite, il était transformé par les marteleurs en tôles et, enfin, livré aux armuriers (F. von Reitzenstein, Alexander, 1959). Or, comme nous l'avons déjà évoqué, si l'on se réfère à la réglementation, les marteleurs devaient fournir un métal constitué « au moins à moitié d'acier ». Par conséquent si le métal était bien issu du Haut Palatinat ceci, confirmerait que des matériaux aciérés devaient y être produits même s'ils n'étaient pas distribués sous la mention explicite d'acier (voir p.47). Il est aussi possible que les marteleurs utilisaient du fer issu des martelleries et de l'acier importé d'une autre région.

En effet les gisements du Haut Palatinat n'étaient sûrement pas les seules sources d'approvisionnement de la ville. Du métal semble également avoir été importé de Styrie (A. Williams, 2003, p. 590). Une grande zone de production d'acier était présente autour de l'Erzberg au XV^e siècle (J.-F. Belhoste, 2001, p. 547). On sait que les marchands de Nuremberg ont entretenu d'étroites relations avec le district d'Innerberg au XVI^e et XVII^e siècles, pour le commerce de l'acier (P. Braunstein and E. Landsteiner, 2011)

Les autres centres de production de l'Allemagne du Sud déjà cités comme Augsbourg devaient sûrement bénéficier de ces sources d'approvisionnements proches et de qualité. Par ailleurs on sait que les armuriers d'Innsbruck faisaient venir au XVI^e siècle des tôles d'armures « harnischblech » de la ville de Leoben en Autriche (A. Williams, 2003, p. 459) et possédaient vraisemblablement un accès facilité au fer de Styrie (M. Pfaffenbichler, 1992, p. 17)

d) Les autres centres

Pour les centres de production secondaires l'origine du métal demeure plus incertaine. Soit parce que ces centres bénéficiaient d'une situation géographique moins favorable, soit parce que l'on n'a malheureusement pas gardé trace de la provenance exacte des matériaux utilisés, qui n'était pas forcément précisée (M. Bernard, 2012, p. 204). La diversité des produits métallurgiques qui circulaient devaient toutefois offrir aux armuriers d'abondantes sources d'approvisionnements. En effet du fer était produit dans nombre de régions d'Europe.

Le « fer d'Espagne » est ainsi fréquemment rencontré dans les sources. Bien que l'on ne sache pas à quoi précisément fait référence cette appellation, il qualifie le fer distribué par les Basques vers le nord de l'Europe, et semble avoir eu une réputation de grande qualité (C. Gaier, 1973, p. 197; S. Painsonneau, 2004, p. 80; M. Bernard, 2012, p. 204; C. Verna, 2017, p. 227–232). C. Gaier précise qu'à partir du XIV^e siècle il est considéré comme le meilleur du marché, pour preuve les contrefaçons dont il faisait l'objet. Il est même tenu pour supérieur au fer allemand. En effet, le fer issu de Cologne était également répandu et pourrait avoir été utilisé pour la fabrication des armures (C. Gaier, 1973, p. 197; M. Bernard, 2012, p. 205). Un autre candidat potentiel cité par ces auteurs est le fer normand⁵⁸. À Paris, par exemple, bien que la provenance du métal ne soit pas précisée, l'essentiel du métal importé l'est par des marchands normands (M. Bernard, 2012, p. 204).

Toutefois d'autres sources d'approvisionnements sont possibles. Ainsi, une partie du fer issu des moulins pyrénéennes était acheminée à Toulouse qui les revendait plus au nord (C. Verna, 2001 a). Les Alpes, on l'a vu à travers l'exemple de la Lombardie, constituent une zone d'intense activité métallurgique et minière. Aussi, les régions comme celles du Dauphiné, de la Carinthie et de la Styrie ne sont pas en reste. L'acier de Steyr était ainsi vendu aux foires de Francfort et à Anvers. De là il pouvait atteindre l'Angleterre, la France et l'Espagne (P. Braunstein and E. Landsteiner, 2011, p. 433). Les fers dauphinois et savoyards irriguaient entre autres le grand axe de la Saône et du Rhône y prenant au passage l'appellation de « fers de Lyon », pour être retrouvés ensuite à Valence et Avignon (T. Sclafert, 1926, p. 320; H. Dubois, 1976). Ceux de Carinthie atteignaient notamment Venise et la côte adriatique (P. Braunstein, 1966, p. 268; J.-F. Belhoste, 2001, p. 546).

⁵⁸ Sur la question de la sidérurgie normande voir les travaux de M. Arnoux (M. Arnoux, 1993)

La côte toscane disposait également de nombreuses forges qui expédiaient leur métal dans toute la péninsule italienne (R.-H. Bautier, 1960, p. 11–15). Les barres du Haut- Palatinat par Nuremberg, gagnaient la Souabe, la Franconie et l’Allemagne rhénane ainsi que Augsbourg, Munich, et le Danube (R. Sprandel, 1968, p. 164). Les fers hongrois faisaient l’objet d’un important courant d’exportation dirigé en partie vers le nord par Cracovie (R.-H. Bautier, 1960, p. 52). Par ailleurs les forges à eau établies en Wallonie, en Lorraine et en Bourgogne alimentaient l’espace compris entre la Seine et le Rhin (J.-F. Belhoste, 2001, p. 548). Certains fers, comme nous l’avons déjà évoqué, n’avaient pas la même réputation que d’autres. Ainsi, au XV^e siècle, celui issu des Pays Bas du Sud était réputé en Espagne pour offrir peu de résistance (C. Gaier, 1973, p. 267)⁵⁹.

Le tableau schématique qui vient d’être présenté n’est évidemment pas exhaustif car nous sommes loin de connaître toute l’aire de diffusion du fer marchand. Néanmoins, il met déjà en évidence une grande diversité de l’origine des fers qui se croisent. Les méthodes archéométriques de provenance ont ici un rôle important à jouer car elles permettent d’aller sonder la matière pour retrouver la signature chimique des espaces sidérurgiques de production.

⁵⁹ C. Gaier précise qu’il était recommandé de s’en servir uniquement pour fabriquer des cuirasses à l’usage des équipages des galères, « dont la vie semble-t-il comptait peu » (C. Gaier, 1973, p. 267)

2) Retrouver la signature chimique des espaces sidérurgiques de production

L'étude de la provenance des alliages ferreux anciens a fait l'objet de nombreuses recherches ces dernières années⁶⁰. Ainsi, il a été mis en évidence qu'une filiation chimique pouvait être établie entre les espaces sidérurgiques de production d'une part, et les objets comme le sont les armures d'autre part. Nous allons tout d'abord nous attacher à expliquer de quelle manière la signature chimique des espaces sidérurgiques peut être extraite, ensuite nous verrons quelles sont les stratégies mises en place pour pouvoir la comparer à des objets de provenance inconnue.

a) Définitions des éléments susceptibles de caractériser la signature chimique d'un minerai

Précisons tout d'abord que l'ensemble des considérations qui vont suivre sont uniquement valables pour la filière directe. Dans le cas de la filière indirecte la séparation avec la fonte liquide et les éléments non réduits du minerai se fait en effet plus facilement qu'à l'état solide. Ainsi la signature chimique des éléments sidérophiles du système se perd lors de la première étape de réduction du minerai de fer.

Chaque minerai possède une signature chimique précise caractérisée par un certain nombre d'éléments majeurs, mineurs et traces. Or, d'après les principes thermodynamiques lisibles notamment sur le diagramme d'Ellingham, à l'issue de la réduction les éléments peuvent avoir suivis différents comportements. Les éléments réductibles comme Co, Ni, Cu, As ou Sb auront tendance à migrer dans le métal. Ces éléments sont dénommés « sidérophiles ». Une grande partie des éléments non réduits vont eux se retrouver dans la scorie au bas du fourneau, ce sont les éléments « lithophiles »⁶¹. Toutefois, la réduction se faisant à l'état solide, la séparation entre la scorie et le métal n'est pas parfaite et une part de celle-ci va se retrouver piégée dans le métal sous la forme d'inclusions. Ainsi, à ce stade, deux filiations sont envisageables avec le minerai originel : une filiation minerai-scorie, et une filiation minerai-métal.

A-M. Desaulty a établi un tableau récapitulatif résumant le comportement des différents éléments à partir des conditions thermodynamiques et des résultats expérimentaux prenant en compte les phénomènes de pollution courants⁶². Toutefois dans le cas des études de provenance, l'influence d'une source de pollution dépend inévitablement de la quantité initiale dans le minerai de

⁶⁰ Voir par exemple les études suivantes : (V. F. Buchwald and H. Wivel, 1998), (M. P. Coustures et al., 2003; A.-M. Desaulty et al., 2008; E. Blakelock et al., 2009; S. Leroy et al., 2011, 2012), (M. F. Charlton, 2015), (A. Disser et al., 2016), (P. Dillmann et al., 2017)

⁶¹ Le lecteur trouvera davantage d'informations sur cette classification dans (V. M. Goldschmidt, 1937)

⁶² Le comportement de la plupart des éléments a été décrit dans la partie « Les alliages ferreux anciens » p.20.

l'élément considéré. Plus ce dernier est présent en faible quantité et plus la pollution engendrée sera perceptible (A.-M. Desaulty, 2008). C'est pour cette raison que S. Leroy, par exemple, a choisi de prendre en compte le barium comme élément caractéristique de la signature chimique de la Lombardie. En effet, cet élément est présent en quantité importante dans les minerais lombards et demeure donc peu affecté par les éventuels ajouts des cendres du charbon de bois où il est relevé en quantité moindre ou du même ordre de grandeur que dans les minerais (voir figure 20) (S. Leroy, 2010, p. 206).

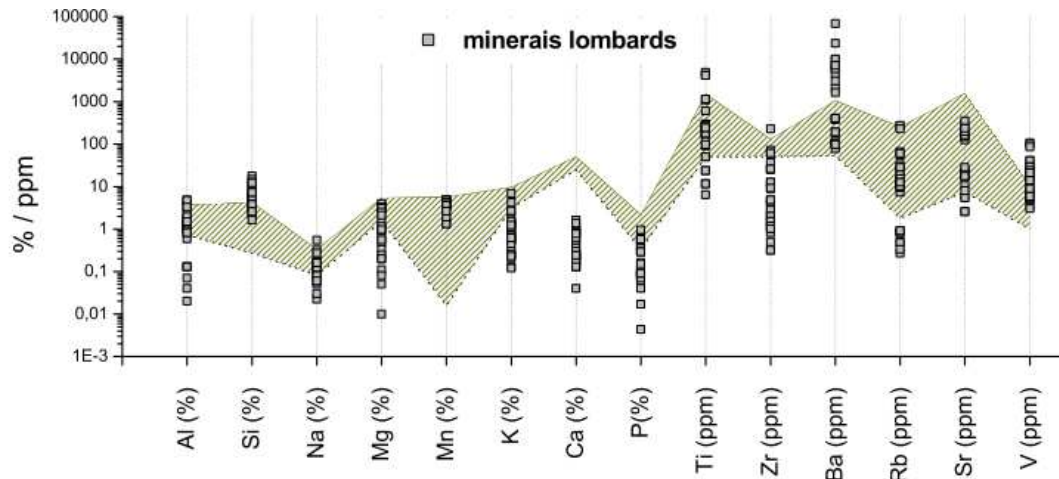


Figure 20- Comparaison des compositions en éléments susceptibles d'être pollués dans les cendres de charbons de bois et les minerais lombards. Teneurs exprimées soit en %, soit en ppm. Zone hachurée : variation de composition des charbons de bois de la littérature recensée par S. Leroy. Carrés gris : minerais analysés par S. Leroy. Tiré de (S. Leroy, 2010, p. 204)

Ces travaux ont été repris et complétés par différents auteurs. A. Disser a notamment intégré dans sa démarche un certain nombre d'éléments majeurs qui lui ont permis d'obtenir une meilleure distinction dans le cas de minerais chimiquement très typés comme c'est le cas de la *Minette lorraine* (A. Disser, 2014, p. 199) (voir figure 21).

	IA	IIA	IIIA	IVB	VB	VIB	VIIIB	VIIIB	IB	IIB	IIIA	IVA	VA	VIA	VIIA	VIIIA		
1	H															He		
2	Li	Be									B	C	N	O	F	Ne		
3	Na	Mg									Al	Si	P	S	Cl	Ar		
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
6	Cs	Ba	Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
7	Fr	Ra																
			La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb		
			Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No		

Éléments définis par Desauty (2008) comme pouvant caractériser la signature chimique d'un minerai dans la scorie

Éléments définis par Desauty (2008) comme pouvant caractériser la signature chimique d'un minerai dans le métal

Éléments nouvellement définis comme pouvant caractériser la signature chimique d'un minerai dans la scorie

Figure 21-Comportements de certains éléments chimiques présents dans les minerais de fer lors de la réduction par la filière directe d'après (A. Disser, 2014, p. 198)

Ce tableau pourrait être enrichi par d'autres éléments discriminants pour des ensembles de productions particuliers. Ainsi on pourrait inclure le barium pour la Lombardie. De même récemment une étude a montré que le tungstène et l'étain pourraient être des éléments intéressants à étudier dans le cas de minerais issus de l'île d'Elbe (M. Benvenuti et al., 2016).

Maintenant que le comportement général des différents éléments a été brièvement décrit, nous allons d'abord nous intéresser aux travaux qui se sont penchés sur l'analyse des inclusions de scories, puis sur ceux qui ont utilisé la matrice métallique comme support d'étude.

b) Filiation minéral- inclusion de scorie

i. Définir la signature chimique des espaces de production

Au vu de ce que nous avons précédemment exposé, pour qu'un élément chimique puisse être utilisé dans une étude de provenance faisant intervenir une filiation avec la scorie, il faut que ce dernier respecte deux principales conditions : l'élément doit avoir un comportement strictement lithophile au cours de la réduction et les phénomènes de pollution engendrés par les différentes composantes du système de réduction autres que le minerai doivent être négligeables (A. Disser, 2014, p. 199).

Une fois que les éléments chimiques susceptibles de caractériser la signature chimique des espaces sidérurgiques ont été définis, il est alors possible de constituer des bases de données de

référence. A titre d'exemple la figure 22 présente la répartition des sites échantillonnés par S. Leroy pour caractériser la signature chimique de la Lombardie.

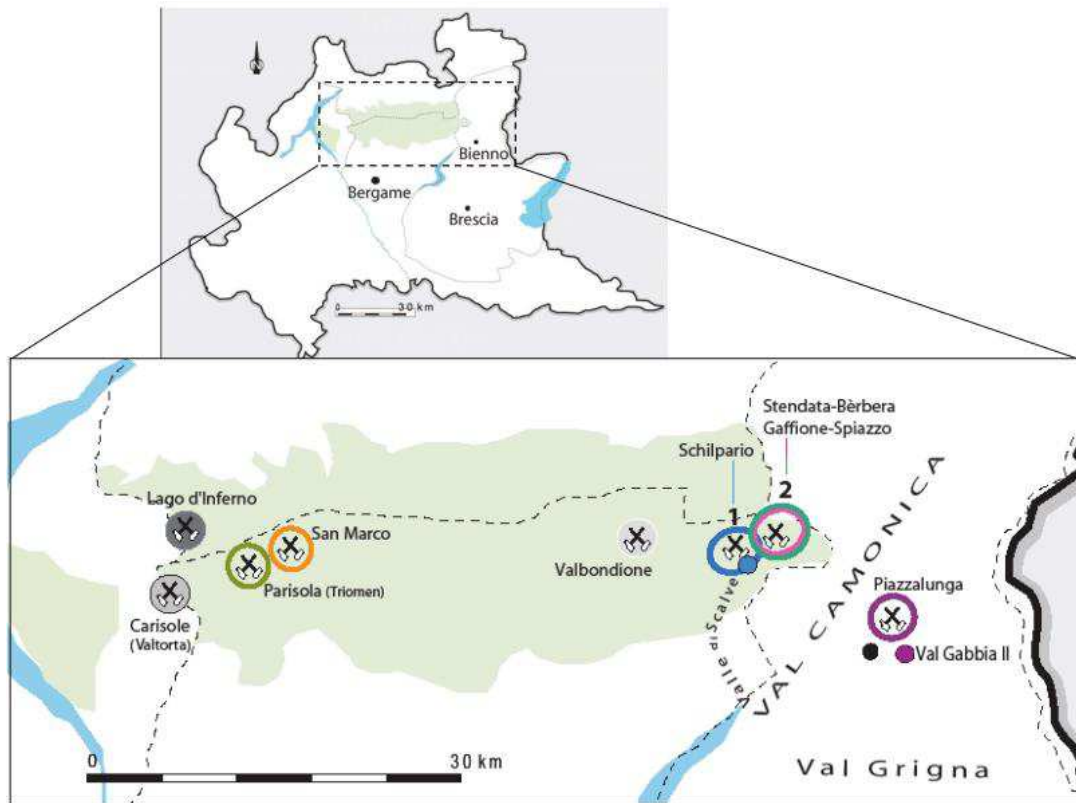


Figure 22- Localisation des mines de fer et des sites archéologiques échantillonnés pour caractériser la signature chimique de la Lombardie d'après (S. Leroy, 2010, p. 173)

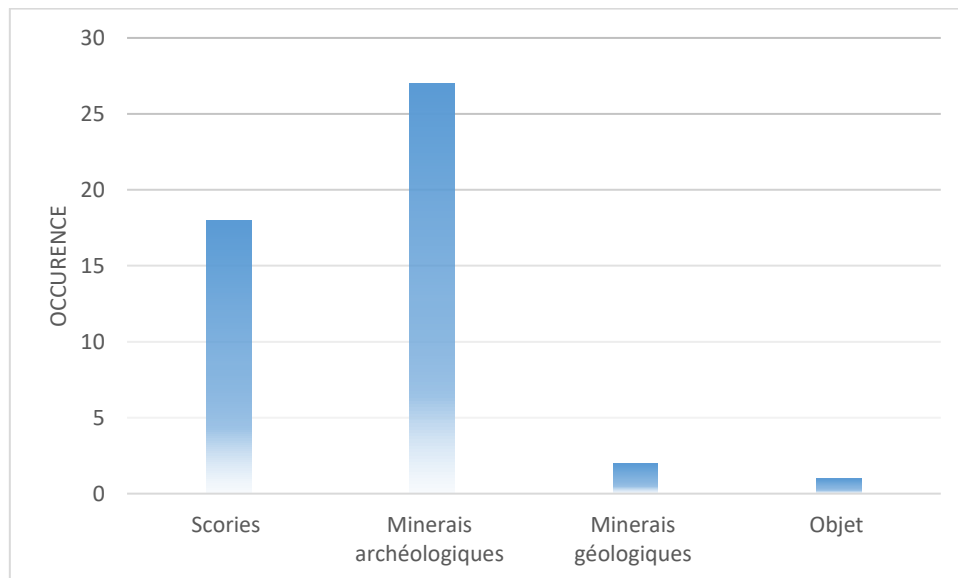


Figure 23- Type d'échantillon retenus dans le cas de la Lombardie d'après (S. Leroy, 2010, p. 224)

Ces bases de données regroupent les compositions chimiques des différents constituants de la chaîne opératoire de réduction (minéral, scories... exemple de la Lombardie, figure 23) afin d'une

part de valider la filiation chimique avec le minerai tout au long de la chaîne opératoire, et pouvoir mener des comparaisons avec des objets ferreux d'origine inconnue d'autre part. Cette comparaison s'effectue en plusieurs étapes que nous allons détailler dans la partie suivante.

ii. Des familles d'inclusions

Comme expliqué précédemment, suite à la réduction une partie des éléments non réduits se retrouve piégée dans le métal sous la forme d'inclusions non métalliques. La composition de ces dernières est représentative de celle du minerai utilisé et des conditions opératoires.

Rappelons qu'un tri des familles d'inclusion doit d'abord être réalisé afin d'éliminer les ajouts et sélectionner les inclusions issues de la réduction (voir p.39). Toutefois, parfois plusieurs classes de réduction peuvent être mise en évidence, par exemple dans le cas où une soudure de plusieurs lopins aurait été effectuée. Ainsi des fournitures de métal différentes peuvent être identifiées au sein d'un même échantillon. Ce phénomène a été démontré notamment sur des crampons d'Angkor (S. Leroy et al., 2017). Les auteurs expliquent que les signatures chimiques dégagées traduisent l'existence de plusieurs lopins de métal d'origines différentes soudés ensembles.

Une fois que les familles d'inclusions liées à l'étape de réduction sont clairement identifiées, l'approche de provenance proprement dite (c'est-à-dire de comparaison avec les ensembles de production), peut être envisagée.

iii. Méthodes mise en œuvre pour les études de provenance

En fonction des auteurs, différentes stratégies ont pu être employées, à la fois basées sur la comparaison de teneurs absolues, de rapports élémentaires en éléments majeurs et traces, et d'analyse multivariée. Nous nous proposons ici de présenter succinctement ces démarches à travers quelques exemples.

❖ **Exemples d'études basées sur les teneurs absolues**

Cette première démarche est peu rencontrée, essentiellement pour les raisons déjà évoquées précédemment, à savoir que les teneurs absolues dans les inclusions de scories ne vont pas dépendre uniquement de la composition initiale du minerai en éléments non réduits mais également d'autres facteurs propres à la réduction. Par conséquent, il est nécessaire de considérer des éléments dont les teneurs se distinguent nettement de la tendance générale afin qu'elles constituent une spécificité du minerai. Dans ce cas les teneurs absolues peuvent constituer un premier filtre dans l'étude de provenance.

Ainsi, S. Leroy a mis en évidence que les régions de l'Ariège et de la Lombardie étaient très typées notamment par leurs teneurs importantes en manganèse ($6,5 < \text{MnO} < 15,5$ dans les scories). Ces fortes concentrations peuvent être considérées comme des signatures spécifiques par rapport à d'autres produits n'en possédant pas (S. Leroy, 2010, p. 206). La Lombardie est également caractérisée par sa richesse en barium (teneur moyenne relevée dans les échantillons de S. Leroy 4639ppm) (S. Leroy, 2010, p. 187). Le phosphore peut lui aussi être un élément caractéristique de certaines régions de production (M. Leroy et al., 1994; M. Leroy, 1998; S. Leroy, 2010, p. 206). Récemment une étude a mis en évidence que le tungstène pouvait être caractéristique de minerais de l'île d'Elbe (M. Benvenuti et al., 2012, 2016).

❖ Exemple d'études basées sur la comparaison de rapports élémentaires d'éléments traces

Afin de s'affranchir de la variabilité des teneurs élémentaires de nombreux auteurs ont choisi de se tourner vers la comparaison de rapports élémentaires d'éléments traces afin de retrouver l'héritage chimique du minerai⁶³.

Une de ces études s'est notamment intéressée à la provenance de 4 armures supposées de fabrication lombarde (S. Leroy et al., 2011). Comme mis en évidence par ces auteurs, l'étude des inclusions d'armures pose des difficultés analytiques particulières. En effet, les armures sont des objets dont le métal a été très travaillé. Par conséquent une grande partie des inclusions piégées dans le métal a été expurgée par martelage. Par ailleurs les inclusions restantes sont généralement de faible taille par rapport à celles étudiées classiquement dans le cas des fers et aciers anciens ($< 30\mu\text{m}$ pour les armures, $> 80\mu\text{m}$ généralement). Ainsi, les inclusions les plus petites n'étaient pas quantifiables en ICP-MS par ablation laser (LA-ICP-MS), privilégiée habituellement pour la quantification des éléments traces. C'est pourquoi une autre technique a été couplée à cette dernière : la SR- μ XRF confocale. Cette dernière, si elle permet de sonder un plus petit volume de matière présentait néanmoins l'inconvénient de ne quantifier qu'un nombre très restreint d'éléments traces (Rb, Sr, Y et Zr), qui parfois peuvent avoir fait l'objet de pollution, et sont donc à manipuler avec précaution. Deux difficultés majeures liées cette étude sont ainsi recensées par les auteurs : le faible nombre d'inclusions susceptibles d'être analysées et le nombre restreint d'éléments traces qu'il a été possible de quantifier. En dépit de ces réserves, il a été possible d'effectuer quelques comparaisons.

Après avoir vérifié que les teneurs en manganèse étaient compatibles avec celles de la région lombarde, S. Leroy et al. ont comparé un certain nombre de rapport d'éléments traces (Sr/Y,

⁶³ Voir notamment (M. P. Coustures et al., 2003), (M.-P. Coustures et al., 2006), (A.-M. Desaulty et al., 2008), (S. Leroy et al., 2011), (P. Mameli et al., 2014)

Nb/Cs, Ba/La, Y/La, Nb/U, Sr/Ba) à ceux issus des données de la Lombardie (espace caractérisé dans (S. Leroy, 2010)).

L'hypothèse de provenance est fortement renforcée dans le cas où l'ensemble des rapports élémentaires considérés sont compatibles avec la région de production testée. Toutefois la prudence est requise car deux sources de minerais aux signatures chimiques proches ne pourront pas forcément être différenciées par certains rapports élémentaires (M. P. Coustures et al., 2003). En revanche un seul rapport différent suffit à invalider l'hypothèse de provenance posée.

Ainsi, l'hypothèse d'un métal issu de Lombardie pour la fabrication de ces armures pourrait être remise en question pour les armures WCA143 et WCA144, de part leur rapport Yb/Y très différents de celui de l'espace lombard, et corroboré pour un plus grand nombre d'inclusions dans le cas de l'échantillon WCA 144 par le rapport Sr/Ba. Toutefois, il est à noter, que dans le cas du ratio Yb/Y, un très faible nombre d'inclusions a pu être analysé (1 pour WCA143 et 2 pour WCA144). Par ailleurs, la différence observée sur le rapport Sr/Ba pourrait être issue d'une pollution en strontium lors de l'élaboration du métal. L'incompatibilité seule de ce rapport ne permet donc pas non plus de trancher définitivement la question. Les auteurs restent donc prudents à juste titre sur les conclusions. Néanmoins, ces travaux constituent un premier jalon de l'étude de provenance appliquée aux armures, et passe en revue les difficultés analytiques susceptibles d'être rencontrées propres à ces objets dont le métal a été très travaillé.

Par ailleurs, plus le nombre de rapports élémentaires considéré est important et plus la validation de l'hypothèse de provenance est probable. C'est pourquoi, pour simplifier la manipulation de ces rapports d'autres auteurs se sont tournés vers les analyses multivariées.

❖ Exemple d'études basées sur des analyses multivariées

Nous avons déjà évoqué précédemment qu'une transformation des données était nécessaire avant d'entreprendre une analyse multivariée (voir p.39). Ainsi la transformation « Log-Ratio » semble la plus appropriée dans le cadre des études archéométallurgiques, car elle permet de s'affranchir du phénomène d'enrichissement des phases lithophiles de la scorie en privilégiant la comparaison d'écarts relatifs plutôt qu'absolus (S. Leroy, 2010, p. 207–209). Par ailleurs S. Leroy, constatant que les éléments régulièrement en dessous des limites de détection contribuaient à disperser la valeur des X_{ij} pour un groupe donné, a proposé de ne considérer dans le calcul de la moyenne géométrique que les éléments rarement en limite de détection (S. Leroy, 2010, p. 212). Une fois cette transformation réalisée, la comparaison des signatures chimiques des espaces de production avec celles d'objets d'origine indéterminée peut être envisagée. Pour cela, différentes méthodes statistiques peuvent être utilisées.

L'ACP et la CAH déjà décrites précédemment pour déterminer des familles d'inclusions (voir p.39), ont été mises en application dans les travaux de A. Disser pour la mise en place de référentiels géochimiques, caractéristiques de différents espaces lorrains et la comparaison de la signature chimique de ces espaces avec celle d'objets de provenance inconnue (A. Disser, 2014). L'auteur rappelle qu'un nombre important de composantes principales doit être pris en compte pour pouvoir valider l'information. Les dernières composantes étant considérées comme porteuses d'une information non pertinente associée au « bruit » il recommande de ne prendre en compte que les premières composantes principales, exprimant 90% de la variance (A. Disser et al., 2017). Une CAH est ensuite effectuée sur ces composantes. Elle permet de condenser et structurer l'information en un seul graphique (voir figure 24). L'ACP est de cette façon employée en guise de prétraitement des données chimiques. L'auteur a appliqué cette démarche afin de déterminer la provenance d'agrafes issues de la Tour de Metz. Une ACP est d'abord effectuée avec les données des espaces sidérurgiques potentiels sur les données transformées en Log-Ratio de 15 éléments Y, La, Ce, Nd, Sm, Eu, Pr, Gd, Th, U, Mn, Al, Si, Ca, Mg. Les agrafes sont d'abord intégrées à l'ACP en tant qu'individus supplémentaires, c'est-à-dire qu'ils ne participent pas à la création du nouveau repère, mais seront tout de même projetés dans ce dernier. Sur la figure 24 on peut ainsi voir que les données relatives aux agrafes se confondent avec l'espace *Minette*.

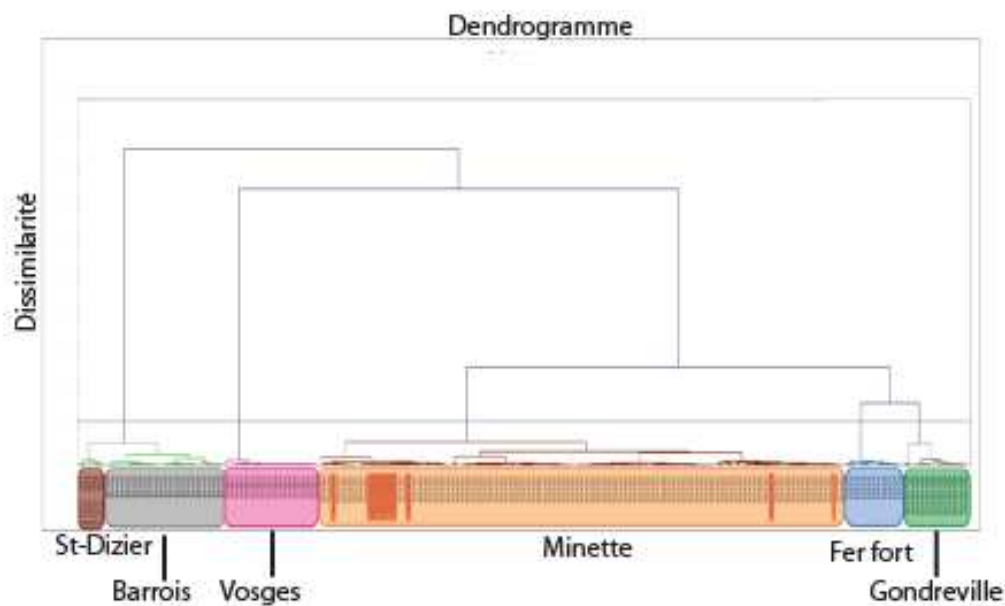


Figure 24- CAH effectuée sur les données de l'ACP en prenant 90% de la variance totale. Individus surlignés en orange correspondent aux agrafes étudiées d'après (A. Disser, 2014, p. 442)

La question que pose ensuite l'auteur est la suivante « Est-ce que, **oui** ou **non**, en fonction de sa signature chimique, ce produit sidérurgique a été produit au sein de cet espace particulier ? » (A. Disser, 2014, p. 211). La question subsidiaire est de déterminer quelle est la probabilité associée à une réponse positive à cette question ?

La régression logistique a été utilisée par A. Disser pour y répondre. Le modèle construit par l'auteur, basé sur les considérations mathématiques précédemment décrites dans la partie *les alliages ferreux anciens*, a été utilisé pour confronter les données des agrafes avec le modèle de régression séparant d'un côté l'espace le plus probable (*Minette*), et de l'autre, le reste des espaces candidats (voir figure 25). Là encore, le modèle relie les agrafes à l'ensemble *Minette* avec une probabilité de 99%.

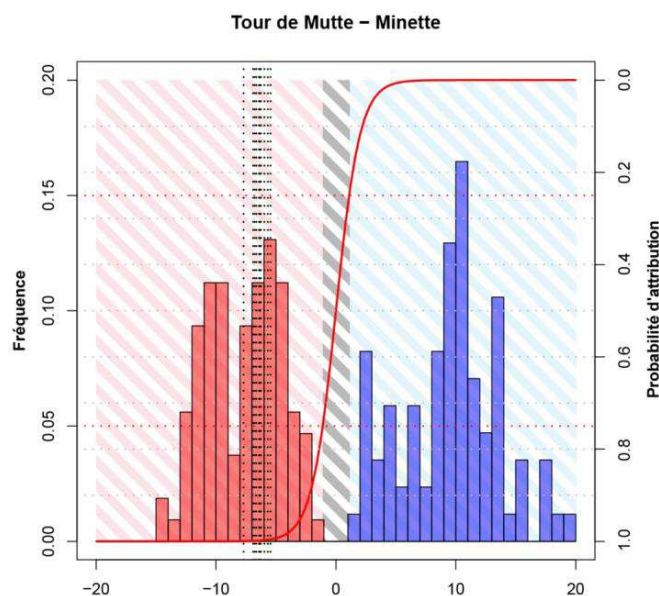


Figure 25- Représentation synthétique des résultats de la régression logistique : confrontation de l'ensemble *Minette* (rouge) au reste du corpus de référence (bleu). Les barres verticales représentent le placement des agrafes par rapport au modèle.
D'après (A. Disser, 2014, p. 443)

La dernière étape de sa démarche consiste à comparer la signature chimique des agrafes à celle de l'ensemble le plus probable : *Minette*. Pour cela l'auteur utilise une nouvelle fois l'ACP en considérant cette fois ci les objets dont on cherche à valider la provenance comme individus à part entière, c'est à dire qu'ils participent à la création du nouveau repère. Puis il effectue une CAH sur les données de l'ACP de la même façon que précédemment. La compatibilité chimique semble assurée puisque, là encore, les données des agrafes se mélangent à celles de l'espace *Minette* (voir figure 26).

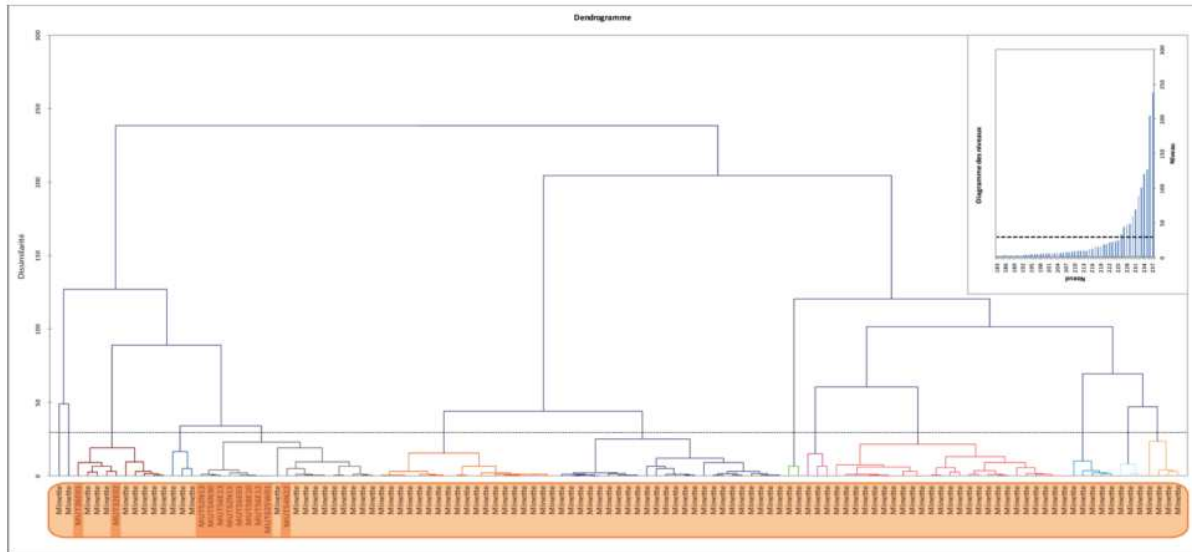


Figure 26- Résultats de la CAH effectuée sur les données de l'ACP. En orange foncé inclusions relatives aux agrafes. D'après (A. Disser, 2014, p. 446)

Un autre type d'approche est également employé dans les études de provenance. Il s'agit des approches supervisées comme l'Analyse Discriminante Linéaire (ADL). L'utilisation de cette dernière repose sur la comparaison de groupes cohérents déjà définis. Pour se faire, l'approche consiste à minimiser la variance intra-classe et à maximiser la variance inter-classe. Elle permet, dans un premier temps, de visualiser si les groupes se distinguent bien les uns des autres en fonction des variables considérées. Quand elle est utilisée uniquement à but de représentation descriptive simplifiée, l'approche est qualifiée d'Analyse Factorielle Discriminante (AFD) (S. Leroy, 2010, p. 79). La représentation donnée par l'AFD ressemble fortement à celle de l'ACP. Toutefois les groupes seront en principe mieux discernés dans le cas de l'AFD, qui maximise la variance inter-classe. En revanche, on parlera bien d'ADL si l'approche consiste à prédire la probabilité d'appartenance à un groupe d'un échantillon supplémentaire à l'une des classes définies. Plusieurs auteurs ont choisi de privilégier cette méthode dans le cadre des études de provenance (S. Leroy, 2010).

S. Leroy, a par exemple mis en place ce type d'approche pour étudier la provenance de fer de construction dans le palais des Papes d'Avignon (S. Leroy, 2010). L'hypothèse à la base du raisonnement suivi est la suivante : si l'on ne peut pas séparer de façon significative la signature chimique d'un objet de celle d'un espace sidérurgique de production, alors il est possible d'envisager qu'il ait été produit au sein de ce dernier. La méthode suivie par S. Leroy se divise en plusieurs étapes. D'abord elle utilise l'AFD pour comparer la similarité chimique d'un échantillon d'origine inconnue avec celle d'espaces de production candidats, dans notre cas l'Ariège, le Dauphiné, la Lombardie et la Montagne Noire sur les axes LD1 et LD2. Douze éléments dont les concentrations ont été transformées en Log-Ratio sont pris en compte : Y, Nb, Cs, La, Ce, Nd, Sm, Eu, Yb, Hf, Th, U. Suite

à cette première analyse un ou plusieurs espaces peuvent être compatibles. Sur l'exemple présenté figure 27, l'Ariège est un espace candidat.

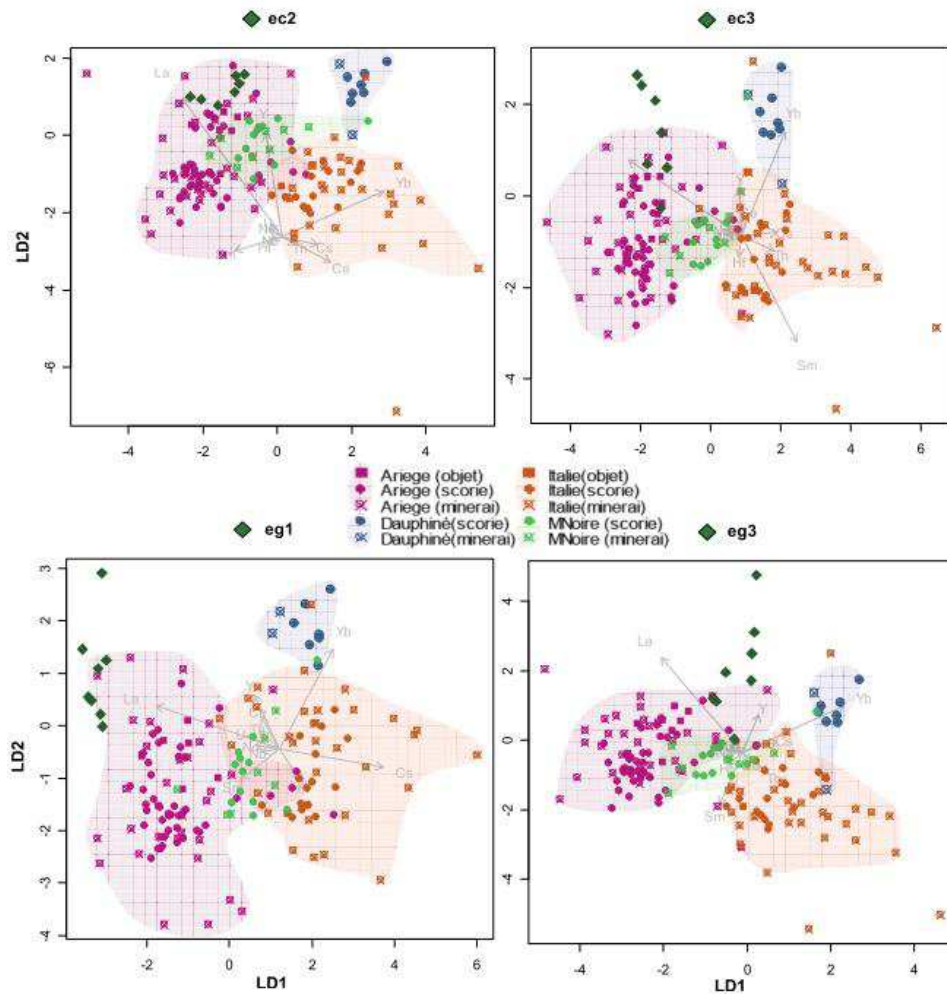


Figure 27- AFD réalisée sur les log-ratio des données de l'Ariège, le Dauphiné, la Lombardie et la Montagne Noire et des fers du Palais des Papes d'Avignon. D'après (S. Leroy, 2010)

L'étape suivante consiste à effectuer une AFD entre l'échantillon (nous garderons l'exemple de l'échantillon Ec2) et l'espace le plus probable (ici l'Ariège). La projection est réalisée sur l'axe LD1 (voir figure 28). Le graphe cumulé croissant sur la figure de droite représente le domaine chimique de l'espace ariégeois, tandis que la boîte à moustaches représente la composition chimique des inclusions présentes dans l'échantillon Ec2.

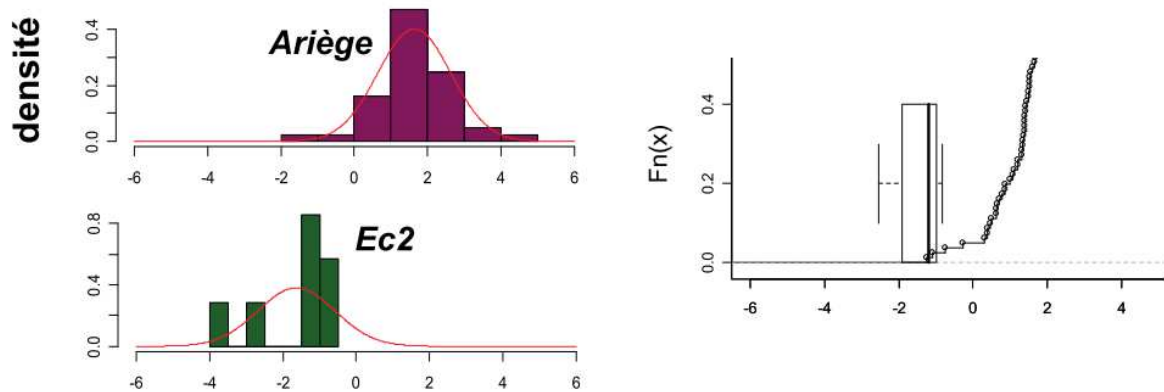


Figure 28 - Projections sur l'axe discriminant LD1 des données de l'Ariège et de celles de l'échantillon Ec2. D'après (S. Leroy, 2010)

L'éloignement entre ces deux groupes est caractérisé par le troisième quartile des projections des inclusions de l'objet Ec2 ($\mathcal{Q}_{\text{quart}} = -0,28$) d'origine indéterminée et la médiane de ces mêmes projections ($\mathcal{Q}_{\text{med}} = -0,06$). En fonction des valeurs que peuvent prendre ces deux grandeurs si l'objet est issu de l'espace considéré ou non, S. Leroy a établi un abaque de compatibilité pour chaque espace sidérurgique qu'elle a étudié⁶⁴(voir figure 29 pour l'abaque de l'espace ariègeois). La Lombardie fait notamment partie de ces espaces.

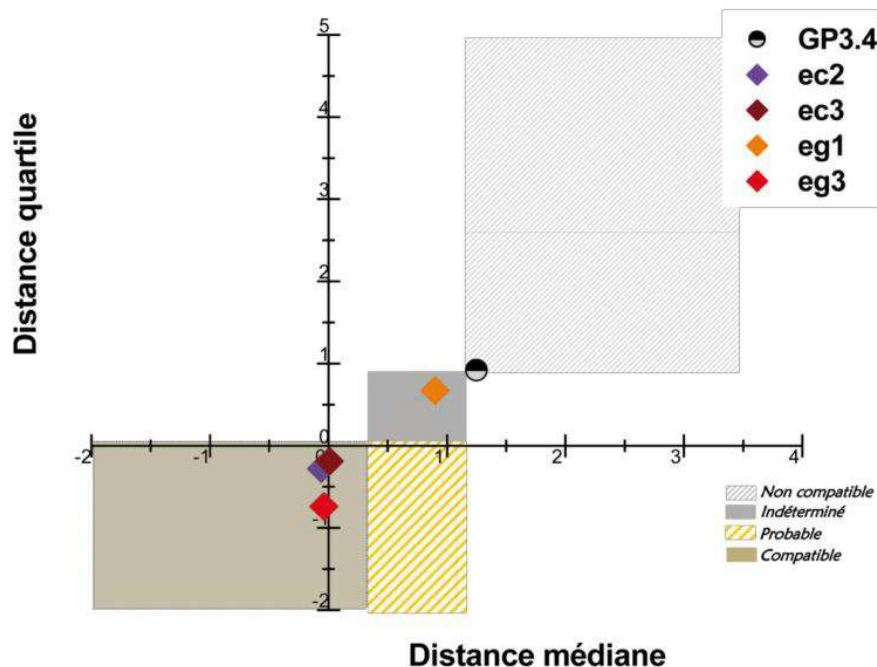


Figure 29- Abaque de compatibilité pour l'espace Ariègeois. D'après (S. Leroy, 2010).

⁶⁴ Pour davantage de détails quant à la construction des abaques de compatibilité voir (S. Leroy, 2010, p. 245–248)

Ainsi, selon les critères définis par S. Leroy, la signature chimique du fer ec2 est bien compatible avec l'espace ariégeois, tout comme les fers eg3 et ec3. Elle est en revanche indéterminée pour eg1 et peut être considérée comme incompatible pour GP3.4.

A titre de comparaison, l'abaque de compatibilité de la Lombardie est présenté sur la figure 30 car c'est une région de grand intérêt dans notre cas, puisque du métal lombard a très certainement été utilisé pour la fabrication des armures. Les tailles des domaines définis par S. Leroy sont bien différentes de celles de l'Ariège. On notera que, pour la région lombarde, l'espace « indéterminé » est beaucoup plus étendu, et ses espaces « compatible » et « non compatible » plus restreints. La validation ou l'invalidation d'une hypothèse de provenance sera donc plus difficile à établir. L'allure de ces abaques est en effet fortement dépendante de la définition des espaces sidérurgiques initiaux. Ainsi, l'espace lombard, contient bien moins de données que son voisin ariégeois, ce qui peut nuire à la qualité de sa définition chimique (S. Leroy, 2010, p. 245)

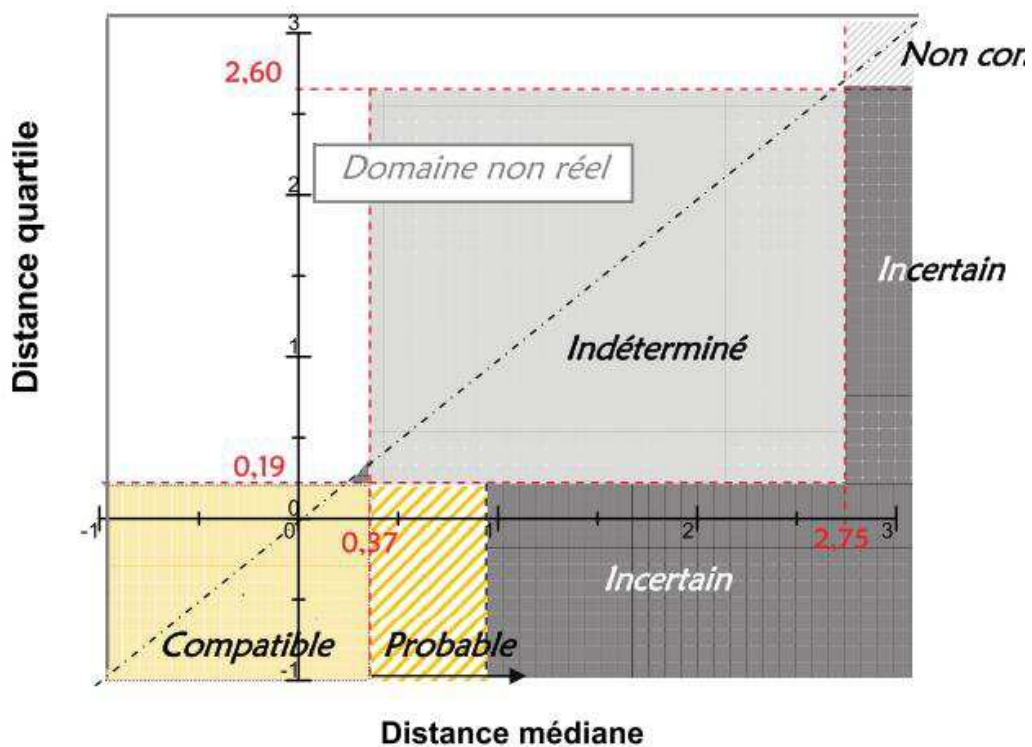


Figure 30- Abaque de compatibilité pour la Lombardie. D'après (S. Leroy, 2010)

❖ Comparaison des différentes méthodes présentées

Suite aux différentes approches présentées, nous souhaiterions formuler quelques remarques. En effet, ces dernières présentent à la fois des avantages et des inconvénients qu'il nous paraît bon d'explicitier.

Pour commencer, nous pensons que l'intérêt des approches multivariées n'est plus à démontrer dès lors que l'on considère un nombre important d'éléments, ce qui est le cas pour les études de provenance en archéométallurgie du fer. Les teneurs absolues peuvent néanmoins constituer des premiers filtres pour des régions fortement typées par un ou plusieurs éléments comme c'est le cas pour la Lombardie (le barium et le manganèse). De plus, la visualisation de rapports élémentaires par le biais de diagrammes bivariés peut dans certains cas présenter un intérêt pour l'interprétation de familles d'inclusions d'origines différentes, constituées par des analyses multivariées. Par ailleurs, lorsque le nombre de données n'est pas suffisant pour avoir recours à ces dernières, la comparaison de rapports élémentaires peut déjà offrir des pistes de réflexion comme nous l'avons vu dans le cas de l'étude de la provenance de 6 armures supposées d'origine lombarde de S. Leroy (S. Leroy et al., 2011).

Concernant le cas spécifique des analyses multivariées, nous avons vu que plusieurs méthodes pouvaient être employées. Nous nous proposons de dresser un rapide bilan des avantages et des limites des méthodes présentées dans les exemples précédents.

- **Les outils non supervisés : CAH et ACP**

CAH

La CAH constitue un outil exploratoire intéressant car il est purement descriptif et peut être appliqué sans aucune condition. En outre, comme l'a montré A. Disser, couplée à l'ACP cette méthode offre une visualisation synthétique de l'ensemble des informations des composantes principales d'intérêt. Toutefois, il est à noter que cette analyse est très dépendante de l'algorithme utilisé pour agglomérer les individus. Par conséquent, la cohérence des groupes formés, doit être validée par l'opérateur, sous peine de créer des « clusters » sans rapport avec la réalité (M. J. Baxter, 2006). De plus certaines dimensions sont exclues dans la visualisation synthétique, ce qui, dans certains cas, pourrait conduire à une perte d'information d'intérêt.

ACP

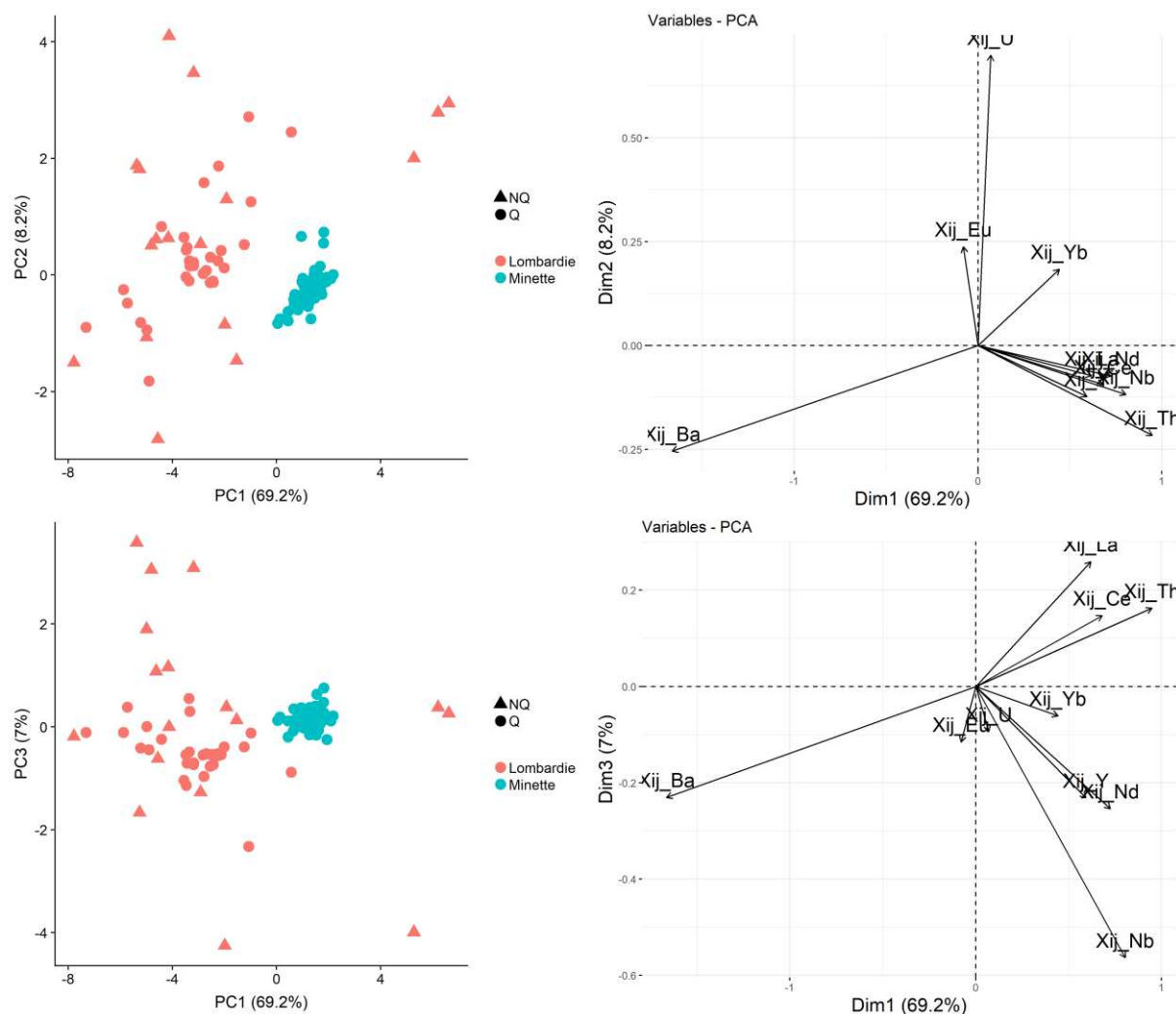
L'ACP met en avant la variance du jeu de données. Aucune information n'est connue sur les données, ce qui laisse en principe ces dernières s'exprimer librement. Ce sont les variables à plus forte variance qui vont avoir le plus de poids sur le résultat de l'analyse. Or, le risque couru ici est le suivant : certaines variables qui ne seraient pas les plus significatives du point de vue du

questionnement de l'étude de provenance pourraient se voir attribuer un poids trop important par l'analyse. La transformation Log-Ratio couramment utilisée permet de relativiser la prédominance de certaines variables sur d'autres. Toutefois, une dispersion inhérente au jeu de données peut toujours être observée. Ceci est généralement vrai pour les espaces sidérurgiques auxquels nous devons nous intéresser, comme la Lombardie, qui comptent à la fois des mesures de la composition de minerais, de scories et d'objets métalliques. Or, par exemple, S. Leroy signale que la signature chimique de la Lombardie est fortement influencée par les groupes de minerais, qui présentent des valeurs de Xij plus dispersés que les autres éléments du corpus de référence (S. Leroy, 2010, p. 226).

Ce phénomène peut notamment être exacerbé lorsque le jeu de données compte un certain nombre de mesures en dessous des limites de détection, comme c'est le cas pour certains minerais lombards. S. Leroy précise toutefois qu'il pourrait être dangereux d'exclure ces minerais du corpus car ils sont peut-être le reflet d'une variation au sein de la signature chimique lombarde. Ainsi pour pouvoir les inclure dans l'analyse multivariée, l'auteur choisit de remplacer les valeurs inférieures à la limite de détection par la moitié de la valeur de cette dernière, tout en sachant qu'inévitablement ces éléments seront entachés d'une plus grande erreur et contribueront à disperser la signature chimique de l'espace.

Par conséquent, le risque en utilisant l'ACP pour ce type de données est de refléter davantage la dispersion au sein d'un espace sidérurgique, qu'entre la signature chimique de l'espace et celle de l'objet dont l'origine est à déterminer (S. Leroy, 2010, p. 78). Pour les mêmes raisons l'ACP peut aussi s'avérer inefficace à discriminer des espaces sidérurgiques de signatures proches, en ne révélant que la dispersion des données liées à ces espaces.

Pour illustrer ces propos, nous avons repris les données de l'espace lombard et de l'espace Minette définis par S. Leroy et A. Dissier. Comme expliqué précédemment, l'espace lombard contient plusieurs individus qui présentent une ou plusieurs mesures en dessous des limites de détection alors que l'espace Minette n'en contient pas pour les variables sélectionnées. Ces individus seront matérialisés par un symbole triangulaire tandis que ceux pour lesquels les éléments sont tous bien quantifiés par un rond sur la figure 31. Le résultat de l'ACP sur les deux premières composantes principales montre que l'espace Minette est bien moins éclaté que l'espace lombard. Les individus les plus dispersés sont par ailleurs ceux qui présentent des teneurs en dessous des limites de détection. Les deux espaces ont du mal à être discriminés par l'ACP alors même que ce sont a priori des espaces géochimiques qui possèdent des signatures bien distinctes.



Nous verrons que ce problème se pose dès que des mesures en dessous des limites de détection seront présentes dans le jeu de données contribuant inévitablement à disperser la signature chimique des objets considérés. Or, l'étude de S. Leroy a montré que ce pouvait être le cas des inclusions d'armures qui sont par nature de faible taille et dont les éléments traces sont plus difficilement quantifiables (S. Leroy et al., 2011).

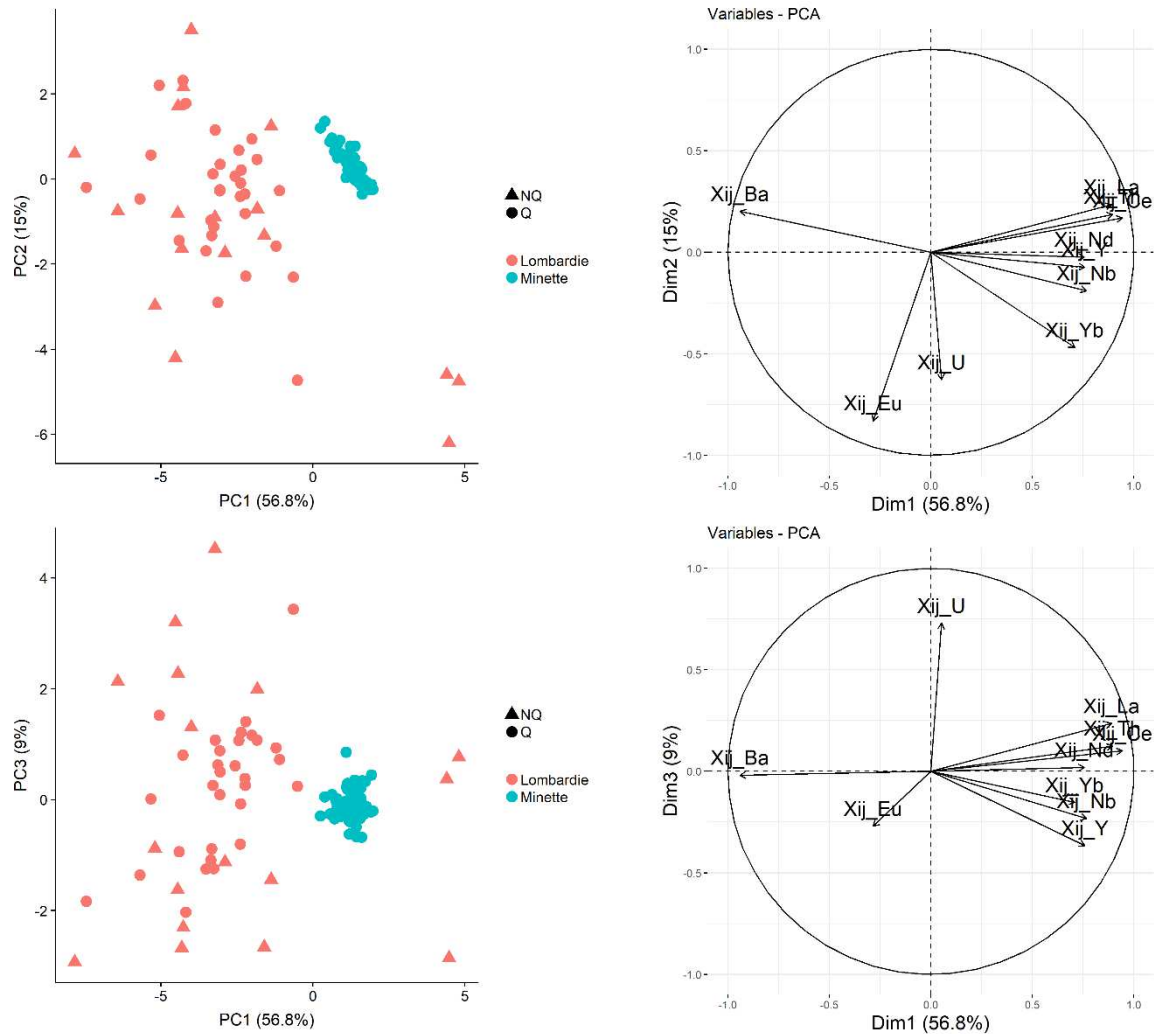
Un des moyens pour minimiser cette dispersion inhérente au jeu de données est de réduire les variables de l'ACP, encore appelée une normalisation des variables. Cette solution est évoquée par Baxter et al. (M. J. Baxter and I. C. Freestone, 2006) comme un possible compromis entre la standardisation des données brutes et la méthode Log-Ratio. Cette opération consiste généralement à diviser les variables par leurs écart-types et à effectuer en quelques sorte une standardisation des X_{ij} ⁶⁵. Comme le précisent Baxter et al. cela revient à considérer que chaque variable aura le même

⁶⁵ S. Leroy effectue également une normalisation des X_{ij} dans le cadre de ces analyses non supervisées mais en divisant les X_{ij} par leur variance et non pas par leurs écart-types. (S. Leroy, 2010, p. 214)

poids sur le jeu de données, la variance est donc ramenée à 1 (M. J. Baxter and I. C. Freestone, 2006). Les variables évoluent alors entre $[-1 ; 1]$ dans un cercle dit de « corrélation »⁶⁶. Bien que l’auteur ne discute pas de ce point précis de l’utilisation de l’ACP, c’est cette méthode qui semble avoir été choisie par A. Disser dans les exemples qui ont été présentés précédemment.

La figure 32 présente la projection sur les deux premières composantes d’une ACP réalisée sur le même jeu de données mais où les X_{ij} ont été standardisés (ACP réduite). La discrimination entre les deux espaces est plus facile. Toutefois, l’ACP met encore principalement en avant la dispersion de l’espace lombard et les individus qui présentent des teneurs en dessous des limites de détection.

⁶⁶ Ainsi le changement de repère de l’ACP sera basé non plus sur une matrice de covariance mais une matrice de corrélation. Toutefois certains auteurs effectuent à ce sujet quelques mises en garde : il convient de ne pas faire des interprétations trop poussées des relations entre les variables que mettront en évidence l’ACP (K. G. van den Boogaart and R. Tolosana-Delgado, 2013). En effet les données de compositions, du fait qu’elles soient liées entre elles (leur somme est égale à une constante) et même une fois transformées en Log-Ratio, présentent des matrices de covariance et de corrélation singulières, qui pourront donner lieu à des interprétations erronées sur la nature des relations entre les variables (K. G. van den Boogaart and R. Tolosana-Delgado, 2013, p. 81). Cependant bien qu’il soit à manipuler avec prudence les auteurs précisent que c’est un outil d’exploration des données très efficace.



De plus Baxter et.al, précisent qu'attribuer le même poids à toutes les variables peut paraître comme une solution un peu extrême. Ainsi une autre alternative est évoquée par l'auteur. Elle consisterait à éliminer graduellement les variables qui dominent l'analyse mais qui n'apportent pas d'informations utiles en terme d'interprétations de celle-ci (M. J. Baxter and I. C. Freestone, 2006).

- **Les outils supervisés : AFD, ADL**

Au contraire de l'ACP, l'AFD fait partie des méthodes supervisées, il est donc nécessaire que l'opérateur fixe avant l'analyse le nombre de groupes contenus dans le jeu de données. Précisons qu'ici, au contraire, de l'ACP une normalisation des X_{ij} n'aura aucun effet sur la séparation des classes car l'AFD attribue un poids différent à chaque variable dans le but de pouvoir discriminer au

mieux les classes définies⁶⁷. Son pouvoir discriminant est par nature supérieur à l'ACP. En effet, sur figure 33, les deux ensembles Minette et Lombardie sont plus nettement séparés qu'avec l'ACP et ce, même si l'espace lombard est de nouveau beaucoup plus dispersé que celui de la Minette.

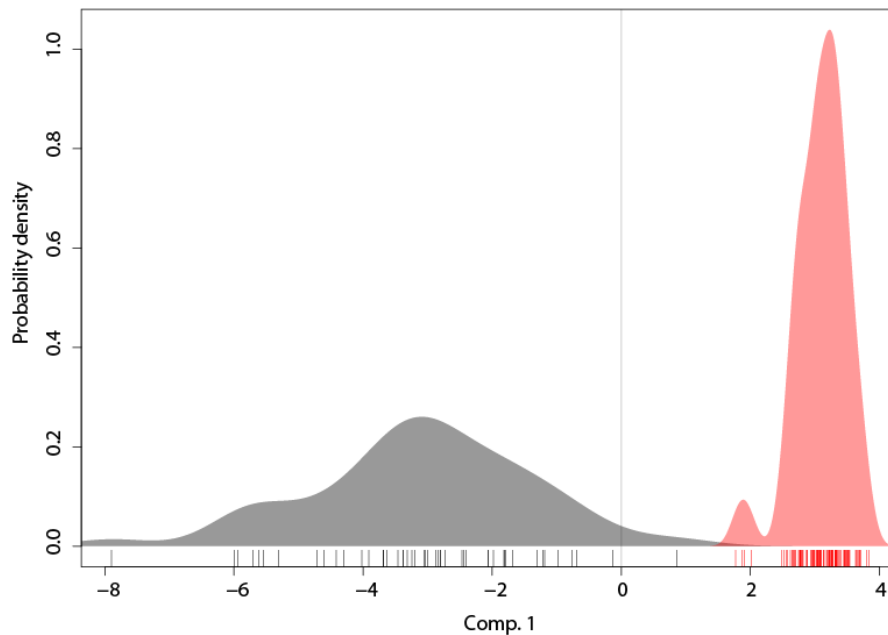


Figure 33 - AFD réalisée sur les données de l'espace lombard (en gris) et l'ensemble Minette (en rouge) définis par S. Leroy et A. Disser.

Par ailleurs, ce type de méthode permet de comparer des groupes de densité très inégale (comme c'est le cas quand on compare la signature chimique d'un objet représenté par une dizaine d'inclusions à celle d'un espace géochimique qui contient plusieurs dizaines de données), en palliant aux effets de dispersion au sein d'un ensemble. Elle offre aussi une approche prédictive afin de déterminer la comptabilité d'un objet avec les ensembles de production considéré (S. Leroy et al., 2014). Toutefois, cette prédiction n'est pas absolue. Pour rappel, l'attribution d'une provenance à un objet dont on cherche à connaître l'origine par l'AFD repose sur le postulat suivant : si l'on ne peut pas séparer de façon significative la signature chimique d'un objet de celle d'un espace sidérurgique de production, alors son appartenance à cet espace peut être envisagée. Toutefois il est possible que l'objet appartienne à un autre ensemble géochimique non compris dans le référentiel. De la même manière on ne peut être certain d'avoir dosé l'ensemble des éléments chimiques discriminants. Ainsi, le risque est d'attribuer à tort la provenance de ce dernier à l'espace sidérurgique le plus probable⁶⁸. Par ailleurs, cette attribution repose aussi sur une lecture graphique dont l'interprétation peut être variable en fonction des opérateurs. La démarche mise en place par S. Leroy avec la construction

⁶⁷ En revanche S. Leroy précise que la somme des X_{ij} étant égale à 0, l'un des éléments utilisés dans le calcul de la moyenne doit être exclu de l'analyse afin d'éviter une combinaison linéaire des variables. Le choix de l'élément n'aura pas d'influence en termes de discrimination statistique puisque ce dernier est pris en compte dans l'analyse statistique via la moyenne géométrique (S. Leroy, 2010, p. 232)

⁶⁸ C'est également le risque inhérent à l'emploi de la régression logistique comme le souligne A. Disser (A. Disser, 2014, p. 244).

d'un abaque de compatibilité est de ce point de vue intéressante, car elle définit des seuils de compatibilité et d'exclusion avec la définition de différents domaines pour lesquels la provenance peut être considérée comme « compatible », « incompatible » ou encore « Indéterminée ». Toutefois, la construction d'un tel outil nécessite d'être en possession d'objets dont on a l'assurance qu'ils aient été produits dans et en dehors de l'espace considéré, ce qui n'est pas toujours le cas. Enfin l'utilisation de l'AFD n'est appropriée que si le nombre d'individus considérés dans chaque groupe est supérieur au nombre total de variables. Ainsi, dans le cas où peu d'inclusions d'un même objet ont pu être analysées le jeu de variables devra être réduit en conséquence. Le risque est alors de diminuer le nombre de variable discriminantes.

Ces différentes approches, bien que différentes dans leur fonctionnement, peuvent être mises en regard afin d'en comparer les résultats. L'utilisation de ces méthodes sur le même jeu de données a par exemple été réalisée dans (M. Charlton et al., 2012). En définitive, il apparaît que, dans le cadre des études de provenance, c'est le va et vient entre ces différents outils (supervisés et non supervisés) qui peut permettre de s'adapter à chaque questionnement et à chaque jeux de données, divers par nature (S. Leroy et al., 2014).

Cette première filiation minerais-scorie ayant été présentée nous allons à présent nous intéresser à la filiation chimique reposant sur l'étude de la composition de la matrice métallique.

c) Filiation chimique à travers la composition chimique de la matrice métallique

i. Travaux basés sur la comparaison de rapports élémentaires

Lors de la réduction, certains oxydes vont pouvoir migrer dans le métal : ce sont les éléments dit sidérophiles. Toutefois ces éléments sont en faible nombre. Il s'agit de Co, Ni, As, Sb, Cu. Par conséquent l'utilisation de ces éléments comme traceurs de la signature chimique du minerai est peu fréquente car elle ne permet de comparer qu'un nombre réduit de rapports élémentaires. Les couples Cu/As Sb/As et Co/Ni ont été toutefois testés par certains auteurs. Les résultats de ces études montrent que le pouvoir discriminant de cette approche reste limité du fait du recouvrement des signatures et le faible nombre de variables qu'il est possible de considérer. Par ailleurs, certains auteurs ont montré que la teneur en As et Ni pouvait être hétérogène dans le métal. Se pose également la question du comportement de ces éléments lors des opérations de forge, qui pourrait altérer la constance de leur rapport élémentaire (S. Leroy et al., 2014)

ii. Travaux basés sur la comparaison de rapports isotopiques

Si les différentes étapes menant du minerai à l'objet entraînent des processus de fractionnement chimique, certains éléments possèdent la propriété de ne pas être affectés par ce phénomène. Leur composition isotopique reflète donc celle de leur matériau parent. Par conséquent ils peuvent être utilisés comme des traceurs. Dans une étude de provenance pour qu'un élément puisse être discriminant, il faut qu'il possède une variabilité significative de sa composition isotopique au sein de différents minerais. De plus, il faut également que son rapport isotopique soit conservé tout au long de la chaîne opératoire et, in fine jusqu'à l'objet final.

Plusieurs couples ont ainsi été testés : les isotopes du plomb (R. Schwab et al., 2006; P. Degryse et al., 2007), du strontium et de l'osmium (M. Brauns et al., 2013) et plus récemment du fer (J. Milot et al., 2016). Toutefois le plomb présente un ratio souvent très hétérogène dans les minerais de fer, ce qui limite son utilisation en tant que traceur discriminant. Le strontium peut lui faire l'objet de pollution au cours de la réduction. Les études portant sur l'osmium et le fer ont montré que des discriminations satisfaisantes pouvaient être réalisées. Cependant, le recouvrement des rapports isotopiques s'avère limitant dans certains cas. Ainsi, pour y remédier, le couplage avec d'autres méthodes comme celles basées sur l'analyse d'inclusions de scories est envisagé.

Une étude récente a choisi de combiner les mesures des rapports isotopiques de l'osmium avec celles d'éléments traces réalisées sur des inclusions (P. Dillmann et al., 2017), basée sur la méthodologie développée par (A. Disser, 2014). Elle définit la signature chimique de différents ensembles de production dans l'est de la France et le sud de l'Allemagne, qu'elle compare avec celles d'objet ferreux de la fin du premier Age du fer. L'étude met également en évidence la cohérence des deux approches (isotopiques et élémentaire), mais également leurs avantages et limitations respectives.

Ainsi, les mesures basées sur les rapports isotopiques de l'osmium permettent d'invalider une hypothèse de provenance si le rapport est significativement différent. En revanche le recouvrement des ratios ne permet pas de valider une hypothèse avec ces seuls résultats. Par ailleurs, l'approche élémentaire présente l'avantage de considérer un grand nombre d'éléments et donc de mieux discriminer les différentes signatures chimiques des espaces de production. Toutefois, elle nécessite qu'un nombre suffisamment important d'inclusions (plusieurs dizaines) issues de la réduction, soit présent au sein des objets pour pouvoir mener à bien la comparaison avec les ensembles géochimiques.

De plus, parfois, quand deux espaces ont une signature chimique proche, un recouvrement de leurs projections peut être observé lors d'analyses multivariées (S. Leroy, 2010). Par conséquent la mesure de rapports isotopiques pourrait permettre dans certains cas de lever une indétermination.

Comme nous venons de le voir, des méthodes ont été mises au point pour déterminer l'origine d'objets ferreux anciens comme le sont les armures. Toutefois, ces approches sont soumises à différentes limites. Rappelons-le, la filiation minerais-scorie qui est à ce jour la plus employée, n'est étudiable que pour la filière directe. De plus, elle demeure impossible à établir si un mélange de minerais a été employé durant la réduction. Or, ce type de pratique a déjà été mis en évidence par certaines études (V. Serneels, 2002; M.-P. Coustures et al., 2014). Dans ce cas-là, une filiation peut être établie uniquement avec la scorie de réduction.

3) Bilan

Cette partie avait pour but de dresser un aperçu des connaissances actuelles quant à l'approvisionnement en métal pour la fabrication des armures en combinant les disciplines. Qu'est-il possible d'en conclure du point de vue de l'organisation de la production dans les différents centres ? Différentes stratégies semblent avoir été mises en place, de l'approvisionnement en matière première jusqu'à la vente des pièces.

En Italie, au XV^e siècle, une famille d'armurier fait figure d'exemple celle des Missaglia. L'étendue des activités de ces armuriers ne se limitait pas seulement à la fabrication d'armures. En effet, ces derniers participent également au commerce des métaux, à la production d'alliage ferreux et au commerce d'armes et d'armures, animant ainsi tout un secteur de l'économie métallurgique. De plus, les plus grandes entreprises comme celle des Negroli au XVI^e siècle, possèdent des filiales ou des représentants à l'étranger dans des villes d'Europe comme à Paris, Rome, Turin, Anvers ou encore Bruxelles leur permettant d'être au plus près de leur clientèle (S. W. Pyhrr, J.-A. Godoy, and S. Leydi, 1998, p. 225). Ces familles d'armuriers semblent prendre part à toutes les étapes de fabrication de leurs pièces, de l'approvisionnement en matière première jusqu'à la vente de leurs produits, c'est pourquoi ils ne peuvent pas être qualifiés de simples artisans. Leurs activités se rapprochent en effet beaucoup plus de celles des grands marchands entrepreneurs de l'époque. En conséquence ils sont qualifiés par certains auteurs comme des armuriers marchands (F. Menant, 1988, p. 143). Ceci justifierait aussi l'organisation professionnelle des armuriers milanais qui leur laissait une très grande liberté d'action y compris dans le contrôle des pièces. Toutefois, les sources ont essentiellement conservé la trace des grandes entreprises à l'instar des Missaglia ou des Negroli, qui exportent à l'étranger. Il est donc probable que la prise en compte des fabricants plus modestes nuancerait cette vision de la production italienne.

Comme nous l'avons vu précédemment, à Nuremberg, le système réglementaire est énoncé comme plus contraignant. La formation de grandes entreprises est prohibée et l'organisation professionnelle des armuriers semble plus hiérarchisée. Ceci se traduit notamment par une

séparation des tâches dans la confection des armures. Ainsi, un métier est dédié à la fabrication de tôle : les marteleurs qui assurent un approvisionnement en métal de qualité aux armuriers, constitué « au moins à moitié d'acier ». D'après ces sources, le métal devrait être majoritairement issu de la région du « Oberpfalz », le Haut Palatinat. Toutefois, ces propos mériteraient sans doute d'être nuancés par la confrontation avec des actes de la pratique (voir p.66). Les entreprises de certains armuriers allemands comme celle d'Anton Peffenhauser se rapprochent ainsi davantage du système des grands armuriers marchand italiens.

Néanmoins malgré ces différences, comme précédemment évoqué, la réussite de ces centres ne fait pas de doute. Elle pourrait être liée à une situation géographique favorable dont ces centres auraient su tirer parti. Ils sont en effet situés à proximité de régions sidérurgiques très actives dont le métal semble avoir été utilisé pour la fabrication d'armures d'après les sources écrites dont nous disposons. Toutefois, le marché du fer étant très développé et complexe à cette période, d'autres sources potentielles d'approvisionnements sont possibles. Les études de provenance des alliages ferreux pourraient permettre de discriminer ces différentes sources. Toutefois, elles n'ont été que peu employées dans le cas des armures. Il est ainsi difficile de déterminer précisément à ce jour, dans quelle mesure les armuriers pouvaient avoir recours à un métal importé d'une autre région et donc le poids réel qu'a pu tenir cette implantation géographique dans leur succès.

V. Bilan général et Problématique

Au terme de cet exposé, l'armure a été examinée sous différents points de vue. Ses usages, font écho à son histoire militaire et sociale. Elle est à la fois un objet de guerre, protégeant le combattant de « pied en cap » (C. Gaier, 2004, p. 173) au XV^e siècle sur le champ de bataille, et un objet de prestige dont une élite a longtemps revendiqué le port comme un droit naturel. A ce titre, elle prend place dans de nombreuses cérémonies et divertissements et peut même occuper une place d'honneur dans les funérailles d'un défunt. Sur les champs de bataille son emploi va finir par se généraliser et se diversifier obéissant à une réalité plus pragmatique de la guerre, qui a connu des bouleversements techniques et stratégiques comme le perfectionnement de l'arc et l'arbalète et l'apparition des armes à feu, mais aussi politiques avec la prise en charge progressive de l'équipement militaire par les gouvernements urbains, royaux et princiers. C'est également un objet qui peut être lu sous un aspect technique. En effet, la fabrication d'une armure demande d'abord la réalisation d'un demi-produit particulier, la tôle, mais également la maîtrise d'un certain nombre de gestes pour mettre en forme le matériau et s'assurer qu'il possède la résistance souhaitée, notamment par le biais de traitements thermiques. Enfin, il fait aussi écho à une histoire économique. Les armures sont des objets échangés sur de longues distances, produits en quantité par des centres renommés et dont certains ont fait une spécialité.

Partant de l'ensemble de ces considérations, nous avons choisi d'aborder l'étude de cet objet par la matière : le métal. Cet angle nous permettra d'analyser en détail, les aspects techniques de sa fabrication, de l'origine du métal à l'élaboration finale de la pièce, ainsi que les savoir-faire associés. Les approches archéométallurgiques ont montré leur potentiel pour identifier la nature du métal et les traitements thermiques appliqués. Toutefois, l'essentiel des recherches actuelles s'est concentré presque exclusivement sur les pièces de harnois articulé du XV^e et majoritairement du XVI^e siècles, produites en Italie et en Allemagne. Par conséquent, les autres types de défenses antérieures ou contemporaines que constituent les plaques de broigne ou de brigandine ne sont pas représentées ou très peu. Il en est de même pour les productions des autres centres de fabrication, ce qui ne permet pas d'apprécier l'évolution globale de cet objet d'un point de vue technique. Enfin, si les récentes méthodologies permettent d'étudier la provenance des alliages ferreux, les études précédentes ont montré les difficultés rencontrées pour leur application dans le cas d'objets dont le métal a été très travaillé. Par conséquent aucune étude archéométallurgique de provenance d'ampleur n'a pu être encore réalisée sur de tels objets.

Ainsi, nous avons dégagé quatre axes de réflexions, pertinents au regard de la nature de nos sources.

- Nous l'avons vu, la typologie de l'armure du XIII^e siècle au XVII^e siècle semble avoir évolué sous l'influence de différents facteurs tant militaires que sociaux. Qu'en est-il alors du métal employé ? Y a-t-il eu une évolution dans les matériaux utilisés ou les techniques de fabrication des différentes parties de l'armure en réponse à ces changements ?
- Au terme de l'exposé réalisé dans ce chapitre, l'importance des centres de productions européens semble très inégale : certains, majeurs et bien identifiés, dominent le marché tandis que d'autres semblent jouer un rôle moindre. Comment expliquer cette répartition ? Est-ce lié aux savoir-faire techniques des armuriers ? Ou bien à une organisation commerciale de la production plus efficace, soutenue par un accès facilité à une matière première de proximité ?
- La fabrication d'armures était réalisée par des travailleurs du métal spécialisés : les armuriers. Comment étaient organisées les productions au sein des ateliers ? Des modes de fabrication spécifiques ont-ils été mis en place pour la réalisation d'armures complètes ou pour des pièces de qualité constante, parfois produites en très grande quantité ?
- Enfin, la période qui nous occupe a connu le développement d'une innovation technique majeure dans le domaine de la métallurgie grâce au recours de la force hydraulique : le procédé de réduction indirecte du fer. Des traces de cette innovation sont-elles lisibles dans les armures ? Peut-on mettre en évidence des intérêts spécifiques à l'avoir utilisée pour la fabrication de ce type d'objet ?

Pour répondre à ces questions cette étude s'est appuyée sur plusieurs points :

- D'abord sur la mise en place d'un corpus de pièces représentatif à la fois de l'évolution de l'équipement défensif des combattants mais également des grands centres de production européens. Jusqu'ici, la plupart des armures étudiées étaient issues des collections de musées. Or, comme explicité précédemment, elles ne peuvent être complètement représentatives de la diversité des pièces autrefois produites, les objets les plus prestigieux ayant eu plus de chance d'être conservés. C'est pourquoi nous avons également privilégié l'étude de matériel archéologique défensif mis au jour récemment.
- Ensuite sur l'utilisation de méthodes expérimentales adaptées à l'analyse des échantillons d'armures, pour permettre l'étude microstructurale et inclusionnaire du métal. Une méthode spécifique pour l'analyse des éléments traces des inclusions de faible taille rencontrées fréquemment dans le cadre d'objets dont le métal a été très travaillé, a notamment été développée.

- Enfin, sur la mise en place de méthodologies adaptées de traitement statistiques de données pour répondre aux questions historiques posées.

Chapitre 2 : Description du matériel d'étude et réalisation des prélèvements

Ce chapitre est dédié à la présentation du matériel d'étude mobilisé dans ce travail pour répondre aux différentes questions posées dans le chapitre précédent. Le choix des pièces ainsi que la nature et l'emplacement des prélèvements effectués sont exposés dans une première partie. Nous nous emploierons ensuite à décrire succinctement le matériel d'étude par siècle et par grande typologie.

Une description plus détaillée relative à chaque objet étudié, ainsi que les emplacements des prélèvements effectués sont disponibles dans le volume Annexe.

I. Constitution du corpus

1) Choix des pièces

Afin de répondre aux questions posées dans le chapitre précédent, il nous a fallu mettre en place un corpus de pièces spécifique pour chaque axe dégagé. Tout d'abord, afin d'apprécier une vision d'ensemble des savoir-faire et des matériaux employés pour fabriquer les armures du XIII^e au XVII^e siècle, nous avons souhaité nous intéresser tant aux armures de plaques (plaques de broigne, plaques de brigandine) qu'aux éléments d'armures articulées. Cependant, les défenses antérieures au XV^e siècle voire au XVI^e siècle demeurent rares dans les collections de musées, c'est pourquoi nous nous sommes également tournés vers les découvertes archéologiques. Les SRA (Service régional de l'archéologie) de différentes régions ont été contactés⁶⁹, afin d'avoir accès au matériel défensif découvert lors de ces dernières années. Les plaques des sites de Laquenexy, Montbaron, Rodemack, Pompey mais aussi Maillezais sont directement issues de cette étape de prospection. Elles sont au nombre d'une trentaine, chiffre qui peut paraître peu élevé. Cependant, il témoigne directement du caractère exceptionnel des découvertes archéologiques de ce type d'objet, qui pose de plus des difficultés d'identification sur les sites.

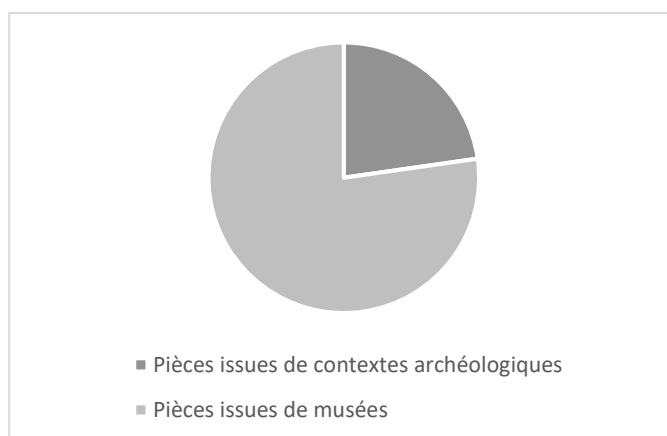


Figure 34 - Proportion de pièces issues de contextes archéologiques par rapport aux objets de musées

Les pièces de la fin du XV^e siècle et du XVI^e siècle sont les plus répandues dans les collections muséales. Ainsi, après prospection dans les inventaires et catalogues de musées, des partenariats ont été mis en place avec différents musées nationaux⁷⁰ mais également internationaux⁷¹. Une discussion préalable avec les conservateurs ou les responsables des collections a été engagée dans chaque cas afin de déterminer les objets d'intérêt pour cette étude et susceptibles d'être analysés.

⁶⁹ Principalement les SRA des Pays de la Loire, du Centre, d'Alsace et de Lorraine.

⁷⁰ Notamment le musée de l'Armée (Paris), le musée Dobrée (Nantes), Le musée du Vieux Château (Laval), Le musée Lorrain (Nancy).

⁷¹ Wallace Collection (Londres)

Le second axe de ce travail concernait l'étude des productions des différents centres armuriers, à la fois celles des plus prestigieux (Italie du Nord, centres germaniques) et celles de centres moins connus (France, Espagne...). Ainsi, un corpus spécifique de pièces italiennes et allemandes mais aussi française a été constitué.

Le troisième axe interrogeait l'organisation des productions au sein des ateliers. Pour répondre à cette question nous avons ici favorisé l'étude de pièces nurembergeoises. Ces dernières ont en effet l'avantage de porter régulièrement des poinçons relatifs à la ville mais aussi parfois à un armurier en particulier, comme Valentin Siebenbürger. Cette identification précise permet ainsi d'interroger le sujet à l'échelle d'un même centre de production mais également d'un même atelier de production. La nature des pièces fabriqués (sur mesure ou en série) tient également une place centrale dans ce questionnement. Par conséquent, nous avons choisi d'éclairer la fabrication sur mesure des différents éléments qui constituent une armure par l'étude de deux armures semi-complètes : l'armure dite de Sainte Suzanne, qui est un harnois de guerre du XV^e siècle, et celle de François de Montmorency, armure du XVI^e siècle vraisemblablement destinée à être portée lors de cérémonies. L'accès à ces deux ensembles offre la possibilité de se pencher sur la cohérence des différents éléments qui constituent une armure du point de vue de la nature des matériaux employés ainsi que du travail de forge en fonction de l'usage de la pièce (guerre ou parade). De plus, un dernier lot particulier a été pris en compte. Il s'agit de la découverte exceptionnelle de plusieurs centaines de cuirasses du XVII^e siècle retrouvés lors des fouilles de l'atelier des fondeurs Perdry à Valenciennes. La taille impressionnante de ce corpus permet d'interroger un tout autre aspect de la production des armures à savoir le travail en « série » et en masse de pièces à destination de l'armée.

Enfin, pour répondre au dernier axe de la thèse, qui concerne le développement du procédé de réduction indirecte et son utilisation pour la fabrication d'armures, l'ensemble des pièces du corpus a été mis à contribution.

2) Nature et emplacement des prélèvements

La prise de prélèvement, essentielle à l'étude des pièces, devait tenir compte de deux principaux critères, à savoir respecter au mieux l'intégrité des objets mais aussi garantir la représentativité des futures analyses. Les fers et aciers anciens peuvent être, comme nous l'avons dit, très hétérogènes à différentes échelles (à l'échelle du centimètre mais aussi à l'échelle microstructurale). La taille du prélèvement effectuée devait permettre de rendre compte de cette hétérogénéité. Ainsi, pour chaque prélèvement réalisé, une discussion préalable a été mise en place avec les conservateurs ou les responsables du matériel afin de déterminer l'emplacement ainsi que la taille de l'échantillon, qui a été généralement fixée à quelques millimètres.

Dans chacun des cas, les emplacements ont été choisis afin de pouvoir dissimuler au maximum la découpe mais également favoriser les éventuels traitements de restauration (figure 35). Ainsi, afin de conserver la forme initiale de l'objet les prélèvements n'ont généralement pas été effectués sur les bords des plates d'armures. Dans le cas des objets archéologiques, une radiographie a généralement été faite en amont afin de cibler les zones non corrodées. Cependant le contraste observé dépend non seulement de la nature des phases mais également de l'épaisseur de l'objet. Ainsi dans le cas des pièces les plus altérées, la prise de prélèvement n'a malheureusement pas pu aboutir sur une étude en laboratoire, du fait de l'absence de métal.

De façon générale, la taille des prélèvements est plus importante sur les objets archéologiques que sur les pièces de musées, car le métal était beaucoup plus altéré. Un repérage de l'orientation du prélèvement a été réalisé par l'apposition d'un marquage de couleur (blanc ou rouge) directement sur les pièces ou une fois le prélèvement réalisé (voir figure 35).



Figure 35 -Exemple de positionnement d'un prélèvement effectué sur une salade du musée de l'Armée. A droite, prélèvement résultant (cliché E. Bérard)

De plus, quand c'était possible, plusieurs prélèvements ont été réalisés sur une même pièce afin de rendre compte d'éventuelles hétérogénéités, phénomènes déjà relevés par les études de nos prédécesseurs. Les prélèvements ont été réalisés à l'aide d'une petite scie à lame circulaire (voir

figure 36) par des restaurateurs spécialisés dans le traitement du métal, qui étaient directement rattachés aux musées partenaires ou avec lesquels nous avons établi une collaboration dans le cadre de ce projet, comme ce fut le cas des laboratoires Arc'Antique (Nantes) du LAM (Jarville-la-Malgrange) ou encore du C2RMF (Paris).



Figure 36 - Réalisation d'un prélèvement par le restaurateur José Ferreira (musée de l'Armée) (cliché E. Bérard)

L'emplacement des prélèvements est détaillé pour chacune des pièces étudiées dans le volume annexe. Nous allons à présent présenter le matériel d'étude de manière chronologique.

II. XIII^e siècle-XIV^e siècle

1) Défenses de tête

Elles sont au nombre de 6. Les quatre premières sont issues des collections du musée de l'Armée. L'avant dernière, une cervelière, est traditionnellement associée aux autres éléments de l'armure dite « l'armure de Sainte Suzanne » datée du XV^e siècle et dont nous reparlerons ultérieurement (O. Renaudeau, 2014). Toutefois la défense de tête est antérieure à l'ensemble puisqu'elle daterait plutôt du XIV^e siècle. Une dernière pièce a été ajoutée dans ce lot. Il s'agit d'une défense de tête publiée par Viollet le Duc comme un heaume du XIII^e siècle (H3), cependant cette datation est aujourd'hui questionnée. En effet, d'après O. Renaudeau (musée de l'Armée) elle pourrait être postérieure. Le tableau 6 présente les informations relatives à ce matériel. Les emplacements précis des prélèvements sont disponibles en annexe.

Tableau 6 - Défenses de tête datées du XIII^e siècle et XIV^e siècle

Armure ou Élément	Désignation	Datation	Lieu de fabrication supposé	Musée	Nombre de prélèvements	Numéro(s) du ou des échantillon(s)
H26	Timbre de bacinet	XIV ^e siècle	Indéterminé	Musée de l'Armée	1	H26
20036	Timbre de bacinet	XIV ^e siècle	Indéterminé	Musée de l'Armée	1	20036
HPO 618.1	Timbre de bacinet	XIV ^e siècle	Indéterminé	Musée de l'Armée	1	HPO 618.1
HPO668	Timbre de bacinet	XIV ^e siècle	Indéterminé	Musée de l'Armée	1	HPO668
STS_1	Cervelière	Première moitié du XIV ^e siècle	Indéterminé	Musée de Laval	2	STS_1 STS_9
H3	Défense de tête à nasal et couvre nuque articulé	XIII ^e siècle ?	Indéterminé	Musée de l'Armée	3	H3_1 H3_2 H3_3

2) Plaques de brigandine et plaques de broigne ou d'armure

Ce type de pièce est rarement conservé dans les collections muséales. Ainsi, les éléments présentés sont issus de trois sites archéologiques : la résidence aristocratique de Montbaron (Indre), l'abbaye de Maillezais (Vendée), et la ferme seigneuriale de Laquenexy (Moselle)⁷².

Les fouilles de la résidence aristocratique rurale de Montbaron ont révélé la présence d'un mobilier métallique varié dont une dizaine de plaques identifiées comme des plaques d'armures ou de broigne. Ces plaques ont été retrouvées sur la deuxième plate-forme de la résidence⁷³ avec une céramique du début du XIII^e siècle (A. Querrien and J. Blanchard, 2004, p. 116). Cette identification a été réalisée grâce à plusieurs critères : leur aspect (matériau, épaisseur et type de corrosion), la position des trous de fixation ainsi que leur forme incurvée. Aucune trace de textile ou de rivet n'a été repérée sur les objets, ce qui indiquerait que les plaques étaient assemblées par des lacets de cuir, matériau qui peut ne pas laisser de trace (A. Querrien and J. Blanchard, 2004, p. 115).

⁷² Pour des détails sur les contextes de découvertes de ces objets se reporter aux publications d'Armelle Querrien et al., pour Montbaron : (A. Querrien and J. Blanchard, 2004), de Jocelyn Martineau et al., pour Maillezais : (J. Martineau et al., 2005) et de Sébastien Jeandemange et al., pour Laquenexy (S. Jeandemange et al., 2011).

⁷³ Les plaques sont toutefois issues de différentes structures archéologiques appartenant à cette même plateforme (un fossé et différentes fosses) (A. Querrien and J. Blanchard, 2004).

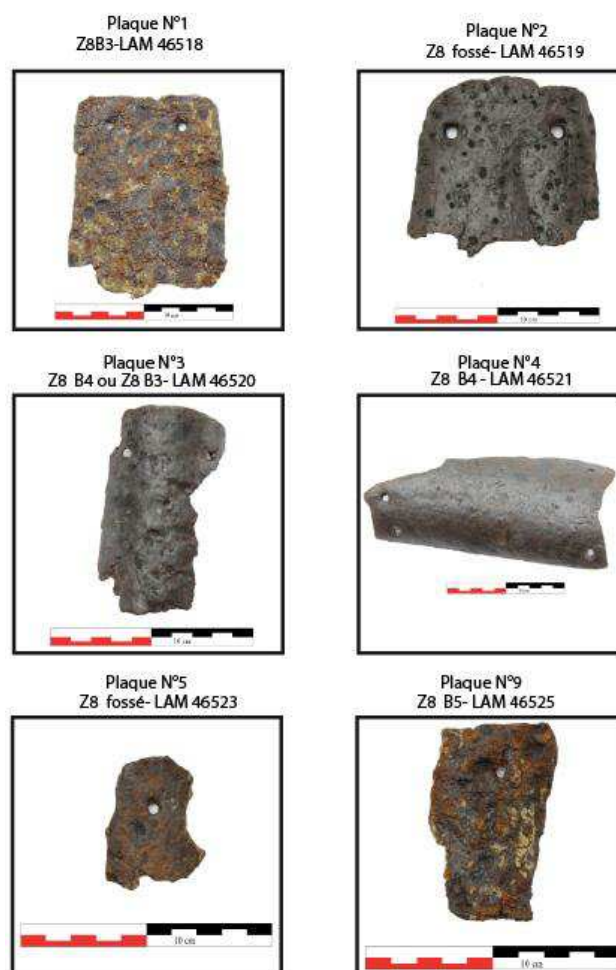


Figure 37- Plaques de broigne ou d'armures issues du site de Montbaron. (cliché E. Bérard)

Le second lot de plaques est issu d'un dépôt (US 528) situé sur le parvis de l'abbaye de Maillezais, comblé par des matériaux très hétérogènes d'origine végétale et organique (charbon de bois, pollens, graines...), mêlés à un mobilier très diversifié. Plus de 1500 objets métalliques mais aussi une importante quantité de restes céramiques ont ainsi été retrouvés. Les déchets ont été brûlés régulièrement sur place, ce qui a généré une épaisse couche de cendre de plus de 0,4 m qui s'étale sur une surface de 118 m² (J. Martineau et al., 2005). Parmi le mobilier métallique on trouve une soixantaine de plaques de brigandines, qui appartiennent vraisemblablement au même individu. Elles présentent trois rivets en alliage cuivreux formant une fleur, un type bien connu pour cette époque (J. Martineau et al., 2005). Les descriptions de ces plaques sont issues des observations effectuées par M. Linlaud (Université Paris Nanterre). D'après lui, le modèle d'armure supposé d'assemblage des différentes plaques est celui de l'armure 22 de la bataille de Wisby (Suède) (B. Thordeman, 2001, p. 112). Les vestiges de matières organiques retrouvés sur certaines d'entre elles ont fait l'objet d'une étude spécifique réalisée par F. Médard (ANATEX).

Enfin, la fouille de la ferme seigneuriale de Laquenexy, occupée entre le XIII^e et le XV^e siècle a livré un certain nombre d'objets métallique dont des plaques incurvées et perforées. Ces plaques, ont été retrouvées à l'intérieur de la ferme médiévale dans le même bâtiment (bâtiment 1, US 411, US 434, US 442) (S. Jeandemange et al., 2011). D'abord associées au domaine agricole, sans que leur fonction exacte ait pu être identifiée, elles ont récemment fait l'objet d'une nouvelle interprétation par A. Raffin lors de ses travaux de master (A. Raffin, 2015). En effet, leur morphologie, très proches de celles du site de Montbaron, les associeraient directement à la catégorie des plaques de broigne. Cette hypothèse est soutenue par la découverte de plusieurs pièces d'armement sur le site comme un carreau d'arbalète ainsi qu'une épée, dans le même bâtiment (S. Jeandemange et al., 2011).

Chapitre 2 : Description du matériel d'étude et réalisation des prélèvements

Tableau 7 - Plaques de broignes et de brigandines (XIII^e siècle-XV^e siècle). Observations réalisées par A. Querrien et J. Blanchard, (A. Querrien and J. Blanchard, 2004, p. 115), M. Linlaud, et S. Jeandemange (S. Jeandemange et al., 2011)

Isolat ou Élément	Identification	Observations	Datation	Site	Nombre de prélèvements	Numéro(s) du ou des échantillon(s)
n°1 Z8B3- LAM46518	Plaque de broigne ou d'armure	Plaque de courbure assez faible (mais elle a pu être écrasée). 2 trous (0,5 cm de diamètre près des deux angles de l'extrémité étroite)	Début du XIII ^e siècle	Montbaron	1	LAM46518
n°2 Z8 fossé- LAM46519_1	Plaque de broigne ou d'armure	Cette plaque a reçu un choc qui l'a pliée en son milieu ce qui explique une courbure assez faible. 2 trous (0,4 et 0,6 cm de diamètre aux deux angles de l'extrémité conservée)	Début du XIII ^e siècle	Montbaron	2	LAM46519_1 LAM46519_2
N°3 Z8B4- LAM46520	Plaque de broigne ou d'armure	Courbure faible à son extrémité conservée et importante vers son milieu. 2 trous (0,3 cm de diamètre)	Début du XIII ^e siècle	Montbaron	1	LAM46520
n°4 Z8B4- LAM46521	Plaque de broigne ou d'armure	Forme trapézoïdale : l'extrémité la plus large et la plus bombée est concave et trois fois plus large que l'autre. Elle pouvait être destinée à protéger un avant-bras droit 4 trous aux angles (0,6 cm de diamètre sur la face externe et 0,7 sur la face interne)	Début du XIII ^e siècle	Montbaron	1	LAM46521
n°5 Z8 fossé- LAM46523	Plaque de broigne ou d'armure	Plaque informe mais de même type	Début du XIII ^e siècle	Montbaron	1	LAM46523
n°9 Z8B- LAM46525	Plaque de broigne ou d'armure	Fragment de plate incurvée	Début du XIII ^e siècle	Montbaron	1	LAM46525

Chapitre 2 : Description du matériel d'étude et réalisation des prélèvements

Isolat ou Elément	Identification	Observations	Datation	Site	Nombre de prélèvements	Numéro(s) du ou des échantillon(s)
RX1408	Plaque de brigandine	Chevauchement de plusieurs plaques - au moins deux - elles sont légèrement cintrées, on observe des traces de cuir perminéralisé et des traces de tissus à la surface d'une des plaques, la radiographie révèle au moins 5 rivets	3ème quart du XIV ^e siècle	Maillezais	2	RX1408_S RX1408_I
RX14 4	Plaque de brigandine	Légèrement cintrées, la radiographie révèle quatre perforations munies de rivets en forme de fleur et en alliage cuivreux, certainement deux sur chaque plaque	3ème quart du XIV ^e siècle	Maillezais	1	RX14 4
RX 612	Plaque de brigandine	Chevauchement de trois plaques de brigandines au moins deux sont complètes. On observe deux rangés de trois rivets en fleur et alliage cuivreux	3ème quart du XIV ^e siècle	Maillezais	1	RX 612
RX14 EN	Plaque de brigandine	Chevauchement de plusieurs plaques	3ème quart du XIV ^e siècle	Maillezais	2	RX14EN_1 RX14EN_2
348 214 425	Plaque de broigne	Pièce rectangulaire de section courbe, s'épaississant légèrement d'une extrémité à l'autre, percée de quatre petits trous et d'un gros trou central.	XIII ^e -XV ^e siècle	Laquenexy	1	348214425
34818 411 1	Plaque de broigne	Fragment de plaque en fer incurvé et muni de deux trous perforés.	XIII ^e -XV ^e siècle	Laquenexy	1	34818411 1
34825 Objet 6 2	Plaque de broigne	Fragment de plaque en fer plate et munie de deux trous perforés.	XIII ^e -XV ^e siècle	Laquenexy	1	34825 Objet 6 2

Chapitre 2 : Description du matériel d'étude et réalisation des prélèvements

Isolat ou Élément	Identification	Observations	Datation	Site	Nombre de prélèvements	Numéro(s) du ou des échantillon(s)
34820 434 1	Plaque de broigne	Fragment de plaque en fer incurvé et muni de deux trous perforés.	XIII ^e -XV ^e siècle	Laquenexy	1	34820 434 1

III. XV^e siècle

1) Éléments d'armures articulées

Une vingtaine d'éléments d'armure datés du XV^e siècle ont été rassemblés. Ils sont issus des collections du musée de l'Armée (Paris), du musée Lorrain (Nancy), du musée Dobrée (Nantes), du Royal Dutch Army Museum (Delft) ainsi que de la Wallace Collection (Londres). Ces objets, bien que contemporains, n'ont a priori aucun lien entre eux. Leur lieu supposé de fabrication est déterminé principalement par leur typologie, recensée dans les catalogues des différents musées. Parfois, la présence de poinçon apposé sur les pièces permet de les relier à un atelier ou un centre de fabrication particulier, mais de telles marques demeurent rares. Les descriptions présentées dans le tableau 8 sont issues des catalogues des différents musées mais également des échanges avec A. Williams (Wallace Collection) et O. Renaudeau (musée de l'Armée). Pour certains échantillons, une étude métallographique avait déjà été menée par A. Williams⁷⁴.

Tableau 8 - Éléments d'armures articulées du XV^e siècle

Armure ou Élément	Désignation	Datation	Lieu de fabrication supposé	Description marque et attribution	Musée	Nombre de prélèvements	Numéro(s) du ou des échantillon(s)
K243	Heaume	XV ^e siècle	Indéterminé		Royal Dutch Army Museum	1	K243
W.C.A.152	Armet	1470-1510	Italie du Nord	Trois marques d'armuriers (1 ^{ère} lettre "C")	Wallace Collection	1	W.C.A.152
A 208	Dossière	1480	Allemagne	Marque qui ressemble à celles laissées par les asseurs d'or ou d'argent	Wallace Collection	1	A 208
9301895-2	Défense de bras	XV ^e siècle	Italie du Nord		Musée Dobrée	1	9301895-2
930 1 892	Brassard	1460	Italie du Nord	Lettre B couronnée	Musée Dobrée	1	930 1 892_T
930 1 895	Cubitière	XV ^e siècle	Italie du Nord	3 poinçons (Y couronné) associés à Pier Innocenzo da Faerno armurier Milanais	Musée Dobrée	1	930 1 895_T
930 1 904	Gantelet	1450-1460	Italie du Nord	1 poinçon sur la poignée	Musée Dobrée	1	930 1 904_T

⁷⁴ Il s'agit des échantillons W.C.A.152 et A 208

Chapitre 2 : Description du matériel d'étude et réalisation des prélèvements

Armure ou Elément	Désignation	Datation	Lieu de fabrication supposé	Description marque et attribution	Musée	Nombre de prélèvements	Numéro(s) du ou des échantillon(s)
H35	Salade	XV ^e siècle	Italie du Nord		Musée de l'Armée	1	H35
HPO2608	Cubitière et arrière bras	1480	Allemagne		Musée de l'Armée	2	HPO2608_1 HPO2608_2
930.1.891	Epaulière	1470	Italie du Nord		Musée Dobrée	1	930.1.891
H43.1	Timbre de salade	XV ^e siècle	Indéterminé		Musée de l'Armée	1	H43.1
HPO 717	Timbre de bacinnet	Première moitié du XV ^e siècle	Indéterminé		Musée de l'Armée	1	HPO 717
HPO618.2	Timbre de salade	XV ^e siècle	Indéterminé		Musée de l'Armée	2	HPO618.2_1 HPO618.2_2
HPO618	Timbre de salade	XV ^e siècle	Espagne		Musée de l'Armée	1	HPO618
61006607	Epaulière ou cuissard	XV ^e siècle	Allemagne		Musée Lorrain	5	06100607 1 06100607 2.1 06100607 2.2 06100607 3 06100607 4
61006605	Epaulière ou cuissard	XV ^e siècle	Allemagne		Musée Lorrain	4	06100605 1 06100605 2 06100605 3 06100605 4
951182	Bassinnet à mézail	1380-1420	Indéterminé		Musée Lorrain	1	951182

A ce premier ensemble de pièce s'ajoute pour le XV^e siècle le harnois de Sainte Suzanne.

2) L'armure de Sainte Suzanne

L'armure dite de Sainte Suzanne fait partie des collections du musée du Vieux Château à Laval, et est actuellement exposée au Musée de l'auditoire de Sainte Suzanne. Elle est un des plus anciens harnois conservés en France. La provenance de cet objet, entré dans les collections du musée au XIX^e siècle s'avère malheureusement inconnue, tout comme les conditions de sa découverte. Cependant, sa typologie rapprocherait l'armure des productions italiennes et notamment milanaises du XV^e siècle, reconnaissable à la dissymétrie de ses défenses d'épaules et de bras. La dossière, est forgée en trois parties (deux plaques latérales couvrant les flancs, et une centrale couvrant l'échine), pratique courante au XV^e siècle (O. Renaudeau, 2014).

Malheureusement aucun poinçon ne permet de l'associer à un atelier en particulier. O. Renaudeau (musée de l'Armée) précise également que le rayonnement de Milan était tel à cette époque qu'il pourrait aussi s'agir d'une imitation française. Un remontage des différents fragments et un soclage ont été opérés par l'atelier de restauration « métal » du musée de l'Armée en 2006, afin d'en améliorer la lisibilité. L'état très fragmentaire de la pièce pourrait laisser penser qu'elle a subi un accident, comme la chute d'un mur ou d'un édifice. Ainsi, l'armure était peut-être déposée dans un sanctuaire à titre de dépôt votif après avoir pris place aux funérailles d'un défunt. La destruction de l'édifice auprès duquel elle aurait été déposée, l'aurait ensuite ensevelie (O. Renaudeau, 2014).

Tableau 9 - Prélèvements sur l'armure de Sainte Suzanne

Armure ou Élément	Description	Nombre de prélèvements	Numéro(s) du ou des échantillon(s)
STS_2	Cubitière	1	STS_2
STS_3	Plastron	1	STS_3
STS_4	Dossière (parties latérales)	2	STS_4 STS_6
STS_5	Epaulière Gauche	1	STS_5
STS_7	Epaulière Droite	1	STS_7
STS_8	Arrière bras	1	STS_8
STS_10	Braconnière	1	STS_10
STS11	Dossière (partie centrale)	1	STS11

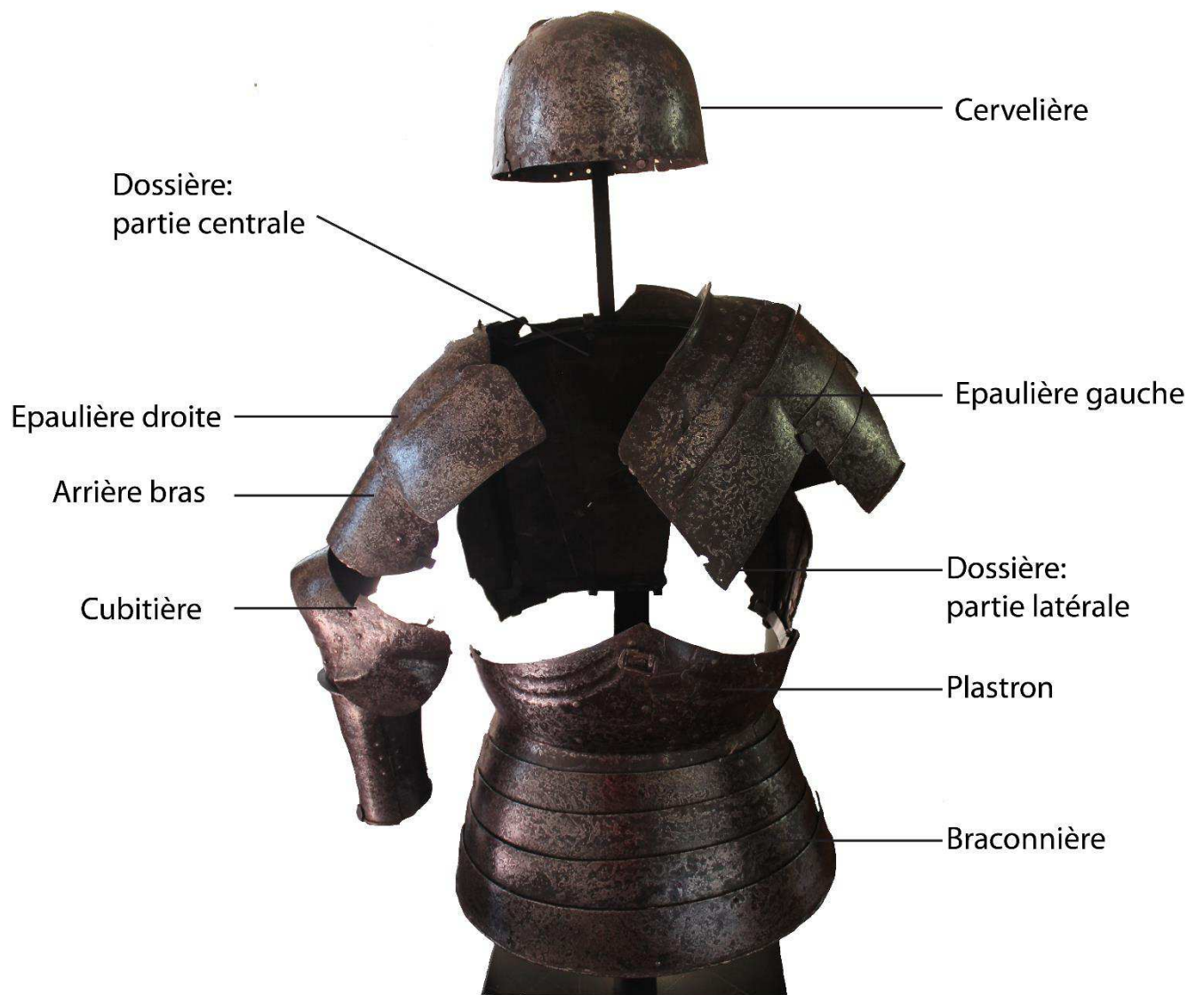


Figure 38 - Armure de Sainte Suzanne (cliché E. Bérard)

IV. XVI^e siècle

1) Eléments d'armures articulées

Cet ensemble compte une quarantaine de pièces qui seraient issues aussi bien d'Allemagne que d'Italie, de France ou encore d'Espagne (voir figure 39). Comme précédemment évoqué, les pièces allemandes et notamment nurembergeoises ont une place privilégiée dans ce corpus. Leur poinçon permet de les relier directement à la ville voire à un atelier de fabrication, comme c'est le cas de celui de Valentin Siebenbürger. Ainsi, elles vont nous permettre d'interroger la production d'armures à la fois à l'échelle de ce centre mais également à celle d'un atelier. Les pièces françaises, très peu étudiées jusqu'ici car plus difficilement identifiables, occupent la seconde place du classement. Leur étude sera complétée par celle de l'armure de François de Montmorency qui fera l'objet d'un paragraphe spécifique. Une grande partie de ces pièces sont issues de collections muséales déjà évoquées, auxquelles il faut ajouter les pièces de harnois issues du Château de l'Avant-Garde de Pompey (Moselle) ainsi que la défense de bras du Château de Rodemack (Moselle).

Le château de Pompey a été construit au début du XIV^e siècle puis adapté au XV^e et XVI^e siècle aux nouvelles exigences de l'artillerie et finit démantelé par les troupes françaises en 1635 (G. Giuliano, 2001). Ses structures ont été mises au jour au XIX^e siècle puis laissées à l'abandon. Les fouilles qui ont été entreprises ont fourni un mobilier abondant dont un certain nombre de pièces d'armement. Malheureusement, elles ne furent pas publiées. G. Giuliano a entrepris l'étude de ce mobilier dont les objets, en l'absence de relevé stratigraphique, sont datés par typo-chronologie (H. Mouillebouche, 2012). Plusieurs plaques d'armures de notre corpus en sont issues. Les identifications des différents fragments ont été faites par M. Linlaud (Université Paris Nanterre) et O. Renaudeau (musée de l'Armée)

Le château de Rodemack aurait été fondé à la fin du XII^e siècle puis transformé en forteresse au cours du XVI^e siècle. Rénové au XIX^e siècle, il a fait l'objet de fouilles récentes (2013) notamment sur l'entrée basse et la cour haute (J.-D. Laffite, 2014). C'est au pied d'une tour de l'entrée basse du château (tour Boncourt), dans un fossé (n° 1112) qu'a été découvert la plaque d'armure étudiée correspondant à un brassard d'avant-bras daté du XV^e ou XVI^e siècle, d'après J.D Laffite.

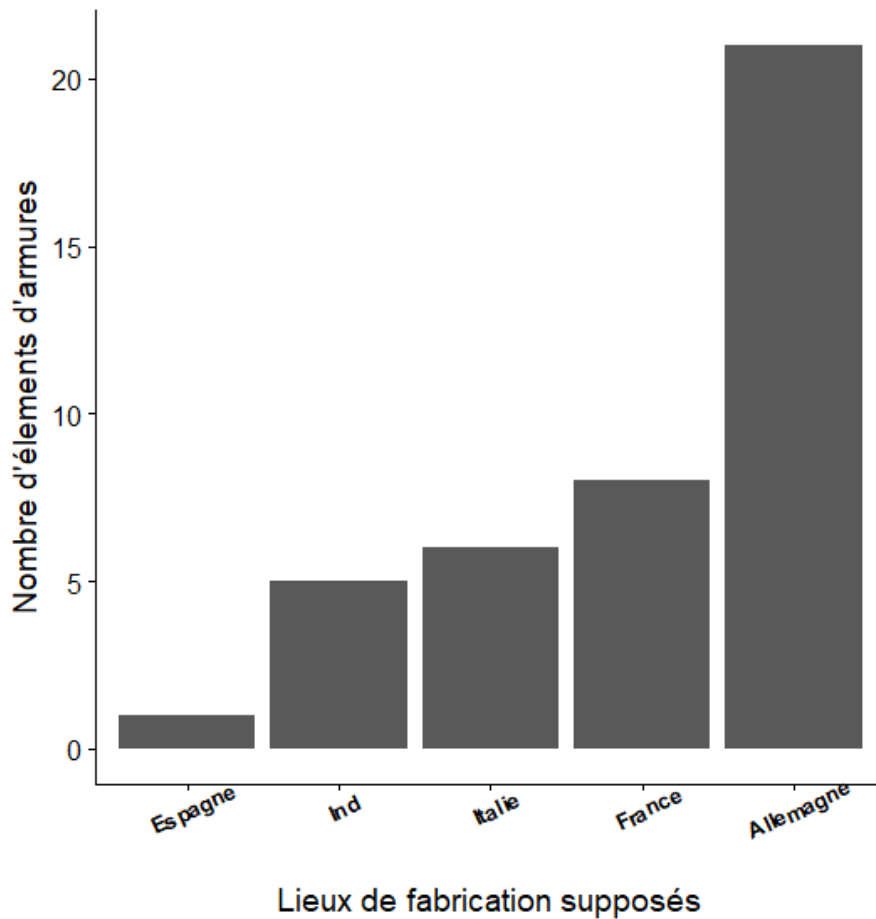


Figure 39 - Lieu de fabrication supposés des pièces d'armures articulés du XVI^e siècle

Des détails sur la nature des pièces étudiées sont rassemblés dans le tableau 10. Les localisations précises des prélèvements effectués, ainsi qu'une description plus complète pour certaines pièces sont présentées en annexe. Pour certains échantillons, une étude métallographique a déjà été menée par A. Williams⁷⁵.

⁷⁵ Il s'agit des éléments d'armures : MR87, W.C A.73, W.C A.215, GNM1312, W.C A.153, W.C A.245, W2333, 1120, W.C A.250, A228, H1G935, W.C A.148, W.C A.143, E

Chapitre 2 : Description du matériel d'étude et réalisation des prélèvements

Tableau 10 - Eléments d'armures articulées du XVI^e siècle, détails

Armure ou Elément	Désignation	Datation	Lieu de fabrication supposé	Description marque et/ou attribution au travail d'un armurier	Lieu de conservation / Musée	Site de découverte	Nombre de prélèvements	Numéro(s) du ou des échantillon(s)
MR87	Pièce de harnois articulé	XVI ^e siècle	Indéterminé		-		1	MR87
771	Gantelet	1500-1510	Allemagne		Royal Dusch Army Museum		1	771
W.C.A.73	Salade	1500	Italie		Wallace Collection		1	W.C.A.73
W.C.A.215	Plastron	1500-1520	Italie		Wallace Collection		1	W.C.A.215
GNM1312	Epaulière	1500	Allemagne / Nuremberg	Marque de Valentin Siebenbürger armurier nurembergeois	German National Museum		1	GNM1312
W.C.A.153	Armet	1500	Espagne ou Flandre	Marque indistincte lettre MFR	Wallace Collection		1	W.C.A.153
W.C.A.245	Cubitière	1524	Allemagne/ Augsbourg	Kolman Helmschmied	Wallace Collection		1	W.C.A.245
K241	Armure d'infanterie	1580	Allemagne/ Nuremberg		Royal Dusch Army Museum		1	K241
W2333	Pièce de harnois articulé	1530	Allemagne/ Brunswick		Deutsches Historisches Museum		1	W2333
G93-2-ou3	Brassard	1580-1590	France		Musée de l'Armée		2	G93-2-ou3-ech1 G93-2-ou3-ech2
9301912_1	Plastron	1540	Allemagne		Musée Dobrée		2	9301912_1_ech 1 9301912_1_ech 2
1120	Plastron	1546	Allemagne/ Nuremberg		German National Museum		1	1120
W.C.A.250	Partie supérieure d'une armure de joute	1550	Allemagne/ Augsbourg		Wallace Collection		1	W.C.A.250
A228	Faucre	1554-1558	Allemagne/ Landshut		Wallace Collection		1	A228
H1G935	Plastron et Bavière	1560	Allemagne		Higgins Armory Museum		2	H1G935 H1G935.B

Chapitre 2 : Description du matériel d'étude et réalisation des prélèvements

Armure ou Élément	Désignation	Datation	Lieu de fabrication supposé	Description marque et/ou attribution au travail d'un armurier	Lieu de conservation / Musée	Site de découverte	Nombre de prélèvements	Numéro(s) du ou des échantillon(s)
W.C.A.148	Morion	1570	Italie du Nord		Wallace Collection		1	W.C.A.148
W.C.A.143	Morion	1580	Italie du Nord		Wallace Collection		2	W.C.A.143A W.C.A.143B
E	Bourguignotte	1580-1600	Allemagne/ Nuremberg	Marque de Nuremberg et d'un maître M*I peut être M.Schneider	West Bohemian Museum		1	E
H83	Défense de tête	Fin du XVIe siècle	Indéterminé		Royal Dusch Army Museum		1	H83
930.1.912.2	Dossière	XVIe siècle	Allemagne		Musée Dobrée		1	930.1.912.2
895 423	Dossière	XVIe siècle	Allemagne/ Nuremberg		Musée Dobrée		1	895 423
G27618	Epaulière	1560	Allemagne		Musée de l'Armée		2	G27618_ech1 G27618_ech2
G40	Éléments d'une armure de cavalier	1533	Allemagne/ Nuremberg	Armure réalisée par Hans Ringler, armurier nurembergeois	Musée de l'Armée		4	G40-1 G40-2 G40-3 G40-4
G70	Epaulière et canon d'avant- bras	1560	France		Musée de l'Armée		2	G70-1 G70-2
895415	Dossière	XVIe siècle	France		Musée Dobrée		1	895415
930_1_911	Cuissard	XVIe siècle	Allemagne/ Augsbourg		Musée Dobrée		1	930_1_911
895_414	Gantelet	XVIe siècle	France		Musée Dobrée		1	895_414
895.4.1.3	Gantelet	XVIe siècle	France		Musée Dobrée		2	895.4.1.3_1 895.4.1.3_2
PAM	Armet	Entre 1450 et 1510	Indéterminé		Réserves de l'office du tourisme de Pont à Mousson		1	LAM46492 LAM46491_1 LAM46491_2
951183	Morion	2ème moitié du XVIe siècle ou le 1er quart du XVIIe siècle	Italie du Nord		Musée Lorrain		1	951183

Chapitre 2 : Description du matériel d'étude et réalisation des prélèvements

Armure ou Élément	Désignation	Datation	Lieu de fabrication supposé	Description marque et/ou attribution au travail d'un armurier	Lieu de conservation / Musée	Site de découverte	Nombre de prélèvements	Numéro(s) du ou des échantillon(s)
951183	Morion	2ème moitié du XVIe siècle ou le 1er quart du XVIIe siècle	Italie du Nord		Musée Lorrain		1	951183
951180.1	Armet	1510-1520	Allemagne		Musée Lorrain		1	951180.1
11423	Plastron	1550	Allemagne/ Nuremberg	Marque de la ville de Nuremberg	Musée de l'Armée		1	11423
G435-Gauche	Cuissard	1535-1540	Allemagne/ Nuremberg	Marque de la ville de Nuremberg et de Valentin Siebenbürger, armurier nurembergeois	Musée de l'Armée		5	G435_ech1 G435_ech2 G435_G3 G435_G4 G435_G5
G436-Gauche	Cuissard	1535-1540	Allemagne/ Nuremberg	Marque de la ville de Nuremberg et de Valentin Siebenbürger, armurier nurembergeois	Musée de l'Armée		6	G436_ech1 G436_ech2 G436_ech3 G436_G4 G436_G5 G436_G6
G436-Droit	Cuissard	1535-1540	Allemagne/ Nuremberg	Marque de la ville de Nuremberg et de Valentin Siebenbürger, armurier nurembergeois	Musée de l'Armée		5	G436_D1 G436_D2 G436_D3 G436_D4 G436_D5
G435-Droit	Cuissard	1535-1540	Allemagne/ Nuremberg	Marque de la ville de Nuremberg et de Valentin Siebenbürger, armurier nurembergeois	Musée de l'Armée		2	G435_D1 G435_D2
G204	Plastron	1550	Allemagne/ Nuremberg	Marque de la ville de Nuremberg	Musée de l'Armée		2	G204_ech1 G204_ech2
SN	Dossière	1535-1540	Allemagne/ Nuremberg	Marque de la ville de Nuremberg	Musée de l'Armée		1	SN
G143	Bourguignotte	1550	France		Musée de l'Armée		1	G143

Armure ou Élément	Désignation	Datation	Lieu de fabrication supposé	Description marque et/ou attribution au travail d'un armurier	Lieu de conservation / Musée	Site de découverte	Nombre de prélèvements	Numéro(s) du ou des échantillon(s)
G93-1	Colletin	1580-1590	France		Musée de l'Armée		1	G93-1
430AG442-LAM46482	Gantelet	Première moitié du XVI ^e siècle	France ou Italie			Château de l'avant-garde de Pompey	1	430AG442-LAM46482
430AG443-LAM46483	Pièce de harnois articulé	Première moitié du XVI ^e siècle	France ou Italie			Château de l'avant-garde de Pompey	1	430AG443-LAM46483
430AG441-LAM46481	Pièce de harnois articulé	Première moitié du XVI ^e siècle	France ou Italie			Château de l'avant-garde de Pompey	1	430AG441-LAM46481
430AG484-LAM746490	Pièce de harnois articulé	Première moitié du XVI ^e siècle	France ou Italie			Château de l'avant-garde de Pompey	1	430AG484-LAM746490
430AG440-LAM46480	Pièce de harnois articulé	Première moitié du XVI ^e siècle	France ou Italie			Château de l'avant-garde de Pompey	1	430AG440-LAM46480
430AG444-LAM46484	Gorgerin	XVI ^e siècle	France ou Italie			Château de l'avant-garde de Pompey	1	430AG444-LAM46484
G42	Bourguignotte	1560	France		Musée de l'Armée		2	G42_ech1 G42_ech2
Brassard_LA M45665	Plaque d'avant-bras	Fin du XV ^e siècle ou début du XVI ^e siècle	Indéterminé			Château de Rodemack	2	LAM45665_b LAM45665_a

En plus de ces éléments d'armures articulées d'origines diverses, deux ensembles d'éléments faisant partie d'une même armure ont été étudiés. Il s'agit d'une armure de cavalier et de celle de sa monture réalisée à Nuremberg dans l'atelier de Hans Ringler et celle de François de Montmorency, supposée de fabrication française.

2) L'armure de cavalier G40

Cette armure fait partie d'une garniture commandée à l'armurier nurembergeois Hans Ringler en 1531 par Otto Henri à l'armurier nurembergeois Hans Ringler. Les pièces de cet ensemble sont réparties dans différents musées. Le musée de l'Armée possède l'armure de campagne et sa barde de cheval (J.-P. Reverseau, 1996).

Poitrail
G40-2



10 cm

Element de harnachement
G40-3



10 cm

Element de harnachement
G40-4



10 cm



10 cm

Cuissard
G40-1

Figure 40 - Harnois et barde de cheval de l'armure G40 (musée de l'Armée) (Cliché E. Bérard)

Plusieurs prélèvements ont été réalisés à la fois sur les défenses relatives au combattant (cuissard) et à celles de sa monture, conservées au musée de l'Armée. Leurs localisations précises sont données dans le volume annexe.

Tableau 11 - Eléments de l'armure G40, détails des prélèvements

Armure ou Elément	Description	Nombre de prélèvements	Numéro(s) du ou des échantillon(s)
G40-1	Cuissard	1	G40-1
G40-2	Poitrail	1	G40-2
G40-3	Elément de harnachement	1	G40-3
G40-4	Elément de harnachement	1	G40-4

3) L'armure de François de Montmorency

Cette demi-armure a été réalisée pour François de Montmorency dans la seconde moitié du XVI^e siècle (1560-1570). Le monogramme que l'on retrouve reproduit sur l'ensemble de la décoration des pièces se compose d'un ϕ (phi) pour François, superposé au « M » croisé des Montmorency. La décoration traduit le style maniériste de l'époque, qui s'est imposé en France à la fin du siècle. Si elle est supposée de fabrication française, son atelier de fabrication demeure inconnu. Par la richesse de son décor mais également sa forme, cette pièce apparaît comme une armure de parade sans doute portée à l'occasion de cérémonies (J.-P. Reverseau, 1993, p. 18). Elle est actuellement conservée au musée des Beaux-Arts de Draguignan.

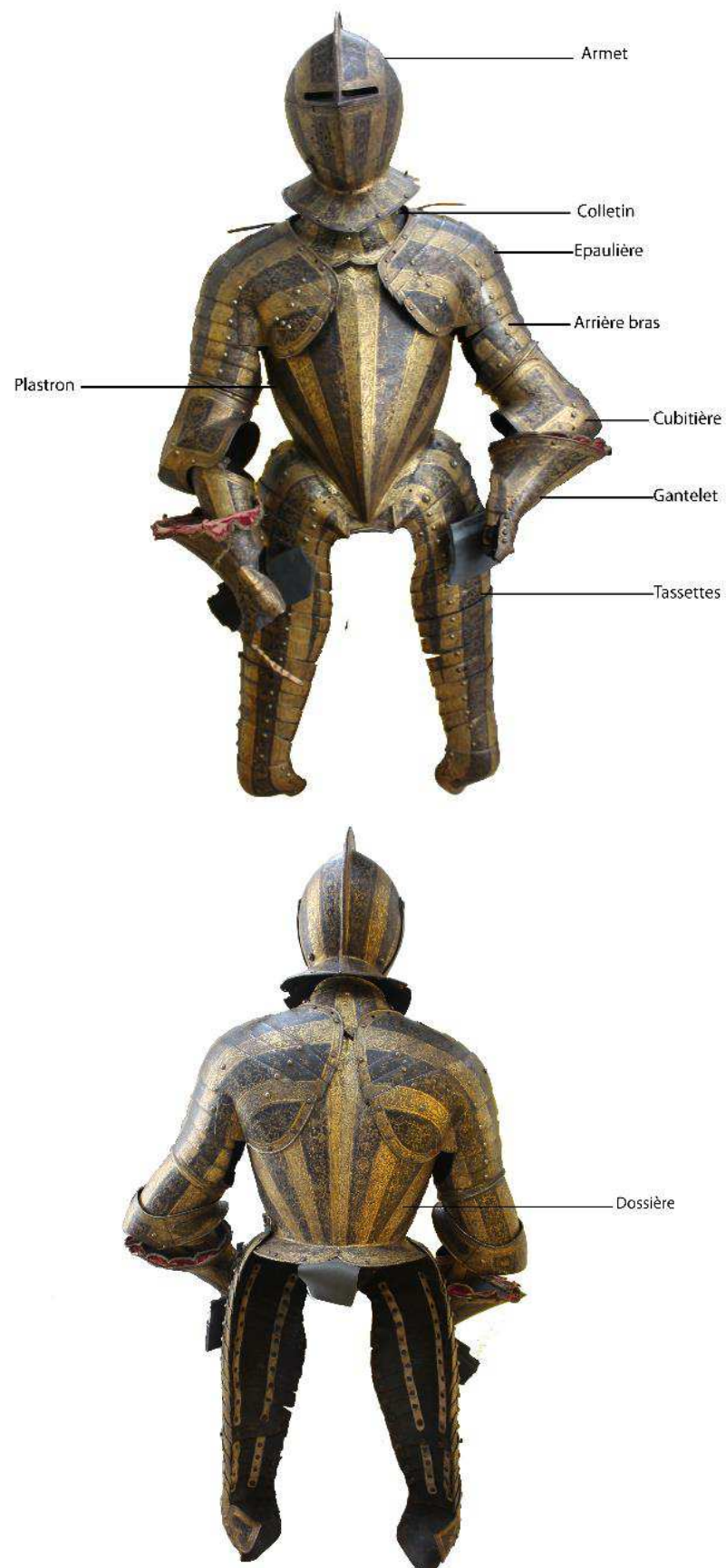


Figure 41 - Armure de François de Montmorency (Cliché E. Bérard)

A l'occasion d'une restauration de l'armure au Centre de recherche et de restauration des musées de France (C2RMF), des prélèvements ont été effectués par D. Robcis (C2RMF) sur une grande partie de ses éléments (voir tableau 12). Sur ceux constitués de différentes lames, comme le colletin ou les tassettes, plusieurs prélèvements ont pu être effectués afin d'étudier leur homogénéité. Le plastron n'a malheureusement pas pu faire l'objet d'une étude car aucun lieu de prélèvement dissimulable n'était envisageable.

Tableau 12 - Prélèvements sur l'armure de François de Montmorency

Armure ou Élément	Description	Lieu de fabrication supposé	Nombre de prélèvements	Numéro(s) du ou des échantillon(s)
Mont_1	Armet	France	1	1_casque
Mont_3	Colletin	France	4	3_colletin 4_colletin_a 4_colletin_b 15_colletin
Mont_10	Epaulière Gauche	France	1	10_epauliere
Mont_11	Arrière bras gauche	France	1	11_epauliere
Mont_12	Cubitière	France	1	12_cubitiere
Mont_2	Gantelet gauche	France	1	2_gantelet
Mont_5	Tassettes jambe gauche	France	3	5_tassette 6_tassette 7_tassette
Mont_13	Tassettes jambe droite	France	2	13_tassette 14_tassette
Mont_8	Dossière	France	2	8_dossiere 9_dossiere

V. XVII^e siècle

1) Éléments d'armure articulée

Une vingtaine de pièces d'armures articulées sont datées du XVII^e siècle. Leur lieu de fabrication est rarement renseigné conséquence directe de l'uniformisation des productions et de la plus grande rareté des poinçons (voir tableau 13). Pour certains échantillons, une étude métallographique a déjà été menée par A. Williams⁷⁶.

Tableau 13 - Pièces d'armures articulées du XVII^e siècle

Armure ou Élément	Désignation	Datation	Lieu de fabrication supposé	Description marque et attribution	Musée	Site de découverte	Nombre de prélèvements	Numéro(s) du ou des échantillon(s)
1341a	Gantelet	Début XVII ^e siècle	Indéterminé		Royal Dusch Army Museum		1	1341a
K221	Cubitière	Début XVII ^e siècle	Indéterminé		Royal Dusch Army Museum		1	K221
W.C.A.235	Colletin	1600	Italie du Nord		Wallace Collection		1	W.C.A.235
W.C.A.144	Morion	1600-1610	Italie du Nord		Wallace Collection		1	W.C.A.144
H	Défense de tête	1600-1630	Allemagne /Nuremberg	Marque de la ville de Nuremberg et celle d'un maître	West Bohemian Museum		1	H
GNM1359	Plastron	1609	Allemagne /Nuremberg	marques de maître « AK » et « FD »	German National Museum		2	GNM1359 a GNM1359 b
A1654	Pièce d'armure articulée	1610	Pays Bas				1	A1654
W.C.A.65	Armure articulée	1620	Allemagne/ Augsburg	Poinçon sur le gantelet attribué à Augsburg?	Wallace Collection		1	W.C.A.65
W.C.A.297	Pièce d'armure articulée	1630	France		Wallace Collection		1	W.C.A.297
Berlin	Plastron	1630	Allemagne /Nuremberg	Marque de la ville de Nuremberg	Deutsches Historisches Museum		1	Berlin

⁷⁶ Il s'agit des éléments d'armures : W.C.A.235, W.C.A.144, H, GNM1359, A1654, W.C.A.65, W.C.A.297, Berlin, W.C.A.180, W.C.A.237.

Armure ou Élément	Désignation	Datation	Lieu de fabrication supposé	Description marque et attribution	Musée	Site de découverte	Nombre de prélèvements	Numéro(s) du ou des échantillon(s)
W.C.A.180	Défense de tête	1630	Italie du Nord		Wallace Collection		1	W.C.A.180
W.C.A.237	Gorgerin	1640	France ou Allemagne		Wallace Collection		1	W.C.A.237
SNI40	Gantelet	XVI ^e siècle ou XVII ^e siècle	Indéterminé		Musée Dobrée		4	SNI40 1 SNI40 2 SNI40 3 SNI40 4
SNI39	Gantelet	XVI ^e siècle ou XVII ^e siècle	Indéterminé		Musée Dobrée		1	SNI39
430AG423_LAM46478	Protège joue	XVI ^e siècle ou XVII ^e siècle	Indéterminé			Château de l'avant-garde de Pompey	1	430AG423_LAM46478
430AG424-LAM46479	Protège joue	Fin du XVI ^e siècle ou XVII ^e siècle	Indéterminé			Château de l'avant-garde de Pompey	1	430AG424-LAM46479
951192.1	Plastron	XVII ^e siècle	Indéterminé		Musée Lorrain		1	951192.1
951192.2	Plastron	XVII ^e siècle	Indéterminé		Musée Lorrain		1	951192.2

A ce premier lot de pièces vient s'ajouter un autre ensemble de taille imposante. En effet, la mise au jour de plusieurs centaines de cuirasses datées du XVII^e siècle à Valenciennes nous a permis d'envisager pour cette période une approche comparative de grande ampleur, que nous allons à présent présenter.

2) Les cuirasses de Valenciennes

a) *Présentation de l'ensemble et définitions des typologies*

Les fouilles menées dans l'atelier d'un fondeur à Valenciennes, Jacques Perdry, a permis de découvrir plusieurs centaines de cuirasses typologiquement datées de la première moitié du XVII^e siècle et destinées à la cavalerie légère (P. Korpiun et al., 2010, p. 6). Les circonstances d'acquisition de ce stock par le fondeur Perdry demeurent inconnues. Toutefois en tant que munitionnaire du roi d'Espagne on sait que ce dernier était impliqué dans la fourniture d'armes.

Les pièces ont été retrouvées dans une fosse rectangulaire (1001N) de la fonderie (bâtiment C) spécialement aménagé pour y déposer cet équipement militaire de 468 objets soit 202 plastrons,

215 dossières, 5 casques, 29 fournements et 17 pulvérins. Les cuirasses ont été empilées les unes sur les autres de manière rationnelle dans le but de remplir au mieux le volume de la fosse. Le matériel militaire restant a été glissé dans les vides subsistant sans ménagements, ce qui suggère que les fondeurs n'avaient vraisemblablement pas l'intention de conserver ce dépôt ou de stocker les objets pour une courte durée afin de les réutiliser ou les revendre (P. Korpiun et al., 2010, p. 94). L'étude de cet équipement offre la possibilité de s'intéresser à la fabrication d'un matériel produit en masse à destination initiale de la cavalerie légère.

Après un examen minutieux de ces pièces 4 grandes types ont été dégagées pour les plastrons. Elles dépendent de la présence ou l'absence d'encoche en bas de ceux-ci ainsi que la hauteur du col (voir tableau 14 et figure 42).

Tableau 14 - Typologies dégagées dans le cas des plastrons

	Encoche (en bas du plastron)	Hauteur de col	Nombre d'exemplaires	Nombre de prélèvements
<i>Typologie 1</i>	Absence	Faible	33	10
<i>Typologie 2</i>	Absence	Importante	89	10
<i>Typologie 3</i>	Présence	Faible	37	10
<i>Typologie 4</i>	Présence	Importante	20	10



Figure 42 -Typologies identifiées dans le cas des plastrons. (Cliché E.Bérard)

L'entreprise fut plus compliquée dans le cas des dossières car elles s'avéraient bien plus endommagées, notamment sur leur partie inférieure. Trois types ont toutefois été définies en fonction de la hauteur du col (voir tableau 15 et figure 43)

Tableau 15 - Typologies dégagées dans le cas des dossières

	Hauteur de col	Nombre d'exemplaires	Nombre de prélèvements
Typologie 1	Importante	46	5
Typologie 2	Moyenne	20	5
Typologie 3	Faible	17	5



Figure 43- Typologies identifiées dans le cas des dossières (Cliché E.Véga)

Au total 55 prélèvements ont été réalisés. Pour les dossières 10 prélèvements ont été effectués, sur des pièces différentes pour chacune des types. Pour les dossières 5 prélèvements par types identifiées ont été réalisés.

Ce corpus se rapproche ici directement d'une production que C. Gaier qualifie de « prêt à porter », c'est-à-dire élaborée en grande quantité, sans doute en différentes tailles et ajustable à chacun des combattants. Nous avons souhaité vérifier l'existence de tailles distinctes pour équiper les combattants.

b) Des tailles différentes ?

Dans ce but, les pièces ont fait l'objet de prises de mesures. Pour les plastrons ainsi que les dossières trois grandeurs ont été relevées (voir figure 44)

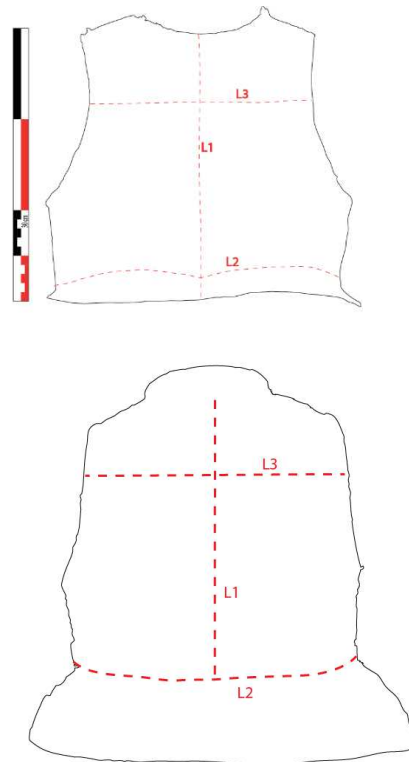


Figure 44 - position des grandeurs relevées sur les plastrons en haut, en bas sur les dossières

Une Analyse en Composantes Principales a ensuite été effectuée sur les données respectivement des plastrons et des dossières afin de dégager les variables à plus forte variance. Pour les plastrons, la grandeur L2 est la plus variable (voir figure 46). Une Classification ascendante hiérarchique a ensuite été entreprise sur les données de l'ACP comprenant 90% de la variance totale (deux premières composantes). Puis, trois familles ont été définies dans le cas des plastrons.

Sur les diagrammes présentés, le demi-tour de taille (L2) qui demeure la grandeur la plus discriminante, nous permet ainsi de distinguer trois familles qui pourraient correspondre à des tailles différentes (voir figure 47). Les écarts entre les valeurs moyennes des demi-tours de taille de chacune des catégories sont d'environ 2 cm, ce qui est de l'ordre de grandeur des différences de taille actuelles dans l'industrie du prêt à porter.

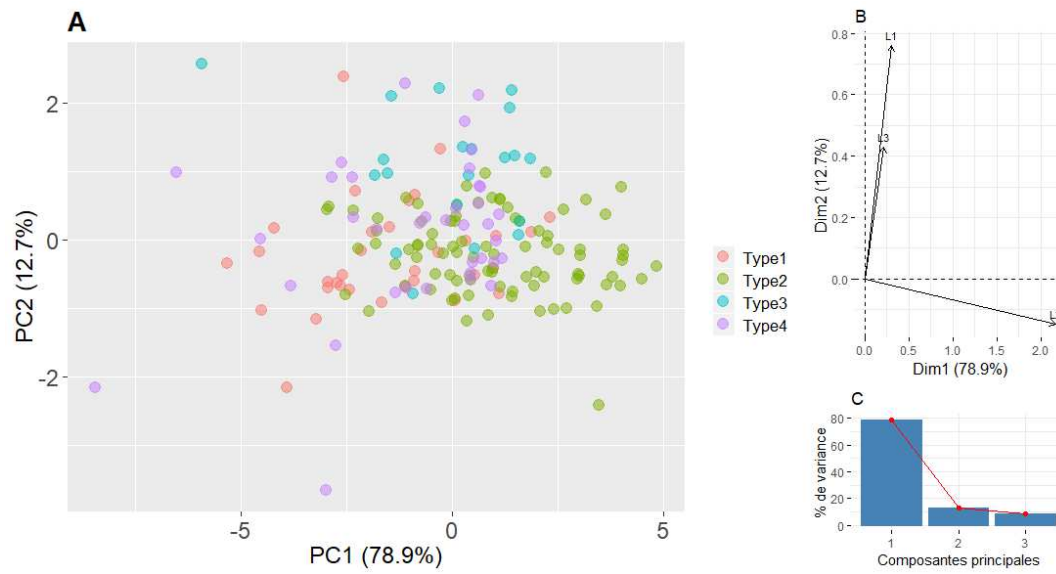


Figure 45 -Résultats de l'analyse en Composantes principales effectuée sur les données des plastrons. Axes PC1/PC2

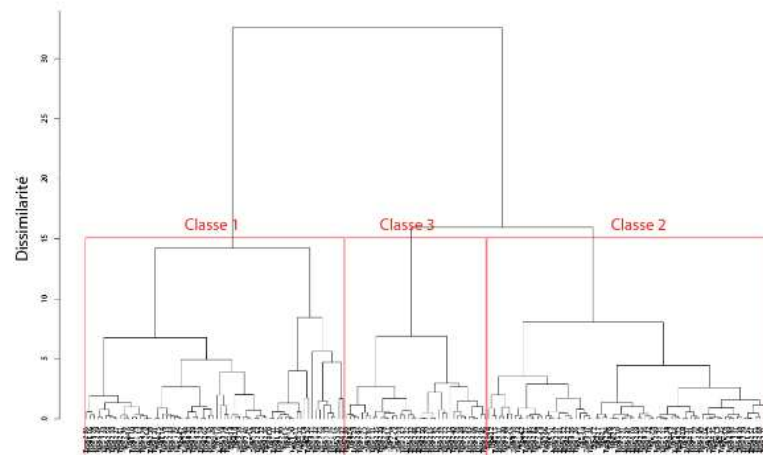


Figure 46 - Classification ascendante hiérarchique effectuée sur les données de l'ACP pour les plastrons

L'ensemble des typologies de plastrons définies sont présentes dans chacune d'entre elles mis à part la 3 qui comporte très majoritairement le type 2.

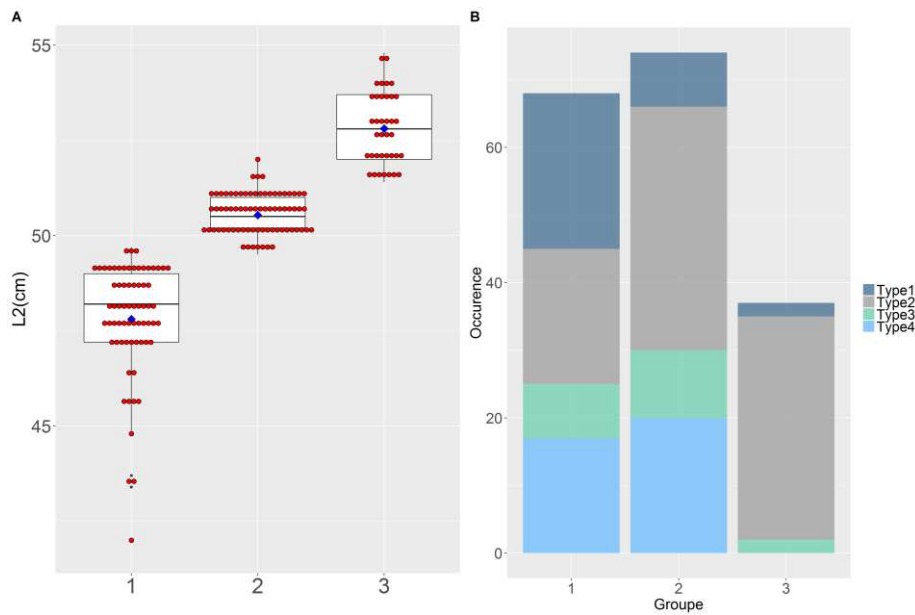


Figure 47 - « A » Tailles définies pour les plastrons selon le demi-tour de taille. « B » Répartition des typologies de plastrons pour chaque taille

Le même protocole a été suivi dans le cadre des dossières. Toutefois, elles s'avéraient beaucoup plus endommagées et ont permis un nombre moins important de mesures (sur une centaine de pièces seulement). Deux tailles ont pu être mises en évidence. Elles présentent un plus fort recouvrement. La taille 1 des dossières possède des dimensions comparables à la taille 2 des plastrons, tandis que la taille 2 pourrait être rapprochée de la taille 1 des plastrons. De plus, au vu de la forme des cous des cuirasses, les plastrons de type 2 étaient certainement associés aux dossières de type 1.

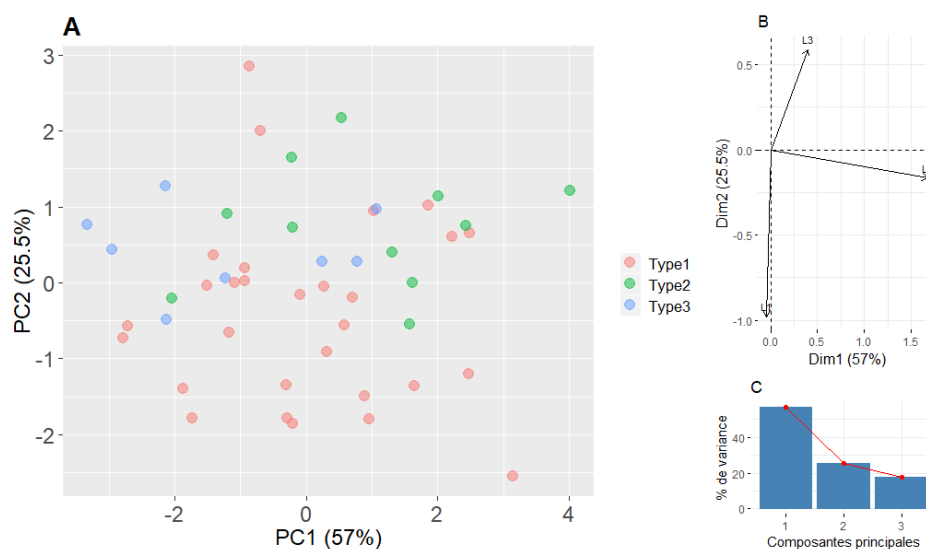


Figure 48 - Résultats de l'analyse en Composantes principales effectuée sur les données les dossières. Axes PC1/PC2

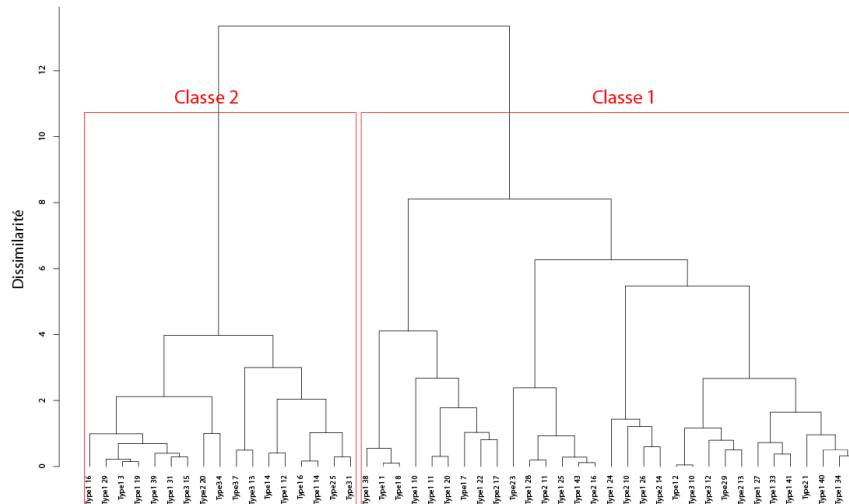


Figure 49 - Classification ascendante hiérarchique effectuée sur les données de l'ACP pour les dossiers

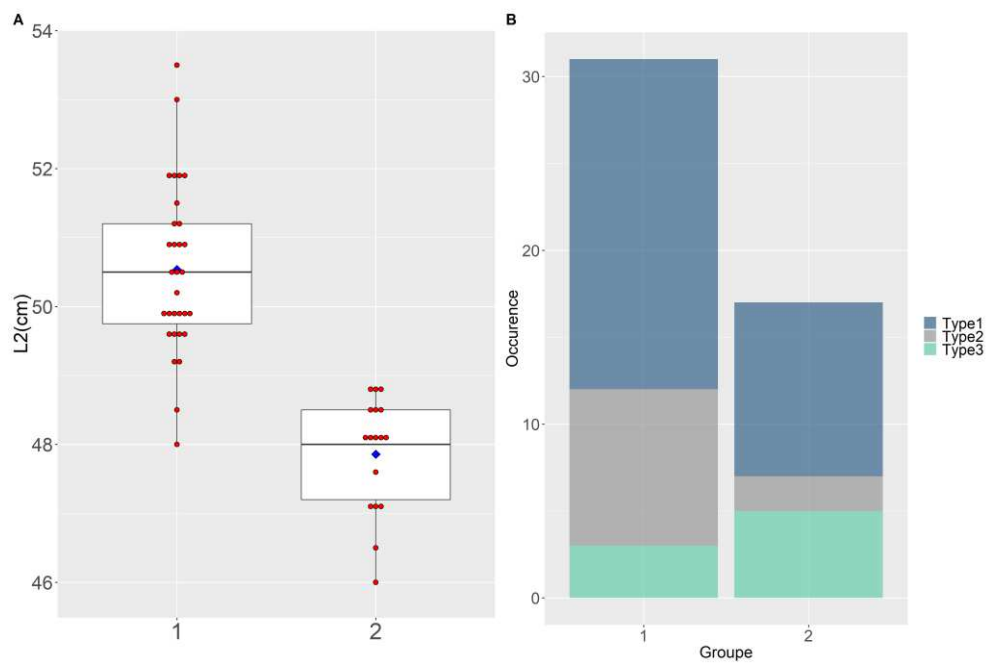


Figure 50 - « A » Tailles définies pour les dossiers selon le demi-tour de taille. « B » Répartition des typologies de dossiers pour chaque taille

VI. Bilan : Représentativité du corpus d'étude

Au total ce sont 137 éléments d'armures qui ont été étudiés, 245 échantillons qui ont été prélevés et 202 qui ont pu être analysés. La plupart des échantillons non étudiés sont issus du corpus de Valenciennes et ce, faute de temps.

Si l'on dresse un bilan général, les éléments du XVI^e siècle sont les mieux représentés (voir figure 52). Ce résultat est à mettre en relation directe avec la plus grande abondance de pièces conservées issues de cette époque. Les corpus du XV^e siècle et du XVII^e siècle sont eux de taille comparable. Enfin, les XIII^e siècle et XIV^e siècle demeurent par rapport aux autres siècles très mal représentés. La difficulté principale pour l'étude des pièces de cette époque est leur grande rareté. En effet les toutes premières collections d'armes et d'armures remontent à la fin du XV^e siècle et au XVI^e siècle et ont principalement consisté à conserver des pièces associées à des personnages illustres. Les découvertes archéologiques semblent par conséquent le meilleur recours pour l'étude de ce type de mobilier et, rappelons-le, elles demeurent rares. Néanmoins notre corpus comprend quelques éléments de plaques de broigne et de plaques de brigandine (voir figure 51).

En ce qui concerne le lieu de fabrication supposé des objets la distribution présentée figure 52, illustre cette fois-ci, les choix qui ont été fait dans le cadre de cette étude, à savoir de privilégier d'abord les pièces nurembergeoises car bien documentées, puis françaises car peu étudiées. Les pièces italiennes demeurent très bien représentées au sein des collections et ont été plus largement étudiées par d'autres auteurs, c'est pourquoi elles n'arrivent ici qu'en troisième place. Enfin, plus de la moitié des objets de notre corpus n'est pas associée à un lieu de fabrication précis. Ceci tient à la difficulté d'identifier précisément ce dernier en l'absence de poinçon apposé sur les pièces, ou lorsque nous nous trouvons confronté à des typologies proches. Ce n'est réellement qu'au XVI^e siècle, grâce aux décorations présentes sur les pièces, que les productions des différents centres, et notamment ceux des centres secondaires comme la France se dégagent en effet clairement de leurs importants voisins allemands et italiens.

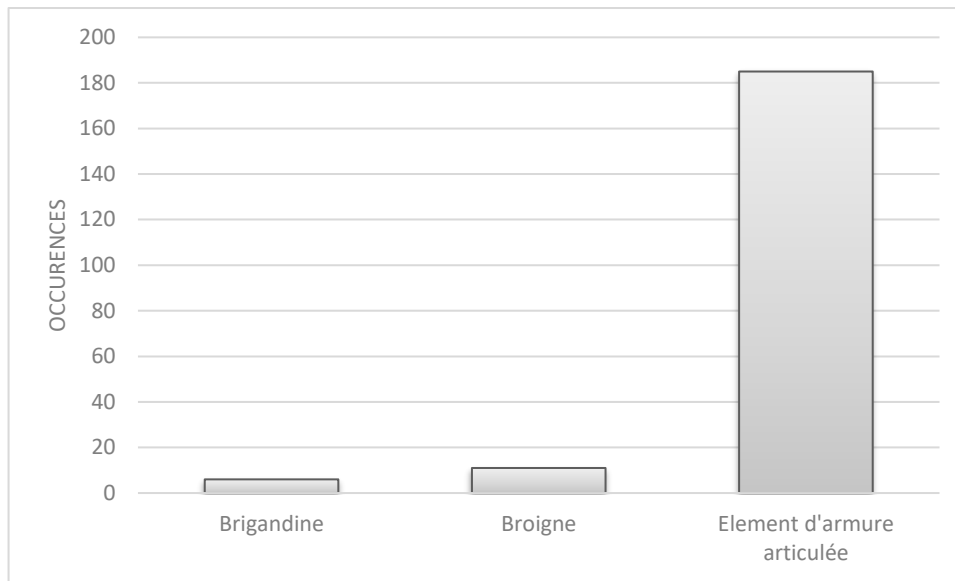


Figure 51-Types d'éléments d'armures étudiés

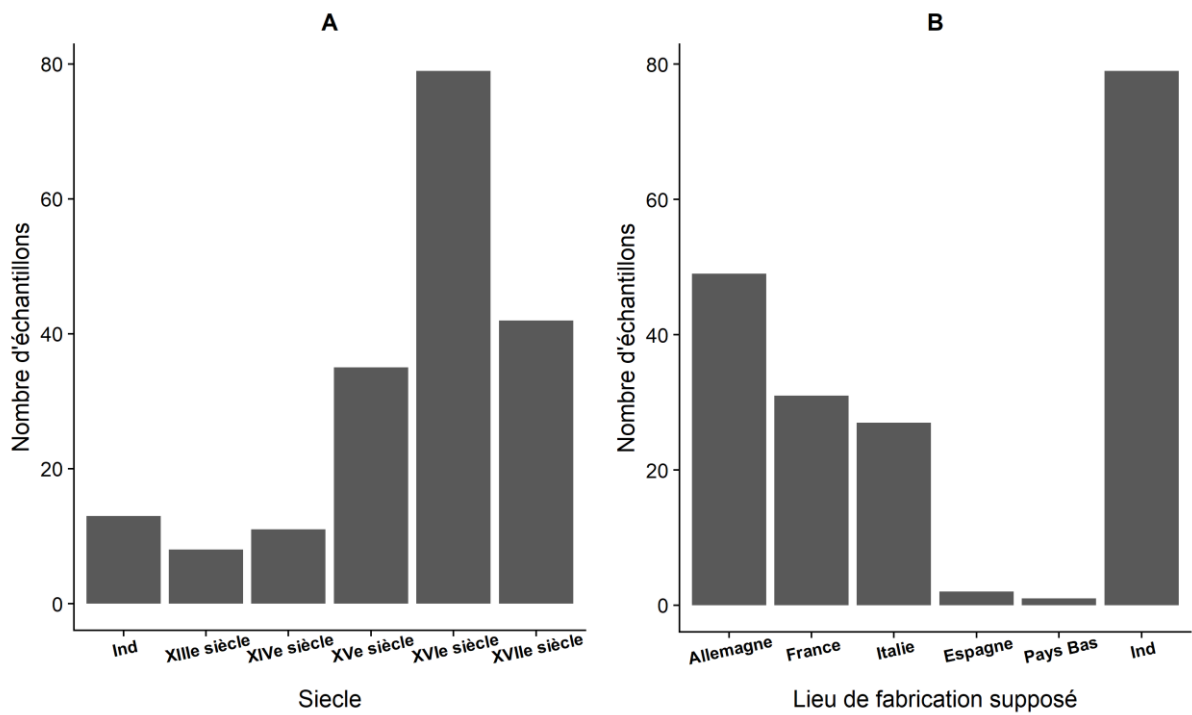


Figure 52 - Distribution de la datation des pièces par siècle et de leur lieu de fabrication supposé

Chapitre 3 : Stratégie d'étude des prélèvements

Afin de répondre aux différentes questions posées dans le Chapitre 1 (voir p.130), une étude microstructurale et inclusionnaire du métal a été entreprise. Une démarche spécifique à la nature des échantillons prélevés a pour cela été mise en place. Ce chapitre est dédié à la présentation de la méthodologie expérimentale adoptée, et a été décomposé en différentes parties.

La première résume la méthodologie analytique employée. La deuxième présente les différentes techniques expérimentales utilisées pour caractériser le métal. Enfin, la dernière est dédiée à la présentation de la méthodologie spécifique mise en place pour déterminer la composition des inclusions non métalliques en éléments majeurs et traces.

I. Méthodologie analytique

Afin d'extraire les informations contenues dans le métal, une démarche spécifique a été mise en place. L'ensemble des étapes est récapitulé figure 53.

Avant analyse, une préparation des échantillons est nécessaire, afin de pouvoir, d'une part, faciliter leur manipulation et, d'autre part, leur apporter la planéité nécessaire pour les étudier via les techniques d'analyses physico-chimiques. Ensuite, la microstructure du métal est caractérisée. Elle permet d'en définir sa nature. Il s'agit de déterminer s'il y a présence de fers ou d'aciers et si oui en quelles teneurs en carbone. On s'est également attaché à quantifier le degré d'épuration du métal par le taux d'inclusions emprisonnées dans la matrice. Ensuite nous avons cherché à remonter aux différentes étapes de fabrication de l'armure, du martelage de la tôle pour donner du volume à la pièce jusqu'à son traitement thermique final. Pour cela, la taille, la forme, l'orientation des grains peuvent fournir des indications très précieuses. Enfin, le degré de résistance du métal a été estimé par des mesures de dureté.

Cependant, parfois, les techniques classiques utilisées ne permettent pas de répondre à la question posée. Le recours à d'autres méthodes d'analyse doit alors être envisagée. Un changement d'échelle est même parfois nécessaire. Ainsi, lorsque la métallographie ne s'avérait pas suffisamment éclairante pour caractériser la structure du métal, les éléments susceptibles d'être présents dans le métal comme le phosphore, ont été dosés à l'aide d'une microsonde électronique. Pour un échantillon le métal, a été étudié jusqu'à l'échelle nanométrique à l'aide d'un Microscope Electronique à Transmission (MET), sur une lame mince découpée par Sonde Ionique Focalisée (FIB pour *Focused ion beam*)

L'étude des inclusions non métalliques permet, quant à elle, de s'intéresser à l'origine des fournitures en métal. Les éléments majeurs, sont quantifiés par la Spectrométrie Dispersive en Energie (EDS pour *Energy Dispersive Spectrometry*) couplé à un Microscope Electronique à Balayage (MEB). Leur étude permet de déterminer le type de procédé de réduction utilisé ainsi que l'homogénéité des fournitures de métal. Pour obtenir des informations sur l'homogénéité des fournitures de métal employées ou sur sa provenance, c'est-à-dire relier sa signature chimique à un ensemble de production précis, il est nécessaire de s'intéresser cette fois ci aux éléments présents en plus petites quantités : les éléments traces ⁷⁷. Ici, c'est la spectrométrie de masse à un plasma inductif couplé à l'ablation laser (LA-ICP-MS pour *Laser Ablation Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry*) qui a été utilisée, car c'est une technique rapide, qui permet d'analyser sélectivement la composition des inclusions contenues dans la matrice métallique repérées précédemment, sans

⁷⁷ Rappelons ici seuls les échantillons associés au procédé de réduction direct peuvent permettre cette filiation chimique

préparation supplémentaire (mis à part un léger re-polissage) et qui a déjà fait ses preuves pour l'étude des inclusions de fers anciens (M. P. Coustures et al., 2003; A.-M. Desaulty et al., 2008; E. Blakelock et al., 2009; S. Leroy et al., 2011, 2012; M. F. Charlton, 2015; A. Disser et al., 2016; P. Dillmann et al., 2017). Cependant, comme nous le verrons, l'étude des inclusions d'armures a nécessité la mise en place d'un protocole bien spécifique pour permettre la mesure de ces éléments.

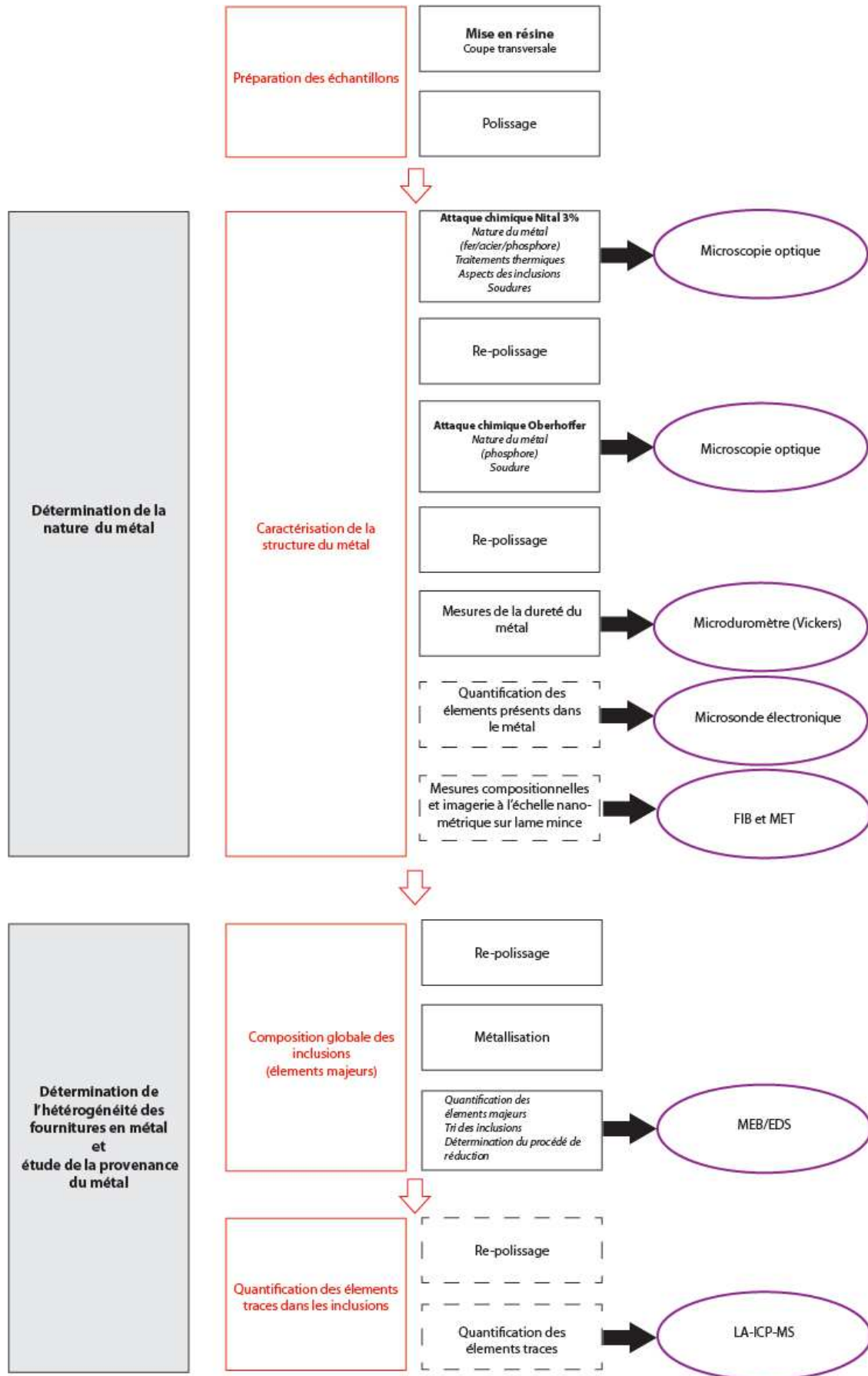


Figure 53 - Démarche Analytique

II. Caractérisation de la structure du métal

1) Préparation des échantillons

Afin de pouvoir les étudier par métallographie, les échantillons ont été enrobés dans une résine époxy à froid en coupe transversale, c'est-à-dire perpendiculaire au plan de martelage. En effet, certains traitements thermiques comme la cémentation ne seront clairement perceptibles que si l'échantillon est observé selon ce plan. Un polissage au papier abrasif SiC est ensuite effectué (grades 180-4000), suivi d'une finition à l'aide de suspensions diamantées (3µm et 1µm).

Certains échantillons étudiés ici (une trentaine) avaient déjà fait l'objet d'une étude métallographique par A. Williams. Ils n'ont donc pas subi cette étape de préparation. Notons que l'auteur n'a pas forcément privilégié pour ces échantillons l'étude du plan en coupe transversale, notamment pour les échantillons de très faible taille (<1mm).

2) Etude du métal

a) *Microstructure générale*

La microstructure du métal a été révélée d'abord au réactif Nital⁷⁸ (3%). En effet ce type de réactif possède une réaction sélective vis-à-vis de l'orientation des grains de ferrite mais également entre la ferrite et la cémentite, ce qui va permettre de mettre la microstructure du métal en relief. Les observations microscopiques sont réalisées en réflexion sous lumière blanche au moyen d'un microscope optique Olympus BX51, permettant un grossissement de x50 à x1000. Les acquisitions sont effectuées au moyen d'un appareil photo Nikon D600 géré par les logiciels NK-Remote et Micro-Manager. Une platine motorisée permet une prise de clichés en mosaïque, afin d'obtenir un balayage complet de la section polie effectué au grossissement x5. La mosaïque est ensuite reconstituée à l'aide du logiciel Gigapan.

Les zones de différentes teneurs en carbone sont relevées ainsi que les traitements thermiques particuliers comme la trempe ou encore la cémentation traduite par la présence d'un gradient de teneur en carbone. Une attention particulière a été également portée sur la forme de la perlite (lamellaire, globulaire) la forme et la taille des grains tout comme celles des inclusions afin de déterminer les éventuelles déformations réalisées par l'armurier.

La teneur en carbone de la matrice métallique peut être estimée par comparaison à un atlas de métallographie (J. Barralis and G. Maeder, 1993), lorsque les conditions de refroidissement se rapprochent suffisamment des conditions d'équilibre thermodynamique. Cette méthode permet

⁷⁸ Acide nitrique dilué dans l'éthanol

d'estimer le taux de carbone de manière simple et rapide mais s'avère moins précise que les méthodes de dosage quantitatif du carbone (A. Feillolay and S. Ryser, 1987). Toutefois, la faible taille de nos échantillons nous empêchait d'avoir recours à ce type d'analyse⁷⁹.

Une grande partie de nos échantillons s'avère être dans des conditions de refroidissement proches de celles d'équilibre thermodynamique. Cependant, des exceptions demeurent notamment lorsque des structures de trempe, de Widmanstätten ou de perlite globulaire ont été relevées. Dans le cas où des structures de Widmanstätten ou de perlite globulaire ont été observées, le taux de carbone a été estimé par cette méthode tout en gardant à l'esprit que les estimations seront de ce fait entachées d'une plus grande erreur. Pour les échantillons trempés, la détermination du taux de carbone par cette méthode s'avère impossible, toutefois une limite basse peut être estimée puisqu'une quantité de carbone minimale est nécessaire pour que l'acier puisse être « trempable ». Elle est située autour de 0,3%.

⁷⁹ Plusieurs dizaines de mg voire jusqu'à 1g de matière seraient nécessaires selon le type d'appareil et le nombre d'éléments analysés (A. Feillolay and S. Ryser, 1987)

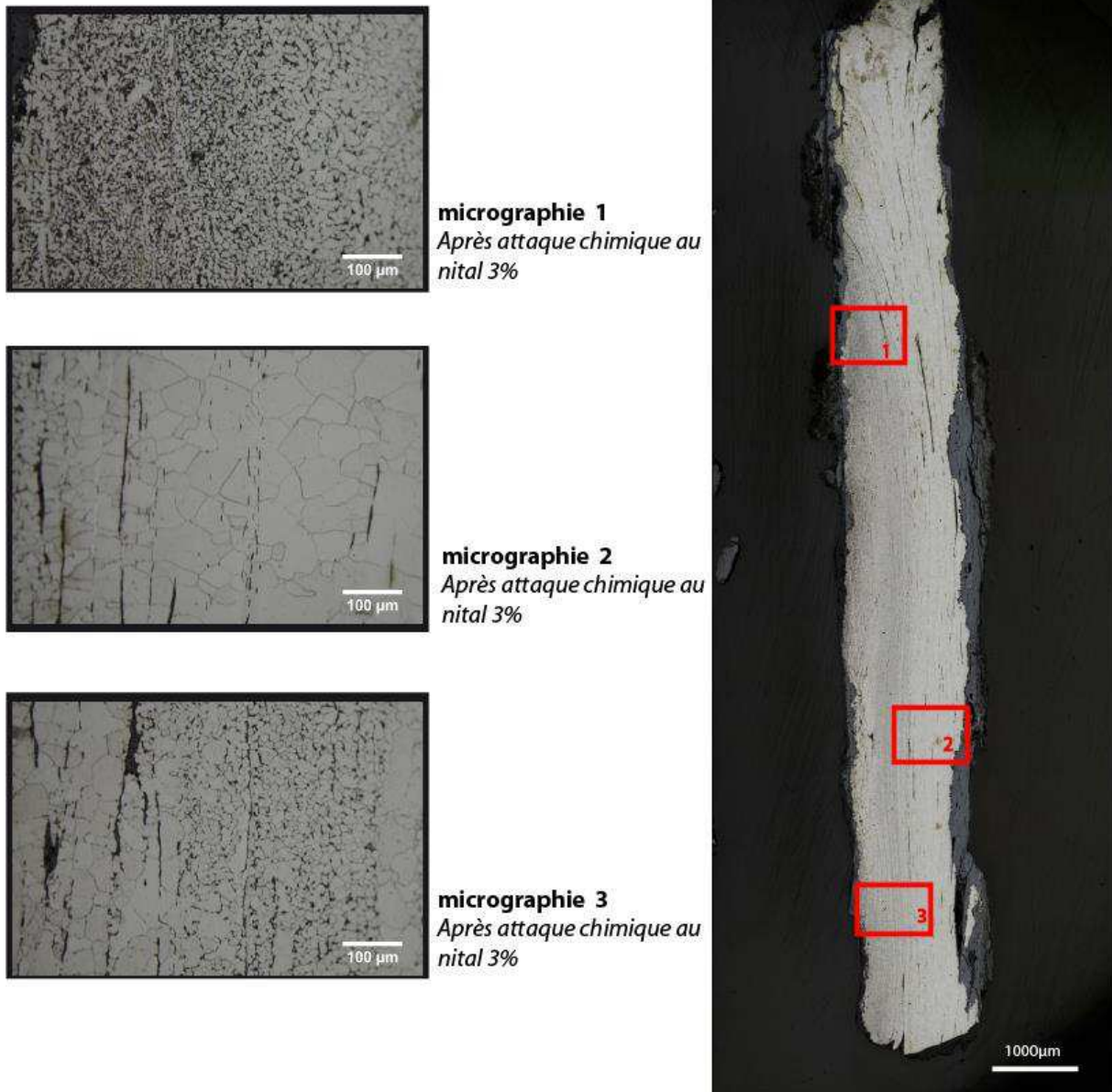
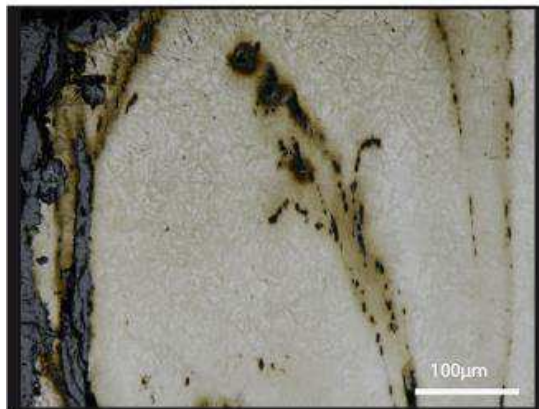


Figure 54 -Exemple d'analyse métallographique après attaque au réactif Nital 3% sur l'échantillon 34820434. On distingue nettement différentes zones carburées

Après un léger repolissage (depuis le grade SiC 4000 jusqu'à la suspension diamantée d'1µm), une nouvelle attaque est effectuée à l'aide du réactif Oberhoffer⁸⁰ afin de mettre en évidence la présence de phosphore mais aussi d'éventuelles lignes de soudure rendues visibles par la ségrégation de l'arsenic (F. Tylecote and R. Thomsen, 1973).

⁸⁰ 500 mL H₂O, 30 g FeCl₃, 0,5 g SnCl₃, 1 g CuCl₂, 500 mL d'éthanol



micrographie 1
Après attaque chimique à l'Oberhoffer



micrographie 2
Après attaque chimique à l'Oberhoffer



Figure 55 - Exemple d'analyse métallographique après attaque au réactif Oberhoffer sur l'échantillon 34820434 La micrographie 1 met en évidence des « structures fantômes » témoins de la présence de phosphore en solution solide. Les lignes blanches sur la micrographie 2 pourraient correspondre à des lignes de soudure

b) Taux moyen de carbone

Dans certains cas, nous avons observé une forte hétérogénéité de la teneur en carbone au sein des échantillons, rendant impossible l'estimation du taux de carbone sur l'ensemble de la surface de l'échantillon par simple comparaison avec les atlas de métallographie. La démarche publiée par Pagès et al. a ainsi été appliquée pour calculer un taux moyen de carbone (G. Pagès et al., 2011).

Après repérage des différentes zones carburées à l'intérieur de l'échantillon, des classes de teneurs distinctes en carbone ont été établies : <0,1 ; 0,1-0,3 ; 0,3-0,5 ; 0,5-0,7 ; 0,7-0,9. (S. Leroy et al., 2017). La définition de classes volontairement étendues, permet de se montrer plus représentatif de l'erreur commise dans la détermination du taux de carbone dans les différentes zones, par comparaison avec les atlas de métallographie.

Le logiciel Illustrator a été utilisé pour dessiner les différentes zones carburées. Le calcul du taux moyen s'effectue ensuite de la façon suivante :

$$\%C^* = \sum_{i=1}^n p_i \times x_i$$

Avec

p_i : proportion de surface occupée par une classe

x_i : moyenne de teneur carbone pour une classe donnée

p_i est déterminée par calcul du nombre de pixels occupés dans chacune des classes à l'aide du logiciel Photoshop.

L'erreur relative du calcul a été estimée entre 1 et 2% et tient pour une grande partie au jugement de l'opérateur relatif aux tracés des zones.

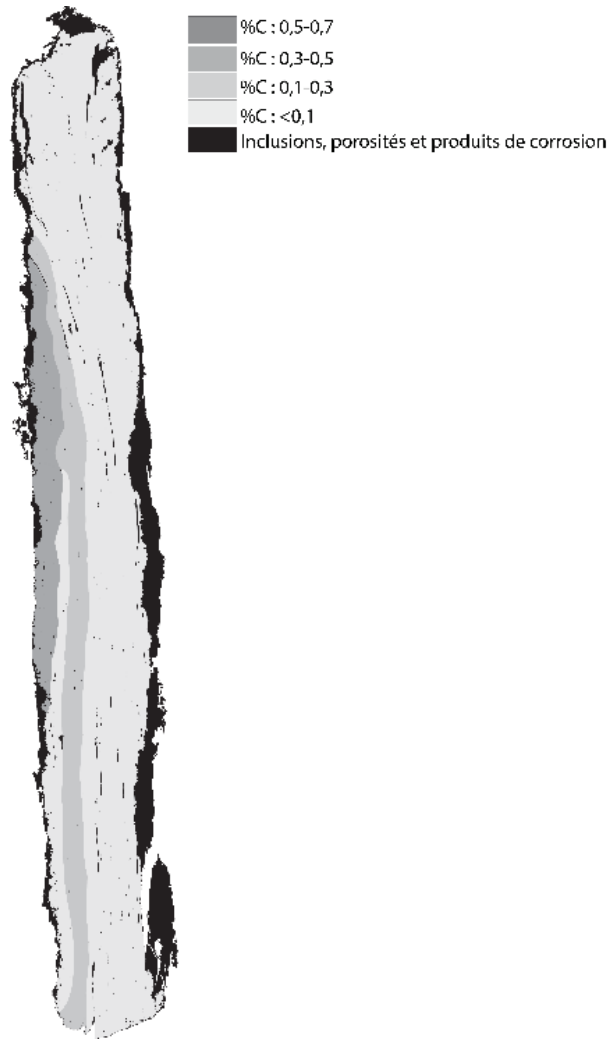


Figure 56 - Exemple de définition des différentes zones carburées de l'échantillon 34820434 à l'aide du logiciel Illustrator

Cette approche permet de comparer les teneurs en carbone pour des classes d'objets de teneurs très différentes et d'effectuer un classement visible en fonction de la surface carburée.

En suivant la méthodologie proposée par S. Leroy et al. (S. Leroy et al., 2017) un écart-type de cette valeur moyenne pondérée par la surface a également été calculé : *Sigma*

$$Sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n p_i \times (x_i - \%C^*)^2}$$

c) Taux d'inclusions et de porosité

Les inclusions témoignent du degré d'épuration du métal et influent par conséquent directement sur sa qualité. Il est donc nécessaire d'estimer leur impact. Suite aux attaques chimiques effectuées un nouveau polissage est entrepris (depuis le grade SiC 4000 jusqu'à la suspension diamantée d'1µm). Une mosaïque de l'échantillon est ensuite réalisée. Elle permet d'obtenir un meilleur contraste entre les inclusions sombres et la matrice métallique claire. En suivant la méthodologie définie par M. L'Héritier et al (M. L'Héritier et al., 2005), une propreté inclusionnaire est calculée selon la formule suivante :

$$PI(\%) = \frac{S_{incl}}{S_{tot}}$$

Avec :

$PI(\%)$: propreté inclusionnaire estimée en pourcentage

S_{incl} : surface occupée par les inclusions

S_{tot} : Surface totale de l'échantillon

Les grandeurs S_{incl} et S_{tot} sont estimées à l'aide du logiciel Phostoshop en déterminant le nombre de pixels occupés respectivement par les inclusions et la surface totale de l'échantillon.

L'erreur relative associée au calcul de la surface a été estimée entre 5 et 10 % et dépend principalement du nombre, de la taille des inclusions, mais également du jugement de l'opérateur.

d) Microdureté

Afin d'estimer la dureté du métal des mesures de microdureté Vickers ont été réalisées (modèle BUEHLER VH3300) au CEA Saclay (DEN – DANS / DMN / SRMA / LA2M) et à l'Institut de Chimie et des Matériaux de Paris Est (ICMPE, Thiais) (microduromètre Futur-Tech, modèle FM-700) avec une masse de 200g et un temps de maintien de 10 secondes. Pour chaque échantillon un profil de microdureté a été effectué sur toute sa largeur. Au moins 10 mesures par échantillon ont été réalisées puis une moyenne arithmétique a été calculée.

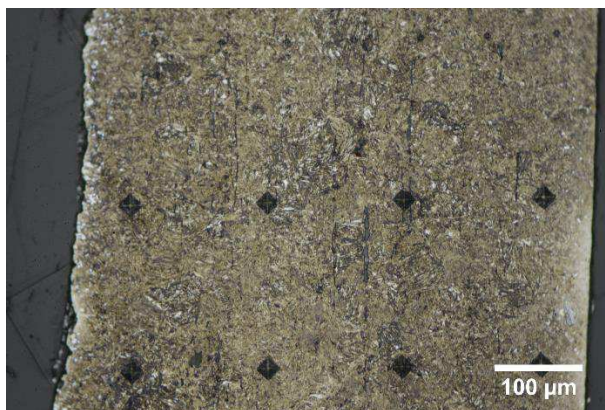


Figure 57 - Exemple de profils réalisés sur l'échantillon G436_ech2

Un écart-type a été calculé sur un échantillon de composition homogène en teneur en carbone et phosphore. Sa valeur est de $\sigma \pm 10$. Des cartographies ont également été réalisées sur certains échantillons avec une masse de 25g afin de déceler d'éventuelles variations locales.

e) Microsonde électronique

Une soixantaine d'échantillons ont fait l'objet de mesures par microsonde électronique, (modèle SX 100 CAMECA) à analyse en dispersion de longueur d'onde (WDS) au laboratoire ICMPE (Thiais). Elle permet une microanalyse quantitative avec une résolution spatiale située autour du μm . Cependant dans le cadre de cette technique, tout le spectre d'émission X n'est pas enregistré. En effet, il est nécessaire de fixer les spectromètres sur le maximum d'intensité des raies des éléments à doser.

La microsonde utilisée était équipée de 3 spectromètres verticaux avec cristaux LPC1, LPC2, LPC3, LLiF, LPET et TAP d'un 1 spectromètre incliné avec cristaux LiF, PET, TAP, PC2 ainsi que d'un 1 spectromètre EDS SDD permettant l'analyse couplée EDS-WDS.

Les mesures ont été réalisées à 15kV pour un courant de sonde d'environ 200nA. Les éléments suivants ont été recherchés : P, As, Si, Mn, Co, Ni, Cr, Cu. Des lignes de profils à l'aide de pointés successifs ont été réalisés sur toute la largeur des échantillons en prenant soin d'éviter les inclusions.

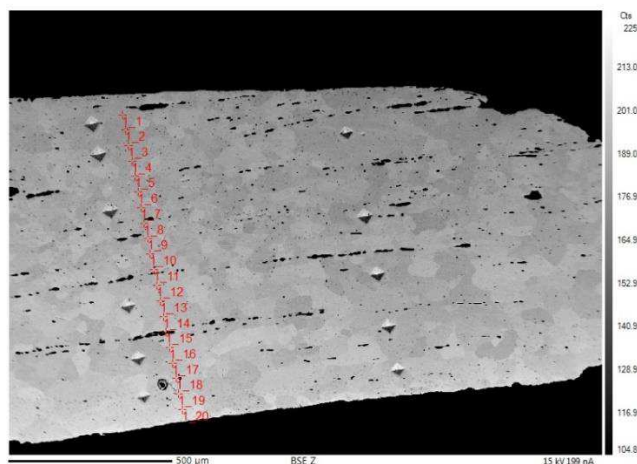


Figure 58 - Exemple de ligne de profil réalisé sur l'échantillon 3_colletin, observé en électron rétrodiffusé. En rouge repérage des pointés effectués

Par rapport à d'autres techniques d'analyse classiques, comme le MEB-EDS dont nous reparlerons, les limites de détection sont plus basses (plusieurs dizaines de ppm, voir tableau 16) cependant les mesures sont en moyenne beaucoup plus longues puisque directement dépendantes du nombre d'éléments analysés (plusieurs heures pour une dizaine de pointés dans notre cas). Les standards utilisés pour la calibration étaient Mn, $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH}, \text{Cl}, \text{F})$, Si, Cu, Ni, Co, Cr, GaAs pour les raies Mn-K α , P-K α , Si-K α , Cu-K α , Ni-K α , Co-K α , Cr-K α , As-K α et As-L α respectivement.

Tableau 16 - Ordre de grandeur des limites de détection et de l'erreur type pour les éléments mesurés

	Mn	P	Si	Cu	Ni	Co	Cr	As
LD (ppm)	220	55	65	50	90	100	50	80
$\sigma_{\%mass}$	0,02	0,007	0,005	0,004	0,008	0,008	0,004	0,007

f) Mesures à l'échelle nanométrique

i. Préparation de la lame mince

La préparation de la lame mince a été réalisée à l'aide d'un microscope à double colonne électronique-ionique (MEB-FIB). L'appareil utilisé est un FEI Strata DB 235 à l'IEMN (Lille). Sa tension varie de 0,2 kV à 30 kV et son intensité de courant de 1 pA à 20 nA. Il permet à la fois le repérage et l'usinage de la lame. Du platine est d'abord déposé en surface au niveau de la zone d'intérêt afin de protéger cette dernière des irradiations et assurer sa tenue mécanique lors de la découpe. Un bombardement par faisceau d'ion de gallium de 30 keV est ensuite réalisé de part et d'autre du dépôt pour creuser l'échantillon et former la lame. Elle est ensuite désolidarisée de l'échantillon puis fixée sur un porte lame en cuivre ou molybdène. Enfin, un amincissement est effectué de part et d'autre afin d'obtenir l'épaisseur souhaitée de l'ordre de 100nm (C. Carrière, 2017, p. 57).

ii. Microscope électronique à transmission

Deux microscopes électroniques à transmission ont été utilisés à l'ICMPE (Thiais). Le premier est un modèle JEOL 2000EX avec une source d'électron thermoélectrique (W ou LaB₆). Il a permis de réaliser de premières images et de faire quelques repérages sur la lame.

Le second est un microscope électronique FEI Tecnai F20. Il est équipé d'un canon à émission de champ (FEG), d'un dispositif de balayage (STEM), d'un détecteur EDX (EDAX R-TEM Sapphire), et d'un spectromètre de perte d'énergie des électrons (GIF 2001). Il permet donc en plus de l'imagerie d'effectuer de la diffraction électronique ou de la haute résolution afin d'observer les alignements d'atomes renseignant sur l'organisation cristalline des phases présentes. Cet appareil nous a permis de rechercher la présence de nano carbures au sein de la matrice métallique, qui peuvent apparaître lors de traitements thermiques spécifiques comme le vieillissement après trempe pouvant conduire à une augmentation de la dureté.

Les clichés de diffraction sont traités par le logiciel Gatan DigitalMicrograph. Les espaces entre les feuillettes d'atomes obtenus sur les images haute résolution peuvent également être mesurés à l'aide de Gatan DigitalMicrograph.

III. Analyses inclusionnaires

1) Quantification des éléments majeurs

Les compositions en éléments majeurs des inclusions ont été déterminées en utilisant la spectrométrie en dispersion d'énergie (EDS), couplée un microscope électronique à balayage. Le MEB est un modèle SEM-FEG JEOL 7001-F, les rayons X sont collectés par un détecteur SDD (Silicon Drift detector) permettant un taux de comptage de 100 000 coup/s sans dégradation du signal. Ceci permet en outre de travailler avec un temps d'acquisition extrêmement court et ainsi de considérer un grand nombre d'inclusions par échantillon. La tension d'accélération choisie est de 15keV, pour un courant de sonde d'environ 8nA.

Avant toute acquisition, la première étape consiste à isoler les inclusions par un filtre de nuance de gris, effectué sur une image en électrons rétrodiffusés, afin d'obtenir un meilleur contraste entre les inclusions (sombre) et la matrice métallique (blanche) (voir figure 59). Afin d'éviter un surdosage de la matrice métallique sur les bords de l'inclusion, un filtre d'un pixel est également appliqué aux extrémités de chacune d'elles. Des cartographies hyperspectrales de dimensions 512 X 512 pixels sont ensuite réalisées afin de couvrir toute la surface de l'échantillon, avec un temps d'analyse de 5 secondes par inclusion. Cette méthode de repérage et d'analyse sélective des inclusions dans la matrice est appelée « Analyse de particule » et est disponible sous le logiciel Aztec (entreprise Oxford). Elle fait gagner un temps considérable dans le cas où il n'est pas nécessaire de doser la composition de la matrice.

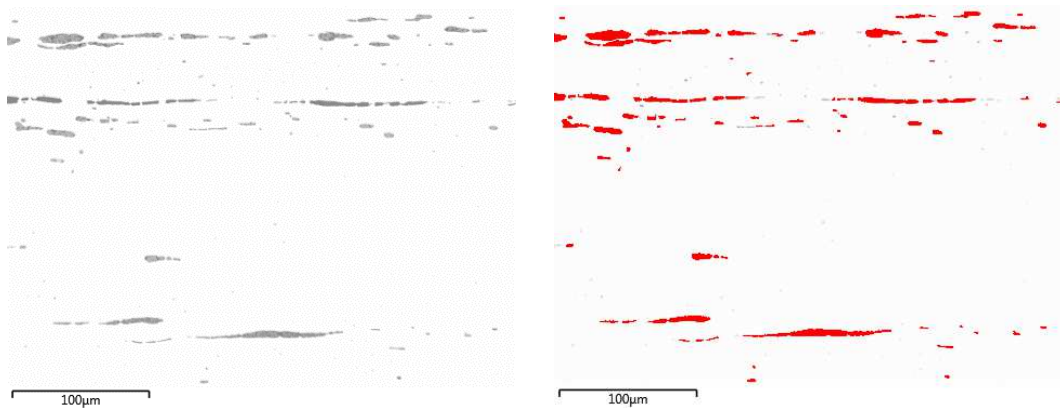


Figure 59 - Exemple de détection d'inclusion. A gauche image en électron rétrodiffusée. A droite résultat de l'analyse d'image pour la détection des inclusions (les mesures vont être menées uniquement sur les pixels rouges)

Pour chaque spectre acquis, la contribution du bruit de fond est automatiquement retirée en utilisant un filtre de type "Top-Hat". La quantification est ensuite réalisée en utilisant la méthode XPP (correction de la matrice par la méthode Phi-Rho-Z) à l'aide d'une table de standards internes fournie par le logiciel (« Quant Standardizations Extended Set ») sur un nombre fixé d'éléments

classiquement rencontrés dans les inclusions de scories de fer (O, Na, Mg, Al, Si, P, S, Cl, K, Ca, Ti, V, Cr, Fe, Mn). Elle se base sur les raies $K\alpha$ de chacun de ces éléments. Les quantités ainsi calculées sont exprimées en pourcentages élémentaires massiques et normalisées à 100%. La quantification est ainsi dite « semi-quantitative » sous couvert que l'ensemble des éléments présents ait été pris en compte dans chacune des inclusions.

Les erreurs relatives ont été estimées à 2% pour les éléments majeurs et à 10% pour les éléments mineurs (concentrations inférieures à 1%mass), la limite de détection étant située autour de 0,5%mass.

2) Tri des inclusions

Après dosage EDS, un premier traitement est effectué sur les inclusions. En effet, l'analyse de particule offre l'avantage d'automatiser la mesure d'un grand nombre d'inclusions. Cependant des particules inutiles pour la suite de l'analyse, situées par exemple dans les produits de corrosion sont également fréquemment dosées. Il convient donc de les éliminer. Ainsi, un premier filtre est appliqué pour exclure les particules analysées trop chargées en fer (>98%mass), qui correspondent au dosage de fer métallique, suite à de légères variations dans le contraste de l'image durant l'analyse, et celles à fort taux en chlore (>0,5%mass). En effet, le chlore n'a pu être apporté que par des processus faisant suite à l'altération de l'objet, il est donc considéré comme marqueur des produits de corrosion.

La suite de l'analyse repose sur un traitement statistique des inclusions, suivant le protocole mis en place par Ph. Dillmann et al. (P. Dillmann and M. L'Héritier, 2007) et A. Disser et al. (A. Disser et al., 2014). Il s'agit de repérer uniquement celles issues de l'étape de réduction ou de l'affinage dans le cas du procédé indirect. Cette étape permet ainsi d'éliminer les éventuels ajouts issus eux des étapes de mise en forme de l'objet. Pour cela une analyse multivariée est effectuée. Tout d'abord on effectue une mise à « l'échelle » de toutes les compositions. Cette opération a pour principal intérêt de rééquilibrer les écarts de variances entre les différentes teneurs. Pour cela on utilise la transformation en log suivante (Log-Ratio ou centred-log ratios voir Chapitre 1) :

$$X_{ij} = \text{Log} \frac{x_{ij}}{g(x_i)}$$

Avec :

X_{ij} : valeur transformée pour chaque variable

x_{ij} : valeur de chaque variable (ici concentration)

$\bar{x}_j$: moyenne de la j^{ème} variable

S_j : Ecartype e la j^{ème} variable

$g(x_i)$: moyenne géométrique de l'ensemble des variables considérées

La suite du protocole opératoire repose sur l'utilisation conjointe de la CAH (Classification Ascendante Hiérarchique) et l'ACP (Analyse en Composantes Principales) pour identifier les différentes familles d'inclusions. Il a déjà été illustré dans le chapitre 1. Les détails des traitements effectués pour chaque échantillon sont disponibles dans le volume annexe.

Une fois ce tri effectué la projection du nuage de points des inclusions est reportée sur la mosaïque de l'échantillon et colorée en fonction de la classe définie lors du tri à l'aide du logiciel Qgis. Ceci permet de visualiser la position de chaque catégorie d'inclusion sur l'échantillon et ainsi aider à leur identification en tant qu'ajouts de forge, ou d'inclusions issues de la réduction.

3) Discrimination chimique des deux filières de réduction

Pour rappel en suivant la méthodologie proposée par (P. Dillmann and M. L'Héritier, 2007) et (A. Disser et al., 2014) une normalisation des données est effectuée. La distinction des deux filières se fait ensuite par le recours à un abaque de compatibilité.

- Normalisation par la surface

$$\%E^* = \sum_{i=1}^n (\%E_i^* \times \frac{Si}{St})$$

$\%E_i$: pourcentage massique de l'élément considéré (oxyde) dans l'inclusion numéro « i »

Si : surface de l'inclusion considérée

St : Surface totale occupée par les inclusions

- Normalisation par le fer

$$\%E^{**} = \frac{\%E_i^* \times 100}{100 - \%E_{FeO}^*}$$

Les deux méthodes, celle de la régression logistique et celle de l'abaque de discrimination, ont été utilisées pour la discrimination chimique des deux filières de réduction. La zone indéterminée comprise entre $0,3 < p < 0,7$ dans le cas de la régression logistique a également été conservée. Dans certains cas, des contradictions ont pu être soulevées. Notamment lorsque les inclusions étaient très pauvres en composés non réduit (NRC pour « Non reduced compound »), les méthodes de discrimination peuvent s'avérer inefficaces pour discriminer les deux procédés. Ainsi, lorsqu'une incompatibilité entre les deux méthodes a été observée, par mesure de prudence le procédé de réduction a alors été déterminé comme « Indéterminé ».

De plus, les armures sont des objets dont le métal a été très travaillé. Ainsi, parfois, les échantillons analysés ne contenaient que très peu d'inclusions. En dessous de 20 inclusions analysées leur nombre a été déterminé comme trop faible pour permettre une distinction fiable des deux procédés. Le procédé sera alors également défini comme « Indéterminé ».

4) Quantification des éléments traces

Rappelons que seuls les échantillons associés au procédé de réduction direct pourront faire l'objet d'une étude de provenance. Dans le cas du procédé de réduction indirecte la signature chimique des éléments sidérophiles du système se perd en effet lors de la première étape de réduction du minerai de fer.

Une douzaine d'inclusions issues de la réduction sont sélectionnées par échantillon et pour chaque famille d'inclusion identifiée, afin d'en déterminer la composition en éléments traces par LA-ICP-MS. Dans le cadre de ce travail, rappelons que les inclusions sont de faibles tailles (<30µm pour les armures, >80µm autrement). Le peu de matière disponible imposait d'enregistrer un signal de courte durée (quelques secondes) et de faible intensité dont certains auteurs ont fait remarquer la difficulté (S. Leroy et al., 2011). Ainsi pour rendre cette mesure possible il a fallu développer un nouvel protocole d'analyse que nous allons à présent détailler.

a) Appareillage

Les appareils peuvent être décomposés en deux principales parties. Le laser et le spectromètre de masse. Au cours de l'interaction laser-matière, l'énergie du laser est transmise à l'échantillon selon des processus complexes qui dépendent notamment de la durée d'impulsion de la longueur d'onde, de l'énergie apportée et de la focalisation du faisceau mais aussi des propriétés optiques, thermiques et mécaniques de l'échantillon.

D'une manière générale, si la densité de puissance atteint des niveaux supérieurs au GW/cm², le phénomène devient explosif et l'on assiste à l'éjection d'atomes, d'ions, d'espèces moléculaires et de fragment de matière de taille allant de quelques nanomètres à plusieurs microns. Un plasma est également formé. Il conduit à l'échauffement du matériau et est en partie responsable de biais analytiques, notamment l'évaporation préférentielle d'éléments ayant des enthalpies de vaporisation basses par rapport à d'autres (le plomb par exemple ($\Delta H=179$ kJ/mol) par rapport à l'uranium ($\Delta H=417$ kJ/mol)). Sa température dépend également de la durée d'impulsion, les impulsions nanosecondes conduisant à des températures plus élevées (d'un ordre de grandeur) par rapport aux impulsions femtosecondes.

Un flux d'Argon ou d'Hélium balaie en permanence la cellule d'ablation dans laquelle l'échantillon a été placé et entraîne ainsi les particules formées vers la torche à plasma de l'ICPMS qui atomise ces dernières et ionise leurs atomes. Ces ions sont ensuite transférés vers le spectromètre de masse. Des cônes permettant d'équilibrer la pression (pression atmosphérique à pression réduite de quelque 10^{-7} mb) délimitent l'interface et permettent d'échantillonner les ions présents dans le centre du plasma ICP. Les ions sont ensuite triés selon leur masse dans l'analyseur de masse et sont finalement dirigés vers le détecteur (J. S. Becker, 2007).

Dans le cadre de ce travail deux appareils ont été utilisés :

- Au CEB à Orléans (France) : un spectromètre de masse à secteurs magnétique et électrostatique "Element XR" (Thermo Scientific) couplé à un laser excimer (ArF*, 193 nm).
- Au laboratoire IPREM à Pau (France) : un spectromètre de masse à secteurs magnétique et électrostatique "Element XR" (Thermo Scientific) équipé d'une interface jet (dispositif permettant une meilleure extraction des ions) couplé à un laser UV-femtoseconde (Yb:KGW, 257 nm). Cette interface jet comprend des cônes spécifiques et une pompe additionnelle qui permet d'augmenter la sensibilité. De plus, du gaz N_2 a été ajouté au plasma afin d'augmenter la sensibilité dans les hautes masses (A. Donard et al., 2015).

La séparation des ions est assurée dans les deux cas par un spectromètre de masse à secteurs magnétique et électrostatique. La variation du champ magnétique permet le tri des ions selon leur rapport masse/charge. Le couplage à un secteur électrostatique permet de dévier la trajectoire des ions en fonction de leur énergie cinétique, focalisant ainsi le faisceau à la fois en direction et en énergie. Ce système de double focalisation conduit à une augmentation importante de la résolution et à une meilleure transmission des ions (G. Bouchoux, 2005). La détection des ions est effectuée par un multiplicateur d'électrons ou une cage de Faraday. Le premier est formé de dynodes discrètes qui convertissent les ions en électrons, les multiplient et les focalisent vers le système de détection. Dans le second système, les ions heurtent une cage de Faraday ce qui crée un courant de décharge amplifié puis mesuré. Ce mode est privilégié pour la mesure des éléments majeurs pour lesquels les taux de comptage sont plus importants.

L'utilisation des lasers femtoseconde est assez récente en chimie analytique et a déjà montré son potentiel pour la quantification d'éléments présents en très faible quantité (A. Donard et al., 2015). En effet, par rapport aux impulsions plus classiquement utilisées (impulsions nanosecondes) dans le cas des impulsions ultra-brèves (impulsions femtosecondes) l'énergie est telle, qu'elle n'a pas le temps de diffuser sous forme de chaleur à l'intérieur du matériau : on parle alors d'ablation dite froide (voir Figure 60). La qualité de l'ablation s'en trouve améliorée et favorise la production de

particules de plus faible taille susceptibles ensuite d'être mieux transportées dans le spectromètre de masse et mieux atomisées dans le plasma (J. Koch et al., 2004). Ceci réduirait également le risque de fractionnement élémentaire. Ce phénomène se caractérise par la formation d'un aérosol dont les proportions élémentaires ne reflètent pas celles du matériau analysé. Il intervient durant la vaporisation et le transport de la matière ablatée mais également lors de l'atomisation et l'ionisation dans le plasma de l'ICPMS. Ses origines sont variées, et dépendent de différents paramètres comme la nature de l'élément considéré, les conditions d'ablation, mais également la taille des particules formées. Les particules les plus grosses seraient comme évoqué, moins facilement atomisées dans le plasma de l'ICPMS ce qui entraînerait un fractionnement important conduisant à la mesure de ratio entre éléments non stœchiométriques.

Tout comme la durée d'impulsion, la longueur d'onde du laser a un rôle déterminant dans ce phénomène, les longueurs d'ondes courtes produisant la formation de particules significativement plus petites. L'ajustement des paramètres propres au laser (ajustement de l'énergie du faisceau laser, du débit de gaz vecteur...), ou à l'ICP (condition robustes permettant de favoriser l'atomisation des particules au détriment parfois de la sensibilité) ou encore l'utilisation de matériaux de référence dont la composition est connue (N. Miliszewicz, S. Walas, and A. Tobiasz, 2015) et très proche du matériau à analyser (matrix matching) permettent de remédier au moins en partie à ce phénomène de fractionnement élémentaire.

Ainsi, c'est bien l'ensemble du montage qui doit être considéré pour juger de la sensibilité finale et de la justesse des mesures. Dans le cadre de notre travail, la difficulté de quantifier la composition de certaines inclusions par le biais des appareils rencontrés classiquement dans les laboratoires d'analyses comme celui du CEB nous a poussé à tester le potentiel de ce second montage.

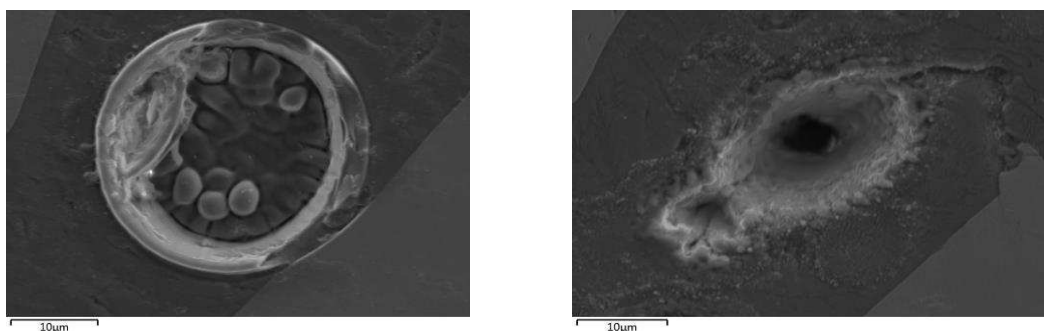


Figure 60 - Illustration de la différence d'interaction avec la matière pour les deux lasers. A gauche ablation effectuée au CEB avec un laser nanoseconde sur une inclusion, à droite à l'IPREM avec un laser femtoseconde. On peut observer une ablation à 2 lobes dans le cas de l'IPREM représentant un défaut d'homogénéité du faisceau UV au moment des analyses (ceci n'affectant que la résolution spatiale)

Pour des inclusions de taille inférieure à 30µm, la détection des ions est limitée par la faible quantité de matière disponible et la faible durée d'ablation (de quelques secondes). Ainsi, du fait de la détection séquentielle des isotopes, un nombre limité d'éléments traces a pu être dosé. Ce

nombre a été choisi dans le but de maintenir au moins dix points de mesures par inclusion. Les éléments chimiques qui s'avéraient les plus pertinents au regard de notre problématique ont été sélectionnés, à savoir : Y, Nb, Cs, Ba, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Yb, Hf, Ta, Th, U.

L'ensemble des mesures a été acquis en mode résolution basse afin maximiser la sensibilité du signal⁸¹. Les détails des paramètres optimisés sont disponibles dans le tableau 17. Au CEB, ils ont été ajustés afin de maximiser la sensibilité de l'appareil. Le montage à l'IPREM offrait une meilleure sensibilité, par conséquent des conditions robustes ont été privilégiées afin de garantir l'efficacité d'atomisation et d'ionisation dans le plasma et réduire le risque de fractionnement élémentaire⁸².

Tableau 17 - Paramètres optimisés pour l'ICP-MS et le laser

	IPREM	CEB
Source laser	Yb:KGW	ArF*
Longueur d'onde	257 nm	193 nm
Diamètre de faisceau	10µm	Entre 20 et 40 µm
Fréquence	20Hz	10Hz

	IPREM	CEB
Plasma	Ar	Ar+He
Carrier gas	Ar (0,62 L.min-1)	Ar+He (0,94 L.min-1)
Cooling gas flow rate	16 L.min-1	16 L.min-1
Auxiliary gas flow rate	1 L.min-1	1 L.min-1
N2 (jet interface)	10 ml.min-1	
Isotopes mesurés	Al27, Fe57, Y89, Nb93, Cs133, Ba137, La139, Ce140, Pr141, Nd146, Sm147, Eu153, Gd157, Yb172, Hf178, Ta181, Th232, U238	Si28, Fe57, Y89, Nb93, Cs133, Ba137, La139, Ce140, Pr141, Nd146, Sm147, Eu153, Gd157, Yb172, Hf178, Ta181, Th232, U238

b) Acquisition des données

La durée de l'acquisition a été fixée à 60 secondes et la durée d'ablation à une dizaine de secondes. La largeur du cratère est située entre 20 et 30µm. Fréquemment, la taille de l'inclusion analysée était inférieure à la taille du cratère effectué. Dans ce cas, le signal enregistré est transitoire mis à part pour le fer (isotope Fe57 dosé) puisque du fer issu de la matrice métallique est dosé tout au long de l'acquisition (voir figure 61).

⁸¹ L'appareil 'Element XR' propose en effet d'augmenter la résolution en diminuant physiquement la taille du faisceau ionique à l'aide des fentes d'entrée et de sortie présentes avant et après le séparateur en masse. Ceci entraîne cependant une baisse sensible de l'intensité du signal.

⁸² En pratique cela se traduit par un maintien du rapport $^{238}\text{U}/^{232}\text{Th}$ le plus proche possible de 1 ($1 \pm 0,05$) sur le verre de référence utilisé le NIST610.

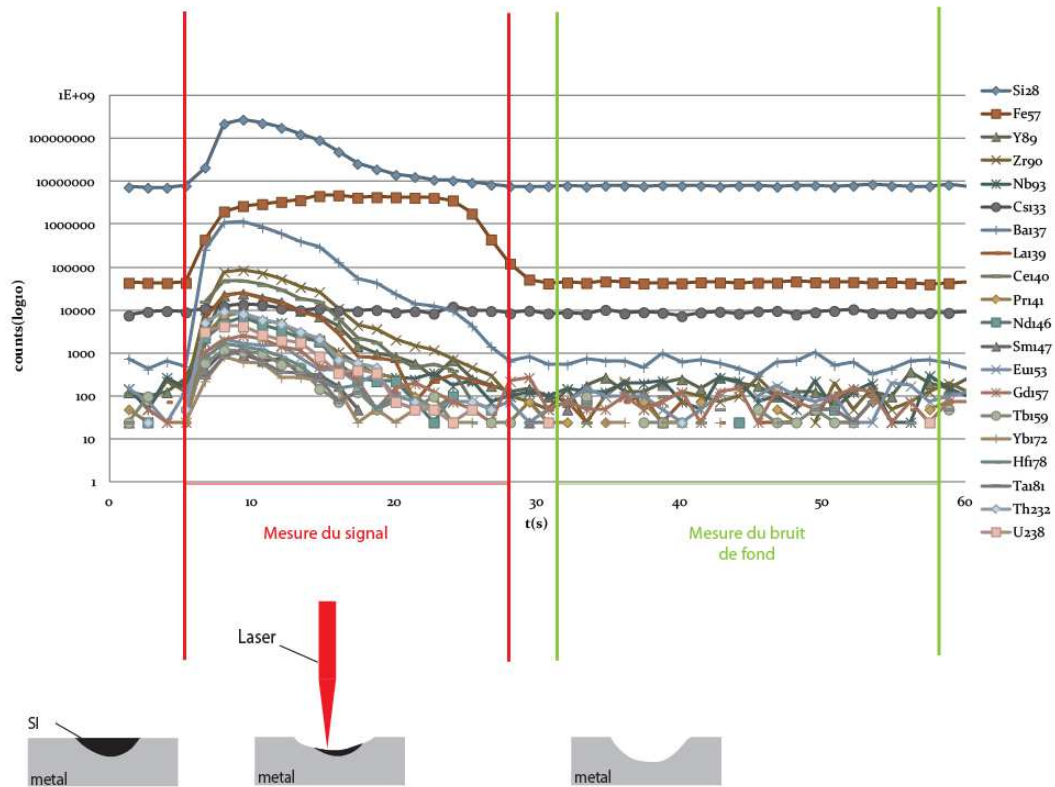


Figure 61 - Exemple de profil obtenu pour une inclusion donnée de taille inférieure à 30 μ m au CEB

Comme il n'est pas possible de garantir la reproductibilité de quantité de matière éjectée d'une ablation à une autre, le signal de chaque isotope a été comparé à celui d'un standard interne. Le ^{28}Si a été choisi dans le cas des analyses effectuées au CEB puisque c'est l'élément le plus abondant dans les inclusions après le fer. Dans le cas de l'IPREM le choix s'est plutôt porté sur ^{27}Al . En effet, le gaz N_2 , ajouté pour augmenter la sensibilité de l'appareil est susceptible d'interférer avec le ^{28}Si .

De plus, comme nous allons le voir, le calcul des concentrations fait également intervenir un standard dit externe. Ce dernier est un verre de référence le NIST610 dosé au moins au début et à la fin de chacune des journées d'acquisition, ce qui permet de vérifier la sensibilité et la bonne stabilité des mesures, mais également de pallier au phénomène de fractionnement élémentaire.

c) Calcul des concentrations

Pour chacun des profils enregistrés, le blanc est estimé en calculant la moyenne du signal analysé pendant une 20^{aine} de seconde. Il est ensuite soustrait point par point du signal mesuré de chaque isotope. Puis les intensités sont intégrées selon la formule suivante :

$$I(i) = \sum x(i)$$

Où $I(i)$ est le signal intégré pour chaque isotope, $x(i)$ est la valeur d'intensité pour chaque point de mesure.

Le signal standardisé par l'étalon interne est calculé de la façon suivante :

$$S(i) = \frac{I(i)}{I(IS)}$$

$I(i)$ est le signal intégré pour chaque isotope, $I(IS)$ est le signal intégré pour le standard interne (^{28}Si ou ^{27}Al).

Le standard externe le NIST610, est utilisé pour calculer la réponse des différents coefficients de calibration Ky .

$$Ky(i) = \frac{S(i)_{nist610}}{[i]_{nist610}} \times [IS]_{nist610}$$

$Ky(i)$ est le coefficient de réponse $S(i)_{nist610}$ est le signal standardisé pour chaque élément (i) dans le nist610, $[i]_{nist610}$ est la concentration de l'élément (i) dans le nist610.

La concentration de chaque élément (i) dans l'inclusion est enfin obtenue de la façon suivante :

$$[i]_{ech} = \frac{S(i)_{ech}}{Ky(i)} \times [IS]_{ech}$$

$S(i)_{nist610}$ correspond au signal standardisé de l'élément (i) dans l'inclusion, $[IS]_{ech}$ est la concentration de l'étalon interne (Si ou Al) dans l'inclusion. Dans le cadre de cette étude elle a été déterminée par MEB-EDS.

d) Limite de détection, reproductibilité et stabilité

Les limites de détection ont été calculées sur au moins 20 mesures de bruit de fond chaque jour, comme cela est recommandé par l'International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC, 1976). Pour chaque blanc enregistré, la moyenne du signal a été déterminée. La validation de la distribution normale du bruit de fond a été vérifiée par un test de Shapiro Wilk. Excepté pour les éléments Yb, Hf, Th, et U l'hypothèse de distribution normale n'a pas pu être rejetée avec un indice de 0,05. Par conséquent, les limites de détection ont été estimées en calculant 3 fois l'écart-type du bruit de fond (approche 3σ) (R. Cédric and C. Marielle, 2014). Les coefficients de calibration Ky ont ensuite été recalculés sans standardisation par l'étalon interne afin d'exprimer les valeurs en ppm. Cependant, les valeurs de détection données sont certainement sous estimées pour les éléments Yb, Hf, Th, et U.

Des moyennes de ces limites sont présentées tableau 18. Elles varient de 0,001 à 0,13ppm. Les résultats sont similaires pour les deux types d'appareillage excepté pour l'élément barium qui possède une limite de détection inférieure à l'IPREM. Ceci est principalement causé par la hauteur du bruit de fond qui diffère sur les deux montages.

La reproductibilité des mesures et leur stabilité ont été contrôlées sur une douzaine de mesures effectuées sur un verre de référence le NIST612. Elles varient de 1% à 11% en fonction des éléments (voir tableau 18). La stabilité a été vérifiée en s'assurant que l'écart-type relatif est inférieur à 15% pour chaque élément.

$$\text{Reproductibilité} = \frac{\text{Valeur calculée} - \text{valeur certifiée}}{\text{valeur certifiée}}$$

$$\text{Stabilité} = \frac{\sigma}{\text{Valeur calculée}}$$

Avec :

Valeur calculée : moyenne des douze mesures effectuées sur le NIST612

valeur certifiée : valeur certifiée pour chaque élément du NIST612

σ : Ecartype calculé sur les douze mesures effectuées sur le NIST612

Tableau 18 - Limite de détection, stabilité et reproductibilité des mesures

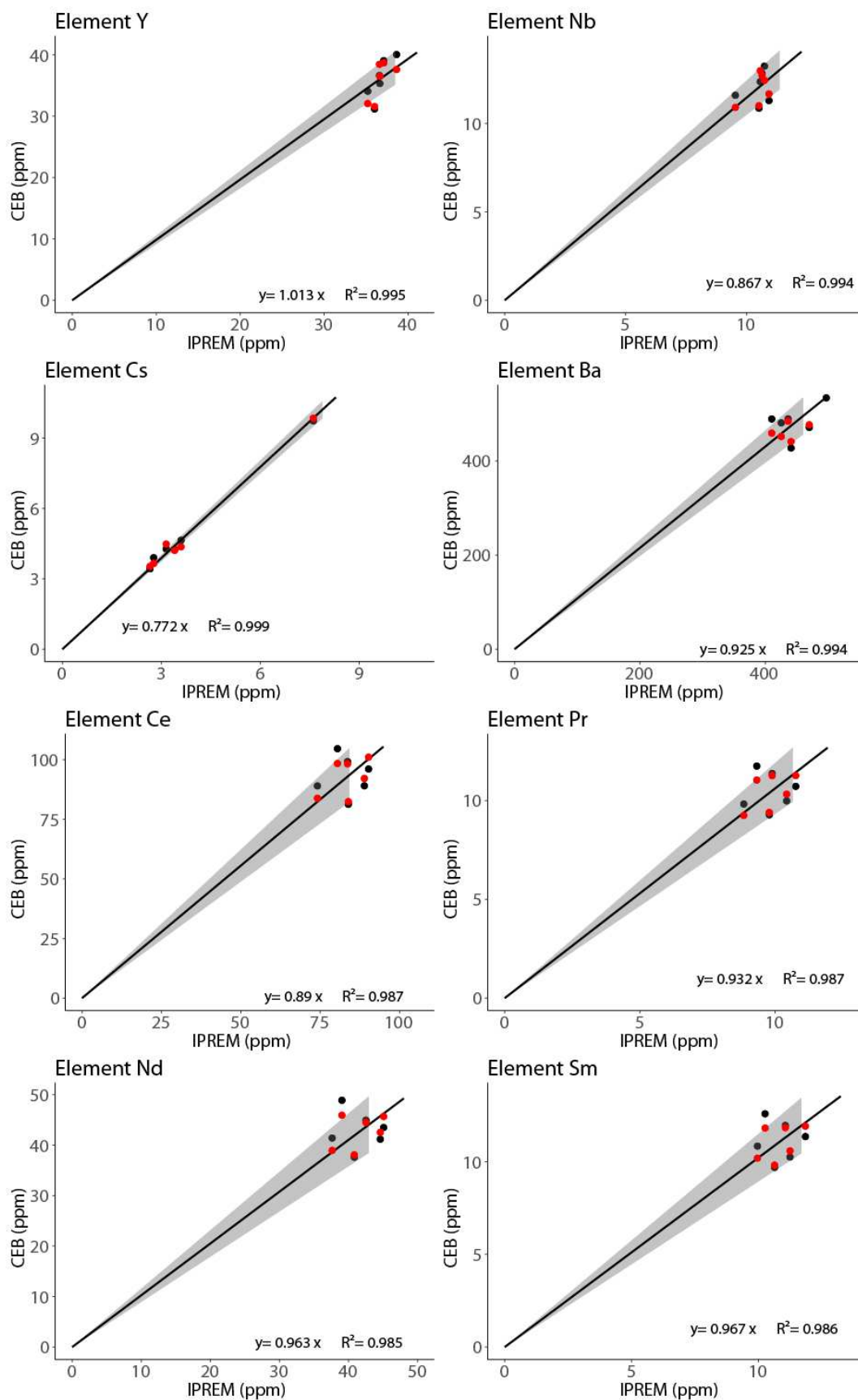
<i>Element</i>	Limite de détection (ppm)	Reproductibilité (%)	Stabilité (%)	Limite de détection (ppm)	Reproductibilité (%)	Stabilité (%)
	CEB			IPREM		
Y	0,006	<1	1	0,01	1	5
Nb	0,004	2	2	0,006	5	9
Cs	0,13	4	2	0,05	5	9
Ba	0,12	2	2	0,01	10	11
La	0,004	1	2	0,005	5	11
Ce	0,004	1	2	0,004	7	13
Pr	0,003	2	2	0,004	6	12
Nd	0,02	1	2	0,015	3	10
Sm	0,008	2	2	0,009	2	10
Eu	0,014	1	2	0,009	4	11
Gd	0,07	2	2	0,007	<1	10
Yb	0,009	1	2	0,04	2	8
Hf	0,003	3	2	0,005	2	10
Ta	0,003	3	2	0,003	<1	10
Th	0,001	1	2	0,002	3	7
U	0,001	1	2	0,002	11	8

e) Intercomparaison

Nous avons vérifié la compatibilité des résultats obtenus sur les deux appareillages en effectuant des analyses au sein des deux laboratoires sur les mêmes inclusions. Elles ont été choisies en fonction de leur taille, supérieure à 60µm, afin de permettre plusieurs mesures⁸³. Au moins deux mesures ont été réalisées par inclusion considérée dans chacun des laboratoires afin de vérifier leur homogénéité. Nous avons également enregistré le signal des isotopes ²⁸Si ou ²⁷Al au CEB afin de vérifier l'influence du standard interne utilisé sur les concentrations finales.

Les résultats sont comparés figure 62. Les concentrations calculées à l'IPREM et au CEB sont dans l'ensemble en bon accord et le choix de l'étalon interne semble jouer qu'un rôle mineur sur la valeur finale de ces dernières. Les dosages des éléments Cs et Nb sont toutefois surestimés au CEB (rapport<0,87). Il est possible que ces écarts soient la conséquence d'un fractionnement élémentaire. Dans ce cas, les résultats pourraient sans doute être améliorés par l'emploi d'un matériau de référence plus proche de la composition des inclusions étudiées, cependant il n'existait pas à notre connaissance de matériau certifié possédant ces caractéristiques. De plus les écarts relatifs demeurent inférieurs à 15%, ce qui est cohérent avec les résultats présentés dans le tableau 18. Nous nous sommes ainsi assurés que les résultats des dosages effectués au sein des deux laboratoires pouvaient être directement confrontés. Toutefois, pour les plus petites inclusions (de taille inférieure à 20µm), dans lesquelles une très faible quantité de matière est disponible, nous avons privilégié l'appareillage disponible à l'IPREM, plus sensible, afin de maximiser les chances d'obtenir un signal exploitable.

⁸³ Ce type d'inclusion n'est pas rencontrée dans le cas des armures. Par conséquent nous nous sommes servis d'un autre échantillon de fer ancien.



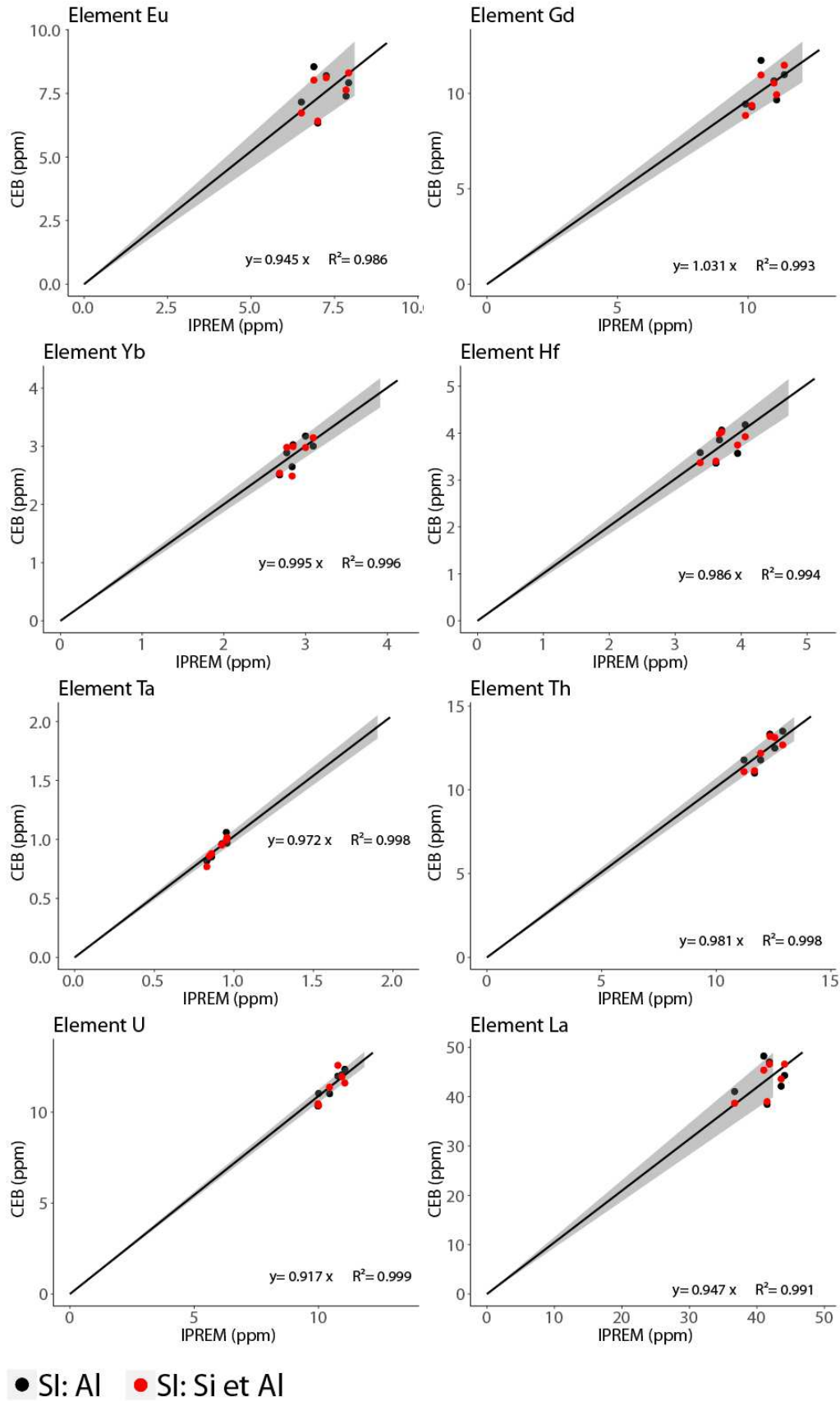


Figure 62 - Comparaison des mesures par LA-ICP-MS effectuées au CEB et à l'IPREM sur des inclusions non métalliques. Les points noirs correspondent aux mesures réalisées avec le même étalon interne (Al27). Les points rouges correspondent aux mesures réalisées avec un étalon interne différent (Al27 à l'IPREM et Si28 au CEB). La plage grisée correspond à plus ou moins 5 % d'erreur relative. « SI » : Standard interne

5) Compatibilité de provenance

a) **Filtre des teneurs absolues**

Comme présenté au chapitre 1, certains auteurs ont mis en évidence que des espaces de production pouvaient être fortement typés par un ou plusieurs éléments chimiques. Ainsi, pour chaque échantillon analysé, une attention particulière sera apportée aux teneurs moyennes pondérées par la surface⁸⁴ (%E*) des éléments manganèse et phosphore pouvant constituer un premier indice de compatibilité ou d'incompatibilité chimique avec certaines régions.

b) **Analyse multivariée**

La méthodologie mise en place pour la quantification des éléments traces nous a permis de mesurer systématiquement une dizaine d'entre eux : Y, Nb, Ba, La, Ce, Pr, Nd, Th, U. Les éléments Cs, Sm, Eu, Gd, Yb, Hf, Ta ont pu être dosés dans un nombre plus réduit de cas (moins d'un tiers des cas pour le Cs et environ 2/3 des cas pour les autres). Ainsi, le nombre d'éléments traces quantifiés était suffisamment important pour pouvoir recourir à l'analyse multivariée.

Les données ont été transformées par la méthode log-ratio suivante (Log-Ratio ou centred-log ratios voir Chapitre 1) :

$$X_{ij} = \text{Log} \frac{x_{ij}}{g(x_i)}$$

Avec :

X_{ij} : valeur transformée pour chaque variable

x_{ij} : valeur de chaque variable (ici concentration)

$\bar{x}_j$: moyenne de la j^{ème} variable

S_j : Ecartype de la j^{ème} variable

$g(x_i)$: moyenne géométrique de l'ensemble des variables considérées

Afin de minimiser la dispersion du jeu de données, nous avons fait le choix de ne conserver pour l'analyse uniquement les éléments systématiquement bien dosés Y, Nb, Ba, La, Ce, Pr, Nd, Th, U⁸⁵. Les autres éléments ont pu être ajoutés ponctuellement dans certaines analyses lorsqu'ils étaient quantifiés. Sauf mention inverse, la moyenne géométrique comprend ainsi l'ensemble des variables considérées. Nous avons ensuite mise en place la démarche suivante.

⁸⁴ Voir calcul p.14

⁸⁵ Certains éléments à fort potentiel discriminant, comme l'euporium, n'ont donc pas pu être considérés dans l'analyse multivariée. Pour les inclusions où cet élément avait pu être quantifié une comparaison du rapport Eu/Sm a été envisagée (voir volume Annexe)

Dans un premier temps nous avons cherché à comparer les signatures chimiques des échantillons d'armures entre elles, afin de mettre en évidence d'éventuels groupes de provenance. Nous avons fait le choix de laisser les données s'exprimer librement dans une démarche exploratoire. L'ACP, méthode non supervisée, choisie dans ce contexte par différents auteurs, a alors été privilégiée (A. Dissler, 2014). De plus, dans le but de rééquilibrer le poids des différentes variables, elle a été réduite. Cette opération a consisté à diviser les variables par leurs écart-types pour effectuer en quelque sorte une standardisation des X_{ij} (voir Chapitre 1).

Afin de préciser la provenance du métal employé pour la fabrication des armures, l'étape suivante a consisté à comparer leurs signatures chimiques avec celles d'espaces de production déjà caractérisés, comme l'espace lombard (S. Leroy, 2010). Toutefois, dans notre cas, un nombre restreint d'éléments traces a pu être dosé, ce qui peut limiter la portée des comparaisons. En effet, le recouvrement des signatures des espaces de production a tendance à augmenter. Ils peuvent alors devenir difficiles à discriminer entre eux. Par ailleurs, certains espaces, comme la Lombardie présentent régulièrement des mesures en dessous des limites de détection pour les éléments sélectionnés, notamment dans le cas des minerais, ce qui contribue à disperser la signature chimique de l'espace et inévitablement à augmenter les recouvrements. L'ACP, méthode non supervisée, privilégiant l'expression de la variance totale du jeu de données, peut ainsi s'avérer inefficace pour discriminer les échantillons et les espaces candidats entre eux. Aussi, dans ces cas précis, les résultats de l'ACP ont été comparés à ceux de l'AFD, méthode supervisée déjà mise en œuvre dans plusieurs études afin de pouvoir trancher (M. Charlton et al., 2012; S. Leroy et al., 2012).

Chapitre 4 : Résultats des analyses menées sur les échantillons

Ce chapitre est dédié à présenter l'ensemble des résultats déduits de l'analyse microstructurale et inclusionnaire des échantillons d'armures. Il a été décomposé en trois grandes parties.

La première recense les principales caractéristiques du métal relevées sur les échantillons, puis replace les caractéristiques métallurgiques dégagées dans leur contexte historique. Pour cela les résultats seront présentés par siècle et par grande typologie. Une description détaillée de la microstructure de chaque échantillon est disponible dans le volume Annexe.

La seconde partie présente les résultats relatifs à la provenance du métal pour les grands centres de production étudiés. Les signatures chimiques des éléments d'armures seront comparées entres elles et avec des ensembles géochimiques de production comme la Lombardie, pertinents du point de vue de l'origine supposée des pièces.

Enfin, la dernière partie rassemble les résultats spécifiques à la discrimination chimique des deux procédés de réduction du fer susceptibles d'avoir été utilisés pour la production du métal : les procédés de réduction directe et indirecte.

I. Nature du métal

Nous allons d'abord nous intéresser aux caractéristiques du métal de façon générale pour l'ensemble des échantillons étudiés. Ceci nous permettra de présenter la démarche mise en place pour caractériser le métal. Dans une seconde partie, cette dernière sera appliquée pour présenter les résultats en replaçant les pièces dans leur contexte historique. Les résultats sont détaillés pour chaque échantillon dans le volume annexe.

1) Résultats généraux

Les fers anciens présentent généralement de grandes hétérogénéités, en termes de nature et de distribution des éléments présents en solution solide ou sous forme de précipités (carbone, phosphore...), de taille de grain, mais également de répartition et de taille des inclusions non métalliques. Les microstructures de nos échantillons ne contredisent pas ce constat et ont révélé des structures variées, que nous allons maintenant présenter.

a) **Hétérogénéité de la teneur en carbone**

i. Présentation générale

La teneur en carbone dans les fers anciens peut être très hétérogène, comme l'illustre la figure 63. Afin d'estimer et comparer les teneurs en carbone des différents échantillons déterminées par comparaison avec les atlas métallographiques (voir Chapitre 3, p.174), une teneur moyenne en carbone pondérée par la surface (%C*) ainsi que l'écart-type associé à cette moyenne (*Sigma*) ont été calculés, en suivant la méthodologie détaillée dans G. Pagès et al. (G. Pagès et al., 2011) et S. Leroy et al. (S. Leroy et al., 2017)⁸⁶ (voir Chapitre 3). Leurs distributions sont présentées figure 64.

⁸⁶ Pour rappel comme exposé dans le chapitre 3, dans le cas des échantillons trempés la détermination du taux de carbone par comparaison avec les atlas métallographiques n'a pas été faite. Toutefois une limite basse peut être estimée puisqu'une quantité de carbone minimale est nécessaire pour que l'acier puisse être trempable. Elle est située autour de 0,3%.

A



B

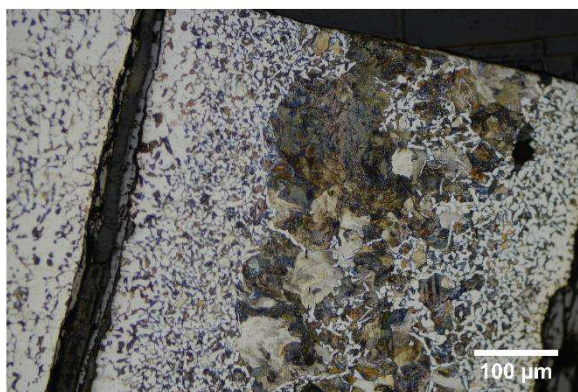
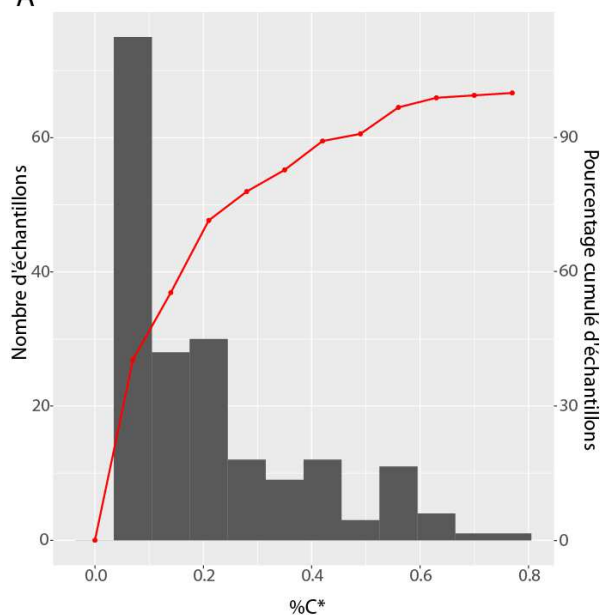


Figure 63- « A » exemple de structure homogène, (échantillon G42_ech2), « B » exemple de structure hétérogène (échantillon 9_dossier). Micrographies observées après attaque au réactif Nital 3%

Environ 70% des échantillons présentent une teneur moyenne en carbone faible ($<0,2\%$). En outre pour un peu plus de 50% d'entre eux, cette teneur est homogène sur l'ensemble de la surface de l'échantillon (Sigma nul). Quelques échantillons seulement montrent une distribution en teneur en carbone très hétérogène (Sigma supérieur à 0,2). Ainsi, au vu de ces résultats, pour caractériser l'hétérogénéité du métal du point de vue de la teneur en carbone nous retiendrons 4 grandes catégories dans la suite de notre exposé.

- Métal très homogène ($\text{Sigma} = 0$)
- Métal homogène (Sigma compris entre 0 et 0,1)
- Métal légèrement hétérogène (Sigma compris entre 0,1 et 0,2)
- Métal hétérogène (Sigma supérieur à 0,2)

A



B

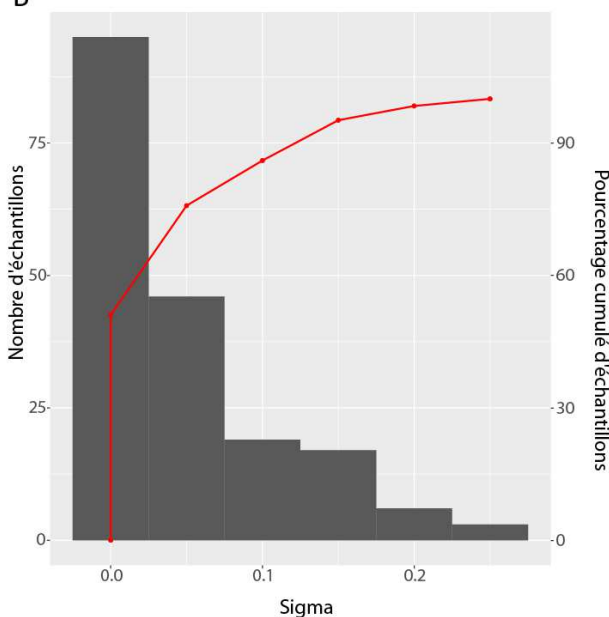


Figure 64 - « A » distribution de la teneur moyenne en carbone pondérée par la surface calculée sur l'ensemble des échantillons, « B » écart-type calculé sur cette teneur moyenne

L'hétérogénéité de la teneur en carbone traduite par l'écart-type peut avoir différentes causes. Elle peut être liée à l'hétérogénéité initiale du métal utilisé, mais aussi à la présence de structures particulières qui seront appelées par la suite « structures en bandes » (voir Chapitre 1). Le paragraphe suivant est dédié à leur présentation.

ii. Structures en bandes

Sur certains échantillons (17 au total), la microstructure relève la présence de bandes de métal de teneur en carbone différentes. Elle associe une (ou des) partie(s) aciérée(s), parfois porteuse(s) de structures de trempe⁸⁷ à une (ou des) partie(s) ferritique(s) (voir figure 65). La régularité de la microstructure sur l'ensemble de la surface des échantillons concernés pourrait suggérer un assemblage de plusieurs matériaux aux propriétés différentes.

⁸⁷ Les structures de trempe sont traitées dans le paragraphe : « Traitements thermiques et mécaniques »

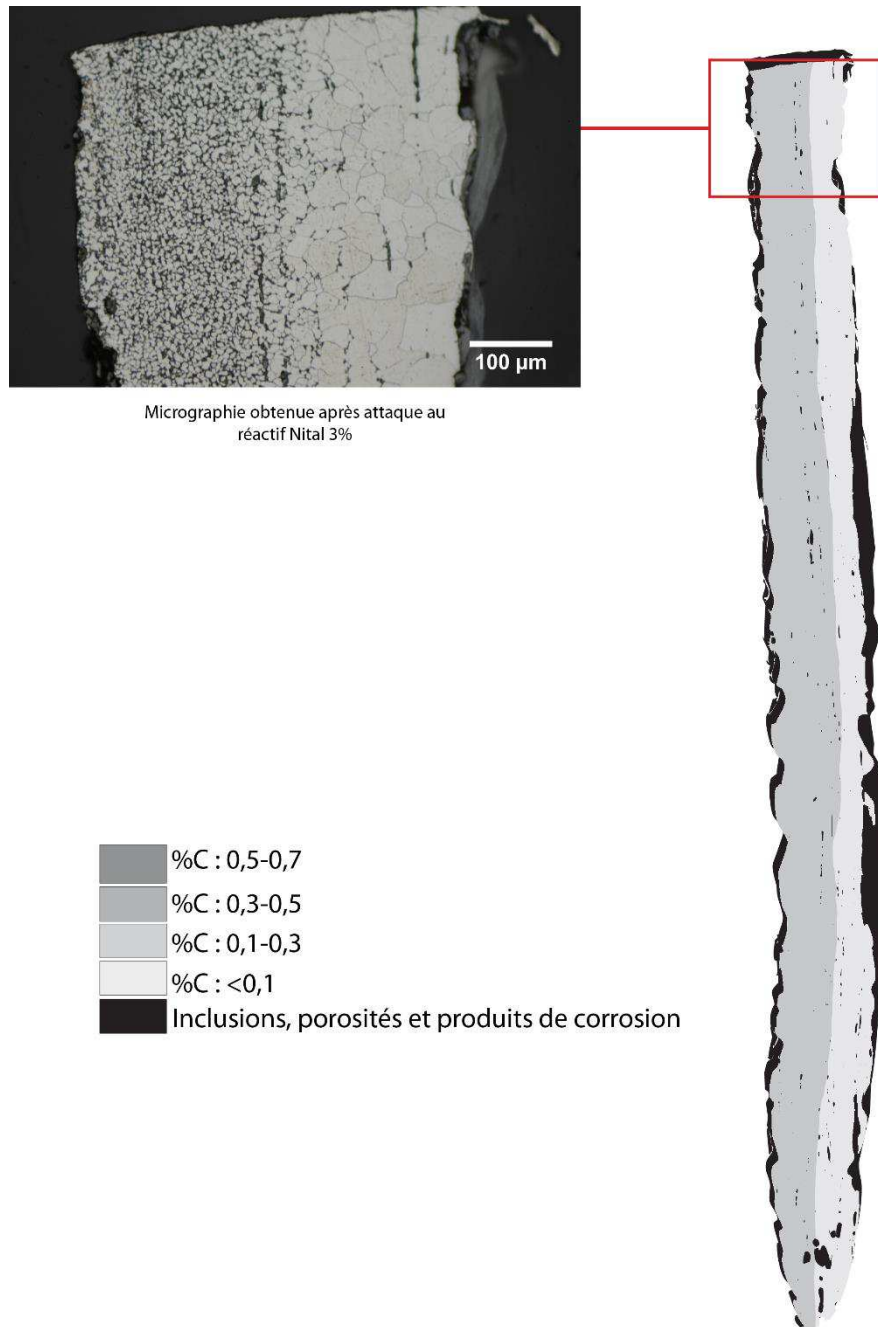


Figure 65 - Exemple de structure en bande associant une bande de ferritique à une bande d'acier moyennement carburé (Echantillon G93-2ou3_ech2). Micrographie observée après attaque au réactif Nital (3%)

b) Taille de grain

La taille des grains est très hétérogène dans le cas des fers anciens. Par conséquent, elle est difficile à quantifier. Après observation de l'ensemble des échantillons de notre corpus par métallographie, nous avons pu mettre en évidence trois grandes familles. La première présente une taille de grain faible mais relativement homogène, majoritairement inférieure à 50µm. La seconde une taille de grain très variable sur l'ensemble de la surface de l'échantillon, allant de 50µm à 200µm. La troisième regroupe des échantillons aux grains très larges, majoritairement supérieur à 200µm (voir figure 66).



Figure 66 - « A » micrographie après attaque au réactif Nital 3% de l'échantillon 8_dossière de l'armure de François de Montmorency, illustrant la catégorie de taille de grain faible (<50µm). « B » micrographie après attaque au réactif Nital 3% de l'échantillon LAM46521 illustrant la catégorie de taille de grain moyenne comprise entre [50-200µm]. « C » micrographie après attaque au réactif Nital 3% de l'échantillon Laq_348214425 illustrant la catégorie de taille de grain élevée supérieure à 200µm.

La distribution de ces trois familles est présentée figure 67. On peut constater que plus de la moitié des échantillons présente une taille de grains très hétérogène comprise entre 50 et 200µm. Les échantillons présentant des grains de taille supérieure à 200µm sont rares, une faible taille de grain (<50 µm) a été relevée pour une cinquantaine d'échantillons.

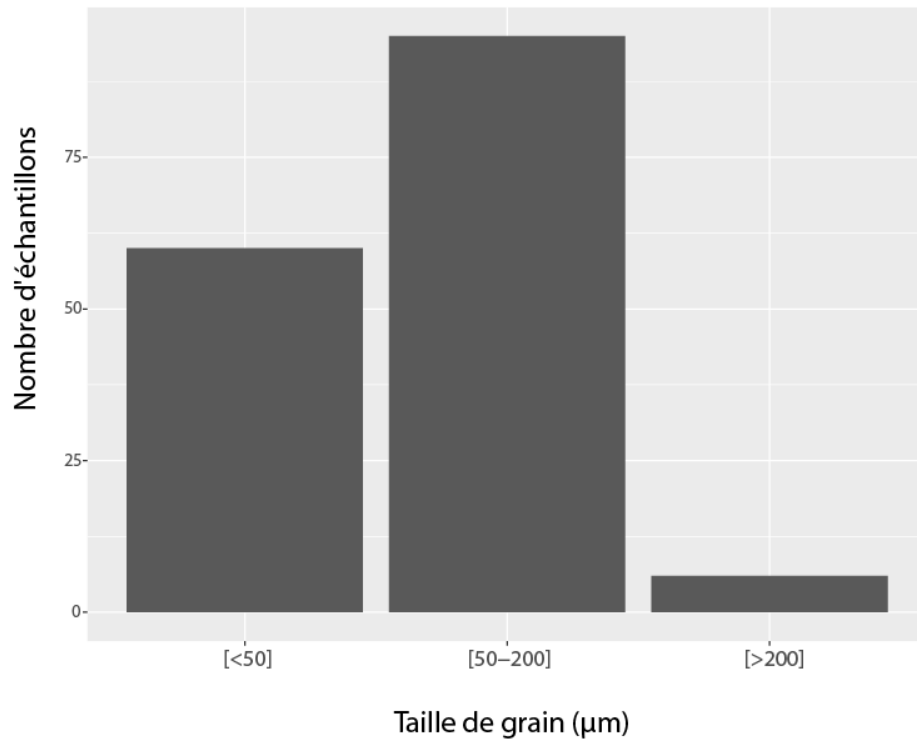


Figure 67 - Distribution des catégories de tailles de grain définies

c) Inclusions non métalliques

De façon générale, les inclusions non métalliques se présentent sous la forme d'inclusions fines (largueur généralement inférieure ou égale à 30μm) et allongées dans la direction de martelage (voir figure 68).

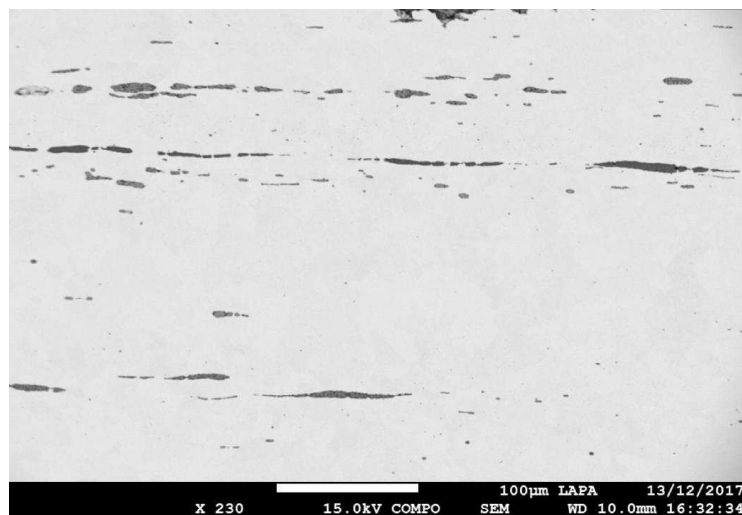


Figure 68- Exemple d'inclusion sur l'échantillon RX14_EN_ech2

Leur taux est variable selon les échantillons mais plus de 75% des échantillons a un taux inférieur à 3% (voir figure 69). Quelques rares échantillons ont une propreté inclusionnaire supérieure à 9%. La moyenne a été calculée, elle se situe autour de 2%.

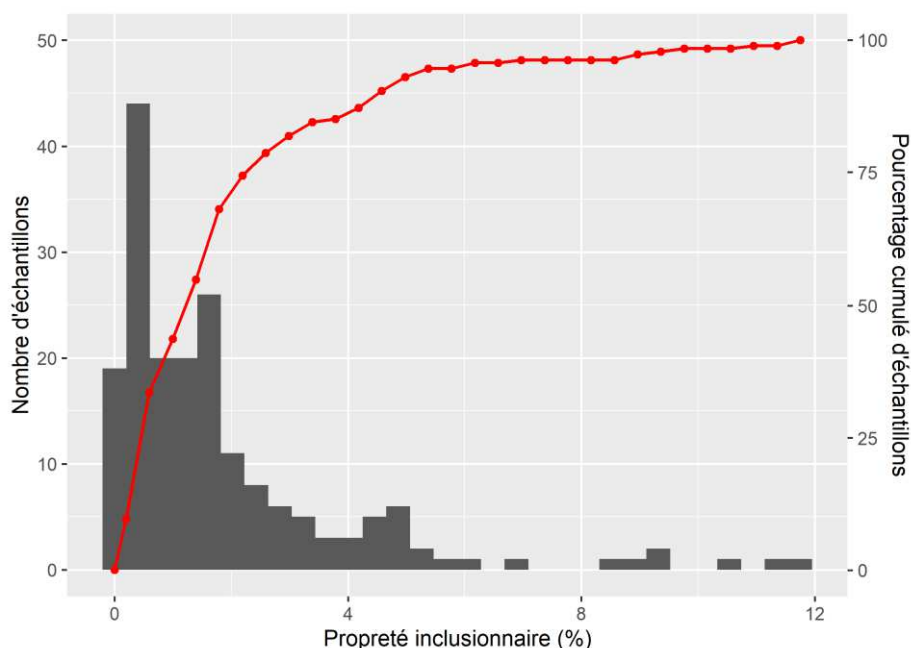


Figure 69- Propreté inclusionnaire (%) calculée pour l'ensemble des échantillons du corpus.

Les analyses effectuées par MEB-EDS ont permis l'observation des inclusions non métalliques et la quantification de leur composition. Les grandes familles d'inclusions rencontrées fréquemment dans le cas des fers anciens et recensées dans la littérature ont été retrouvées. Les inclusions polyphasées sont généralement constituées de fayalite (Fe_2SiO_4) dans une matrice vitreuse, comprenant parfois des globules ou de fines dendrites de wüstite (FeO). Des proportions variables de K, Ca, Mn, Al, Mg, S et P peuvent aussi y être rencontrées. Des inclusions de scorie d'apparence monophasée et vitreuse ont également été relevées (voir figure 70).

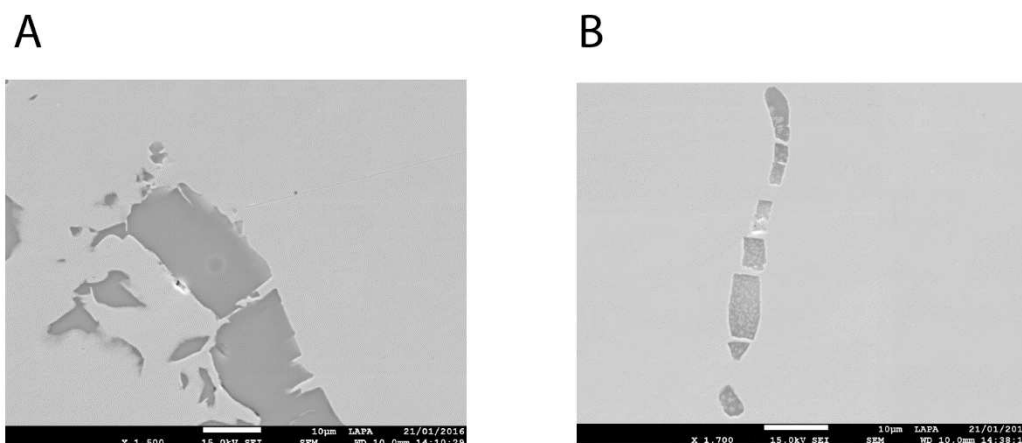


Figure 70 - « A » : Exemple d'inclusion d'apparence monophasée. « B » : Exemple d'inclusion polyphasée constituée d'une matrice silicatée et de wüstite.

Pour certains échantillons d'autres types d'inclusions ont pu être ponctuellement rencontrées. Par exemple, certaines fortement chargées en oxygène, phosphore et fer, ont pu être

identifiées comme des phosphates de fer⁸⁸. D'autres encore pouvaient présenter des fortes teneurs en Ti, V et Cr⁸⁹.

d) Teneur et distribution du phosphore.

i. Présentation générale

La présence de phosphore dans le métal peut être mise en évidence de différentes façons. Les variations microscopiques de la teneur en phosphore sont traduites par la présence de « structures fantômes » révélées après attaque au réactif Oberhoffer (J. W. Stewart, J. A. Charles, and E. R. Wallach, 2000). Un exemple du type de microstructure observé est présenté figure 71.

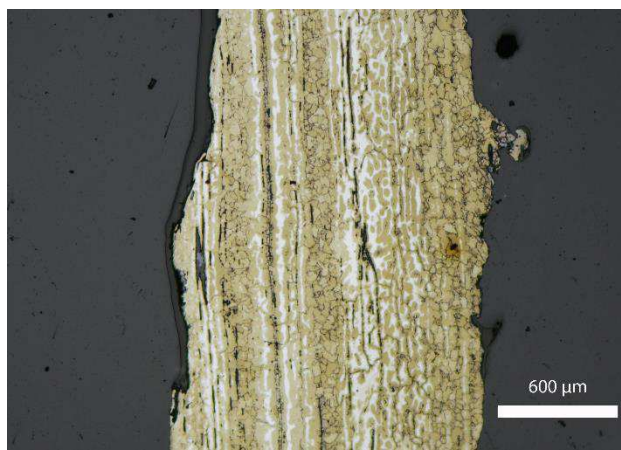


Figure 71 - Exemple de structures fantômes mises en évidence sur l'échantillon 430AG444 à l'aide du réactif Oberhoffer

Leur présence a été systématiquement recherchée sur l'ensemble des échantillons. Cependant, leur absence ne signifie pas forcément l'absence de phosphore en solution solide dans le métal. L'histoire thermique de ce dernier a pu conduire à une répartition homogène du phosphore, rendu indiscernable par attaque chimique. Sa présence peut toutefois être fortement suspectée par la présence d'inclusions fortement chargées en phosphore, comme des phosphates de fer. Des dosages EPMA ont été effectués pour quantifier le phosphore dans le métal sur l'ensemble des échantillons présentant des structures fantômes, et pour ceux où sa présence était fortement suspectée. La distribution de la teneur moyenne en phosphore mesurée sur ces échantillons est présentée figure 72.

⁸⁸ La distribution des phases a été vérifiée par des cartographies élémentaires EDS

⁸⁹ Ce type d'inclusion est rencontré dans les alliages ferreux issus de la filière indirecte. Le titane le vanadium et le chrome formeraient, en effet, des carbures très stables en raison de leurs grandes affinités pour le carbone. Ainsi lors de l'affinage ce pourrait être l'oxydation de ces phases qui serait à l'origine de la forte concentration en chrome vanadium et titane dans certaines inclusions du procédé indirect (P. Dillmann, 1998),

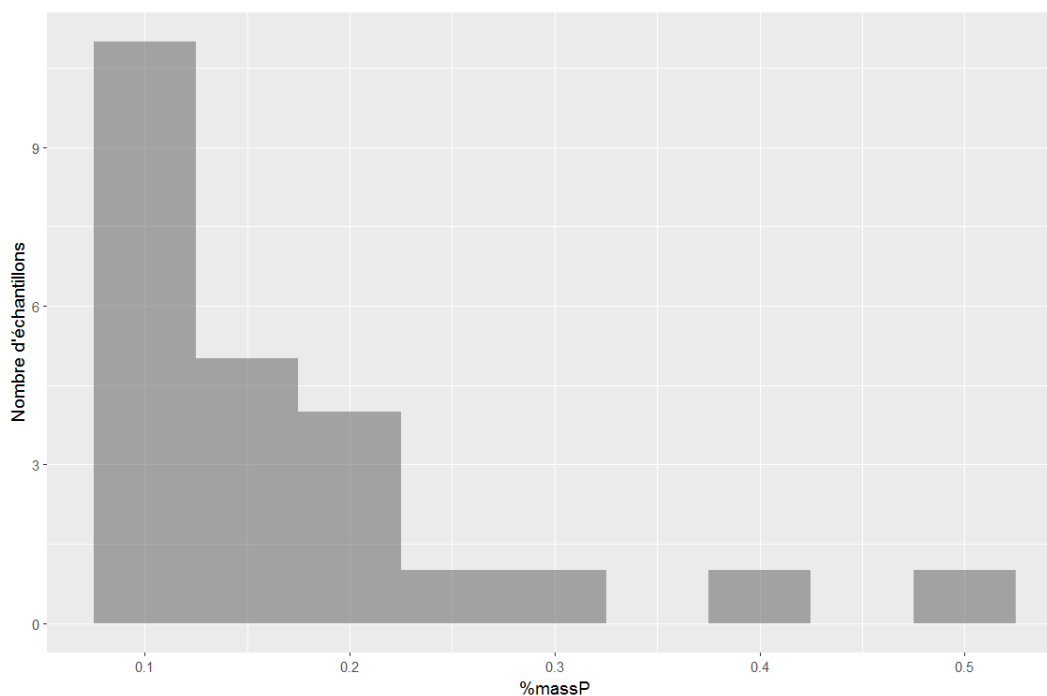


Figure 72 - Distribution de la teneur en phosphore pour les fers phosphoreux (échantillons où des structures fantômes ou des inclusions fortement chargées en phosphore ont été relevées)

Au total, la présence de phosphore dans le métal a été mise en évidence sur 31 échantillons soit seulement 15% du corpus. Ces échantillons contiennent du phosphore en quantité supérieure ou égale à 0,1%mass. Les teneurs supérieures à 0,2%mass demeurent rares. Elles ne dépassent pas 0,5%mass (voir figure 72).

ii. Hétérogénéité de la teneur en phosphore et structures en bandes

Régulièrement des hétérogénéités en teneur en phosphore ont été observées. Celles-ci peuvent avoir différentes causes. Elles peuvent être liées à l'histoire thermique du matériau. Les structures fantômes observées en sont, par exemple, une conséquence directe. Toutefois, dans certains cas, cette hétérogénéité s'avérait répartie de façon très régulière sur la surface des échantillons. Ainsi, une association d'une bande de métal moyennement carburé à une autre de fer phosphoreux a été relevée pour trois échantillons (Echantillons H26, Laq34820-434 et STS9) (voir figure 73). Des phénomènes de ségrégation compétitive entre le carbone et le phosphore, notamment aux joints de grains, ont été recensés dans la littérature (H. Hänsel and H. J. Grabke, 1986). Cependant, pour ces quatre échantillons l'homogénéité et la régularité des structures sur l'ensemble des surfaces sont remarquables et pourraient suggérer l'assemblage de deux matériaux. Ceci fait directement écho aux structures en bandes associant un métal très faiblement carburé à un autre plus aciéré qui ont été précédemment évoquées.

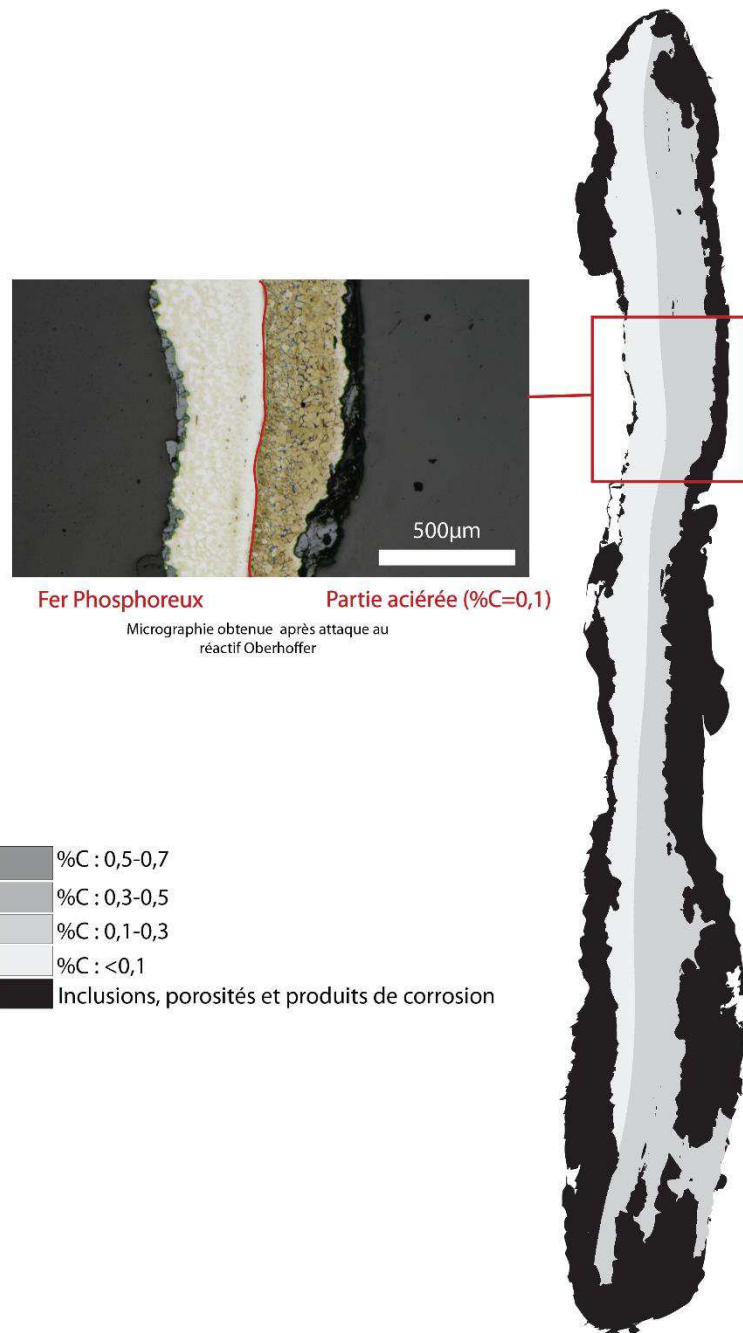


Figure 73 - Structure en bande associant une bande de fer phosphoreux à une bande aciérée (Echantillon H26). Micrographie observée après attaque au réactif Oberhoffer.

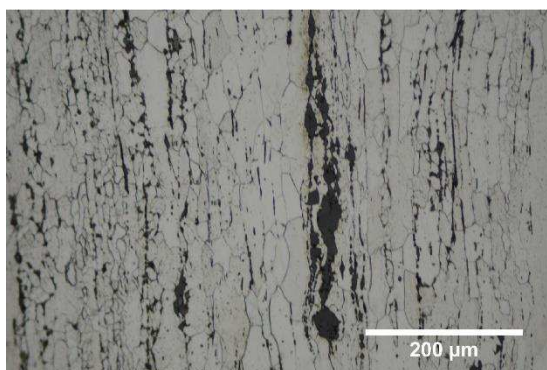
e) Traitements thermiques, thermochimiques et mécaniques

Le métal a pu subir différents traitements thermiques thermochimiques ou mécaniques afin d'en modifier les propriétés selon le but recherché. Différentes structures témoignant de ces phénomènes ont été observées.

i. Déformation du métal

Six échantillons ont révélé des structures de grains écrouis témoignant d'un martelage du métal qui n'a pas été suivi d'un recuit ayant permis une recristallisation des grains sous une forme équiaxe. Comme l'illustre la figure 75, la plupart sont faiblement ou moyennement carburés ($\%C^* < 0,4\%$ mass), deux d'entre eux présentent toutefois des teneurs en carbone importantes ($\%C^* > 0,6\%$ mass) suggérant un travail de forge plus laborieux pour réussir à déformer l'acier (voir figure 74).

A



B



Figure 74 - « A » : Structure écrouie d'un métal ferritique (micrographie de l'échantillon 771 obtenue après attaque Nital 3%), « B » Structure écrouie d'un métal aciéré ($\%C > 0,6$) (micrographie de l'échantillon STS_10 obtenue après attaque Nital 3%)

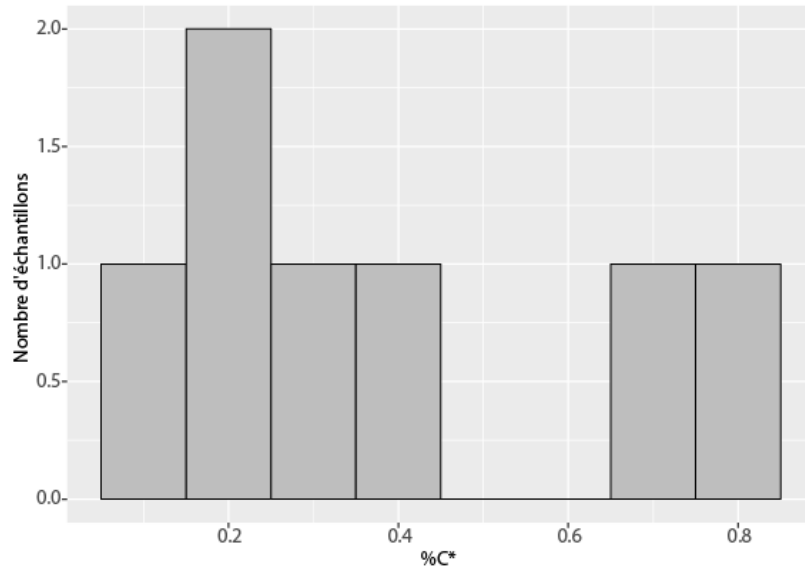


Figure 75 - Distribution de la teneur en carbone pondérée par la surface des échantillons présentant une structure écrouie

ii. Structures de recuit

Le recuit consiste à effectuer une chauffe et un maintien en température du métal. Ce traitement permet notamment d'annuler les effets des traitements thermiques ou mécaniques antérieurs et adoucit le matériau. L'armurier devait ainsi y avoir fréquemment recours pour continuer à pouvoir déformer le métal, lors de la mise en forme de l'armure. Pour rappel ce type d'opération peut être à l'origine d'une recristallisation des grains, d'une croissance des grains mais également d'une globulisation de la perlite⁹⁰.

⁹⁰ Pour une description plus détaillée voir p. 58

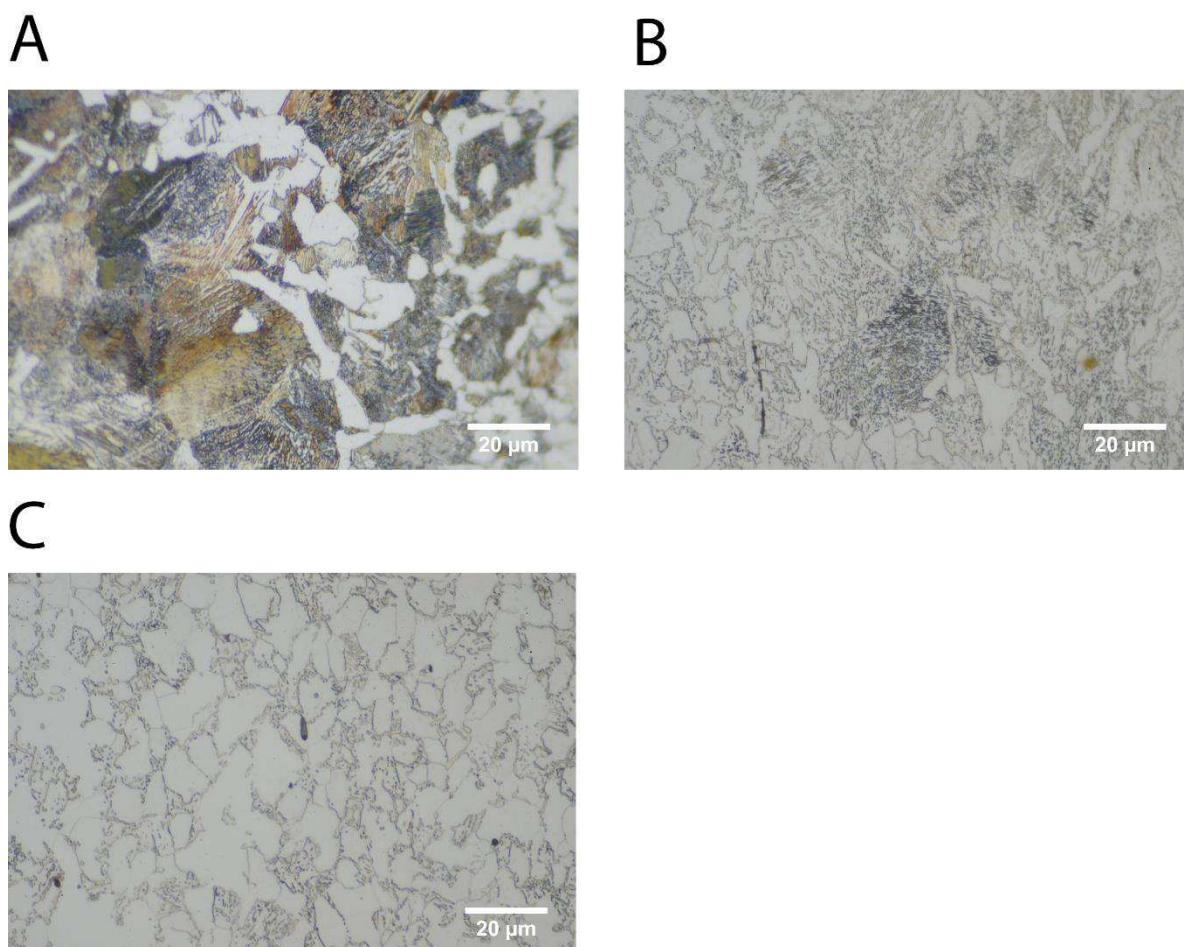


Figure 76 - « A » Exemple de perlite lamellaire (micrographie de l'échantillon 9_dossier de l'armure de François de Montmorency après attaque au réactif Nital 3%), « B » Exemple de perlite en cours de globulisation (micrographie de l'échantillon G436_ech3 après attaque au réactif Nital 3%), « C » : Exemple de perlite globulaire (micrographie de l'échantillon G436_ech3 après attaque au réactif Nital 3%)

Plus de 95% des échantillons présentent des structures de recuit matérialisées par la présence de grains équiaxes. Comme précédemment évoqué, pour 9 d'entre eux les grains sont de tailles très larges ($>200\mu\text{m}$). Ceci témoigne d'une chauffe prolongée du métal. Ce geste a pu être réalisé volontairement si l'armurier cherchait à obtenir un métal de faible dureté. Il peut également résulter d'un acte involontaire. Par exemple, la réalisation d'une dorure au mercure nécessitait deux étapes : un cuivrage pour faciliter l'adhésion du fer et de l'or puis par-dessus un dépôt d'un amalgame d'or et de mercure qui était chauffé pour évaporer le mercure. Un échantillon issu d'une défense de tête 951180-1, présente les vestiges d'un cuivrage réalisé sur le fer qui pourrait témoigner des traces d'une ancienne dorure au mercure aujourd'hui disparue. Le recuit qui a pu être réalisé pour son application aurait eu deux principales conséquences sur cet échantillon : l'augmentation de la taille des grains de ferrite et éventuellement une décarburation de surface qui expliquerait l'hétérogénéité de teneur en carbone observée.

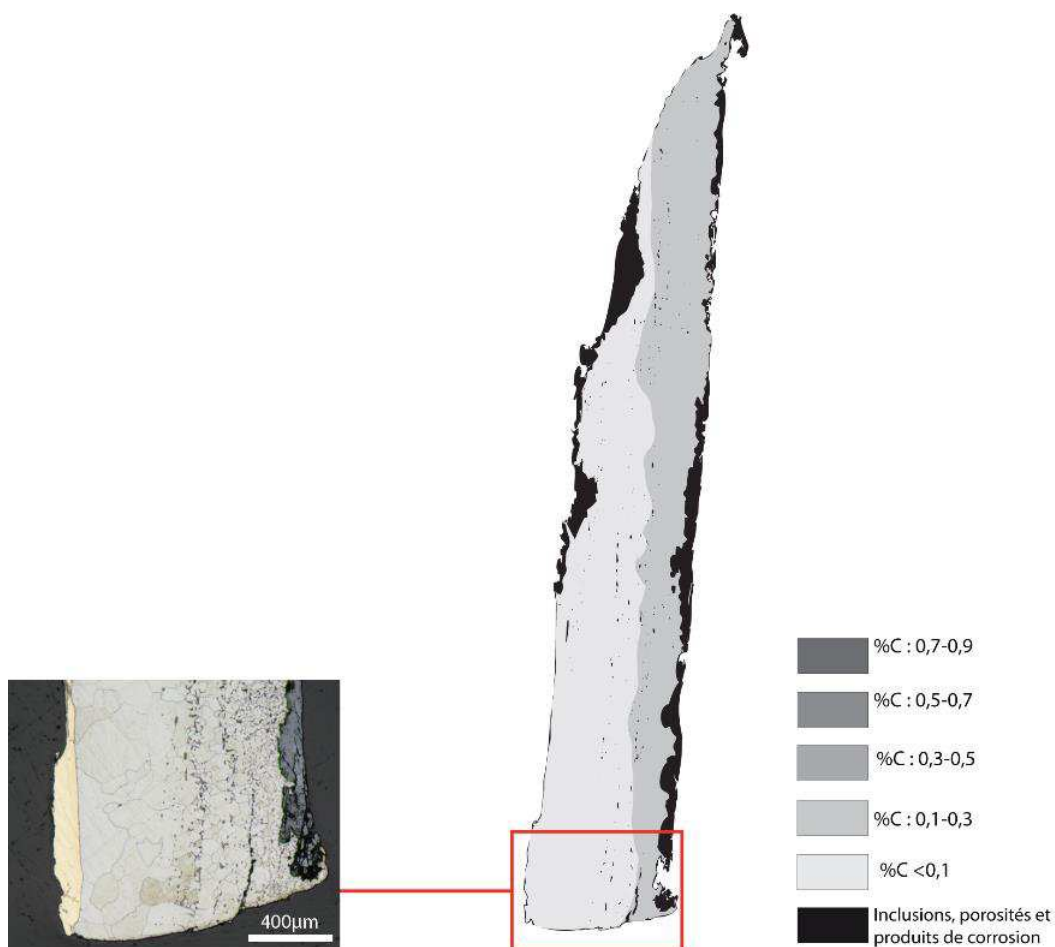


Figure 77 - Détail de la microstructure de l'échantillon 951180-1.

iii. Trempe

La trempe consiste à refroidir brutalement le métal à partir du domaine austénitique. Ce traitement permet d'obtenir une structure particulière, la martensite, d'une très grande dureté. En pratique, dans le cas des alliages ferreux anciens l'acier sera dit « trempable » s'il possède une teneur en carbone supérieure à 0,3%. Cette opération pouvait également être suivie d'un revenu, une chauffe de quelques centaines de degrés qui provoque la précipitation du carbone sous forme de carbures et permettait d'éliminer une partie des tensions du matériau. On parle alors de martensite tempérée. La bainite est également une structure de trempe mais elle est obtenue pour des vitesses de refroidissement moins élevées. Elle peut être très difficile à différencier de la martensite tempérée au microscope optique (B. L. Bramfitt and A. O. Benscoter, 2002).

Ces structures (martensite et bainite) ont été identifiées sur 16 échantillons soit 8% du corpus. Ces phases étaient parfois accompagnées de perlite nodulaire et de ferrite. Les différents types de microstructures rencontrées sont illustrées figure 78. Seuls deux échantillons présentent une structure de trempe homogène (micrographie A). La microstructure des échantillons trempés

est, en effet, généralement hétérogène, c'est-à-dire qu'elle compte d'autres phases en plus de la bainite et la martensite. Ce phénomène peut s'expliquer de différentes façons. Il dépend d'abord de la vitesse de refroidissement et donc de la façon d'opérer la trempe. Pour rappel, pour un acier homogène en teneur en carbone, en fonction de la vitesse de refroidissement plus ou moins rapide toute une gamme de structures peut être obtenue, alliant parfois différentes phases (martensite, perlite, ferrite...) (voir Chapitre 1). Pour qu'une structure de martensite complète soit obtenue le refroidissement doit être très rapide (trempe à l'eau). Cependant, si la teneur en carbone est hétérogène dans le métal alors la vitesse de refroidissement nécessaire pour former de la martensite sera variable. Par conséquent la diversité des microstructures observées peut aussi être fonction de la teneur en carbone de l'échantillon. La micrographie E pourrait illustrer ce dernier cas. A la vitesse de refroidissement donnée, les zones les plus claires ne contenaient sans doute pas assez de carbone pour qu'une structure de trempe (martensite, bainite) se forme à cet endroit.

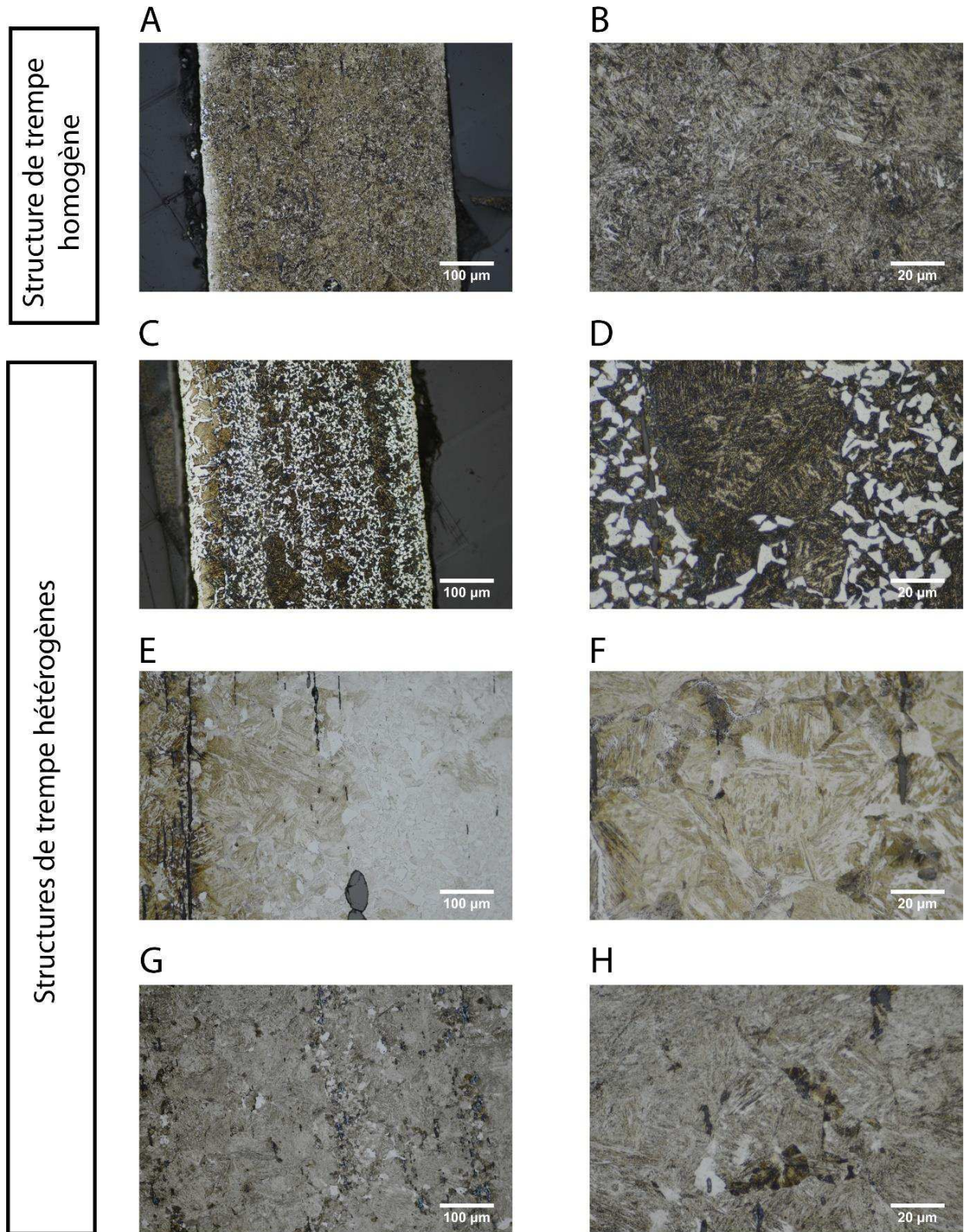


Figure 78 - « A » micrographie de l'échantillon G436_ech2 après attaque au réactif Nital 3%. « B » détail de la microstructure de l'échantillon G436_ech2 présentant une structure de trempe homogène (martensite et bainite). « C » micrographie de l'échantillon G436_ech1 après attaque au réactif Nital 3%. « D » détail de la microstructure de l'échantillon G436_ech1, présentant des phases typiques de trempe (martensite et bainite) dans une matrice de ferrite. « E » micrographie de l'échantillon LAM46491_1 après attaque au réactif Nital 3%. « F » détail de la microstructure de l'échantillon LAM46491_1 présentant différentes structures : martensite, bainite et perlite nodulaire. : « G » micrographie de l'échantillon 895413_1 après attaque au réactif Nital 3%. « H » détail de la microstructure de l'échantillon 895413_1 présentant différentes structures : martensite, bainite et perlite nodulaire

Si le revenu est trop poussé, on peut obtenir une structure de carbures sphériques répartis uniformément dans une matrice de ferrite, qui ressemble fortement à la perlite globulaire obtenue après recuit. Un exemple de ce type de structure est présenté figure 79.

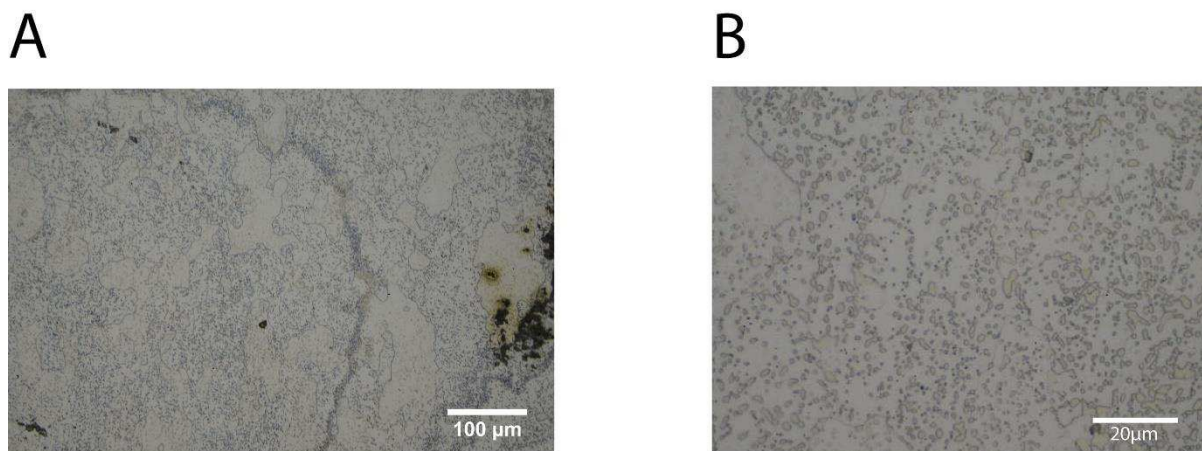


Figure 79 - « A » : micrographie de l'échantillon K229a après attaque au réactif Nital 3%. « B » détail de la structure.

iv. Cémentation

La cémentation consiste à mettre en contact du fer avec une source de carbone à chaud afin de le durcir. Le carbone diffuse alors progressivement au sein du métal donnant naissance à un gradient de teneur en carbone.

Treize échantillons présentaient un gradient de teneur en carbone bien marqué sur l'ensemble de leur surface, susceptible de suggérer ce type d'opération (voir figure 80). Toutefois, ces structures pourraient aussi être causées par l'hétérogénéité du métal, ou par diffusion du carbone dans la partie la moins carburée lors d'une soudure fer/acier par exemple. Par conséquent nous resterons prudents quant à l'interprétation de ces structures.

Notons également que, dans certains cas, la corrosion peut avoir fait disparaître la trace de ce gradient (P. Dillmann, L. Pérez, and C. Verna, 2011 a, p. 32). Ainsi, il est possible qu'une partie des échantillons de notre corpus soit dans ce cas, ce qui pourrait amener à sous-estimer la part de ce traitement thermique dans nos résultats.

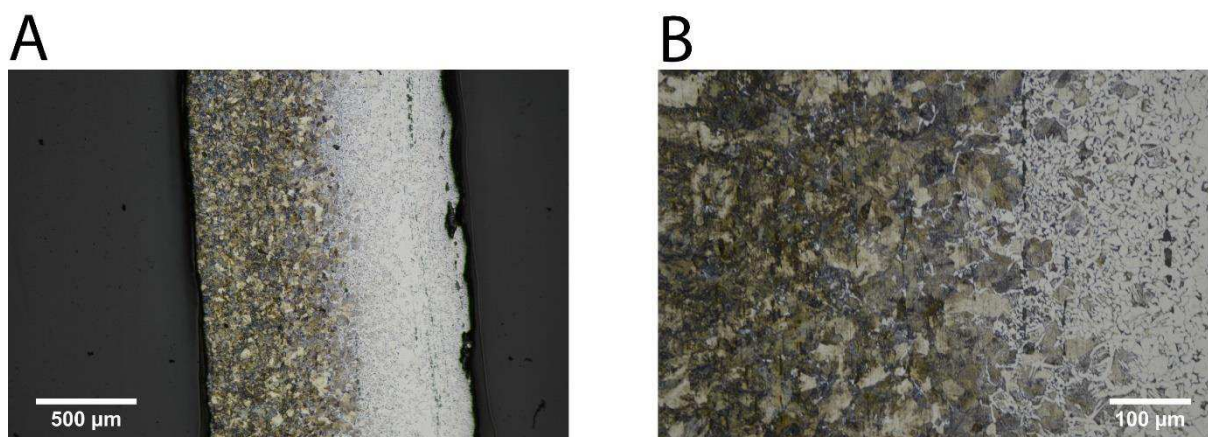


Figure 80 - « A » Micrographie de l'échantillon STS_6 après attaque au réactif Nital 3% mettant en évidence un gradient de teneur en carbone qui s'étend sur l'ensemble de la surface de l'échantillon. « B » détail.

v. Structure de Widmanstätten

Ce type de structure est fréquemment rencontré dans le cas des fers anciens. Elle résulte d'une surchauffe suivie d'un refroidissement relativement rapide à partir du domaine austénitique et comporte une structure aciculaire (en aiguille) de ferrite (voir figure 81). Dans notre corpus, 26 échantillons présentaient ce type de structure. Ce traitement fragilise le métal et n'était donc surement pas réalisé volontairement par l'armurier.

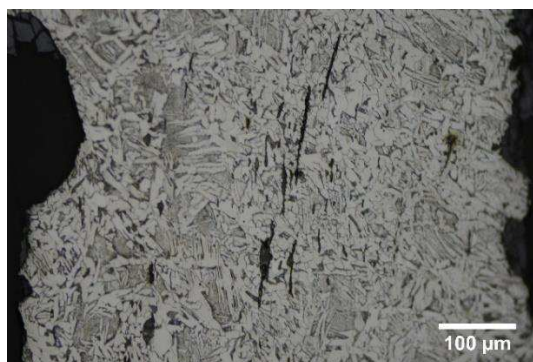


Figure 81 - Micrographie de l'échantillon HPO717 après attaque au réactif Nital 3% présentant une structure de Widmanstätten

vi. Bilan

Compte tenu des structures présentées, les traitements thermiques, thermochimiques et mécaniques ont été classés en différentes catégories dans le tableau 19. Une perlite de forme entièrement globulaire témoigne d'une chauffe et d'un maintien en température prolongé, de même que la présence de grains de grande taille (>200µm) équiaxes⁹¹. Ces structures ont été classées dans

⁹¹ La taille de grain peut également être influencé par un autre facteur : la présence de phosphore. Ainsi plus la quantité de phosphore est importante dans le métal plus la taille des grains de ferrite aura tendance à augmenter. Ceci s'explique par l'augmentation de la température de transformation ferrite-austénite en

la catégorie « CP ». La présence de carbures sphériques répartis uniformément dans une matrice ferritique peut aussi résulter d'un revenu trop poussé d'une structure de trempe. Toutefois comme la microstructure résultante s'avère très proche de celle de la perlite globulaire après recuit ces structures seront uniquement classées dans la catégorie « CP », afin de ne pas risquer une erreur d'interprétation.

Des grains fortement écrouis selon une direction privilégiée témoignent cette fois-ci d'un martelage du métal qui n'a pas été suivi d'un recuit, ayant permis une recristallisation des grains sous une forme équiaxe. Ces structures définissent la catégorie « E ».

La trempe sera identifiée grâce à la présence de structures typiques de cette opération à savoir la martensite ou la bainite. Ces phases témoignent, en effet, d'un refroidissement très rapide et par conséquent d'une action très probablement délibérée de l'armurier.

Les structures de Widmanstätten sont facilement identifiables par métallographie et seront rangées dans la catégorie « WID ».

Enfin, la présence d'un gradient de teneur en carbone s'étendant sur toute la largeur de l'échantillon, comme présenté figure 80 pourrait témoigner d'une opération de cémentation (catégorie « Grad »). Si aucune de ces structures remarquables n'a été identifiée, l'échantillon sera classé dans la catégorie « A ». Le métal a cependant obligatoirement subi une succession de phases de martelages suivies de recuits afin de pouvoir être déformé.

présence de phosphore. Pour des teneurs en phosphore élevées l'alliage est ainsi totalement ferritique pendant le refroidissement ce qui permet une croissance plus importante des grains (voir Chapitre 1) (J. W. Stewart, J. A. Charles, and R. Wallache, 2001). Ainsi, nous avons pris le soin de vérifier que les échantillons de cette catégorie ne comptaient pas de phosphore en quantité ($>0,1\%$ mass) avant de conclure.

Tableau 19 - Classement des traitements thermiques et mécaniques

Symbole	Structure	Traitement associé
CP	Perlite globulaire <i>Et/ Ou</i> Grains larges (>200µm) et équiaxes	Chauffe et maintien en température prolongé
E	Structures aux grains très écrouis	Déformation du métal par martelage ⁹²
T	Martensite ou bainite	Trempe
WID	Structure de Widmanstätten ou ferrite aciculaire	Surchauffe suivie d'un refroidissement assez rapide
Grad	Gradient de teneur en carbone qui s'étend sur toute la largeur de l'échantillon	Possible cémentation
A	-	Aucun traitement thermique ou mécanique particulier relevé ⁹³

Sur l'ensemble de notre corpus, seule la catégorie « WID » se recouvre largement avec les autres. C'est pourquoi nous la considérerons à part et ne l'avons pas incluse dans la figure 82. Pour rappel, elle comprend 26 échantillons, soit 13% du corpus. Comme l'illustre figure 82, la grande majorité des échantillons (environ 70%) n'a pas reçu de traitement particulier, en dehors de la succession de phases de martelage et recuit nécessaire à la déformation du métal (catégorie « A »).

⁹² Non suivi d'un recuit ayant permis une recristallisation des grains sous une forme équiaxe

⁹³ En dehors de la succession de phases de martelage et recuit

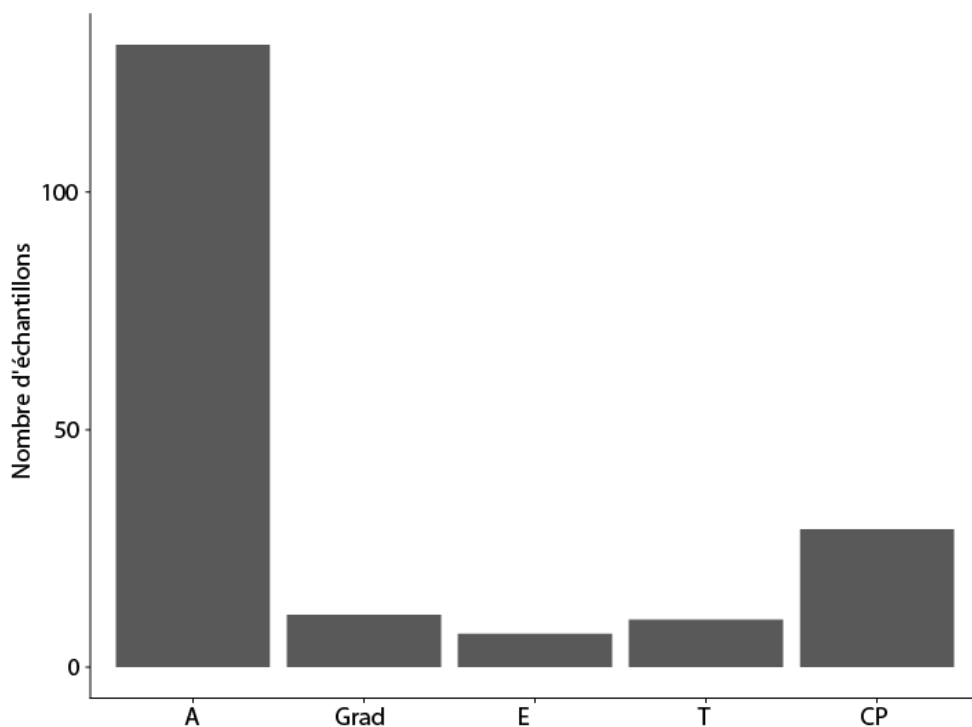


Figure 82- Traitements thermiques ou mécaniques appliqués sur les échantillons. Catégorie « A » échantillons qui n'ont pas reçu de traitement particulier, catégorie « T » échantillons trempés. « E » : Structures écrouies, « CP » Chauffe et maintien en température prolongée. « Grad » : possible cémentation

f) Dureté du métal

Des profils de microdureté ont été réalisés sur l'ensemble des échantillons. Un exemple de profil est donné figure 83. Une moyenne a ensuite été calculée (voir Chapitre 3)

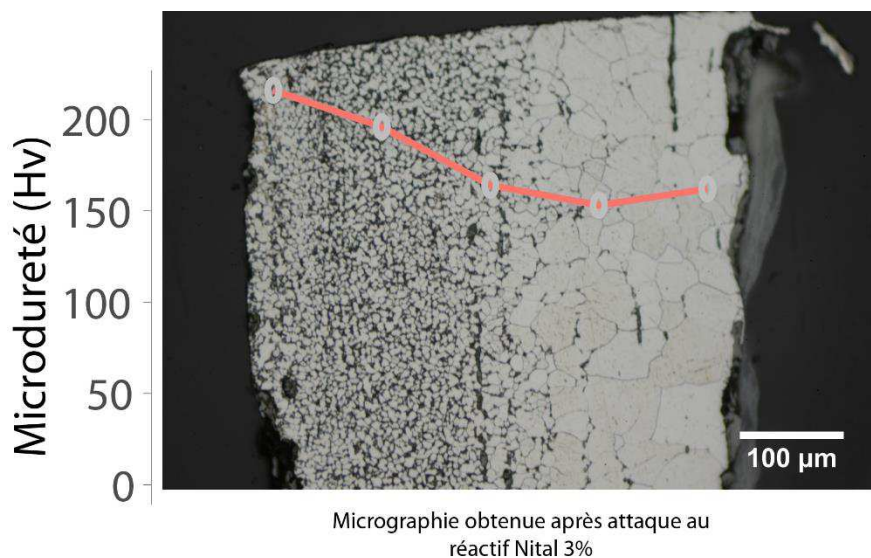


Figure 83 - Profil de microdureté observé sur une coupe transversale de l'échantillon G93_2_ou_3_ech2. Micrographie observée après attaque au réactif Nital 3%

La figure 84 présente l'histogramme des duretés moyennes mesurées sur l'ensemble des échantillons. La valeur moyenne est de 190Hv. De plus, plus de 85% des échantillons ont une dureté

comprise entre 150 et 200Hv. Ainsi, 10% d'entre eux seulement présentent une dureté supérieure à 250Hv tandis que moins de 10% ont une dureté inférieure à 150Hv.

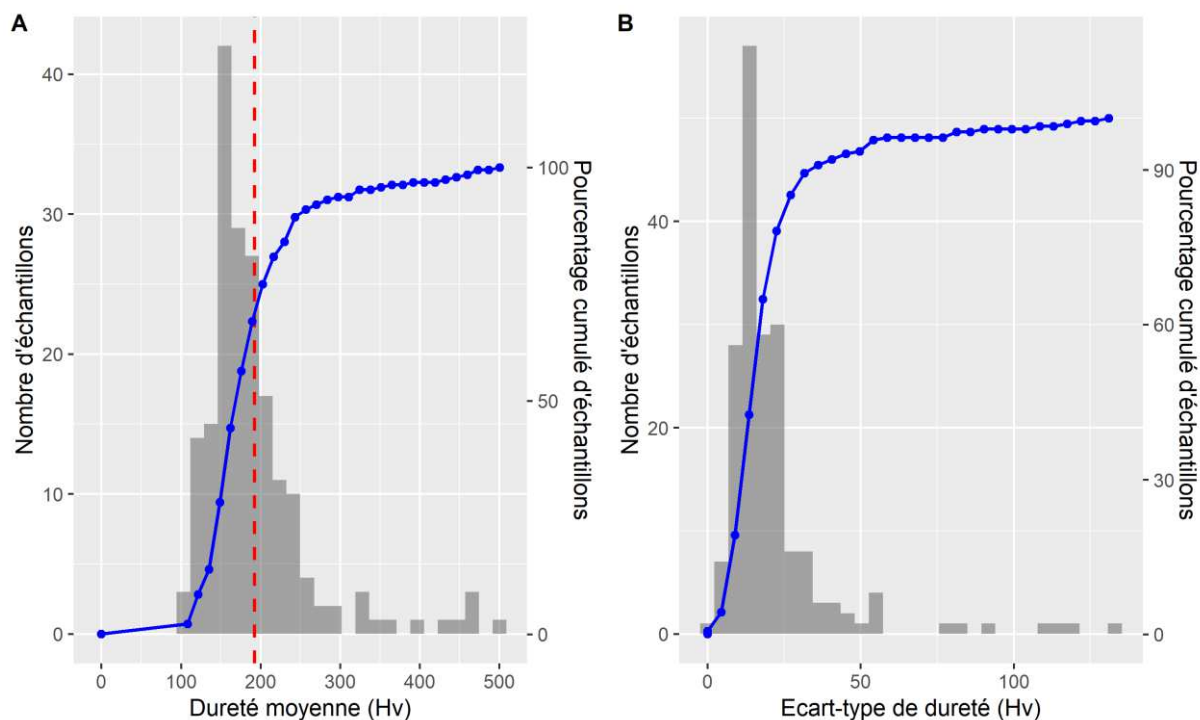


Figure 84- « A » : Distribution de la dureté moyenne sur l'ensemble des échantillons du corpus. En rouge pointillé valeur moyenne. « B » : Écart-type de dureté

L'écart-type associé aux valeurs moyennes de dureté est, pour au moins 10% des échantillons, supérieur à 40Hv. Il reflète la présence d'hétérogénéité en teneur en carbone comme un gradient de teneur en carbone, de structures en bandes, ou encore de structures de trempe hétérogène dans le métal (voir figure 85).

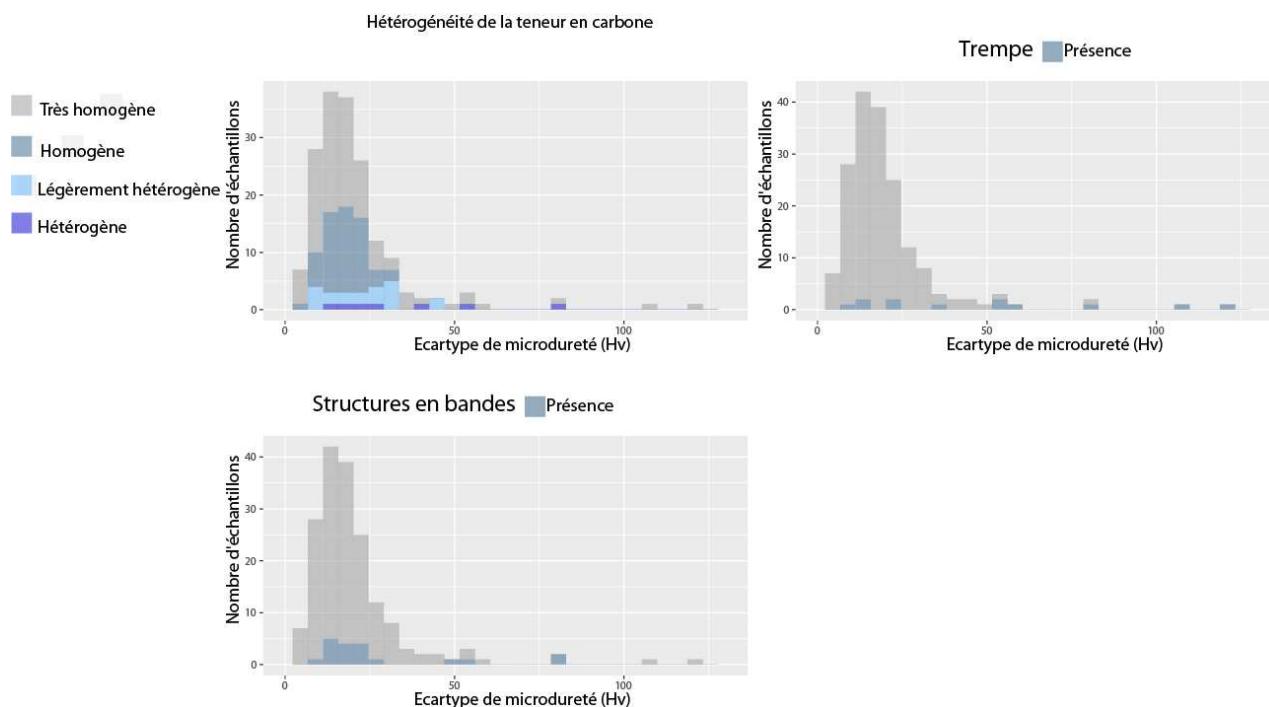


Figure 85 - Distribution de l'écart-type de dureté, détails

La figure 86 présente le taux moyen de carbone pondéré par la surface en fonction de la dureté moyenne. Dans le cas des échantillons trempés, ce taux moyen de carbone n'a pu être estimé, par conséquent ils ne figurent pas sur ce schéma. Les lignes en pointillées représentent l'intervalle des valeurs attendues défini par V. F. Buchwald pour des structures à l'équilibre en teneur homogène en carbone (V. F. Buchwald, 2005, p. 67)⁹⁴. Seulement un quart de nos échantillons figure dans ces intervalles. Pour les autres, la dureté est généralement supérieure aux valeurs théoriques attendues.

D'autres facteurs que la teneur en carbone peuvent influencer la dureté du métal comme la taille de grain, la présence d'éléments en solution solide comme le phosphore ou de précipités, les traitements thermiques comme la trempe, ou encore les traitements mécaniques consistant à écrouir le métal (déformation du métal par martelage).

⁹⁴ Pour plus de lisibilité les erreurs associées au calcul du taux moyen de carbone et l'écart-type des valeurs de dureté n'ont pas été représentées sur le graphique. Pour rappel l'intervalle défini pour les teneurs en carbone est de $\pm 0,1$ pour chacune des classes. Pour la dureté l'écart-type calculé sur un échantillon de composition homogène est de $\sigma \pm 10$ (voir Chapitre 3)

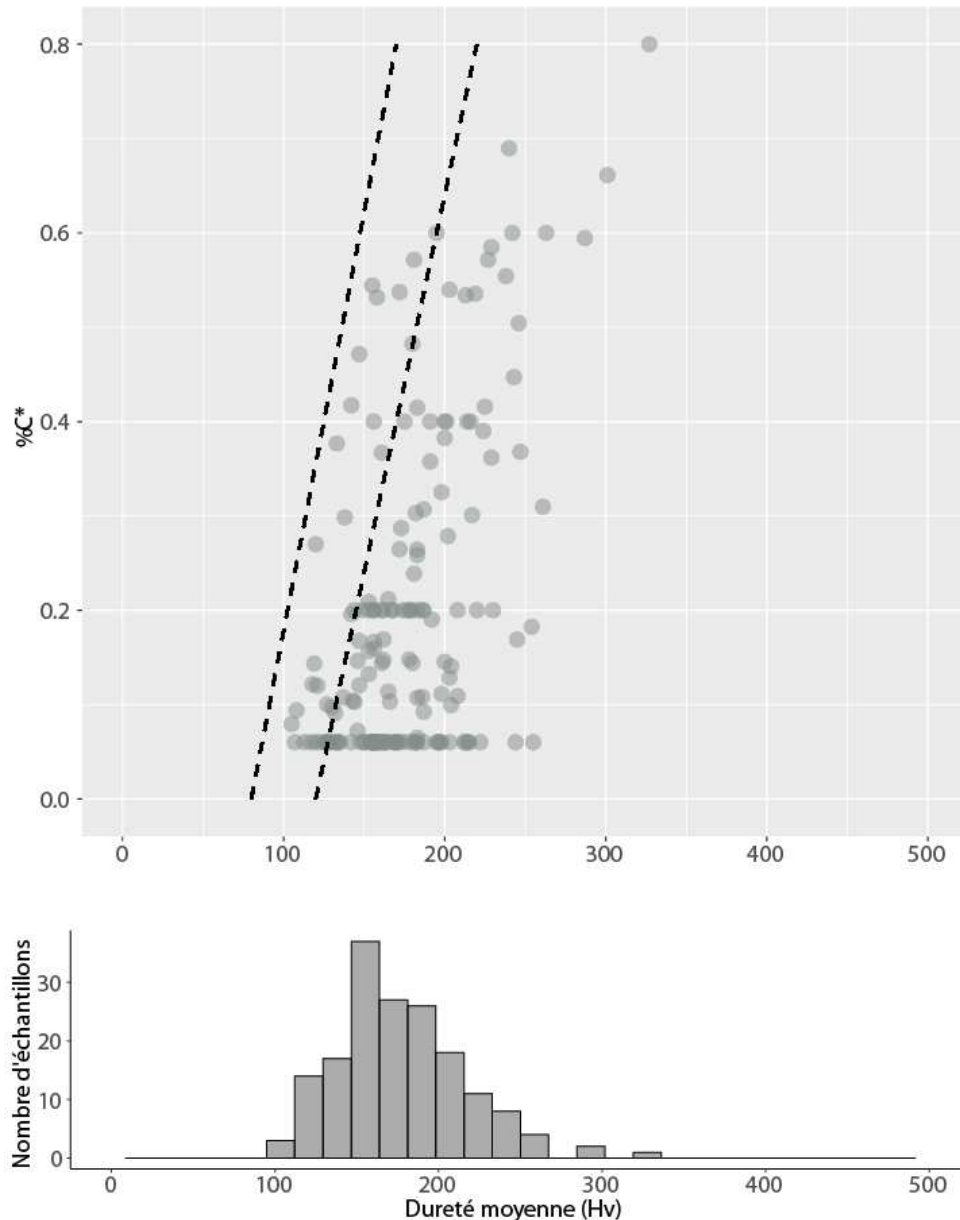


Figure 86 -Taux moyen de carbone pondéré par la surface en fonction de la dureté moyenne. Les traits en pointillés matérialisent l'intervalle des valeurs attendues défini par V. F. Buchwald pour des structures à l'équilibre (V. F. Buchwald, 2005, P.67).

La figure 87 présente le taux moyen de carbone pondéré par la surface, calculé en fonction de la dureté moyenne pour chaque traitement thermique ou mécanique relevé⁹⁵. Dans le cas des échantillons trempés, seule la distribution des valeurs de dureté est présentée, le taux moyen de carbone n'ayant pas pu être estimé.

Les échantillons classés dans la catégorie des fers phosphoreux (FP) possèdent une dureté comprise entre 120 et 250 Hv. Le durcissement du métal est clairement perceptible par rapport à l'intervalle des valeurs attendues. Il l'est également pour les échantillons présentant des structures

⁹⁵ La catégorie « Grad » ne sera pas traitée ici puisque pour ce traitement thermique la dureté est directement reliée à la teneur en carbone du matériau.

aux grains écrouis (catégorie « E »). Les échantillons trempés possèdent les duretés les plus élevées. Elles sont supérieures à 250 Hv et peuvent atteindre jusqu'à 474Hv. Les échantillons où des structures de Widmanstätten ont été relevées (catégorie « WID ») présentent des duretés proches ou comprises dans l'intervalle attendu. En revanche, la majeure partie des échantillons présentant des structures de recuit (« CP ») ont des duretés supérieures à cet intervalle. L'adoucissement du matériau attendu pour ce type de traitement thermique n'est donc pas perceptible ici. Enfin, plus de 75% des échantillons faiblement carburés ($\%C^* < 0,2$) et pour lesquels aucune spécificité n'a été relevée (catégorie A) présente également une dureté supérieure aux valeurs attendues. Pour ces échantillons, comme ceux de la catégorie « CP », d'autres facteurs de durcissement, non considérés jusqu'ici sont à prendre en compte afin d'expliquer ce résultat.

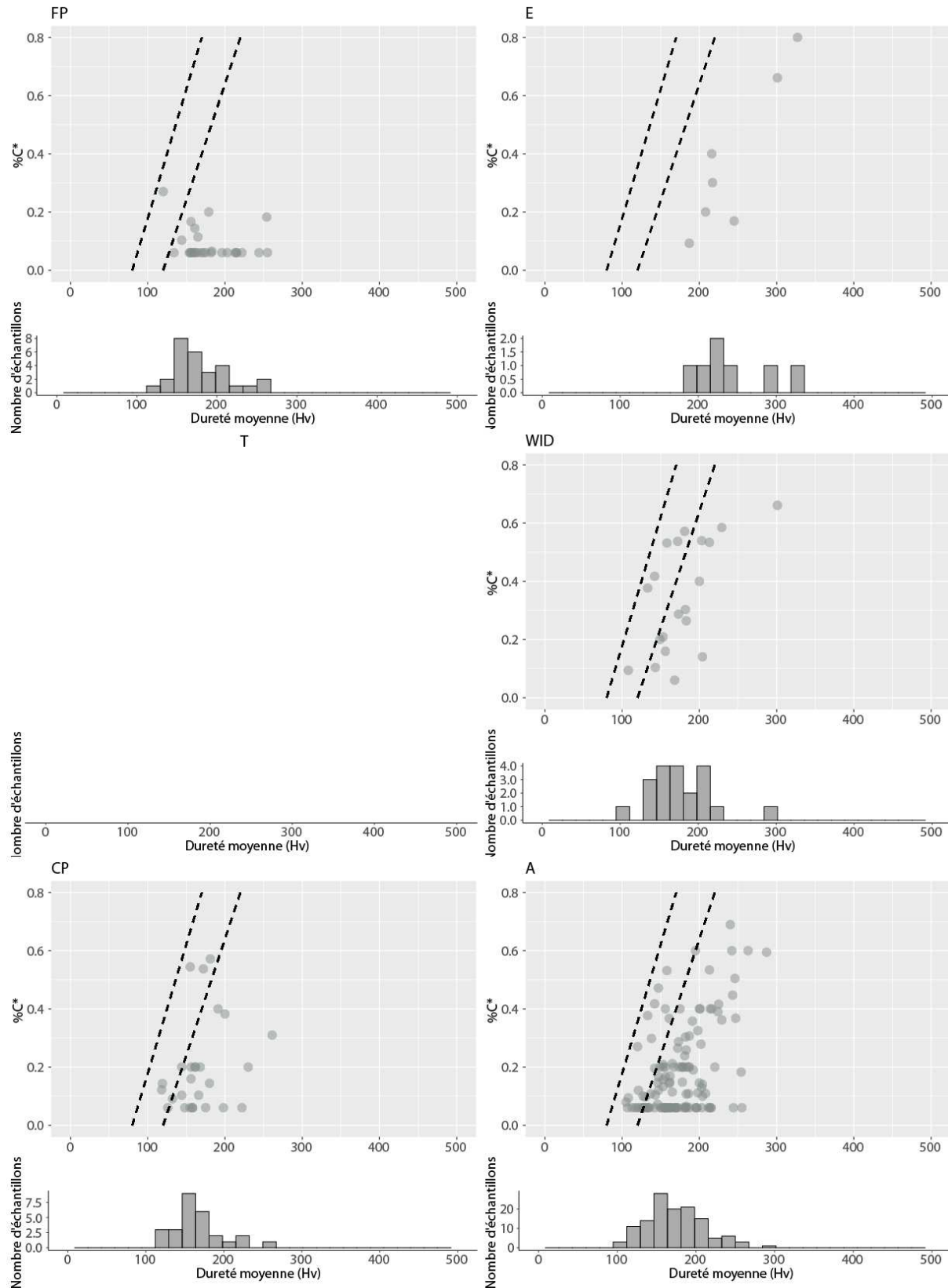


Figure 87 -Taux moyen de carbone pondéré par la surface en fonction de la dureté moyenne pour chaque catégorie de traitement thermique ou mécanique définie. Catégorie « T » échantillons trempés. Catégorie « FP » : fer phosphoreux « E » pour structures écrouies, « CP » pour Chauffage et maintien prolongé en température. Les traits en pointillés matérialisent l'intervalle des valeurs attendues défini par V. F. Buchwald pour des structures à l'équilibre (V. F. Buchwald, 2005, P.67).

La taille de grain est également un facteur susceptible d'influer sur la dureté du matériau. Une faible taille de grain favorise, en effet, l'augmentation de la dureté par le blocage des dislocations au sein du métal. L'influence de ce paramètre est présentée figure 88 pour les catégories « CP » et « A ». Certains échantillons présentent une taille de grain faible ($<50\mu\text{m}$) qui pourrait expliquer les valeurs de dureté plus élevées que les valeurs attendues. Cependant, ce n'est pas le cas pour tous les échantillons.

Bien que les intervalles donnés par la littérature soient sans doute trop restrictifs vis-à-vis de la nature hétérogène des échantillons, certains résultats demeurent très surprenants. Plus de 75% des aciers à bas taux de carbone ($\%C^* < 0,1\%$ mass) présentent, en effet, des duretés élevées, voire très élevées puisque, pour au moins 25% d'entre eux, elle est estimée à plus du double des valeurs attendues (voir figure 88 et figure 89). Aucun des facteurs présentés jusqu'ici ne permet d'expliquer ce phénomène. La taille de grain est, en effet, située entre 50 et $200\mu\text{m}$ et parfois même supérieure à $200\mu\text{m}$ (voir figure 89)

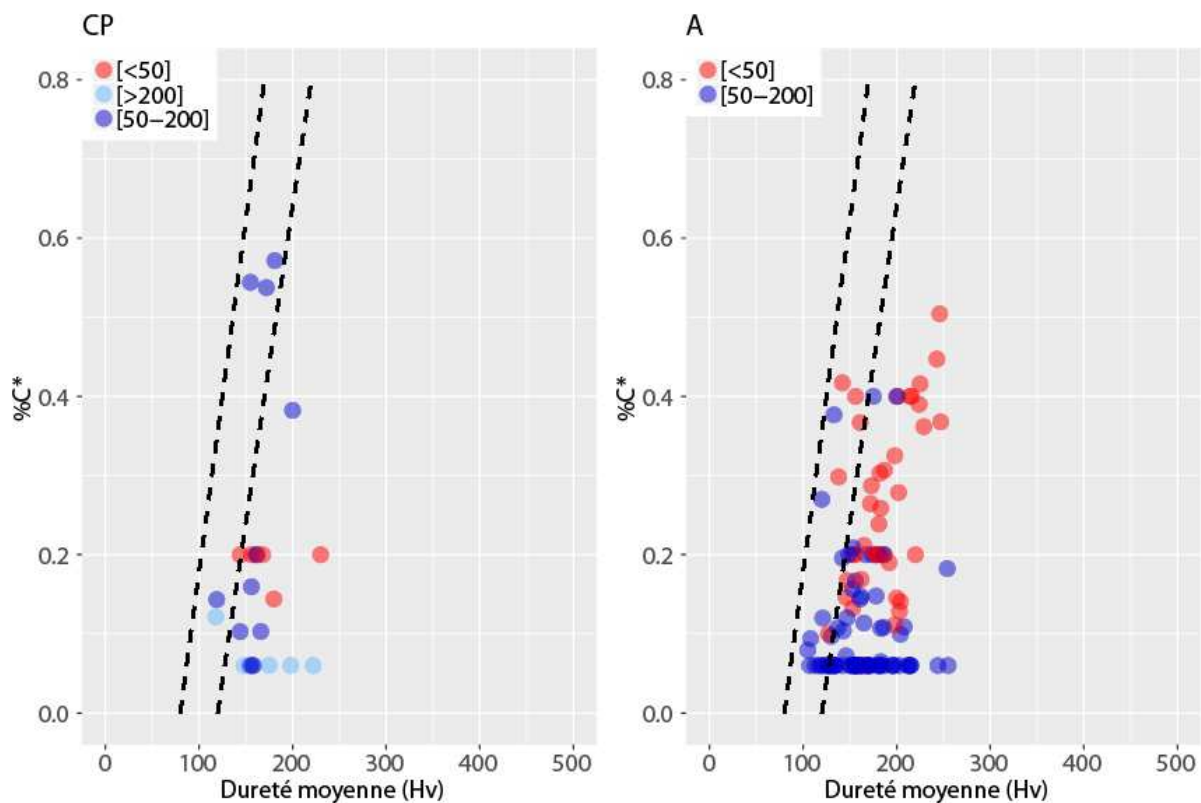


Figure 88 - Influence de la taille de grain sur la dureté du métal des échantillons des catégories CP et A

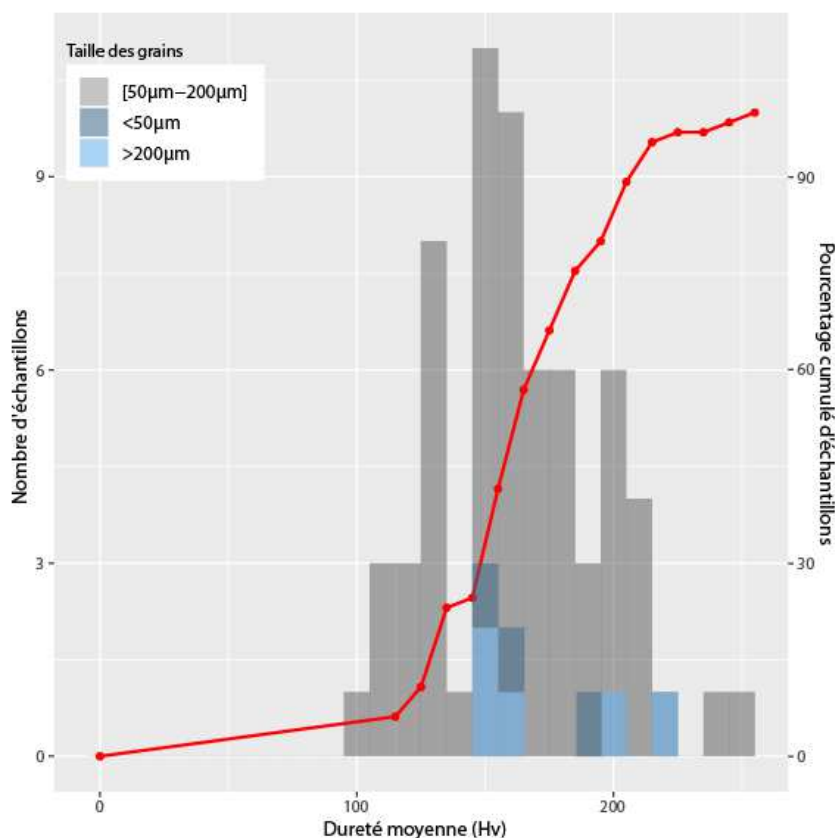


Figure 89 - Distribution de la dureté moyenne pour les échantillons à faible taux de carbone (%C* < 0,1% mass)

Or, la dureté est également susceptible d'augmenter avec la présence d'éléments en solution solide ou sous forme de précipités dans le métal. Ainsi, pour les échantillons à faible taux de carbone (%C* < 0,1% mass), à la dureté élevée (>140Hv), la présence des éléments As, Si, Mn, Co, Ni, Cr, Cu a été recherchée⁹⁶.

Les concentrations relevées restent dans l'ensemble faibles (<0,1% mass) malgré quelques rares exceptions (voir tableau 20). Quelques échantillons (6) présentent des teneurs en Si, Mn ou Ni supérieures à 0,1% mass (cellules du tableau grisées). De l'arsenic a été rencontré régulièrement dans les échantillons, en moyenne à hauteur de 0,1% mass (cellules du tableau grisées). L'influence de ces éléments sur la dureté moyenne des échantillons sera commentée en détail dans la discussion.

⁹⁶ L'absence de quantité significative de phosphore (%massP < 0,1) a été vérifiée pour ces échantillons.

Tableau 20 - Teneurs mesurées par EPMA dans les échantillons à basse teneur en carbone (%C* $\leq$ 0,1) et en phosphore (%massP $\leq$ 0,1). « NQ » : non quantifié.

Numéro	%massSi	%massMn	%massCo	%massNi	%massAs	%massCu	%massCr	Dureté (Hv)
K243	0,01	0,35	0,01	0,01	0,10	<0,01	<0,01	195
A 208	0,01	<0,01	<0,01	0,01	0,10	<0,01	<0,01	179
1120	0,01	<0,02	<0,01	0,02	0,09	0,01	<0,01	161
A228	<0,01	<0,02	<0,01	0,02	0,10	<0,01	<0,01	154
H1G 935	0,01	<0,02	<0,01	0,04	0,10	<0,01	<0,01	164
H	0,02	0,30	<0,01	0,02	0,10	<0,01	<0,01	212
A1654	<0,01	<0,02	<0,01	0,05	0,10	<0,01	<0,01	176
A65	0,02	<0,02	<0,01	0,02	0,09	<0,01	<0,01	180
A 297	0,01	<0,02	<0,01	0,02	0,09	<0,01	<0,01	203
895 423	0,01	<0,02	<0,01	0,06	0,43	0,13	<0,01	155
G70-2	0,02	<0,02	<0,01	0,08	0,09	<0,01	<0,01	158
G40-4	0,03	<0,02	<0,01	0,02	0,10	<0,01	<0,01	155
HPO2608_1	0,01	<0,02	<0,01	0,02	0,10	<0,01	<0,01	168
HPO2608_2	0,01	<0,02	<0,01	0,04	0,10	0,04	<0,01	182
20036	0,05	<0,02	<0,01	0,04	0,34	0,08	<0,01	170
StS_2	0,02	0,01	NQ	NQ	NQ	NQ	NQ	148
STS_7	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,09	0,01	<0,01	198
06100607 1	0,03	<0,02	<0,01	0,04	0,10	<0,01	<0,01	183
6100607 4	0,02	<0,02	<0,01	0,04	0,10	<0,01	<0,01	197
061006605 4	0,02	<0,02	<0,01	0,04	0,10	<0,01	<0,01	187
3_colletin	0,01	<0,02	<0,01	0,03	0,10	<0,01	<0,01	170
SN	0,01	<0,02	0,04	0,10	0,10	<0,01	<0,01	142
RX1408 I	0,20	<0,02	<0,01	<0,01	0,10	<0,01	<0,01	155
RX14 4	0,01	<0,02	<0,01	<0,01	0,10	0,03	<0,01	150
RX14 EN_2	0,01	<0,02	<0,01	<0,01	0,03	0,01	<0,01	158
N°3 Z8B4 LAM46520_2	0,01	<0,02	0,02	0,10	0,20	<0,01	<0,01	151
n°4 Z8B4- LAM46521	0,01	<0,02	0,05	0,10	0,10	<0,01	<0,01	157

Le phénomène de durcissement observé pourrait aussi être causé par la présence de précipités et notamment de carbures de taille nanométrique résultant d'un phénomène appelée vieillissement⁹⁷. Pour un échantillon (STS7, voir figure 90), la présence de ce type de particule a été recherchée à l'aide d'un Microscope Electronique à Transmission sur une lame mince. Des analyses EDS et des images haute résolution ont également été réalisées.

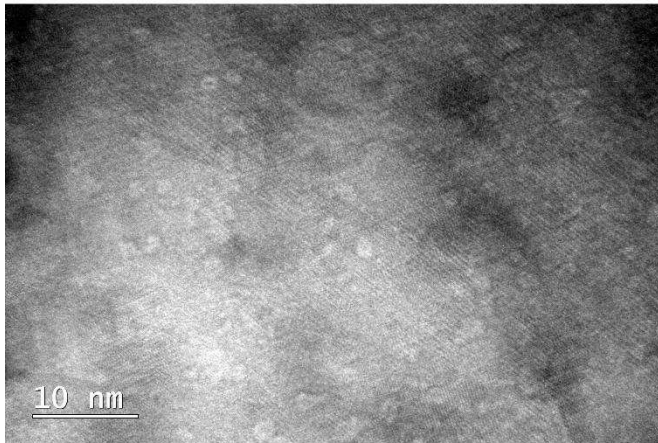
⁹⁷ Ce phénomène a été décrit dans le Chapitre 1



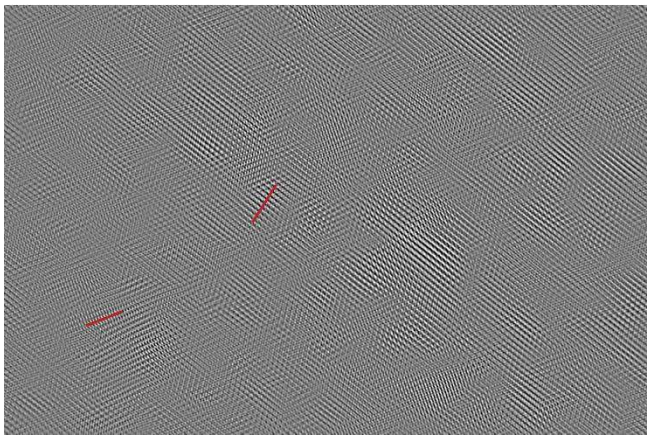
Figure 90 -Microstructure de l'échantillon STS_7

Un exemple d'image haute résolution obtenue sur la lame mince est donné figure 91. Après filtrage on distingue nettement différentes orientations de plans cristallins. Ceci pourrait être lié à la présence de précipités à l'intérieur de la matrice métallique tels que des carbures. Malheureusement, la présence de ces derniers n'a pas pu être attestée par imagerie, ou par EDS. De plus, ces variations d'orientations pourraient aussi être causées par une hétérogénéité d'épaisseur de la lame. Par conséquent, il n'est pas possible à ce stade d'attribuer la cause de la dureté élevée observée à la présence de carbures ou à d'autres précipités dans le métal.

A



B



— Exemples
d'orientations de
plan cristallins

Figure 91 - « A » image haute résolution obtenue à l'aide d'un Microscope Electronique à Transmission, « B » image filtrée

2) Caractéristiques métallurgiques : évolution historique

La partie précédente nous a permis de présenter les principaux résultats ainsi que la démarche mise en place pour caractériser la nature du métal. Nous allons à présent replacer ces considérations métallurgiques dans leur contexte historique. Pour cela, les résultats vont être présentés par grande typologie et par siècle.

a) Armures de plaques

Comme explicité dans le Chapitre 1, les armures de plaques étaient constituées de plaques de métal de taille variable, sommairement mises en forme et attachées les unes aux autres afin de protéger certaines parties du corps du combattant. Trois lots différents de plaques ont été étudiés dans ce travail. Les deux premiers concernent des plaques de broigne issues des sites de Montbaron (XIIIe siècle) et Laquenexy (XIIIe-XVe siècles). Le dernier comporte des plaques de brigandine issues du site de Maillezais (XIVe siècle). Les principaux résultats ont été rassemblés dans le tableau 21 et sont également illustrés par quelques figures. Pour ce lot d'échantillons, les micrographies sont disponibles en annexe.

Comme l'illustre la figure 92, la majeure partie des échantillons est très faiblement carburée (%C* <0,1%mass). De plus, le taux moyen de carbone ne dépasse pas 0,3%mass excepté pour un élément de Montbaron à 0,27%mass. Les échantillons de Maillezais et Laquenexy présentent des structures relativement homogènes et majoritairement de nature ferritique. Ceux de Montbaron sont eux plus hétérogènes.

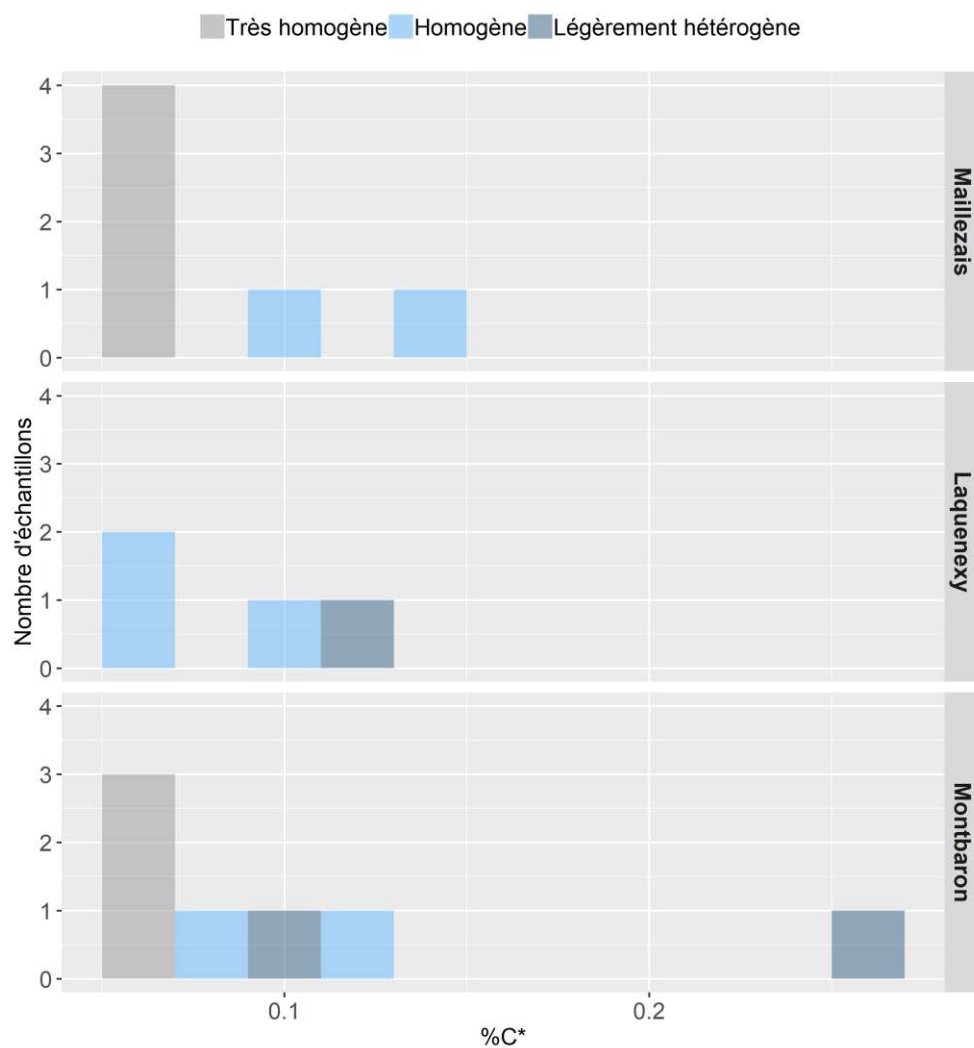


Figure 92 - Distribution de la teneur moyenne en carbone des échantillons pondérée par la surface pour les sites de Maillezais, Laquenexy et Montbaron

La présence de phosphore dans le métal a été mise en évidence pour 6 échantillons : un sur les six du site de Maillezais, 3 sur les 4 échantillons de Laquenexy et 2 sur les 7 de Montbaron.

Tableau 21 - Principaux résultats pour les échantillons de plaques d'armures

Numéro d'échantillon	Site	%C*	Phosphore (%massP≥0,1)	Traitements thermiques thermochimiques et mécaniques					Structures en bandes	Taille de grain (μm)
				CP	T	Grad	E	WID		
RX1408 S	Maillezais	0,06	PRÉSENCE							[50-200]
RX1408 I	Maillezais	0,06	ABSENCE	X						[50-200]
RX14 4	Maillezais	0,06	ABSENCE							[50-200]
RX 612	Maillezais	0,14	ABSENCE	X						[<50]
RX14 EN_1	Maillezais	0,10	ABSENCE	X						[50-200]
RX14 EN_2	Maillezais	0,06	ABSENCE	X						[50-200]
348 214 425	Laquenexy	0,06	PRÉSENCE	X						[>200]
34818 411 1	Laquenexy	0,06	PRÉSENCE							[50-200]
34825 Objet 6 2	Laquenexy	0,10	ABSENCE							[50-200]
34820 434 1	Laquenexy	0,11	PRÉSENCE						X	[50-200]
n°1 Z8B3-LAM46518	Montbaron	0,12	ABSENCE							[50-200]
n°2 Z8 fossé-LAM46519_1	Montbaron	0,27	PRÉSENCE							[50-200]
n°2 Z8 fossé-LAM46519_2	Montbaron	0,09	ABSENCE							[50-200]
N°3 Z8B4 LAM46520_2	Montbaron	0,06	ABSENCE							[50-200]
n°4 Z8B4-LAM46521	Montbaron	0,06	ABSENCE							[50-200]
n°5 Z8 fossé-LAM46523	Montbaron	0,06	PRÉSENCE							[50-200]
n°9 Z8B-LAM46525	Montbaron	0,07	ABSENCE							[50-200]

Une structure en bande a été mise en évidence sur l'une des plaques d'armure. Il s'agit d'un échantillon issu d'une plaque de Laquenexy (échantillon 34820 434 1). Il associe une bande d'acier hétérogène à un fer phosphoreux (voir figure 93).

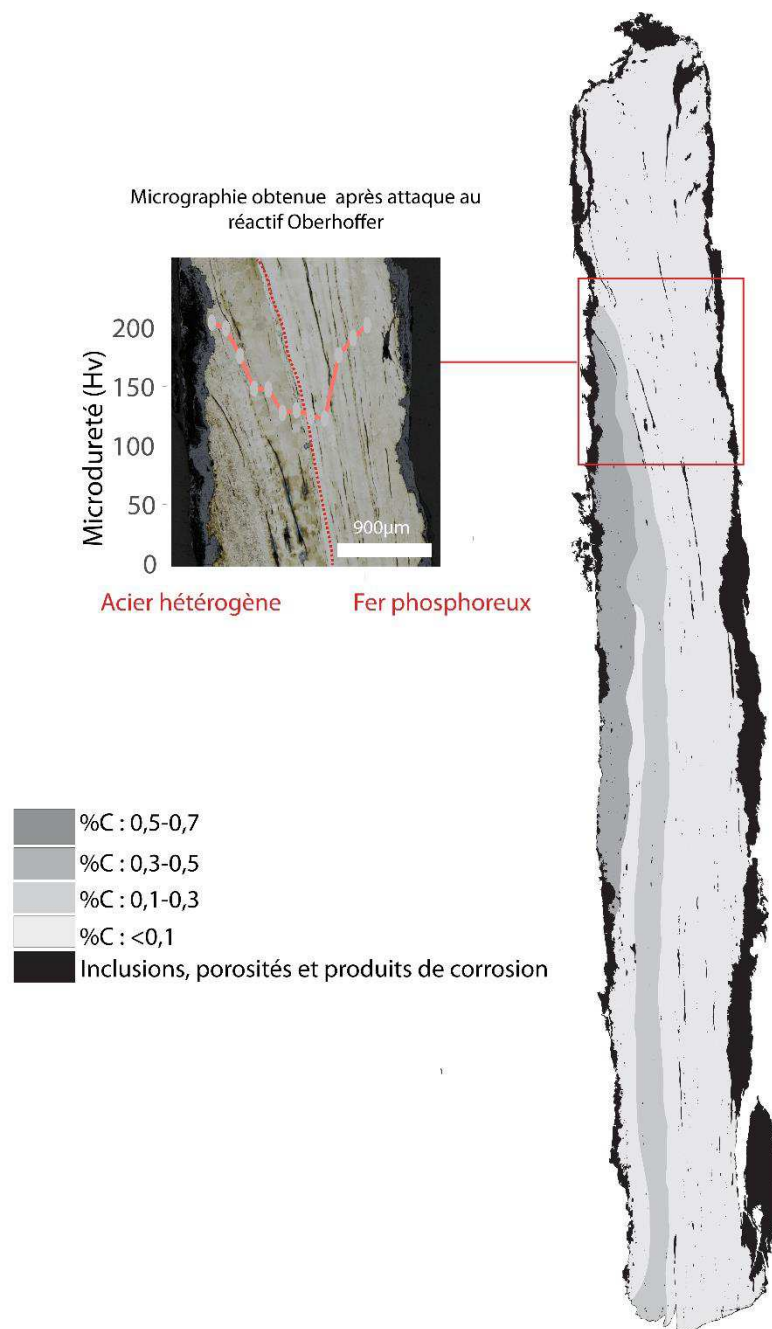


Figure 93- Structure en bande associant une bande de ferritique à une bande d'acier moyennement carburé (Echantillon Laq_34820_434).

Dans l'ensemble, les échantillons ne présentent pas de traitement thermique particulier. Toutefois, l'un d'eux montre de larges grains de ferrite, preuve qu'un maintien prolongé en température a été opéré (voir tableau 21).

Les taux d'inclusions et de porosités sont plutôt élevés par rapport aux autres échantillons du corpus, particulièrement dans le cas des échantillons issus des sites de Laquenexy et de Montbaron, où la propreté inclusionnaire dépasse largement les 2% (voir figure 95). En moyenne ces échantillons présentent également des inclusions de largeur plus importante (>50µm, voir figure 94). Ceci

traduirait une épuration du métal moins poussée pour la fabrication de ces plaques d'armures. Les échantillons de Maillezais présentent des taux plus faibles (<2%).

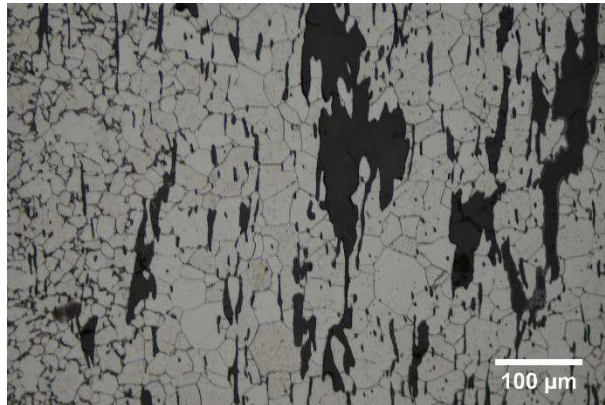


Figure 94 - Micrographie observée après attaque au réactif Nital 3%. Echantillon n°1 Z8B3-LAM46518

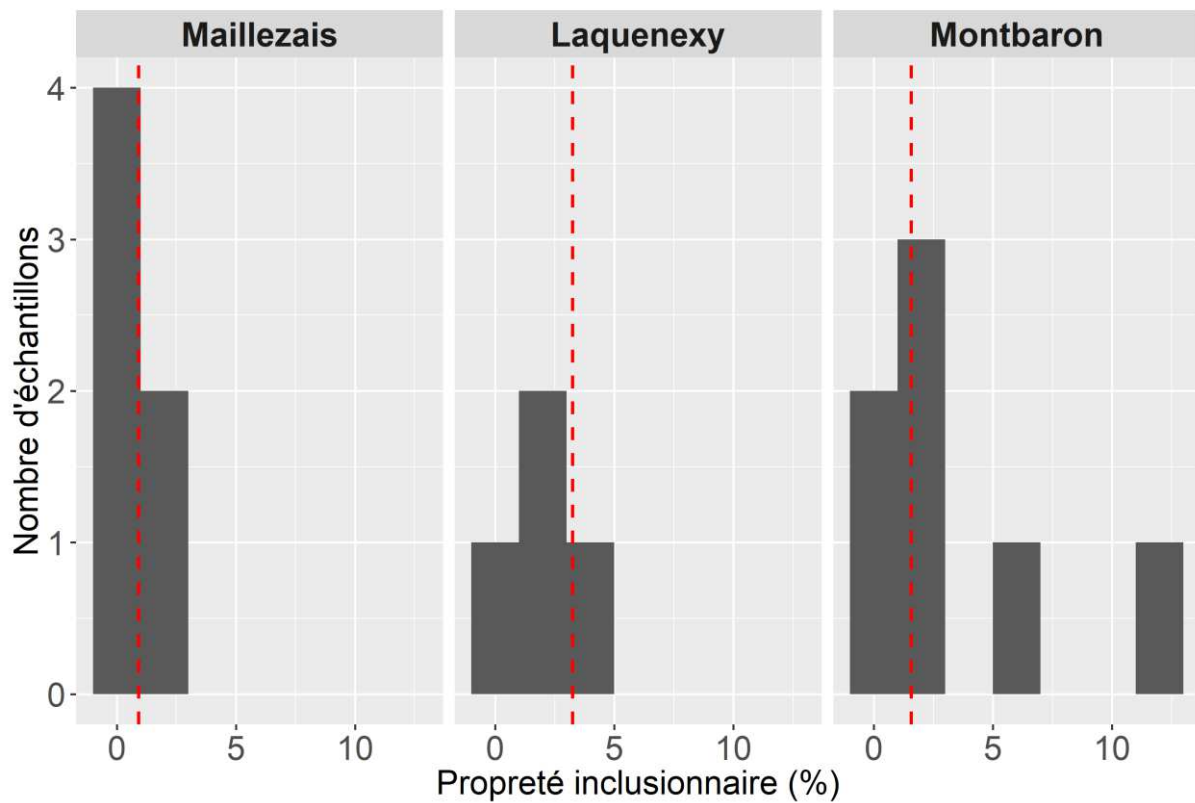


Figure 95 - Distribution de la propreté inclusionnaire (%) pour les échantillons de Maillezais, Laquenexy et Montbaron. En rouge valeur moyenne

Enfin, la distribution de la dureté du métal est présentée figure 96. Elle est comprise entre 130 et 180Hv, valeurs plus faibles que celle de la moyenne des échantillons du corpus général qui est de 190Hv.

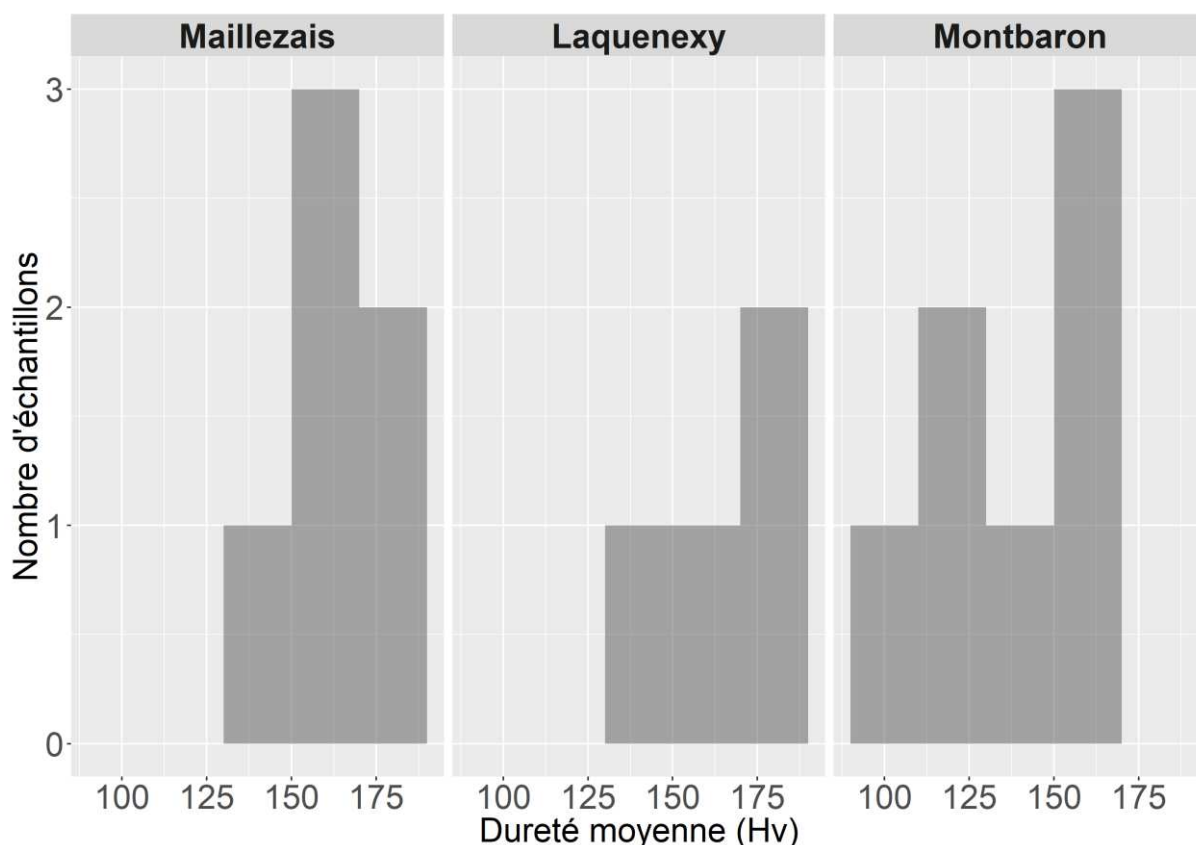


Figure 96 - Distribution de la dureté moyenne sur les échantillons des sites de Maillezais, Laquenexy et Montbaron.

Pour conclure, les échantillons de plaques d'armures sont essentiellement constitués d'alliages faiblement carburés (%C* <0,2%mass) et de dureté plus faible que la moyenne des échantillons du corpus général. La présence de phosphore dans le métal est attestée pour un tiers des échantillons et sur 3 des 4 échantillons issus du site de Laquenexy. Par rapport à l'ensemble du corpus étudié les inclusions sont en moyenne de taille plus importante (>50µm) et la propreté inclusionnaire est dans certain cas bien plus élevée (supérieur à 2% voire même à 10%). Ceci traduit une attention moindre portée à l'épuration du métal pour des défenses mises en forme plus simplement que les éléments d'armures articulées, dont l'usage se répand dans le courant du XIV^e siècle et se généralise au cours des siècles suivants.

b) Éléments d'armures articulées

Ce groupe compte 129 échantillons, soit plus de la moitié des échantillons étudiés⁹⁸. Par conséquent, un grand nombre des conclusions faites sur la totalité du corpus se retrouve ici. Pour éviter les répétitions, nous avons choisi de présenter uniquement l'influence des facteurs principaux qui définissent le comportement mécanique du métal à savoir : le taux de carbone, la présence de

⁹⁸ Les résultats relatifs aux éléments d'armures de Sainte Suzanne, de François de Montmorency et de Valenciennes sont traités dans les paragraphes suivants.

phosphore, ainsi que les traitements thermiques et mécaniques qui ont pu être réalisés volontairement afin de modifier les propriétés du métal.

La figure 97 présente la distribution du taux moyen de teneur en carbone pondéré par la surface en fonction de la dureté moyenne associée. Les échantillons sont pour plus de la moitié faiblement carburés ($\%C^* < 0,2\%$ mass). Trois maximums sont visibles sur l'histogramme. Ils matérialisent la présence des échantillons homogènes, qui appartiennent à une seule classe de teneur en carbone⁹⁹ (voir Chapitre 3). Du point de vue de la dureté, deux groupes se dégagent. Le premier compte les échantillons de fortes duretés (>300 Hv). Ce sont les échantillons trempés. Le second regroupe des échantillons de dureté intermédiaire comprise entre 130 et 230 Hv et ce quels que soient la nature du métal (fer, acier, fer phosphoreux) ou le traitement thermique ou mécanique appliqué.

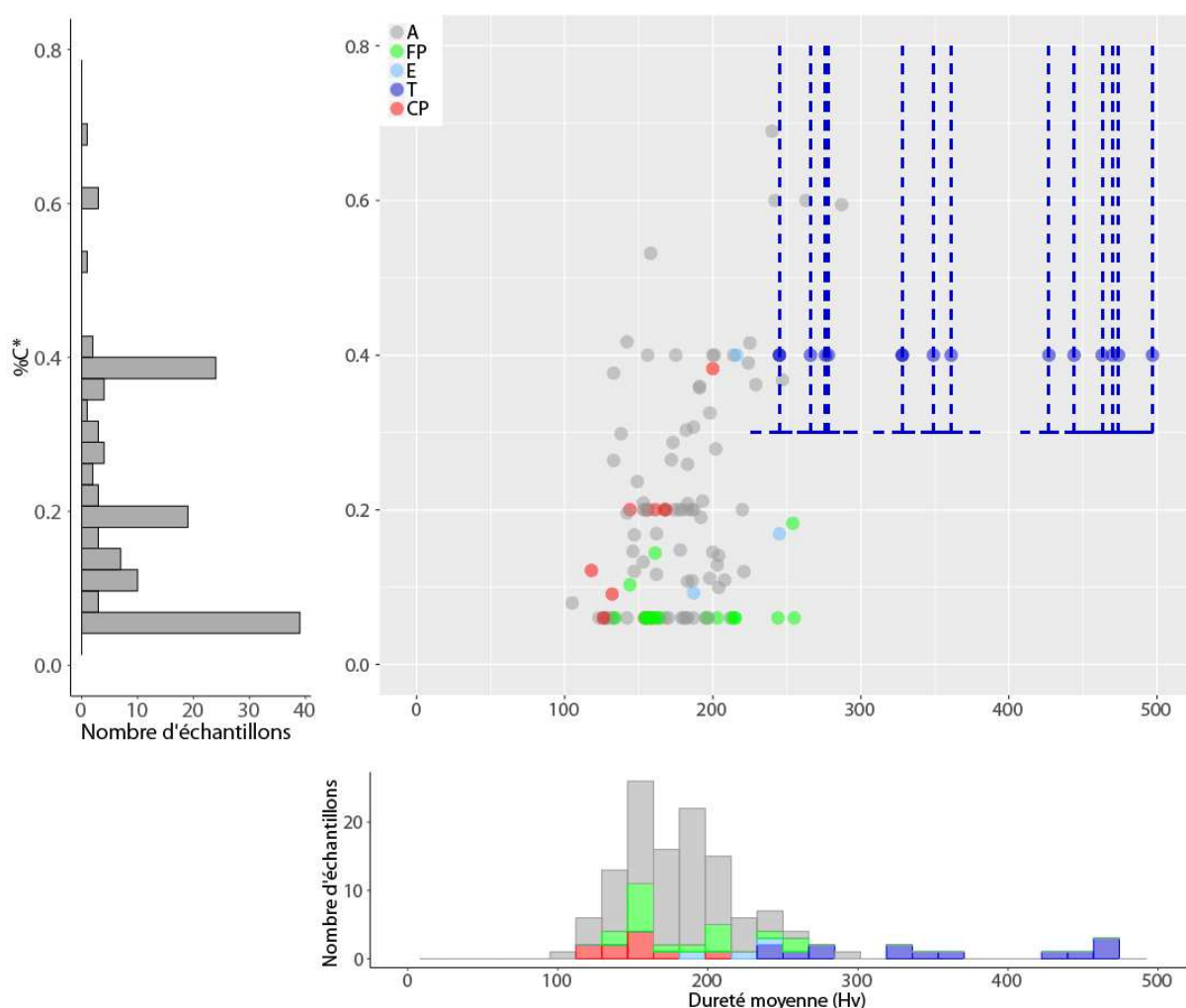


Figure 97 - Taux moyen de carbone pondéré par la surface en fonction de la microdureté. « T » échantillons trempés, « E » : structures écrouies, « FP » fer phosphoreux ($\%massP > 0,1$ dans le métal). « CP » : Chauffe et maintien en température prolongé. « A » aucune spécificité relevée. Les traits en pointillés matérialisent l'étendue des valeurs de teneur en carbone possible pour les échantillons trempés.

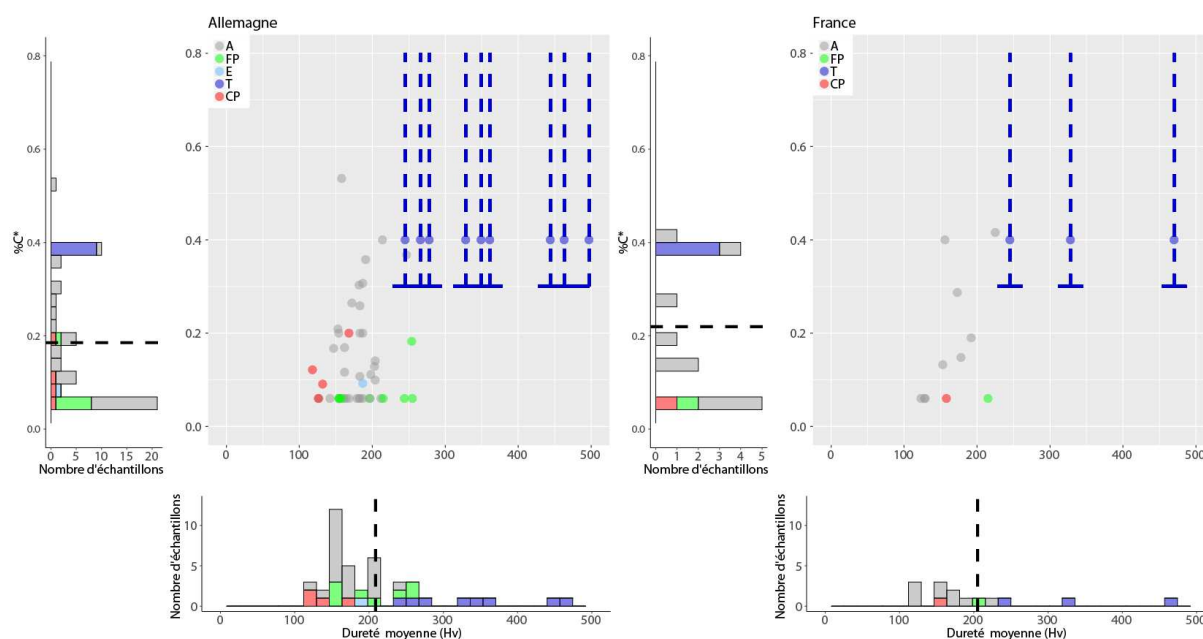
⁹⁹ Pour rappel les classes établies sont les suivantes : $<0,1$; $0,1-0,3$; $0,3-0,5$; $0,5-0,7$; $0,7-0,9$ (voir Chapitre 3)

La nature du métal employé pourrait être reliée à deux principaux facteurs : le lieu de fabrication et l'usage de la pièce, c'est pourquoi nous allons vérifier si des spécificités se dégagent en fonction du lieu supposé de fabrication des pièces, puis en fonction du type de défense.

i. Lieu de fabrication supposé des pièces

La figure 98 présente la distribution de la teneur moyenne en carbone au sein des échantillons étudiés, en fonction de la dureté moyenne pour chaque lieu supposé de fabrication. Le groupe « Allemagne » rassemble des pièces supposées avoir été fabriquées dans des lieux précis comme Nuremberg pour la majorité des échantillons (60% des échantillons allemands), ou désignées comme de typologie « allemande ». Le groupe « Italie » comprend des pièces supposées avoir été fabriquées en Italie du Nord, à Milan ou peut être dans d'autres villes comme Brescia. Le groupe « France » rassemble les pièces dites de typologie « française », de même pour le groupe « Espagne ».

Les pièces les plus carburées appartiennent aux groupes de l'Allemagne et de l'Italie. De plus sur l'ensemble du corpus allemand, une grande partie des échantillons est très faiblement carburée ($\%C^* < 0,1\%$ mass). Des opérations de trempe ont été relevées pour toutes les origines. Enfin la dureté est centrée autour de 200Hv pour l'Allemagne, l'Italie et la France. De plus, des occurrences de fers phosphoreux ont été relevées uniquement dans le cas des échantillons allemands et français. Mis à part cette spécificité, aucune caractéristique propre à un centre de production ne semble se dégager.



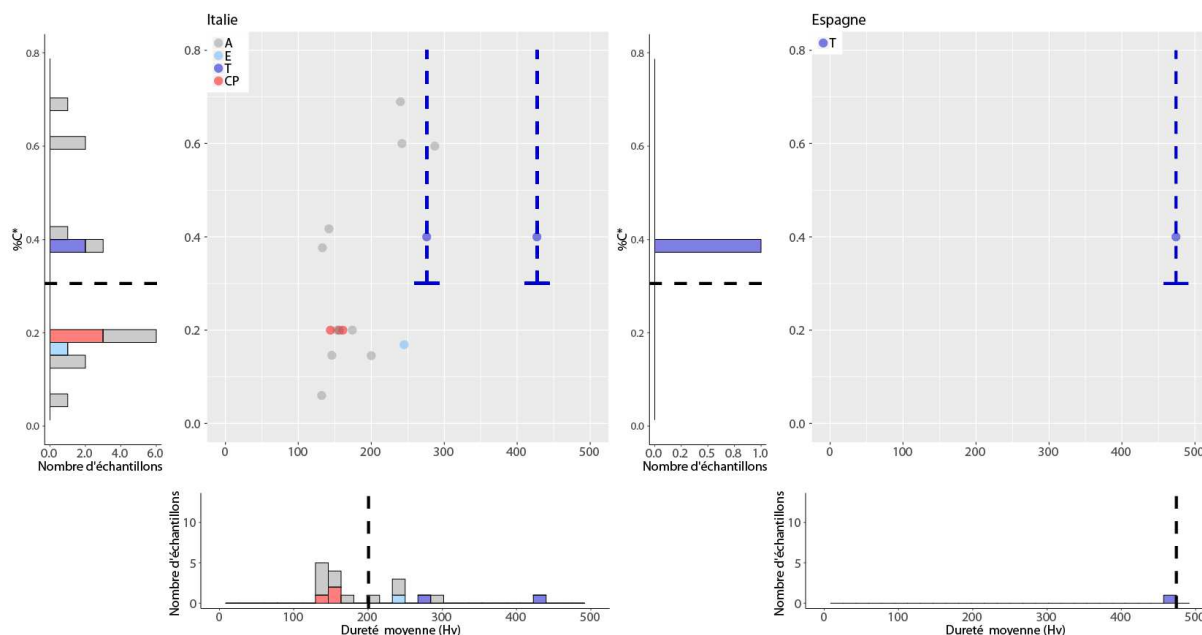


Figure 98 - Distribution de la teneur en carbone des échantillons issus des pièces d'armures articulées en fonction de la provenance supposée des objets ; « T » échantillons trempés. « E » : Structures écrouies, Catégorie « FP » fer phosphoreux (%massP>0,1 dans le métal), « CP » : Chauffe et maintien prolongé en température. « A » aucune spécificité relevée. En noir pointillé : valeur moyenne de dureté. En bleu pointillé : étendue possible de la teneur en carbone pour les échantillons trempés

Les structures en bande représentent également une catégorie de métal particulière. Cependant, elles ne constituent pas une spécificité propre à un centre de fabrication puisqu'elles ont été observées dans tous les lieux considérés, excepté pour l'Espagne où la part de ce type de structure est difficile à évaluer puisque le corpus ne compte qu'un échantillon (voir figure 99 et figure 100).

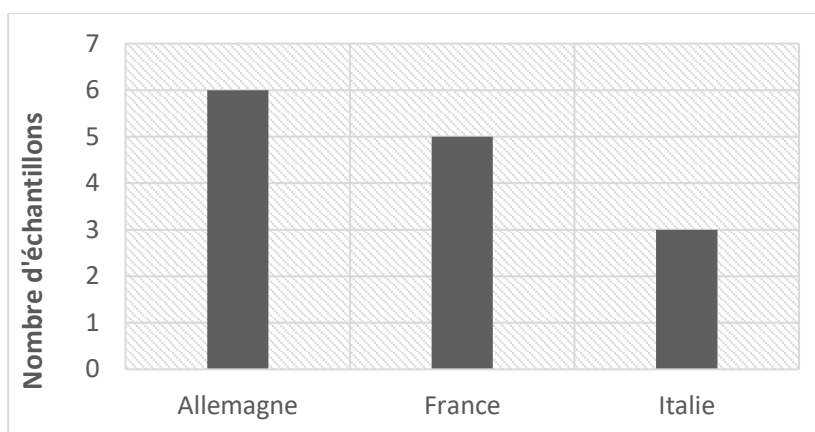


Figure 99 - Histogramme des structures en bandes observées en fonction du lieu de fabrication supposé des pièces

Les échantillons allemands sont les plus nombreux des quatre groupes précédemment évoqués. Nous avons souhaité vérifier si, pour ces pièces supposées de fabrication allemande, un lien pouvait exister entre la nature du métal et la période de fabrication. Les résultats sont présentés figure 100. Les échantillons trempés de dureté élevée sont exclusivement présents au XVI^e siècle. Toutes les spécificités précédemment dégagées sont recensées à cette période (CP, FP, E, T).

Cependant, c'est le siècle le mieux représenté statistiquement, il est donc possible que cette diversité soit aussi présente au siècle précédent et suivant, ce que nos résultats ne permettent pas de montrer.

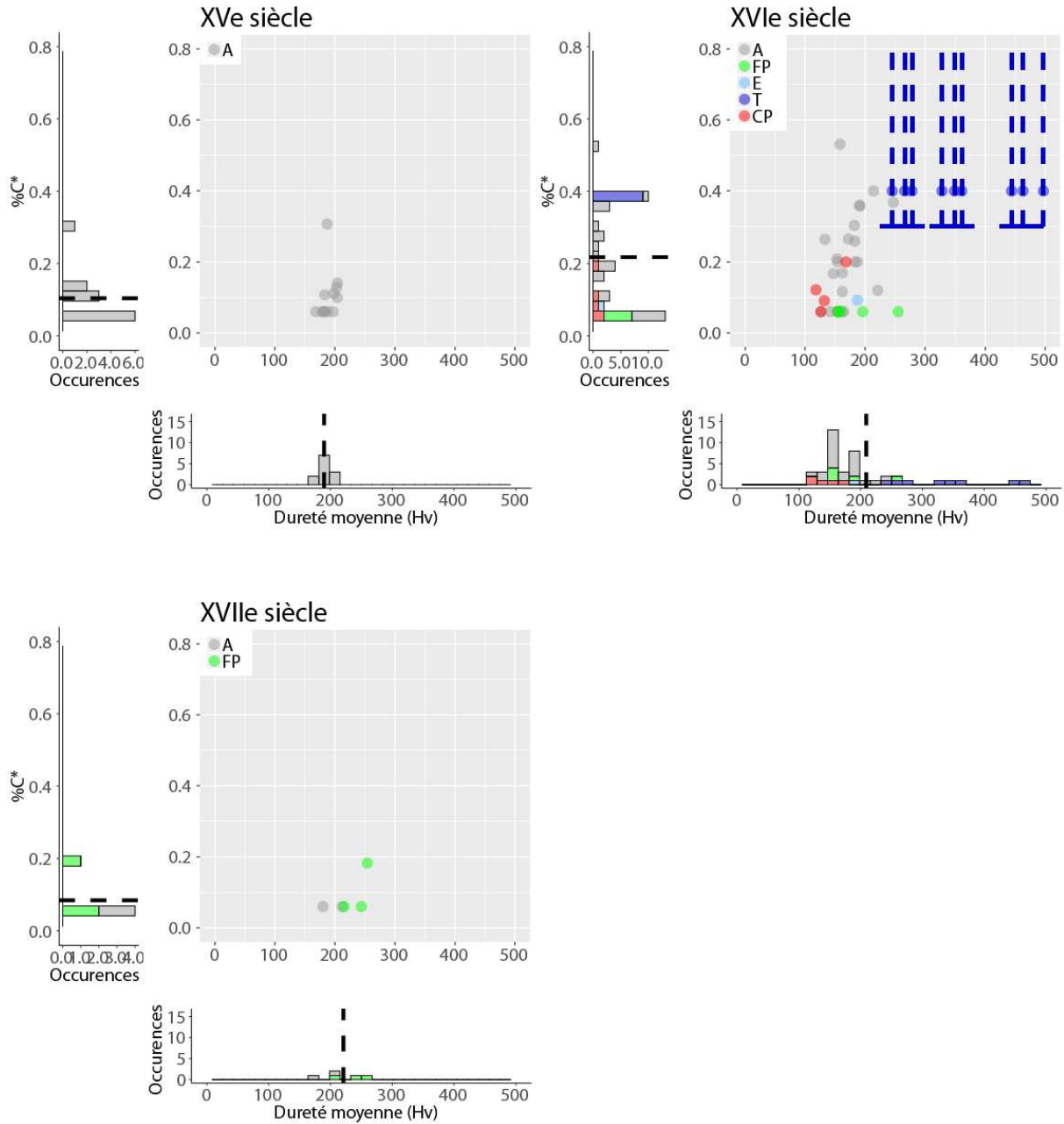
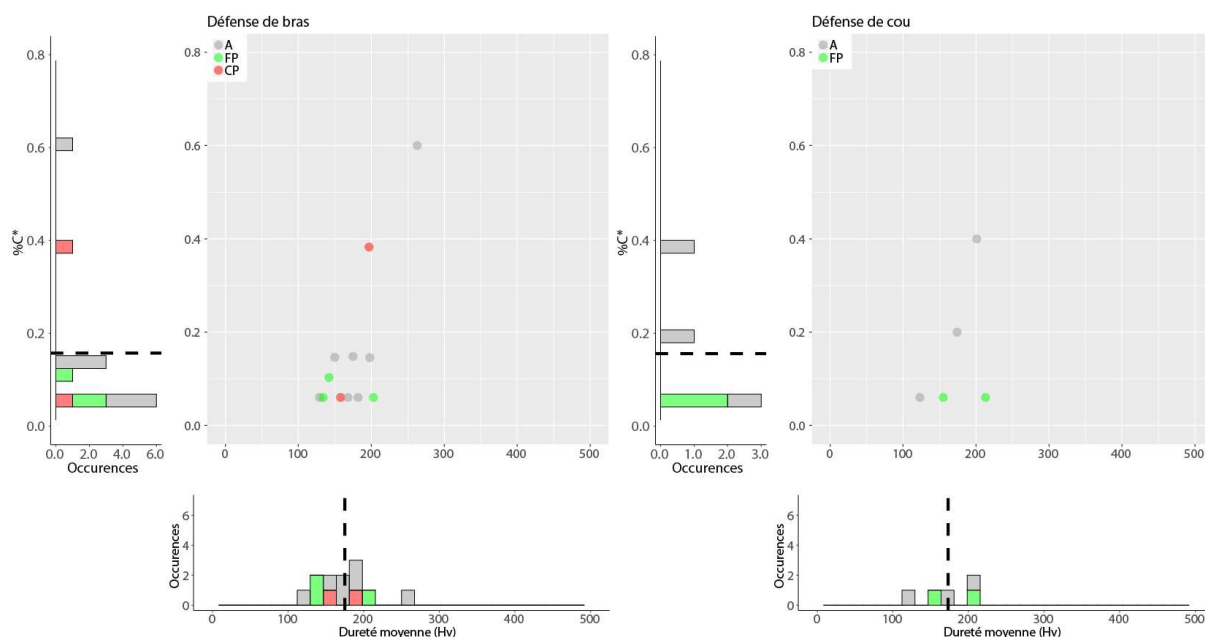
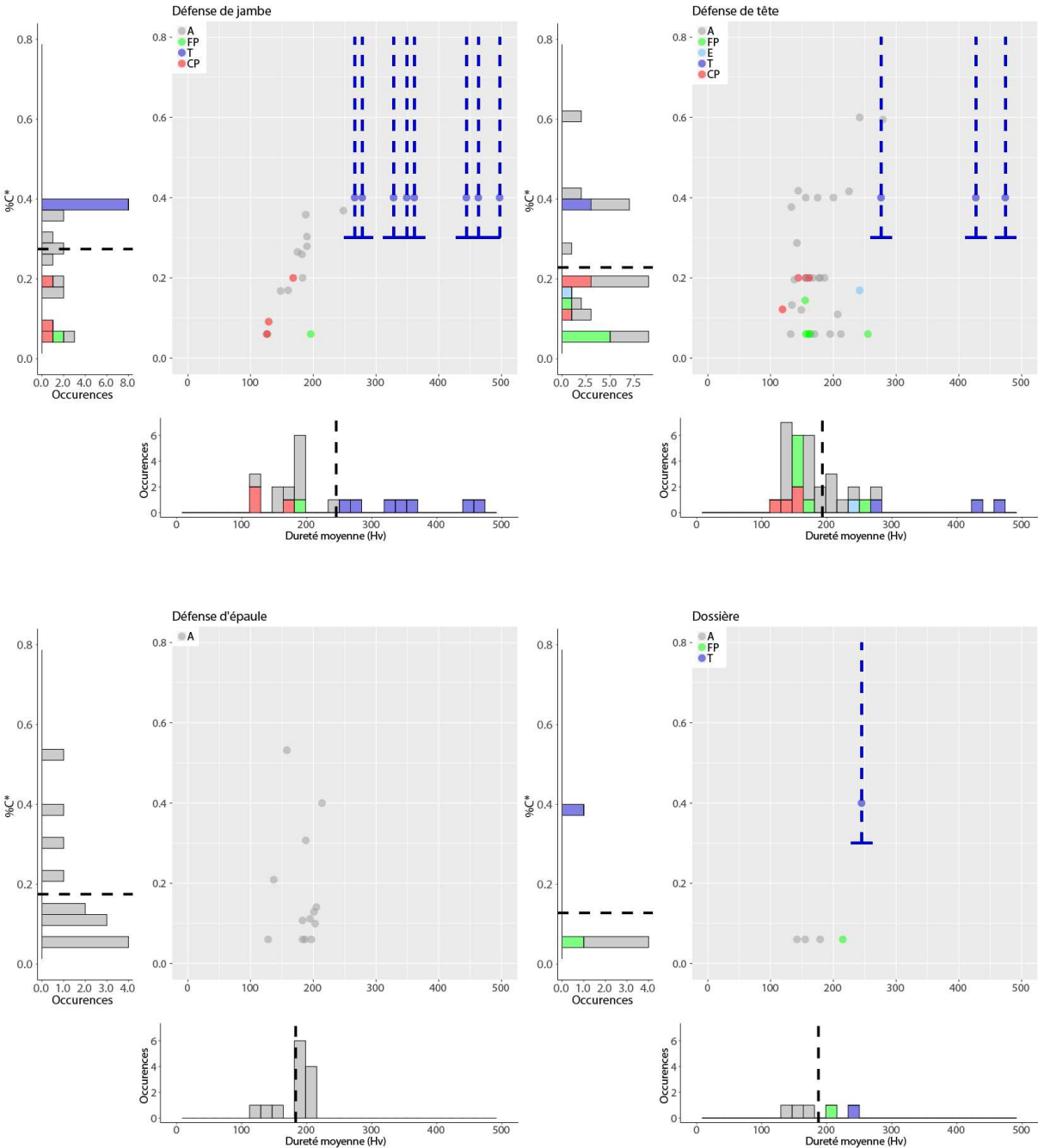


Figure 100 - Distribution de la teneur en carbone des échantillons issus des pièces d'armures articulées supposées de fabrication allemande en fonction de la dureté moyenne « T » échantillons trempés. « E » : Structures écrouies, Catégorie « FP » fer phosphoreux (%massP>0,1 dans le métal), « CP » : Chauffe et maintien prolongé en température. « A » aucune spécificité relevée. En noir pointillé : valeur moyenne de dureté. En bleu pointillé étendue possible de la teneur en carbone pour les échantillons trempés

ii. Type de défense

La figure 101 présente la répartition de la teneur moyenne en carbone des échantillons par type de défense en fonction de la dureté moyenne associée. Les protections les plus carburées sont les gantelets, les défenses des jambes et les défenses de tête. Toutefois, dans ce dernier groupe, une majorité des échantillons est peu ou faiblement carburée ($\%C^* < 0,2\%$ mass). Des occurrences de métal trempé sont visibles majoritairement dans le cas des défenses de tête, des défenses de jambe et dans celui des gantelets. Cependant, ce type de traitement thermique a aussi été rencontré sur un échantillon d'une dossière. Enfin, en moyenne, ce sont les gantelets et les défenses de jambe qui possèdent les duretés les plus importantes ($> 200\text{Hv}$). Ce résultat est à mettre en relation directe avec la présence de métal trempé. Des occurrences de fer phosphoreux ont été relevées sur l'ensemble des types de défenses, exceptés pour les défenses de jambe, d'épaule ainsi que pour les gantelets.





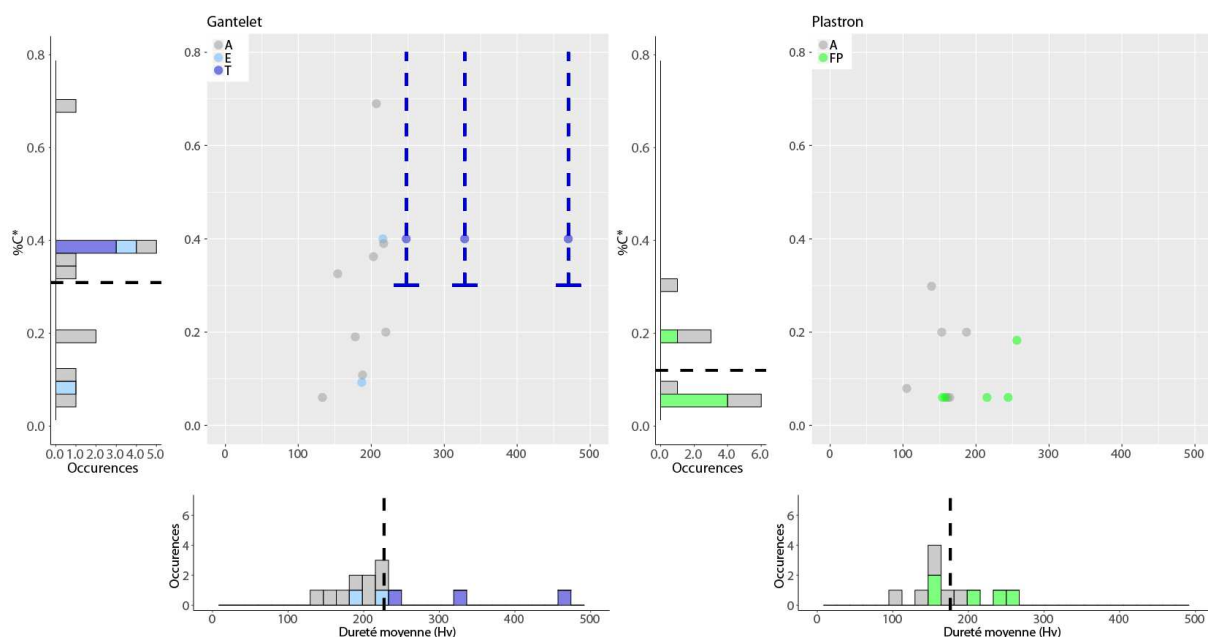


Figure 101 - Distribution de la teneur en carbone des échantillons issus des pièces d'armures articulées en fonction de la dureté moyenne; « T » échantillons trempés. « E » : Structures écrouies, Catégorie « FP » fer phosphoreux (%massP>0,1 dans le métal), « CP » : Chauffe et maintien prolongé en température. « A » aucune spécificité relevée. En noir pointillé : valeur moyenne de dureté. En bleu pointillé étendue possible de la teneur en carbone pour les échantillons trempés

Par ailleurs, des structures en bandes ont été observées sur un grand nombre de type de défense. Elles ne semblent donc pas associées à un type de protection particulière comme le montre la figure 102.

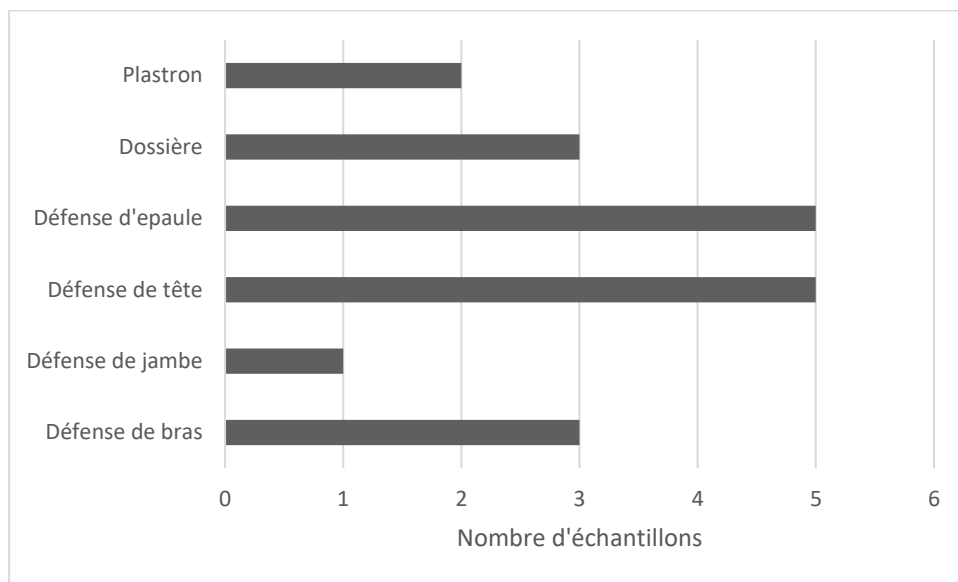


Figure 102 - Histogramme des structures en bandes observées en fonction du type de pièce

Pour conclure, du point de vue de la dureté du métal, deux groupes peuvent être dégagés sur les éléments d'armures articulées.

Le premier compte les échantillons de fortes duretés (>300 Hv). Ce sont les échantillons trempés. Ce type de traitement thermique est présent dans tous les lieux de fabrication supposés.

Du point de vue du type de défense c'est sur les gantelets, les défenses de tête et les défenses de jambe qu'il est essentiellement rencontré.

Le second regroupe des échantillons de dureté intermédiaire comprise entre 130 et 230 Hv et ce quel que soit la nature du métal (fer, acier, fer phosphoreux) ou le traitement thermique ou mécanique appliqué. La seule spécificité relevée concerne les fers phosphoreux, absents du corpus de pièces italiennes.

Qu'en est-il à présent de la nature du métal sur les différentes pièces issues d'une même armure ? La partie suivante propose de s'y intéresser à travers deux grands ensembles : l'armure de Sainte Suzanne (XV^e siècle) et l'armure de François de Montmorency (XVI^e siècle).

c) Armures semi complètes

Sur ces deux ensembles nous allons décrire, pour chaque prélèvement effectué, la microstructure du métal. Cependant, pour ne pas surcharger les paragraphes, les micrographies ne seront pas présentées lorsque nous ferons référence à des structures types, décrites en détails dans la partie « Résultats généraux » p. 199 (perlite globulaire, martensite et bainite...). Le lecteur les trouvera toutes rassemblées pour chaque échantillon dans le volume annexe. Des schémas récapitulatifs de l'ensemble des résultats détaillés dans cette partie sont présentés dans le Chapitre 5 (voir p.375 et 378).

i. Armure de Sainte Suzanne

Sur la cervelière de l'armure de Sainte Suzanne deux prélèvements ont été réalisés (numérotés STS_1 et STS_9)¹⁰⁰. Le premier présente une structure très hétérogène du point de vue de la teneur en carbone qui court d'environ 0,8%mass à moins de 0,2%mass. La perlite, majoritairement globulaire témoigne d'un recuit. Le deuxième prélèvement possède un taux de carbone beaucoup plus faible (%C <0,1%mass). L'échantillon peut être décomposé en deux parties : l'une riche en phosphore (%massP>0,2) et l'autre plus pauvre (%massP<0,1). La séparation entre les deux structures est traduite par une chute nette de la dureté d'environ 250 à 150Hv (voir figure 103) ainsi que par une différence de taille de grain (>200µm dans la partie phosphoreuse et <100µm sur l'autre partie de l'échantillon). A l'extrême bord de l'échantillon la dureté augmente à nouveau. On entre alors dans une nouvelle zone riche en phosphore. Cette structure en bande rappelle celle de l'échantillon H26 déjà présenté p. 209.

¹⁰⁰ Les localisations précises des prélèvements sont données en Annexes. Une photographie de l'armure complète est disponible p. 166

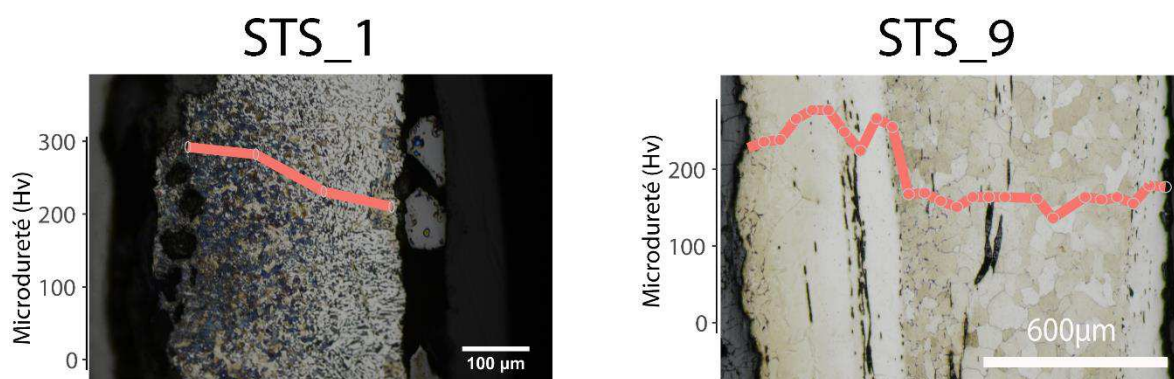


Figure 103 - Micrographies de la cervelière de l'armure de Sainte Suzanne (échantillon STS_1) observée après attaque au réactif Nital 3%. Micrographie de la cervelière de l'armure de Sainte Suzanne (échantillon STS_9) observée après attaque au réactif Oberhoffer. En rouge profil de microdureté (à gauche masse=200g, à droite masse =20g)

Sur le bras droit, 3 éléments ont été étudiés : l'épaulière, l'arrière-bras et la cubitière. L'épaulière (STS_7) et la cubitière (STS_2) présentent des structures ferritiques à très bas taux de carbone ($\%C < 0,1\%$ mass). La microstructure de l'arrière-bras (STS_8) se caractérise par un gradient de teneur en carbone (de 0,6% mass au bord gauche à 0,4% mass au bord droit). La ferrite est aciculaire (structure de Widmanstätten).

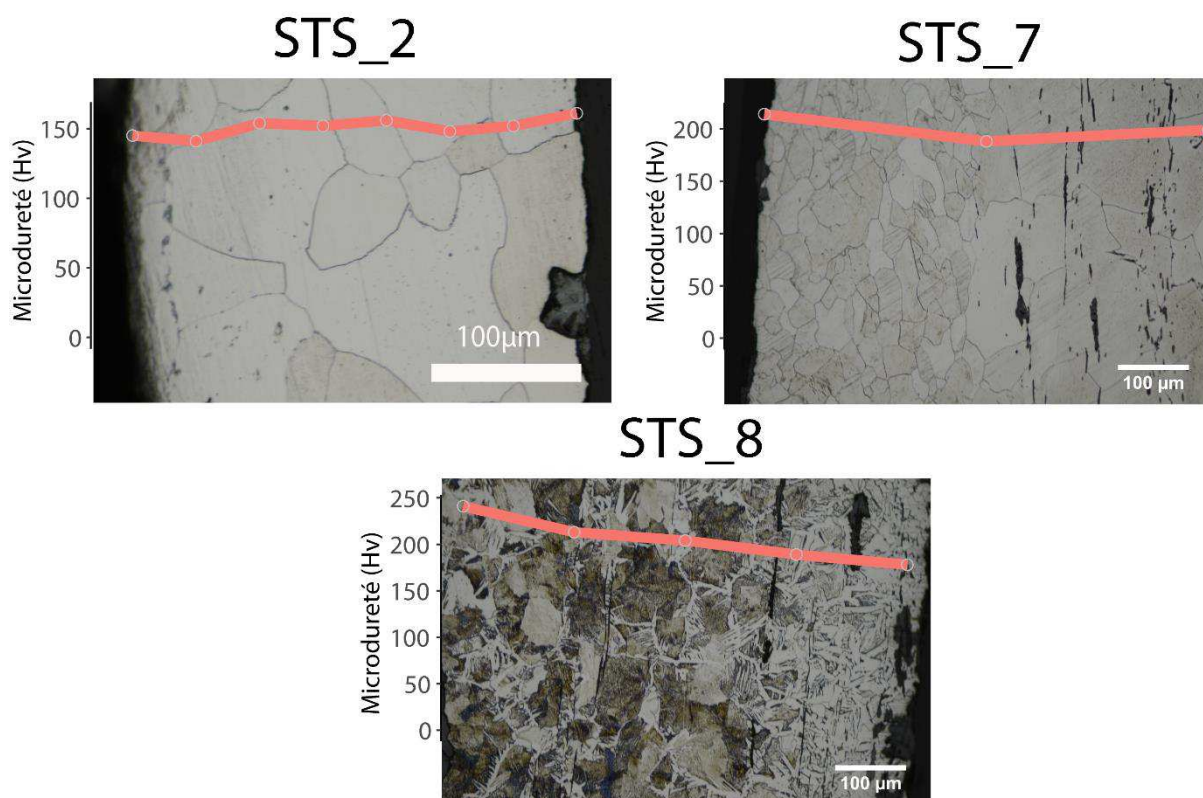


Figure 104 - Micrographies de la cubitière (échantillon STS_2), de l'épaulière droite (échantillon STS_7), micrographie de l'arrière bras (échantillon STS_8) de l'armure de Sainte Suzanne observées après attaque au réactif Nital 3%. En rouge profil de microdureté (masse =200g)

La dossière est constituée de trois parties. Un prélèvement a été effectué sur chacune d'entre elles. Les deux premiers, (échantillon STS_4 et échantillon STS_6), prélevés aux extrémités, présentent des structures très semblables à savoir un gradient de carbone bien net qui court de

0,8%mass à 0,1%mass (voir figure 105). Il pourrait être le résultat d'une cémentation. La partie centrale de la dossière (échantillon STS_11) est constituée d'un acier hétérogène en teneur en carbone. Un faciès typique de structures de trempe (martensite et bainite) est observé au centre, tandis que les extrémités révèlent une structure ferrito perlitique. L'interface entre les deux parties est nettement marquée d'un côté par une chute brutale de la dureté de 450 à 300Hv.

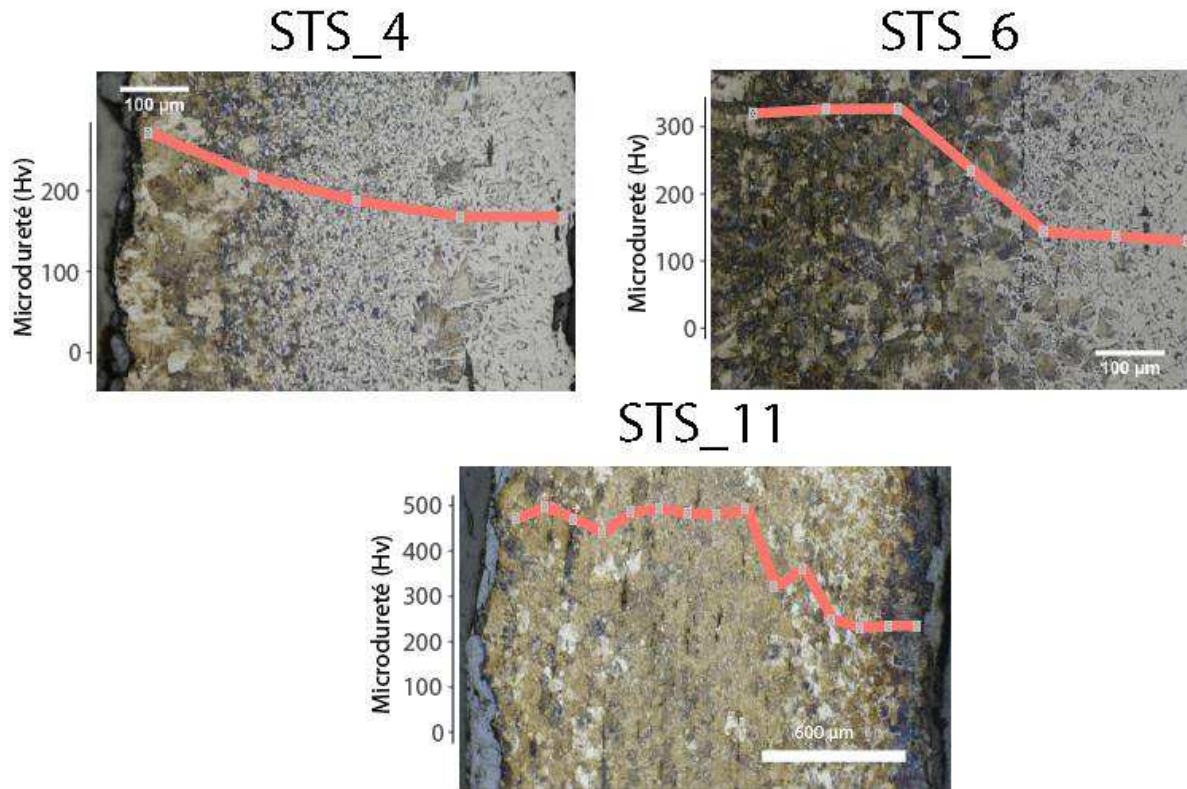


Figure 105 - Micrographies de la dossière (échantillon STS_4), de l'autre extrémité de la dossière (échantillon STS_6), et du centre de la dossière (échantillon STS_11) de l'armure de Sainte Suzanne observées après attaque au réactif Nital 3%. En rouge profil de microdureté (masse $\approx 200\text{g}$)

Les trois derniers prélèvements (STS_3, STS_5 et STS_10) ont été réalisés sur l'épaulière gauche le plastron et une lame de la braconnière. Tous trois sont des aciers à teneur en carbone supérieure à 0,4%mass. Sur le plastron, un léger gradient de teneur en carbone est visible. Il s'étend de 0,2 à 0,8%mass. La perlite est de forme globulaire ou lamellaire épaisse. L'échantillon de l'épaulière est homogène et porte lui aussi les traces d'un recuit (perlite majoritairement de forme globulaire). Le prélèvement réalisé sur une lame de la braconnière est également très homogène en teneur en carbone (environ 0,7-0,8%mass). De plus, cet échantillon présente une structure fortement écrouie, à mettre en relation avec la dureté élevée mesurée (supérieure à 300Hv).

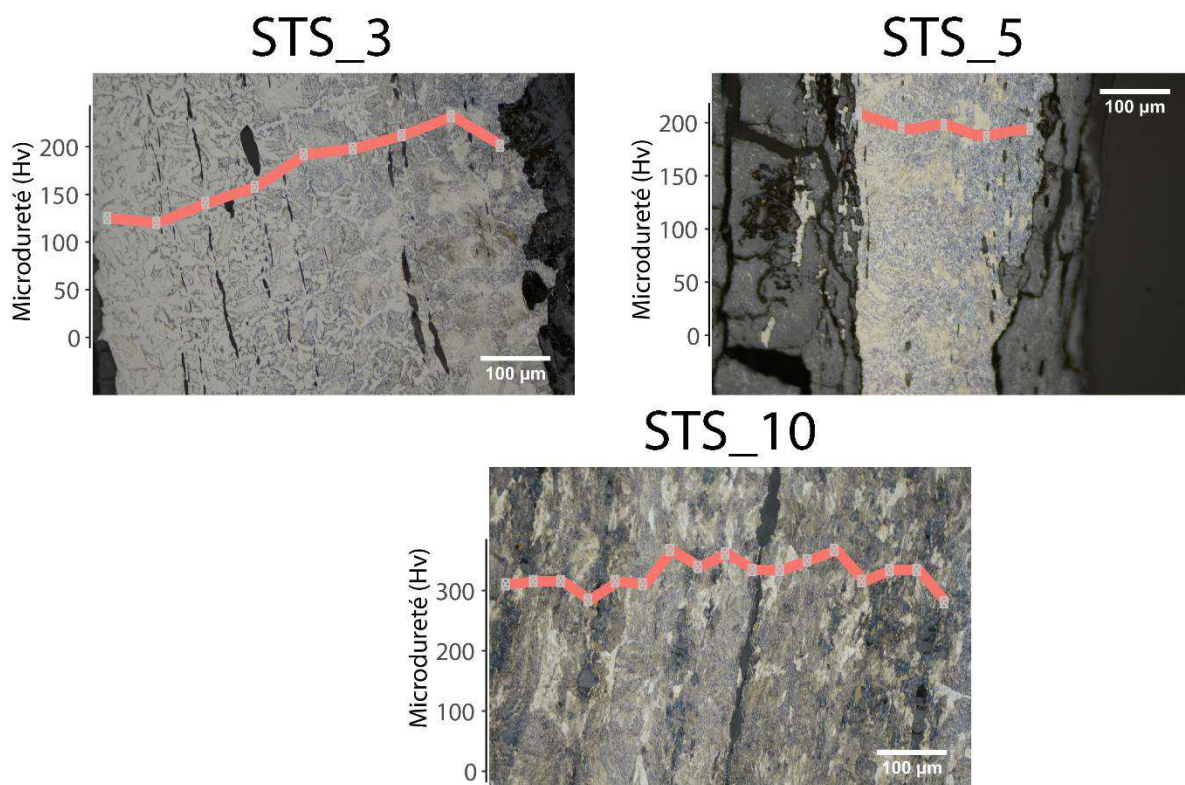


Figure 106 - Micrographies du plastron (échantillon STS_3), de l'épaulière gauche (échantillon STS_5), micrographie d'une lame de braconnière (échantillon STS_10) de l'armure de Sainte Suzanne observées après attaque au réactif Nital 3%. En rouge profil de microdureté (masse =200g)

Pour conclure, les éléments de l'armure de Sainte Suzanne présentent des structures métallurgiques très variés allant de structures totalement ferritiques à celles d'aciers ferrito perlitique à teneur en carbone élevée (%C>0,6%mass). De plus, le métal a subi des traitements thermiques et mécaniques variables en fonction des éléments de l'armure. La majorité des pièces porte la marque d'un maintien prolongé en température. L'échantillon prélevé sur une lame de la braconnière (échantillon 10 : STS_10) fait ici exception puisqu'il révèle une structure aux grains écrouis. Quatre échantillons sont porteurs d'un gradient de teneur en carbone qui pourrait être le résultat d'une cémentation. Un seul présente des structures typiques de trempe.

Les valeurs de dureté sont comprises entre 150 et 220Hv y compris pour les échantillons ferritiques (échantillon 7 (STS_7) et échantillon 2 (STS_2)). L'échantillon prélevé sur une lame de la braconnière (échantillon 10 (STS_10) ainsi que celui sur le centre de la dossière, trempé, (échantillon 11 (STS_11)) font ici exception avec des duretés de plus de 300Hv.

ii. Armure de François de Montmorency

L'échantillon prélevé sur l'armet¹⁰¹ de l'armure de François de Montmorency présente une structure faiblement carburée. Une bande de ferrite à larges grains (>100µm) se distingue sur le bord droit (voir figure 107, éch1). La perlite est de forme globulaire ce qui témoigne d'une chauffe suivie d'un maintien prolongé en température. Sur les trois échantillons des lames du colletin étudiés, deux présentent des structures moyennement carburées où la perlite est en grande partie de forme globulaire. Il s'agit des échantillons ech15, ech4a et ech4b¹⁰². L'échantillon 3, prélevé sur une autre lame du colletin est entièrement ferritique mais présente une dureté proche des autres échantillons autour de 150 Hv. Les mesures par EPMA ont montré qu'il contenait du phosphore mais en faible quantité (%massP=0,08)

¹⁰¹ Les localisations précises des prélèvements sont données dans le volume Annexes. Une vue générale de l'armure est présentée p. 173.

¹⁰² Les échantillons ech4a et ech4b constituent un seul prélèvement qui s'est brisé lors de la découpe. L'échantillon b apparaît plus carburé que le a ce qui a pu contribuer à leur séparation

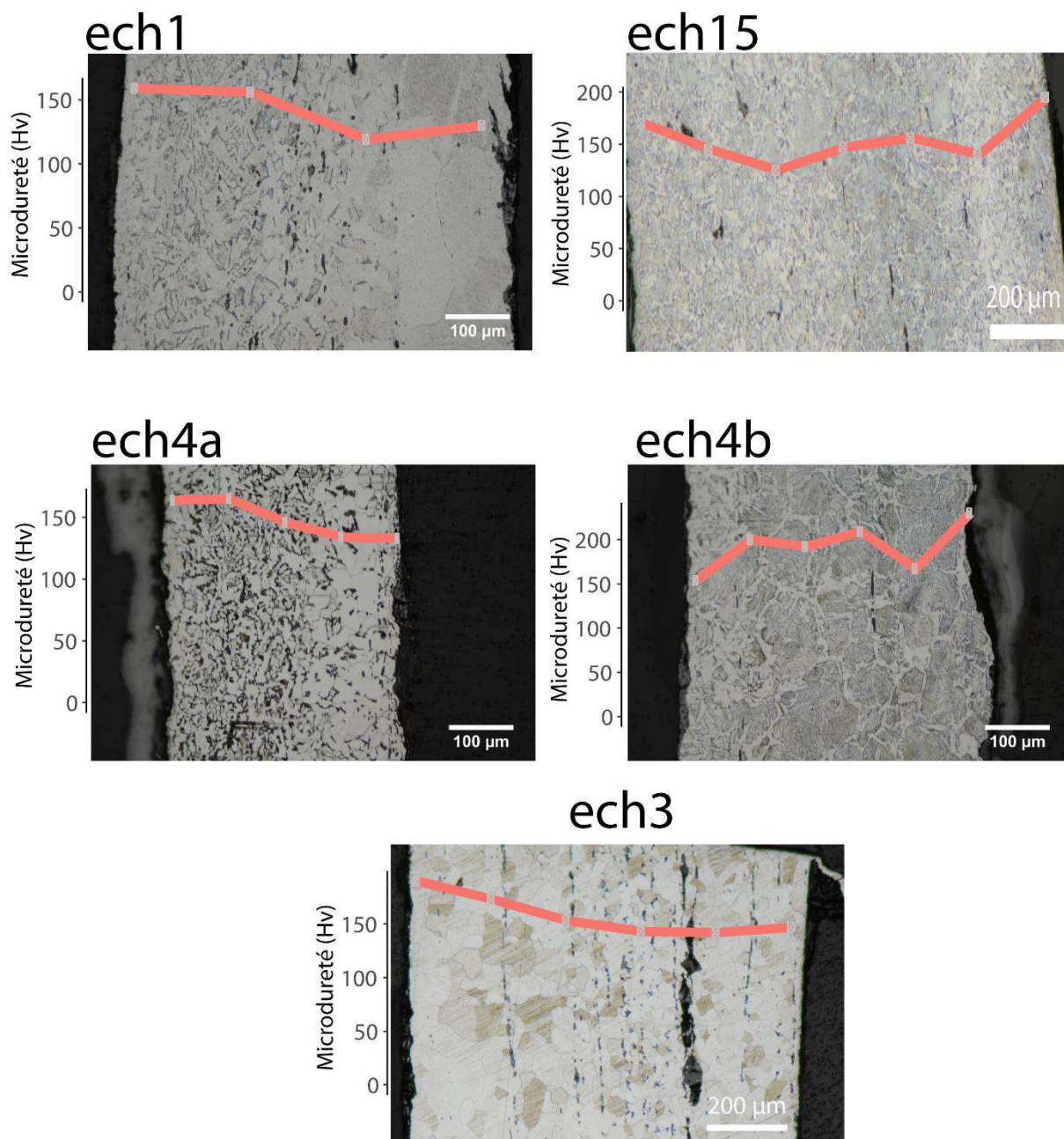


Figure 107 - Micrographies d'un échantillon issu de l'armet de l'armure de François de Montmorency (ech 1 : 1_casque), d'un échantillon issu de d'une lame du colletin (ech 15 : 15_colletin), de deux échantillons issus d'une autre lame du colletin (ech4a et ech4b : 4_colletin_a et 4_colletin_b) d'une autre lame du colletin (ech 3 : 3_colletin) observées après attaque au réactif Nital 3%. En rouge profil de microdureté (masse =200g)

La figure 108 présente les structures observées sur les différents éléments étudiés du bras gauche. L'épaulière (ech10) et le gantelet (ech2) sont les plus carburés. L'échantillon 10 est très homogène tandis qu'un gradient de teneur en carbone est visible sur l'échantillon 2. De plus sur ce dernier les grains sont fortement déformés, ce qui témoigne d'un martelage du métal non suivi d'un recuit qui aurait conduit à une recristallisation des grains sous une forme équiaxe. Sur l'arrière-bras, deux prélèvements ont été effectués. Tous deux présentent des structures d'un acier faiblement carburé (%C $\approx$ 0,2%mass). Toutefois la déformation des grains sur l'échantillon 12 témoigne d'une

déformation par martelage non suivie d'un recuit ayant permis la recristallisation des grains, tandis que la perlite globulaire sur le 11 relève d'une chauffe suivi d'un maintien prolongé en température.

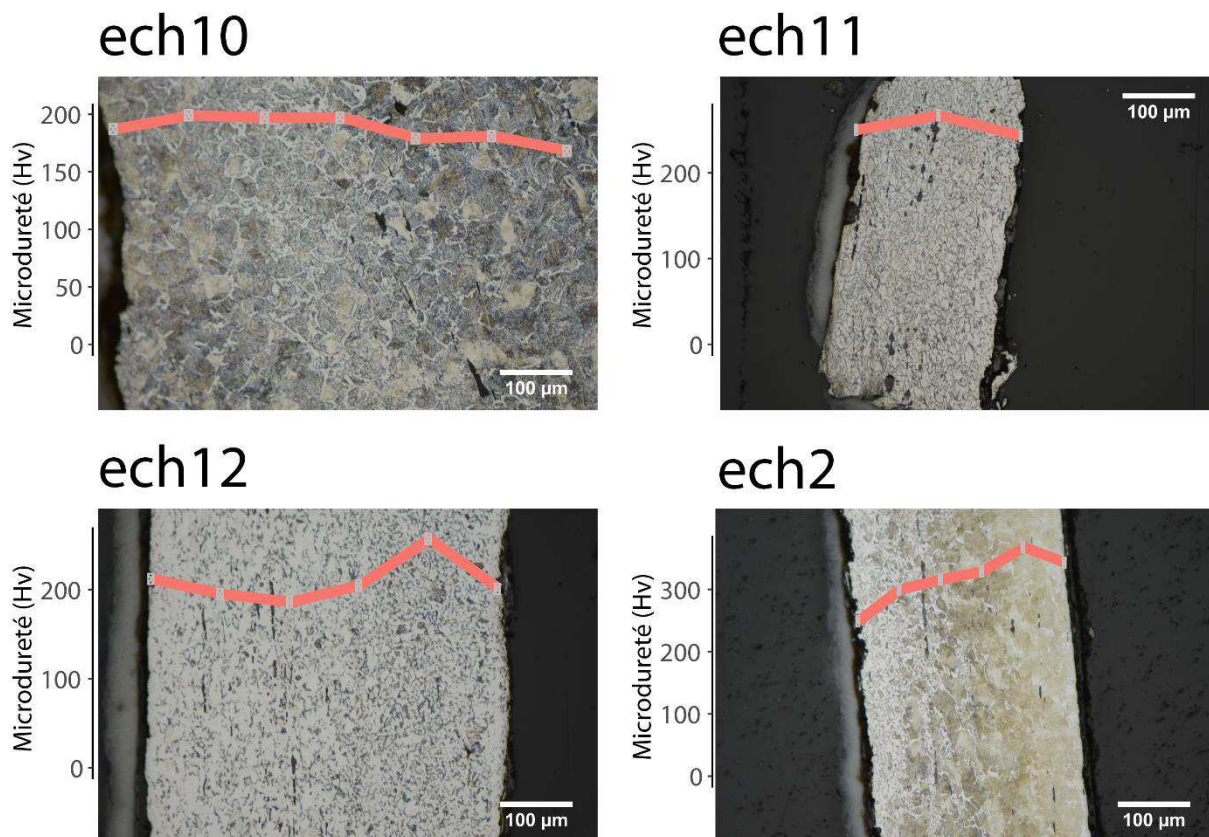


Figure 108- Micrographie d'un échantillon issu de l'épaulière gauche (ech 10 : 10_epaulière), micrographie d'un échantillon issu de l'arrière-bras gauche (ech 11 : 11_epaulière), micrographie d'un autre échantillon issu du canon d'avant-bras gauche (ech 12 : 12_cubitère), micrographie d'un échantillon issu du gantelet gauche (ech2 : 2_gantelet) observées après attaque au réactif Nital 3%. En rouge profil de microdureté (masse =200g)

Deux échantillons ont été étudiés pour la dossier (voir figure 109). L'échantillon 8 présente deux bandes : une faiblement carburée et l'autre ferritique. La perlite est globulaire. L'échantillon 9 et faiblement carburée mis à part une bande à l'extrémité gauche à $\%C \approx 0,7\%$ mass et séparée par une fissure.

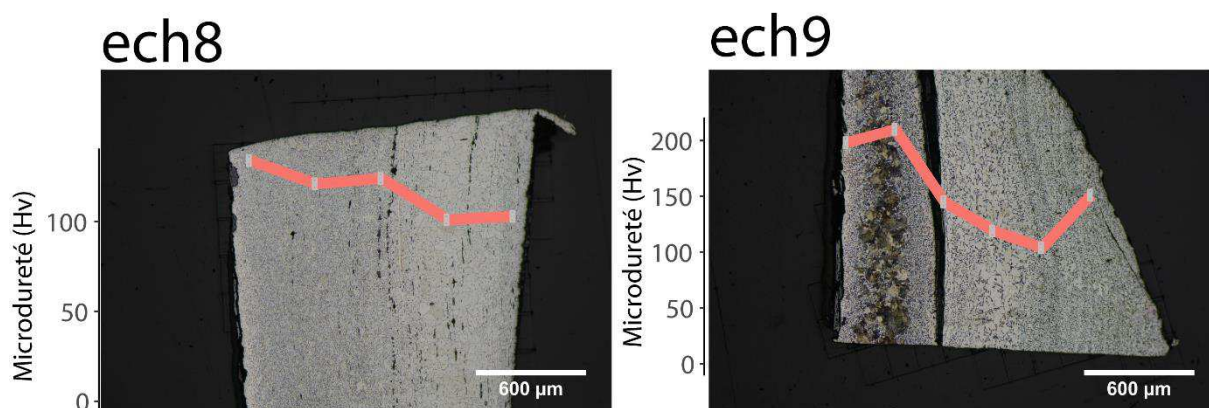


Figure 109 - Micrographies d'un échantillon issu de la dossier de l'armure de François de Montmorency (ech8 : 8_dossier), d'un autre échantillon issu de la dossier (ech9 : 9_dossier), observées après attaque au réactif Nital 3%. En rouge profil de microdureté (masse =200g)

Les structures métallographiques des échantillons issus des tassettes sont présentées figure 110. Les échantillons 5 et 14 présentent des structures hétérogènes en teneur en carbone. Ils sont moyennement carburés mis à part une bande au centre. Les échantillons 6, 7 et 13 sont eux plus homogènes du point de vue de la teneur en carbone. L'échantillon 13 est légèrement plus carburé au centre. L'échantillon 6 présente, lui, une perlite globulaire signe qu'un recuit a été opéré.

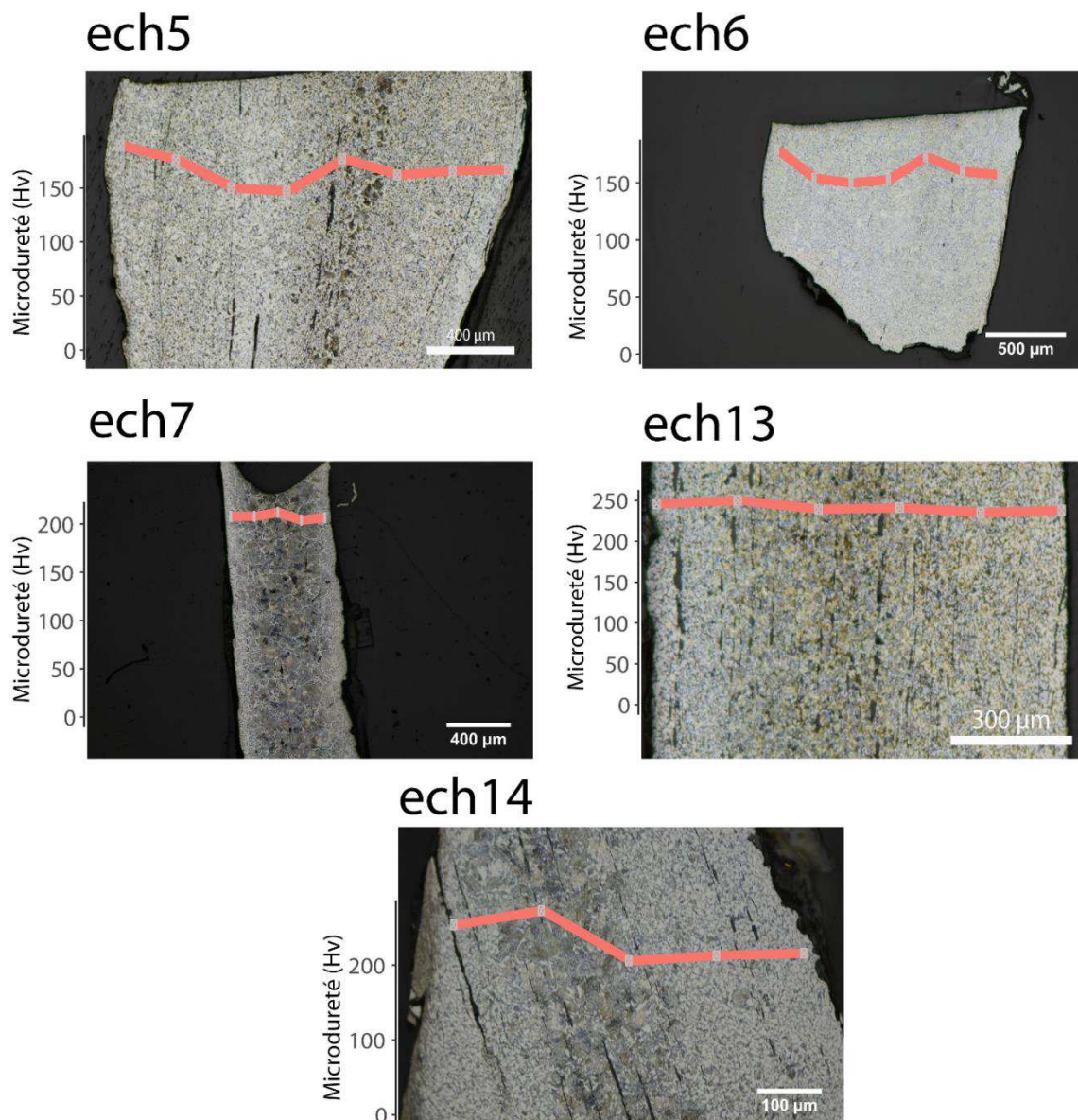


Figure 110 - Micrographies des échantillons issus des tassettes gauche (ech 5 : 5_tassette), (ech6 : 6_tassette), (ech7, 7_tassette) et droite (ech13 : 13_tassette), (ech14 : 14_tassette) de l'armure de François de Montmorency observées après attaque au réactif Nital 3%. En rouge profil de microdureté (masse =200g)

Pour conclure, la nature du métal constituant les différentes parties de l'armure de François de Montmorency est, comme pour l'armure de Sainte Suzanne très variée, allant de structures totalement ferritiques à d'autres ferrito-perlitiques à teneur en carbone élevées (%C>0,6%mass). Du point de vue des traitements thermiques, aucune occurrence de trempe n'a été relevée. Le métal porte les traces d'une chauffe suivie d'un maintien prolongé en température sur une majorité des

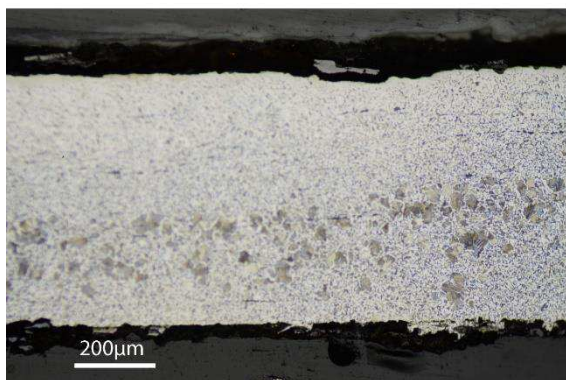
échantillons. Les valeurs de dureté sont généralement comprises entre 150 et 220Hv y compris pour l'échantillon 3 très faiblement carburé ($<0,1\%$ mass). Deux échantillons font exception. L'échantillon issu du gantelet présente une dureté supérieure de 290Hv, et l'échantillon 8 issu de la dossière a une dureté de 119Hv cohérente avec sa structure métallographique ferritique.

Le corpus étudié compte également deux paires de cuissards issues, non pas d'une même armure mais d'un même atelier : celui de l'armurier nurembergeois Valentin Siebenbürger. Nous allons nous y intéresser dans le paragraphe suivant.

d) Pièces issues de l'atelier de Valentin Siebenbürger

18 échantillons ont été prélevés sur les deux paires de cuissards G436 et G435 d'apparence similaire et issus de l'atelier de l'armurier nurembergeois Valentin Siebenbürger. Sur le cuissard droit de la paire G435 deux prélèvements sur des lames différentes de la pièce ont été effectués¹⁰³. Le premier (échantillon G435-D1) est un acier hétérogène en teneur en carbone, le second (échantillon G435-D2) présente une structure plus homogène de perlite globulaire¹⁰⁴ dans une matrice de ferrite (voir figure 111).

G435-D1



G435-D2



Figure 111 - micrographies des échantillons G435-D1 et G435-D2 du cuissard droit issu de l'atelier de Valentin Siebenbürger, observées après attaque au réactif Nital 3%

Sur le cuissard gauche de la paire G435, cinq prélèvements sur des lames différentes de la pièce ont été effectués (voir figure 112). Deux d'entre eux, les échantillons G435_ech1 et G435_ech3 sont des aciers moyennement carburés ($\%C=0,3-0,4\%$ mass). Deux autres, G435_ech2 et G435_G4 sont plus faiblement carburés ($\%C<0,2\%$ mass). Le dernier, G435_G5 présente une structure ferritique avec quelques amas de perlite qui se détachent sur l'extrémité basse de l'échantillon.

¹⁰³ Les localisations précises des prélèvements sont données en annexes

¹⁰⁴ Les micrographies détaillées sont rassemblées en annexes

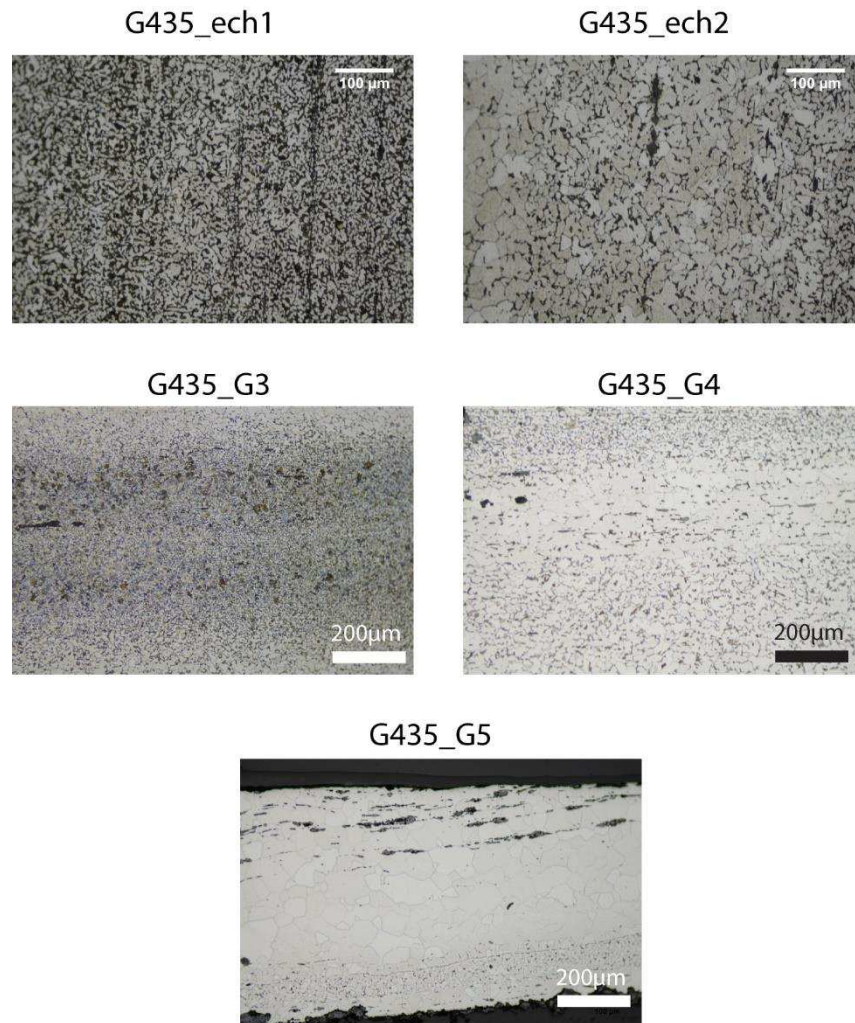


Figure 112 - micrographies des échantillons G435_ech1, G435_ech2, G435_G3, G435_G4, et G435_G5 du cuissard gauche de la paire G435 issu de l'atelier de Valentin Siebenbürger, observées après attaque au réactif Nital 3%

Sur le cuissard droit de la paire G436, cinq prélèvements ont également été effectués (voir figure 113). Deux d'entre eux, G436_D1 et G436_D5, présentent des structures de trempe hétérogènes qui peuvent être décomposées en plusieurs bandes. Certaines comptent de la martensite et bainite quand d'autres sont constituées de ferrite et de perlite. L'échantillon G436_D2 est un acier moyennement carburé ($\%C \approx 0,3\%$ mass). Les deux derniers échantillons, G436_D3 et G436_D4, sont constitués de ferrite à taille de grain variable, parfois supérieur à 200 µm.

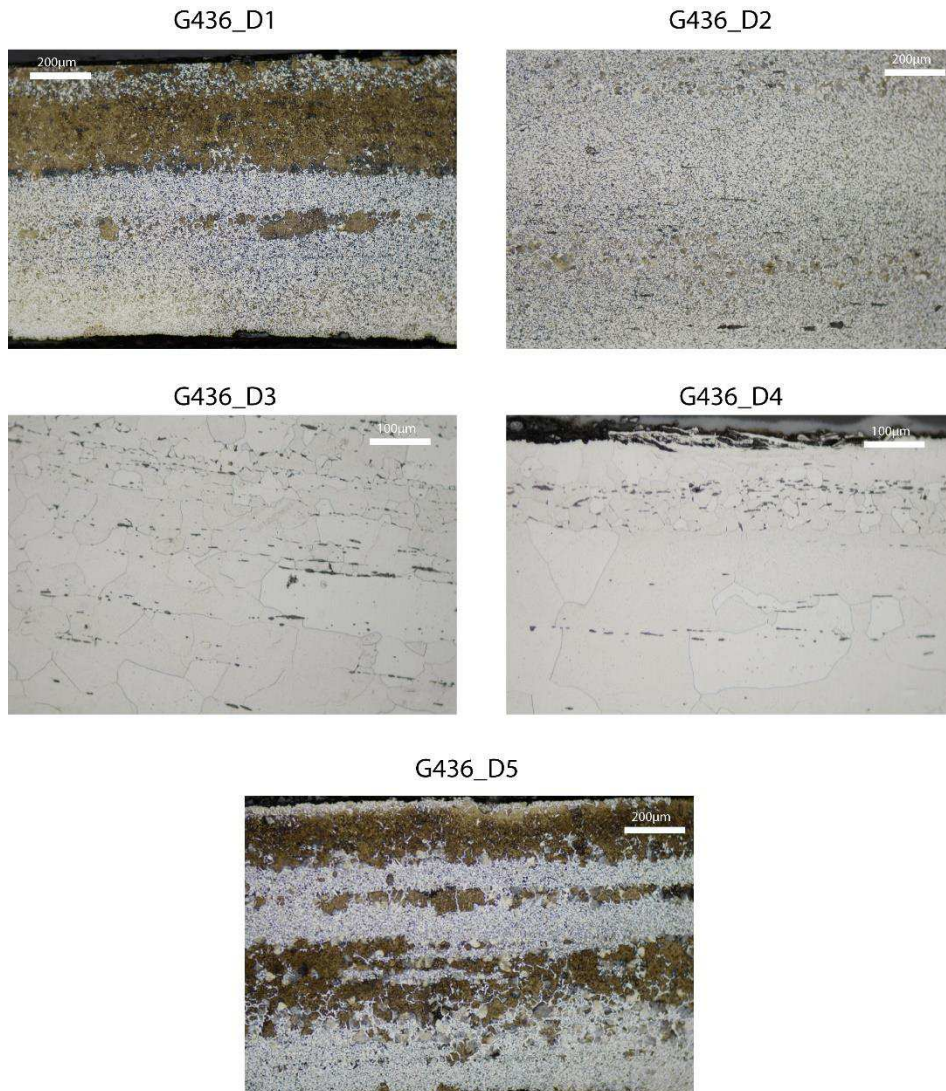


Figure 113 - micrographies des échantillons G436_D1, G436_D2, G436_D3, G436_D4, et G436_D5 du cuissard droit de la paire G436 issu de l'atelier de Valentin Siebenbürger, observées après attaque au réactif Nital 3%

Enfin, sur le cuissard gauche de la paire G436 cinq échantillons ont été prélevés (voir figure 114). Seuls les échantillons G436_ech1 et G436_ech2 sont issus de la même lame. Le prélèvement s'est, en effet, brisé en deux parties lors de la découpe. Excepté pour l'échantillon G436_ech3 qui présente une structure ferrito perlitique, l'ensemble des échantillons est porteur de structures de trempe (martensite et bainite). Une structure de trempe homogène est uniquement observée sur l'échantillon G436_ech2.

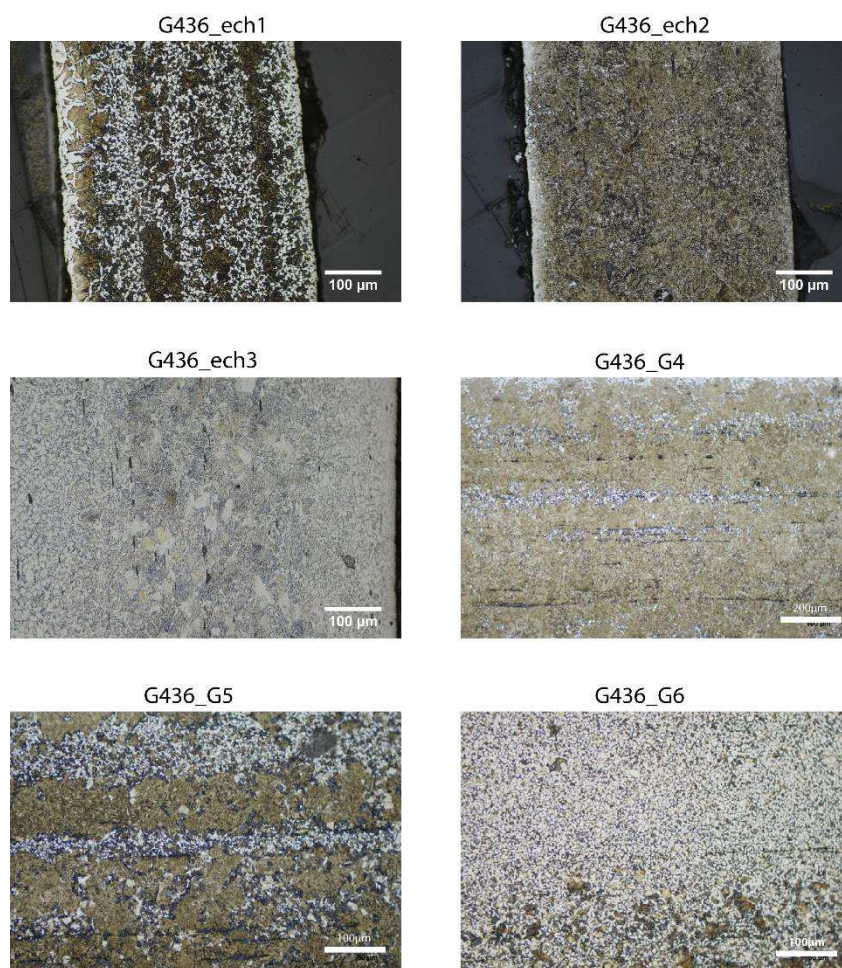


Figure 114 -micrographies des échantillons G436_ech1, G436_ech2, G436_ech3, G436_G4, G436_G5 et G436_G6 du cuissard gauche de la paire G436 issu de l'atelier de Valentin Siebenbürger, observées après attaque au réactif Nital 3%

Les échantillons ont une dureté moyenne de 250Hv (voir figure 115). Les échantillons trempés ont une dureté supérieure à cette valeur moyenne, qui monte jusqu'à 500Hv. La propreté inclusionnaire ne dépasse pas 2%, hormis pour un échantillon où elle est légèrement supérieure (2,1%) (voir figure 115).

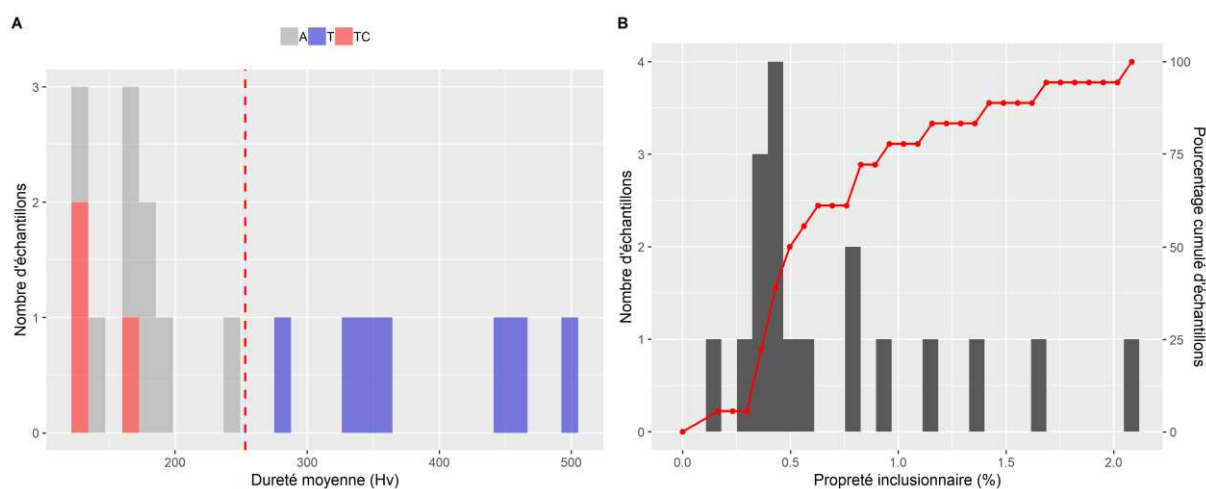


Figure 115 - « A » Distribution de la dureté moyenne pour les échantillons des cuissards G436 et G435, en rouge pointillé valeur moyenne. « B » Distribution de la propreté inclusionnaire pour les cuissards G436 et G435

Pour conclure, sur cet ensemble de pièces issues de l'atelier de Valentin Siebenbürger, les matériaux aciérés sont majoritaires. 3 échantillons seulement présentent une structure entièrement ferritique. Il s'agit de l'échantillon 5 du cuissard gauche G435 et des échantillons 3 et 4 du cuissard droit G436. Hormis un échantillon (le 3), l'ensemble des parties constituant le cuissard gauche G436 sont trempées, ce qui augmente considérablement la dureté du métal (jusqu'à 500Hv). Son homologue droit ne possède que deux occurrences de trempe (échantillons 1 et 5).

La présentation des résultats relatifs à la nature du métal pour les groupes d'armures de typologies proches du XIII^e au XVII^e siècles est maintenant achevée. Ils feront l'objet d'une discussion détaillée dans le chapitre suivant selon l'usage de l'armure, la richesse de son porteur et son lieu de fabrication. Pour le XVII^e siècle, il reste cependant à présenter les résultats d'un dernier groupe d'armures : celui des cuirasses de Valenciennes.

e) Armures de Valenciennes

Pour le XVII^e siècle, le corpus étudié compte un groupe d'armure de grand intérêt. Il s'agit des plastrons et dossières retrouvées dans l'atelier d'un fondeur à Valenciennes. Ce paragraphe est dédié à la présentation des résultats sur la nature du métal. 17 échantillons ont été étudiés dans ce corpus. Les principaux résultats ont été rassemblés dans le Tableau 22 et sont également illustrés par quelques figures. Pour ce lot d'échantillons les micrographies détaillées sont disponibles en annexe.

La teneur moyenne en carbone pondérée par la surface est présentée figure 116. Les échantillons présentent une bonne homogénéité et un faible taux de carbone ($\%C^* < 0,3\% \text{mass}$). Un seul fait ici exception avec un taux moyen de 0,4%mass. Il s'agit du plastron 1002-10-14. Sa répartition en teneur en carbone est hétérogène ($\text{Sigma} > 0,2$) et se traduit par la présence d'un gradient. Aucun autre traitement thermique ou mécanique potentiel n'a été relevé.

Chapitre 4 : Résultats des analyses menées sur les échantillons

Tableau 22 - Principaux résultats sur la nature du métal pour les échantillons des armures de Valenciennes

Numéro d'échantillon	Type de défense	%C*	Phosphore (%massP≥0,1)	Traitements thermiques, thermochimiques et mécaniques					Structure en bande	Taille de grain (μm)
				CP	T	Grad	E	WID		
1002-1-9	Plastron	0,06	ABSENCE							[<50]
1002-4-21	Plastron	0,06	ABSENCE							[50-200]
1002-5-16	Plastron	0,15	ABSENCE							[50-200]
1002-2-18	Plastron	0,06	ABSENCE							[50-200]
1002-14-20	Dossière	0,20	PRÉSENCE							[50-200]
1002-18-25	Dossière	0,06	PRÉSENCE							[50-200]
1002-3-22	Plastron	0,06	ABSENCE							[50-200]
1002-4-20	Plastron	0,10	ABSENCE							[50-200]
1002-7-13	Plastron	0,06	ABSENCE							[50-200]
1002-2-21	Plastron	0,10	ABSENCE							[<50]
1002-6-22	Plastron	0,20	ABSENCE							[50-200]
1002-10-14	Plastron	0,41	ABSENCE			X				[<50]
"3-4"	Plastron	0,11	ABSENCE						X	[50-200]
1002-3-1	Plastron	0,06	ABSENCE							[50-200]
1002-2-6	Plastron	0,06	ABSENCE							[50-200]
1002-2-16	Plastron	0,24	ABSENCE							[<50]
1002-3-20	Plastron	0,17	PRÉSENCE							[50-200]

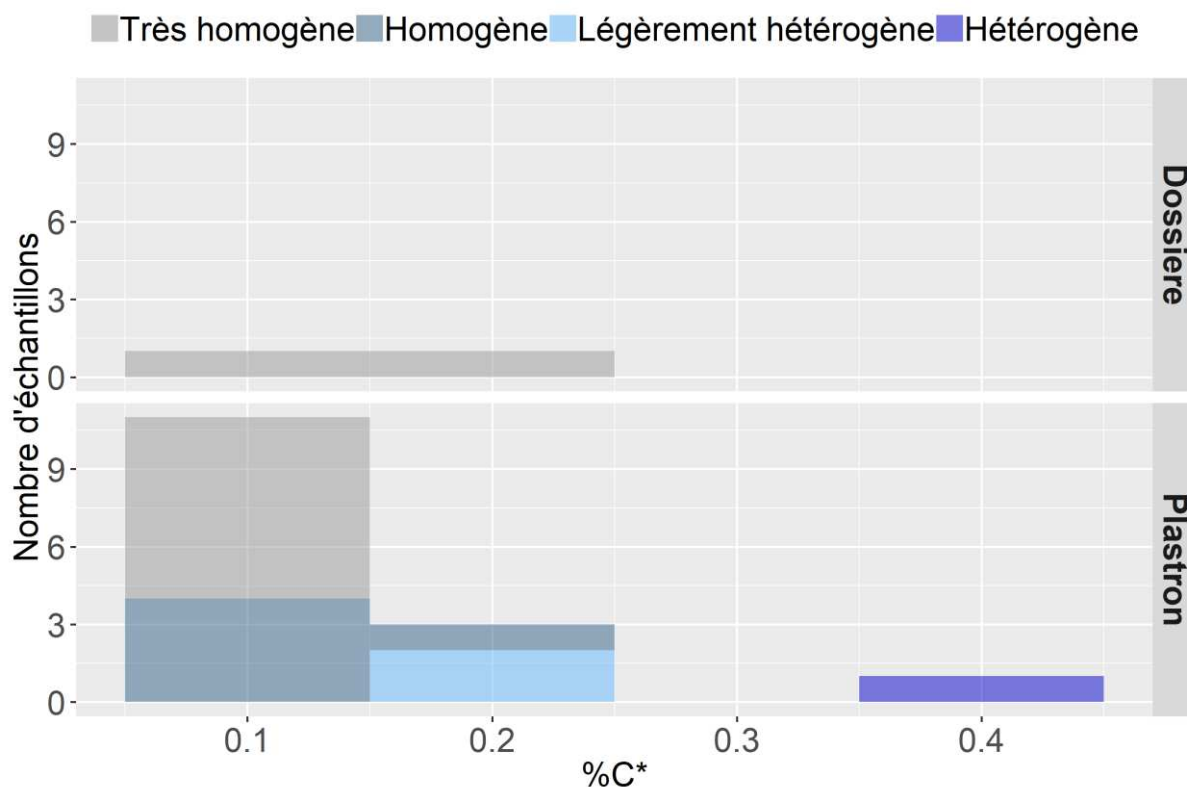


Figure 116 - « A » Distribution de la teneur moyenne en carbone pondérée par la surface des échantillons des armures de Valenciennes

Une structure en bande a été mise en évidence sur l'échantillon 3-4. Elle associe une bande de métal faiblement carburé ($\%C=0,2\%$ mass) à une bande ferritique (voir figure 117).

Echantillon 3-4



Figure 117 - Micrographies des échantillons 3-4 révélant une structure en bande.

La propreté inclusionnaire est en moyenne supérieure à 2% (voir figure 118) donc légèrement supérieure à celle de l'ensemble des échantillons du corpus (<2%)

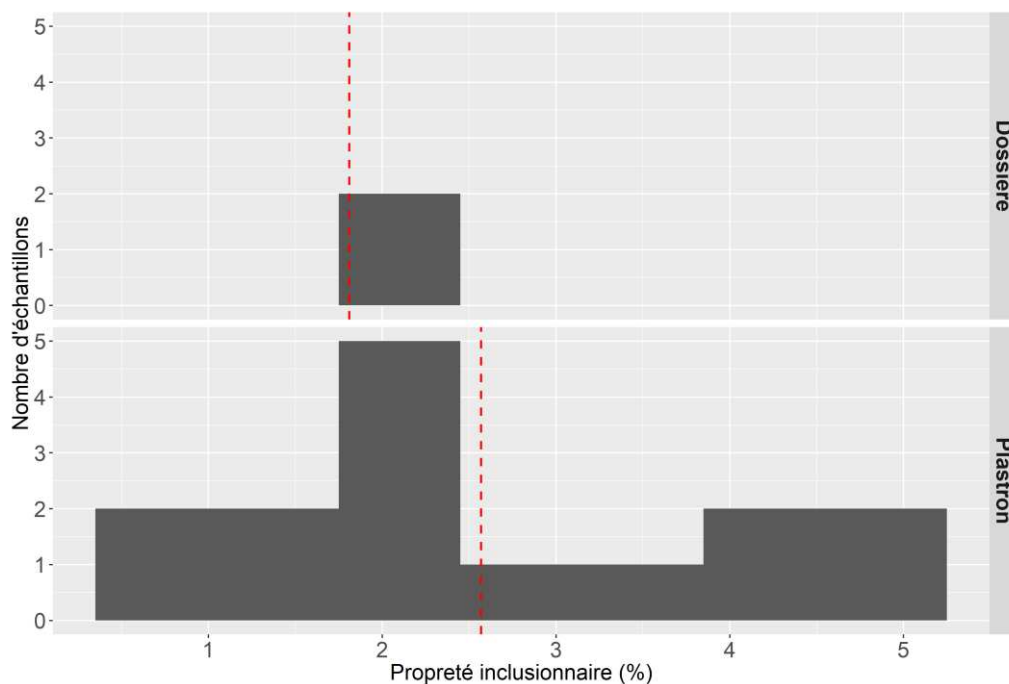


Figure 118 - Distribution de la propreté inclusionnaire (%) pour les échantillons de Valenciennes. En rouge valeur moyenne

La valeur moyenne de la dureté mesurée pour les plastrons est de 130Hv, ce qui est inférieur à la dureté moyenne de l'ensemble des échantillons du corpus (190Hv). Les deux dossiers examinées présentent une dureté supérieure à 170Hv du fait de la présence de phosphore dans le métal (voir figure 119).

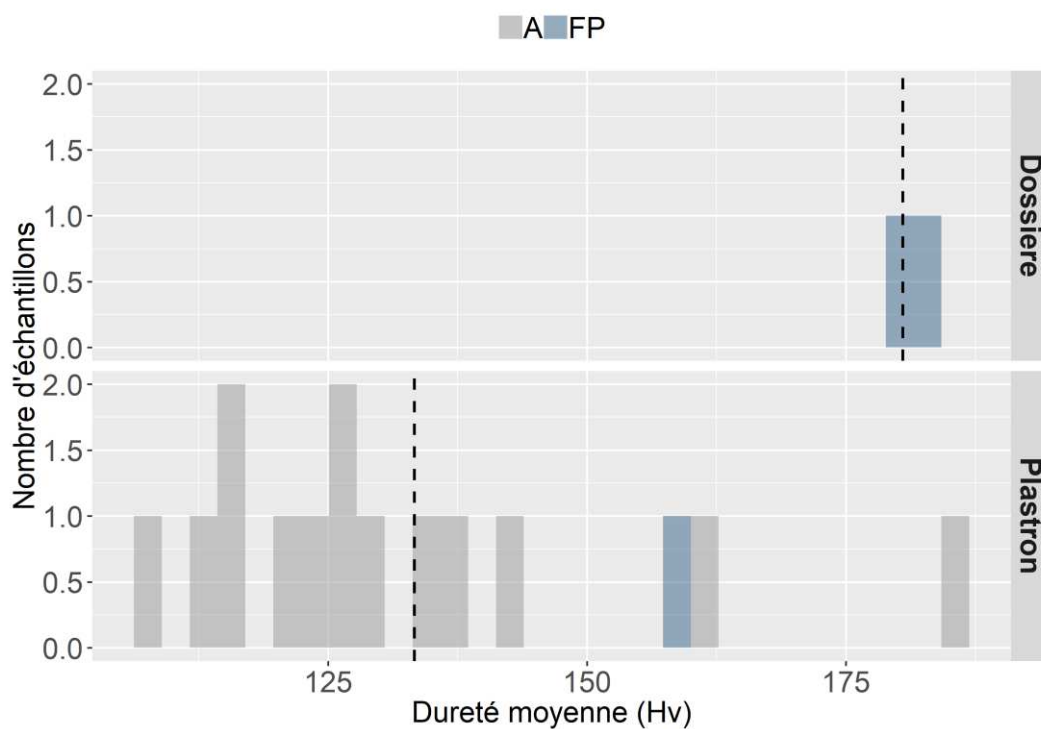


Figure 119 - Distribution de la dureté moyenne sur les échantillons des sites de Valenciennes. Catégorie « FP » fer phosphoreux. « A » pour aucune spécificité relevée. En pointillé valeur moyenne

Pour conclure, les échantillons des armures de Valenciennes sont essentiellement constitués d'alliages faiblement carburés ($\%C^* < 0,2\%$ mass) d'une dureté plus faible que la moyenne des échantillons du corpus. La présence de phosphore dans le métal est attestée sur les deux dossières examinées et sur un des 15 plastrons. Enfin, la propreté inclusionnaire est légèrement supérieure à la moyenne de l'ensemble des échantillons du corpus (2%) et monte jusqu'à 5%.

3) Synthèse sur la nature du métal

Cette partie était consacrée à décrire et caractériser la nature du métal des échantillons d'armures étudiés. Nous souhaitons à présent dresser un bref bilan des principaux résultats.

Les échantillons présentent en moyenne une teneur en carbone homogène sur l'ensemble de leur surface ($\sigma < 0,1$). Toutefois des exceptions demeurent. Elles concernent environ une trentaine d'échantillons. L'hétérogénéité observée peut avoir différentes causes. Dans un tiers des cas, elle est liée à la présence d'un gradient de teneur en carbone qui pourrait résulter d'une opération de cémentation destinée à durcir le métal. L'hétérogénéité peut aussi refléter la présence de structures en bandes associant une partie moyennement carburée à une partie ferritique. Ces structures se distinguent par leur régularité sur l'ensemble de la surface de l'échantillon. Ceci pourrait suggérer une opération spécifique de mise en forme par soudure de deux lopins de métal de nature différente. Toutefois, elles peuvent aussi être le résultat de l'hétérogénéité du lopin de métal utilisé pour fabriquer la tôle.

Si l'on s'intéresse à présent à la teneur moyenne en carbone, force est de constater que le métal peut être de nature très variable, allant de structures totalement ferritiques à l'acier fortement carburé. Toutefois, seulement un quart des échantillons possède une teneur moyenne en carbone pondérée par la surface supérieure ou égale à 0,4%mass. Les aciers faiblement à moyennement carburés sont, par conséquent, nettement majoritaires. Dans le corpus examiné, l'acier trempé est ainsi essentiellement rencontré au XV^e siècle et surtout au XVI^e siècle, qui est le mieux représenté d'un point de vue statistique. Par conséquent, il est possible que ce type d'opération ait été pratiquée plus largement aux siècles précédents que ce que suggèrent nos résultats. De façon générale, les cas de trempe restent rares dans les pièces étudiées. Ils ont été observés sur une dizaine d'échantillons (sur les 202 examinés), issus aussi bien d'armures allemandes, italiennes, françaises qu'espagnoles.

Les propriétés physiques du métal peuvent également être influencées par les éléments mineurs présents dans le métal en solution solide ou sous forme de précipités comme le phosphore. L'emploi de fer phosphoreux a été relevé sur une trentaine d'échantillons. Il a été observé de façon récurrente sur les armures de plaques étudiées (1/3 des échantillons) ainsi que sur les éléments d'armures datés du XVII^e siècle (1/4 des échantillons). On en recense également quelques cas au XVI^e siècle. Le lieu de fabrication supposé des pièces pourrait avoir un lien avec l'utilisation de ce type de matériau puisqu'aucune occurrence de ce dernier n'a été rencontrée sur les armures supposées de facture italienne. Parfois, il est associé avec une autre bande de métal plus aciéré, formant ainsi un nouveau type de matériau « mixte ». C'est le cas de trois échantillons.

Les inclusions non métalliques contenues dans le métal influent également sur la résistance de ce dernier. Elles constituent, en effet, autant de points de fragilité supplémentaires. Dans le cas des armures, le métal a été fortement martelé éliminant ainsi une bonne partie des inclusions piégées à l'intérieur de ce dernier. Ainsi, la propreté inclusionnaire est centrée autour de 2% mais demeure généralement inférieure à 3%. Les plaques de broigne des sites de Laquenexy et Montbaron présentent toutefois des taux de porosités et d'inclusions supérieurs à cette moyenne. Quelques rares échantillons ont une propreté inclusionnaire supérieure à 9% (5 échantillons).

Si la nature du métal est visiblement variable la dureté finale des matériaux est, elle, relativement homogène. Elle est en moyenne centrée autour de 190Hv, ce qui correspond à la dureté d'un acier homogène moyennement carburé (à hauteur de 0,4%mass). Toutefois, ce résultat est aussi observé pour les aciers très faiblement carburés ($\%C^* < 0,1\% \text{mass}$). Les traitements thermiques et mécaniques tout comme la présence d'éléments en solution solide comme le phosphore sont autant de possibilités pour arriver à ce résultat final. Cependant, là encore, des exceptions sont à recenser. Les échantillons trempés présentent bien évidemment des duretés bien plus élevées (supérieure à 300Hv) tout comme les objets aux structures écrouies (supérieure à 250Hv) mais ils demeurent minoritaires dans le corpus étudié. Enfin, quelques échantillons (moins de 5) de nature ferritique présentent de faibles duretés ($< 110\text{Hv}$).

II. Provenance du métal

L'étude de la composition des inclusions a permis d'étudier la provenance du métal utilisé pour la fabrication des armures. La démarche a été décomposée en différentes étapes. La signature chimique des inclusions a d'abord été étudiée sur les éléments majeurs afin de mettre en évidence des familles d'inclusions au sein d'un même échantillon par un tri statistique explicité dans le Chapitre 3. Cette étape a permis d'identifier les inclusions issues de la réduction (ou de l'affinage dans le cas du procédé de réduction indirecte) ainsi que d'étudier l'hétérogénéité de l'origine du métal au sein d'un même échantillon.

La suivante consiste à déterminer à quel procédé de réduction (directe ou indirecte) la (ou les) familles définies sont associées¹⁰⁵. Seules celles associées au procédé de réduction directe pourront, en effet, faire l'objet d'une étude de provenance pour les raisons explicitées au Chapitre 1 et au Chapitre 3.

La signature chimique des échantillons a ensuite été étudiée pour des groupes d'objets issus d'un même lieu de fabrication, en prenant en compte le manganèse et le phosphore, éléments majeurs caractéristiques de certaines régions de production, puis les éléments traces. Enfin, des tests de compatibilité chimique ont été effectués avec des ensembles géochimiques de production pertinents dans le cadre du corpus étudié, tels la Lombardie.

1) Différentes origines du métal

a) *Au sein d'un même échantillon*

Dans la partie précédente (voir p.199) des structures constituées de bandes de métal de nature différente ont été identifiées. Les hétérogénéités en carbone observées sous cette forme peuvent être causées par celle de la loupe initiale, mais également résulter d'un assemblage de plusieurs feuilles ou lopins de métal par soudure. Les analyses inclusionnaires apportent ici un nouvel éclairage car elles permettent de distinguer des familles d'inclusions et donc potentiellement d'identifier différents groupes de provenance sur un même échantillon, c'est à dire plusieurs lopins de métal d'origine différente qui auraient été soudés ensemble.

La figure 120 illustre l'exemple de la défense de tête H26 où un fer phosphoreux est associé à un acier faiblement carburé. La méthode définie par A. Disser et al., (A. Disser et al., 2014) pour identifier les familles d'inclusions a été suivie dans ce travail. Pour rappel une classification ascendante hiérarchique est d'abord effectuée sur les données des éléments majeurs (composés non réduits). Quatre groupes ont été définis ici. Puis une Analyse en Composantes Principales (ACP) est

¹⁰⁵ Les résultats sur les procédés de réduction sont détaillés dans une partie spécifique p.115.

réalisée. Les points sont alors colorés selon le groupe d'appartenance des inclusions défini par la classification. La cohérence des groupes définis est ensuite vérifiée par l'analyse des bivariés correspondants (voir Chapitre 1 et Chapitre 3)

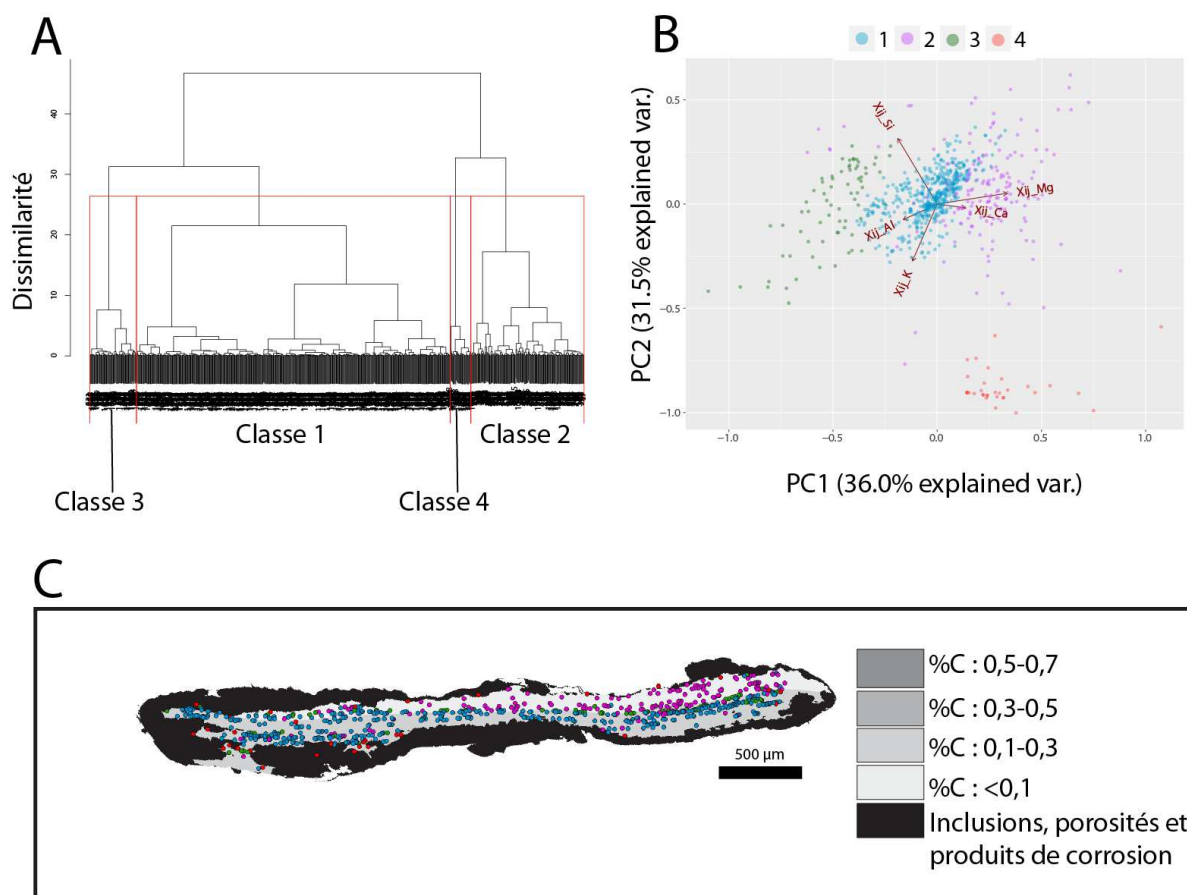
Pour l'échantillon H26, les familles 1 et 2 sont spatialement bien différenciées. La classe 2 est située dans la partie correspondant au fer phosphoreux, la 1 dans l'acier faiblement carburé¹⁰⁶ (voir figure 120). Ces résultats corroborent donc l'hypothèse d'un assemblage par soudure de deux lopins de métal ou de tôles de métal de nature différente.

Sur la vingtaine de structures en bandes observées, des familles d'inclusions distinctes et spatialement différenciées ont pu être mises en évidence dans quatre autres cas¹⁰⁷. Il s'agit des échantillons issus d'un arrière-bras d'origine indéterminé (K229a), d'une plaque de broigne de Laquenexy (34820 434 1), et de deux échantillons appartenant à l'armure de Sainte Suzanne (STS6 et STS9).

Des familles d'inclusions différentes ont été mises en évidence sur d'autres échantillons qui ne présentaient pas de structures en bandes comme c'est le cas de l'échantillon G436_ech1 issu d'un cuissard d'origine allemande trempé. Un résumé du tri inclusionnaire effectué pour chaque échantillon est présenté dans le volume annexe.

¹⁰⁶ Les deux autres familles, de taille beaucoup plus réduite, ne présentent pas des rapports élémentaires homogènes. La classe 3 est dispersée selon le potassium et la 4 selon le calcium (voir volume Annexe)

¹⁰⁷ Les résultats détaillés des analyses sont présentés dans le volume Annexes pour ces échantillons



b) Comparaison de la signature chimique des éléments d'armures supposés issus d'un même centre de fabrication

Dans le corpus étudié, trois grands centres de fabrication ont été identifiés : « l'Allemagne », « L'Italie » et la « France ». Le groupe « Allemagne » rassemble des pièces supposées avoir été fabriquées dans des lieux précis comme Nuremberg (9 d'entre eux), Augsburg (4 d'entre eux), et Brunswick (1 élément), ou simplement désignées comme de typologie « allemande ». Le groupe « Italie » comprend des pièces supposées avoir été fabriquées en Italie du Nord, pour la plupart sans doute à Milan ou peut être dans d'autres villes comme Brescia. Elles sont dites de « typologie italienne ». Le groupe « France » rassemble les pièces dites de typologie « française », leur lieu précis de fabrication est inconnu. Les armures de Sainte Suzanne supposée de fabrication italienne, et de François de Montmorency, supposée de fabrication française seront exclues des analyses dans un premier temps. Le tableau 24 et le tableau 25 rassemblent les armures appartenant à ces trois groupes pour lesquelles une étude de provenance a pu être envisagée.

Dans les paragraphes qui vont suivre, nous allons nous pencher sur la cohérence chimique de ces trois groupes en suivant plusieurs étapes. Le manganèse et le phosphore sont considérés comme des éléments caractéristiques de certaines régions de production, par conséquent nous vérifierons d'abord la présence de ces deux éléments au sein des échantillons. Ensuite, l'analyse en composantes principales sera utilisée pour étudier la dispersion de ces signatures chimiques sur les éléments traces.

Chapitre 4 : Résultats des analyses menées sur les échantillons

Tableau 23 - Eléments d'armures appartenant au groupe « Italie » considérés dans la suite

Armure ou Élément	Désignation	Datation	Lieu de fabrication supposé	Marque ou poinçon	Description marque et/ou attribution au travail d'un armurier	Musée ou lieu de conservation	Nombre de prélèvements	Désignation des échantillons
930 1 892	Brassard	1460	Italie du Nord	Présence	Lettre B couronnée	Musée Dobrée	1	930 1 892_T
930 1 904	Gantelet	1450-1460	Italie du Nord	Présence	1 poinçon sur la poignée	Musée Dobrée	1	930 1 904_T
930.1.891	Epaulière	1470	Italie du Nord	Absence		Musée Dobrée	1	930.1.891
H35	Salade	XVe siècle	Italie du Nord	Absence		Musée de l'Armée	1	H35
930 1 895	Cubitière	XVe siècle	Italie du Nord	Présence	3 poinçons (Y couronné) associés à Pier Innocenzo da Faerno armurier Milanais	Musée Dobrée	1	9301895-2
PAM	Armet	Entre 1450 et 1510	Italie du Nord	Absence		Office du tourisme de Pont à Mousson	1	LAM46491_1 LAM46491_2 LAM46492
951183	Morion	2ème moitié du XVIe siècle ou le 1er quart du XVIIe siècle	Italie du Nord	Absence		Musée Lorrain	1	951183
W.C A.143	Morion	1580	Italie du Nord	Absence		Wallace Collection	2	W.C A.143A W.C A.143B
W.C A.73	Salade	1500	Italie	Absence		Wallace Collection	1	W.C A.73
W.C A.235	Colletin	1600	Italie du Nord	Absence		Wallace Collection	1	W.C A.235
W.C A.144	Morion	1600-1610	Italie du Nord	Absence		Wallace Collection	1	W.C A.144
W.C A.180	Défense de tête	1630	Italie du Nord	Absence		Wallace Collection	1	W.C A.180

Chapitre 4 : Résultats des analyses menées sur les échantillons

Tableau 24 -Eléments d'armures appartenant au groupe « Allemagne » considérés dans la suite

Armure ou Élément	Désignation	Datation	Lieu de fabrication supposé	Marque ou poinçon	Description marque et/ou attribution au travail d'un armurier	Musée	Nombre de prélèvements	Désignation des échantillons
GNM1312	Epaulière	1500	Allemagne / Nuremberg	Présence	Marque de Valentin Siebenbürger armurier nurembergeois	German National Museum	1	GNM1312
W.C A.245	Cubitière	1524	Allemagne/ Augsburg	Absence	Kolman Helmschmied	Wallace Collection	1	W.C A.245
9301912_1	Plastron	1540	Allemagne	Absence		Musée Dobrée	2	9301912_1_ech1 9301912_1_ech1
1120	Plastron	1546	Allemagne/ Nuremberg	Absence		German National Museum	1	1120
W.C A.250	Partie supérieure d'une armure de joute	1550	Allemagne/ Augsburg	Absence		Wallace Collection	1	W.C A.250
H1G935	Plastron et Bavière	1560	Allemagne	Absence		Higgins Armory Museum	2	H1G935B
E	Bourguignotte	1580-1600	Allemagne/ Nuremberg	Présence	Marque de Nuremberg et d'un maître M*I peut être M.Scneider	West Bohemian Museum	1	E
930.1.912.2	Dossière	XVI ^e siècle	Allemagne	Absence		Musée Dobrée	1	930.1.912.2_T
G27618	Epaulière	1560	Allemagne	Absence		Musée de l'Armée	2	G27618_ech1 G27618_ech2
G40	Eléments d'une armure de cavalier	1533	Allemagne/ Nuremberg	Absence	Armure réalisée par Hans Ringler, armurier nurembergeois	Musée de l'Armée	4	G40-2 G40-3
930_1_911	Cuissard	XVI ^e siècle	Allemagne/ Augsburg	Absence		Musée Dobrée	1	930_1_911
951180.1	Armet	1510-1520	Allemagne	Absence		Musée Lorrain	1	951180.1
G435-Gauche	Cuissard	1535-1540	Allemagne/ Nuremberg	Présence	Marque de la ville de Nuremberg et de Valentin Siebenbürger, armurier nurembergeois	Musée de l'Armée	3	G435_ech1 G435_ech2 G435_G3
G436-Gauche	Cuissard	1535-1540	Allemagne/ Nuremberg	Présence	Marque de la ville de Nuremberg et de Valentin Siebenbürger, armurier nurembergeois	Musée de l'Armée	6	G436_ech1 G436_ech2 G436_ech3 G436_G4 G436_G5 G436_G6

Armure ou Élément	Désignation	Datation	Lieu de fabrication supposé	Marque ou poinçon	Description marque et/ou attribution au travail d'un armurier	Musée	Nombre de prélèvements	Désignation des échantillons
G435-Droit	Cuissard	1535-1540	Allemagne/Nuremberg	Présence	Marque de la ville de Nuremberg et de Valentin Siebenbürger, armurier nurembergeois	Musée de l'Armée	2	G435_D1 G435_D2
SN	Dossière	1535-1540	Allemagne/Nuremberg	Présence	Marque de la ville de Nuremberg	Musée de l'Armée	1	SN
H	Défense de tête	1600-1630	Allemagne/Nuremberg	Présence	Marque de la ville de Nuremberg et celle d'un maître	West Bohemian Museum	1	H
W.C.A.65	Armure articulée	1620	Allemagne/Augsbourg	Présence	Poinçon sur le gantelet attribué à Augsbourg?	Wallace Collection	1	W.C.A.65
HPO2608	Cubitière et arrière bras	1480	Allemagne	Absence		Musée de l'Armée	2	HPO2608_1 HPO2608_2

Tableau 25 - Eléments d'armures appartenant au groupe « France » considérés dans la suite

Armure ou Élément	Désignation	Datation	Lieu de fabrication supposé	Musée	Nombre de prélèvements	Désignation des échantillons
G143	Bourguignotte	1550	France	Musée de l'Armée	1	G143_ech1 G143_ech2
895_414	Gantelet	XVI ^e siècle	France	Musée Dobrée	1	895_414
895.4.1.3	Gantelet	XVI ^e siècle	France	Musée Dobrée	2	895.4.1.3_1 895.4.1.3_1
G42	Bourguignotte	1560	France	Musée de l'Armée	2	G42_ech2
W.C.A.297	Pièce d'armure articulée	1630	France	Wallace Collection	1	W.C.A.297

i. Filtre des teneurs absolues en manganèse et phosphore

La figure 121 présente les teneurs moyennes pondérées par la surface (voir Chapitre 3), en phosphore mesurée dans les inclusions en fonction de celles en manganèse pour les groupes « Allemagne », « Italie » et « France ». La comparaison des teneurs absolues ne peut pas être considérée comme un critère définitif pour définir une compatibilité ou une incompatibilité chimique

du fait de leurs fortes variations au sein des inclusions¹⁰⁸. Cependant il est possible de raisonner en termes « d'absence » ou de « présence » de ces éléments chimiques pour formuler des hypothèses. Compte tenu des limites de détection des éléments mineurs par MEB-EDS (voir Chapitre 3) nous considérerons l'élément comme « absent » des inclusions lorsque sa teneur est en dessous de 0,5%mass.

Excepté pour les échantillons, H35 et 951183, en couleur sur la figure 121, l'ensemble des armures appartenant au groupe « Italie » contient du manganèse à teneur supérieure à 2%mass. En revanche, ces échantillons ne contiennent pas de phosphore (%massP<0,5) ou très peu pour l'armure WCA144.

Pour les armures allemandes, une plus grande diversité est observée. Environ la moitié d'entre elles possède du manganèse en quantité variable mais inférieure à 8%mass et pas de phosphore. L'autre moitié ne contient pas de manganèse (%massMn<0,5) et jusqu'à 1,5%mass de phosphore. Il s'agit des échantillons SN, 1120, H, E, 9301912_1_ech2, HPO2608_1, HPO2608_2. Les échantillons 951180.1 WCA65 et GNM1312 illustrent un cas intermédiaire puisqu'ils possèdent de faible teneur en manganèse. Seuls les échantillons WCA250 et SN ne contiennent ni manganèse ni phosphore.

Enfin, les armures issues du groupe « France » contiennent quelques pourcents de manganèse, excepté pour un échantillon WCA297, et pas de phosphore.

¹⁰⁸ Et ce pour un même minerai. Ce phénomène est à mettre en relation directe avec les conditions thermodynamiques hétérogènes qui règnent dans le fourneau (voir Chapitre 1)

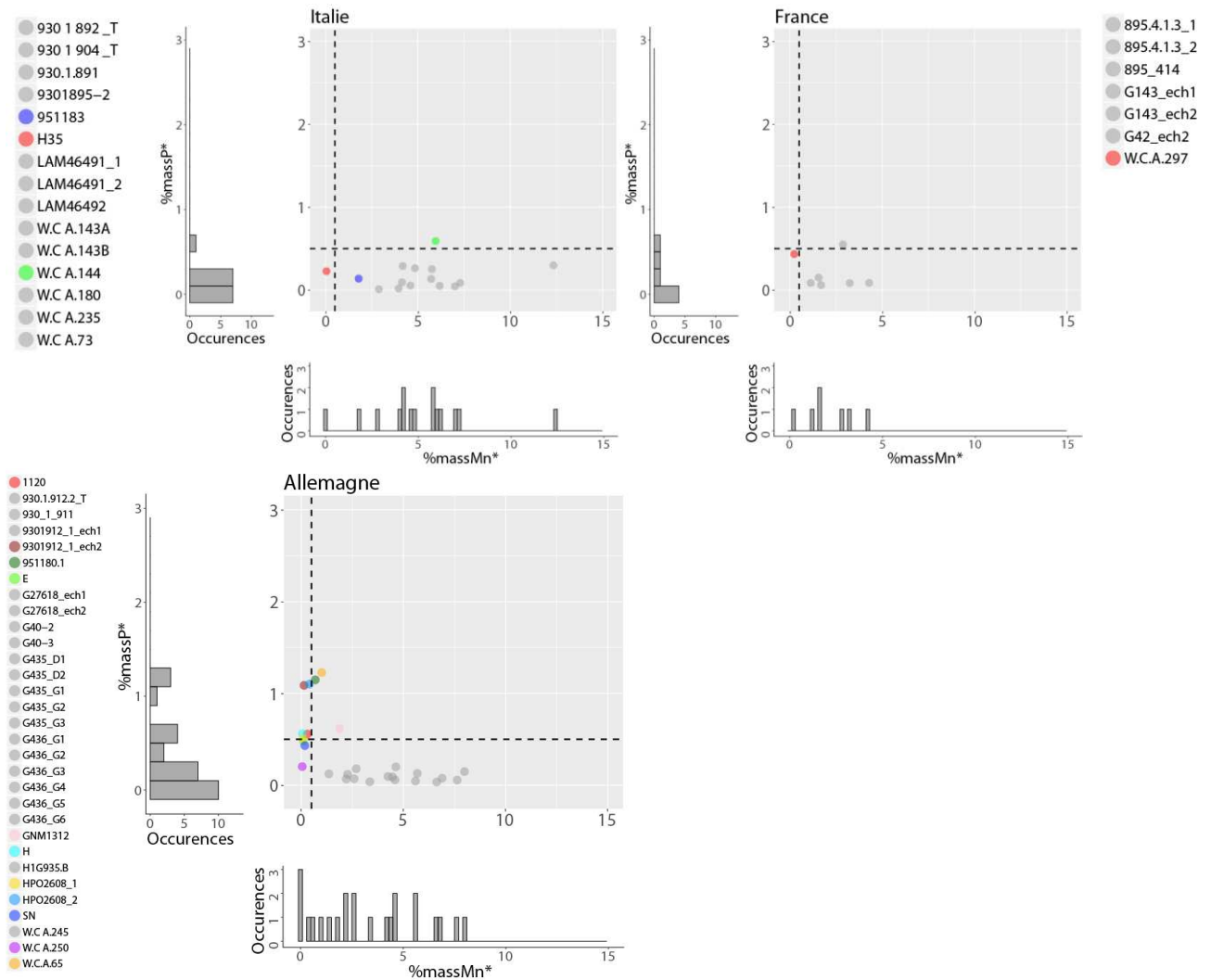


Figure 121 - Bivariés Mn/P pour les échantillons des groupes « Allemagne », « Italie » et « France ». Chaque point représente la teneur moyenne pondérée par la surface de chaque échantillon

La comparaison des teneurs en phosphore et manganèse laisse déjà entrevoir une plus grande cohérence du groupe « Italie » (présence de manganèse et peu ou pas de phosphore) et « France » (présence de manganèse et peu ou pas de phosphore) par rapport au groupe « Allemagne », dont les teneurs sont plus dispersées. La figure 122 colore les points du groupe « Allemagne » par centre de fabrication. Les teneurs en manganèse et phosphore sont dispersées et ce, quel que soit le centre de fabrication concerné.

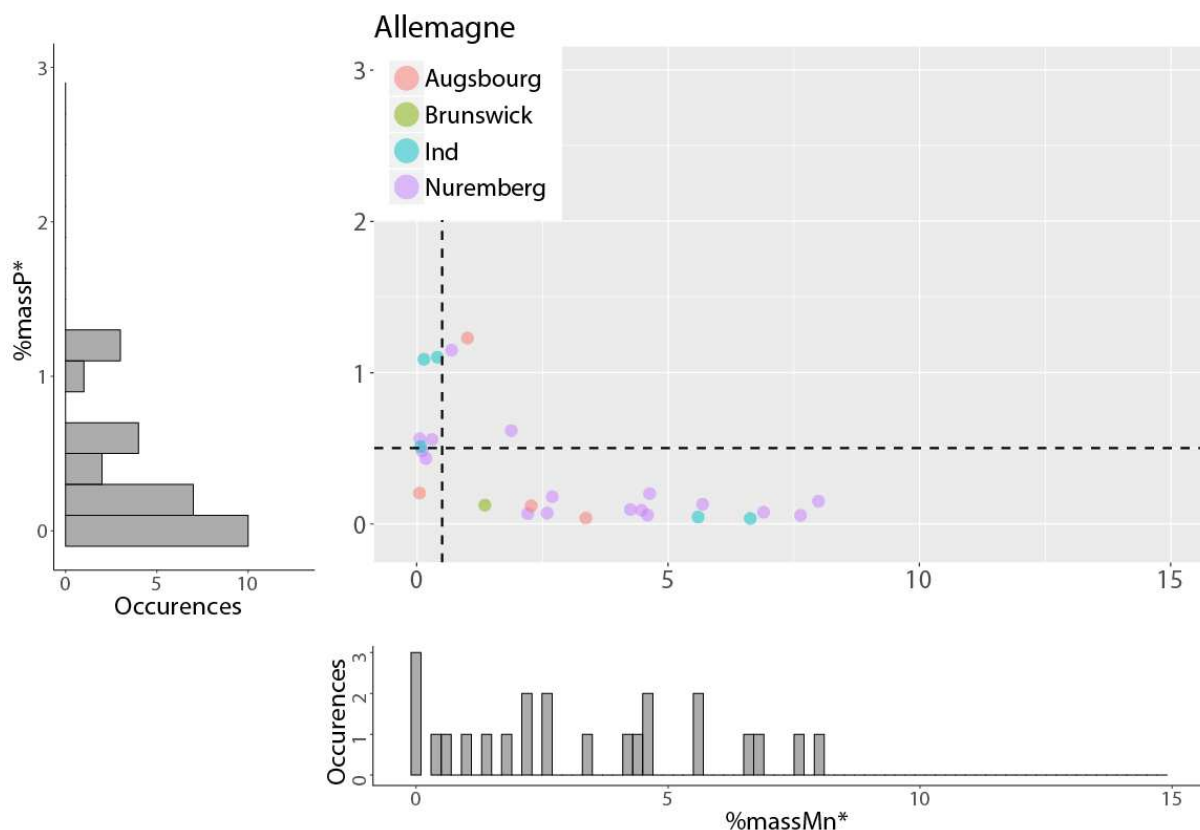


Figure 122 - Bivariés Mn/P pour les échantillons du groupe « Allemagne ». Chaque point représente la teneur moyenne pondérée par la surface de chaque échantillon

Ces résultats vont maintenant être confrontés à ceux obtenus sur les éléments traces par analyse multivariée.

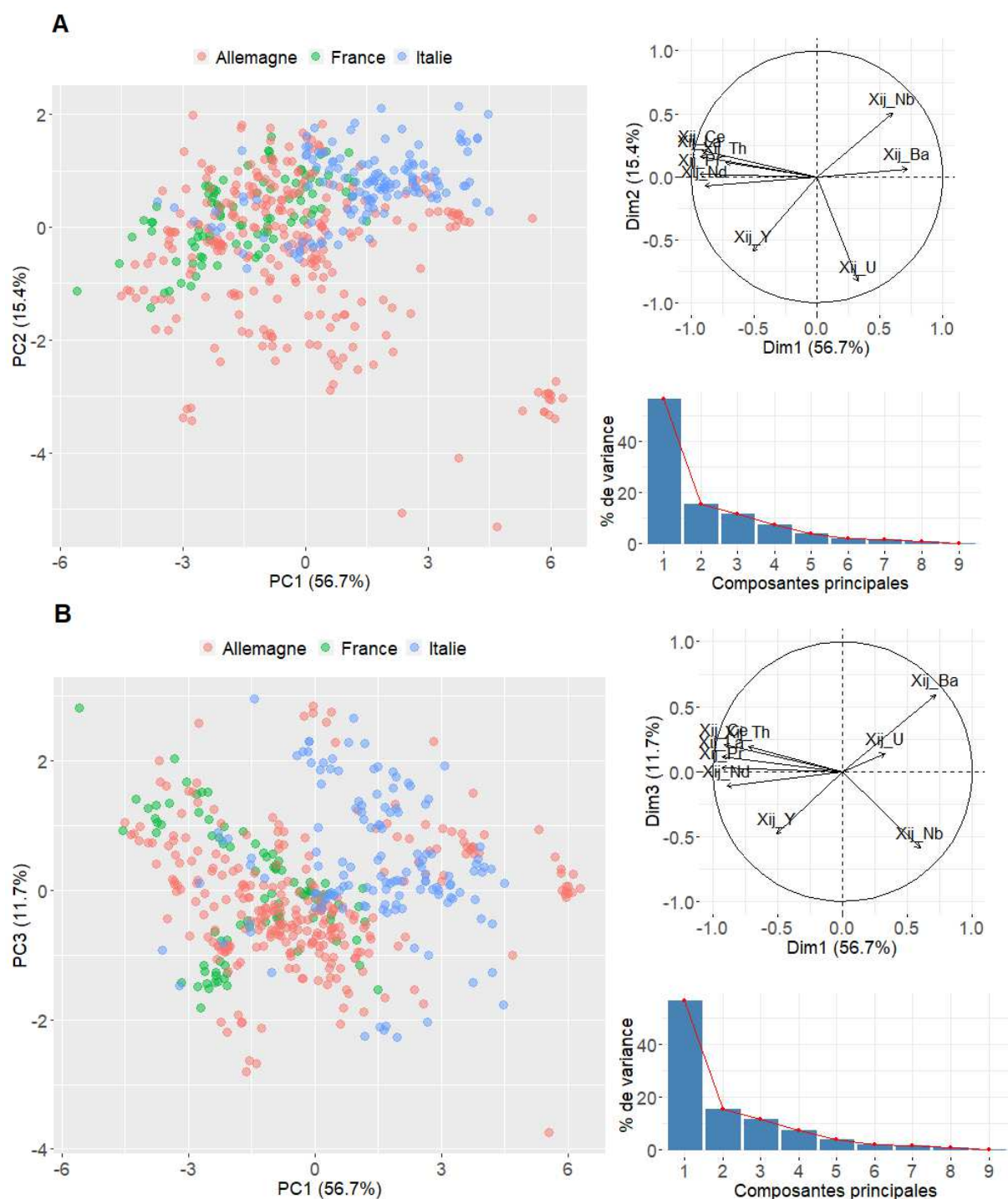
ii. Analyse multivariée sur les éléments traces : aperçu général

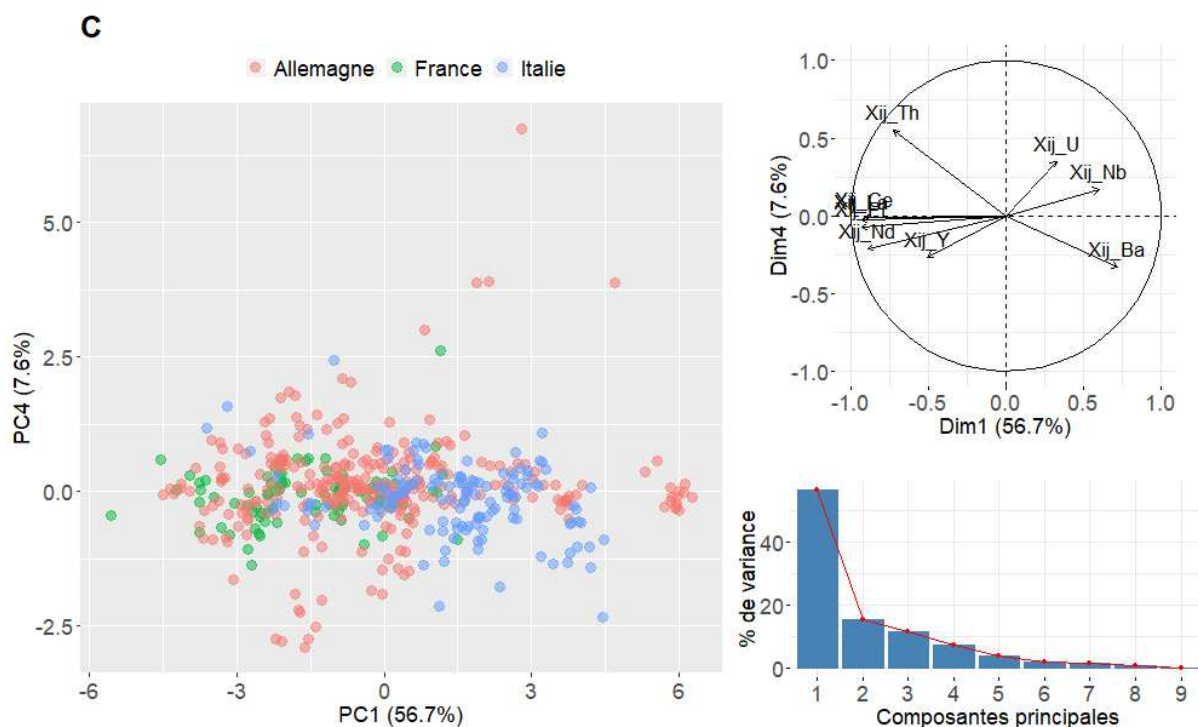
Une ACP a été réalisée sur les données transformées en log-ratio¹⁰⁹ des éléments traces au-dessus de la limite de détection, à savoir Y, Nb, Ba, La, Ce, Pr, Nd, Th, U, pour les armures supposées de fabrication allemande, italienne et française. Le barium est susceptible d'être pollué par les cendres de charbon de bois. Toutefois nous avons choisi de le conserver car il faisait partie des éléments toujours bien quantifiés au sein des inclusions. De plus, c'est un élément caractéristique de la signature chimique lombarde car il demeure en principe peu affecté par les éventuels ajouts des cendres du charbon de bois où il est relevé en quantité moindre ou du même ordre de grandeur que dans les minerais de cette région (S. Leroy, 2010, p. 206). Par conséquent, il pouvait s'avérer utile pour discriminer les signatures chimiques des armures supposées de fabrication italienne.

Les résultats de l'analyse multivariée sont résumés figure 123. Les quatre premiers axes comprennent 90% de la variance cumulée. Sur les axes PC1/PC2, un nuage de points central est

¹⁰⁹ Voir p.213 pour le détail du calcul

visible, superposant les trois groupes d'armures. Cependant, une grande partie des points appartenant au groupe « Italie » se détache des groupes « France » et « Allemagne », essentiellement selon la variable X_{ij_Ba} . Le groupe « Allemagne » est plus éclaté que le groupe « Italie ». Quelques points y appartenant sont même isolés du nuage de points central. Ceci suggère une variabilité des signatures chimiques plus forte pour ce groupe, déjà perçue sur les éléments manganèse et phosphore. Le nuage de points français se recouvre toujours largement avec le groupe « Allemagne » et ce quelle que soient les projections considérées.





Afin de clarifier la distinction entre les différents centres de production, nous allons à présent les étudier en détail par groupe d'armure, en commençant par l'Italie.

iii. Corpus italien

Douze éléments d'armure sont supposés de fabrication italienne. Afin d'évaluer la dispersion de leur signature chimique, une ACP a été réalisée sur les données transformées en log-ratio des éléments traces. Si les projections d'inclusions de différents échantillons se superposent une même provenance pourra être envisagée. Dans le cas inverse, on pourra supposer que l'on a affaire à des groupes d'approvisionnements distincts.

Les résultats sont présentés figure 124 et figure 125. Les projections sur les axes PC1 et PC2 présentent un dense regroupement d'échantillons dans la partie supérieure et quelques groupements de points plus isolés. Les trois premiers axes comprennent 90% de la variance cumulée. La troisième composante isole l'échantillon H35 mais ne semble pas apporter d'autre information pour différencier les groupes d'échantillons. Par conséquent, dans la suite de l'exposé, seules les deux premières composantes seront discutées.

Afin d'améliorer la lecture du graphique, chaque élément d'armure dans le nuage est identifié successivement par une couleur différente sur la figure 125. Lorsque plusieurs échantillons ont été prélevés sur un même élément d'armure, ils seront également matérialisés sur le graphique par une couleur différente.

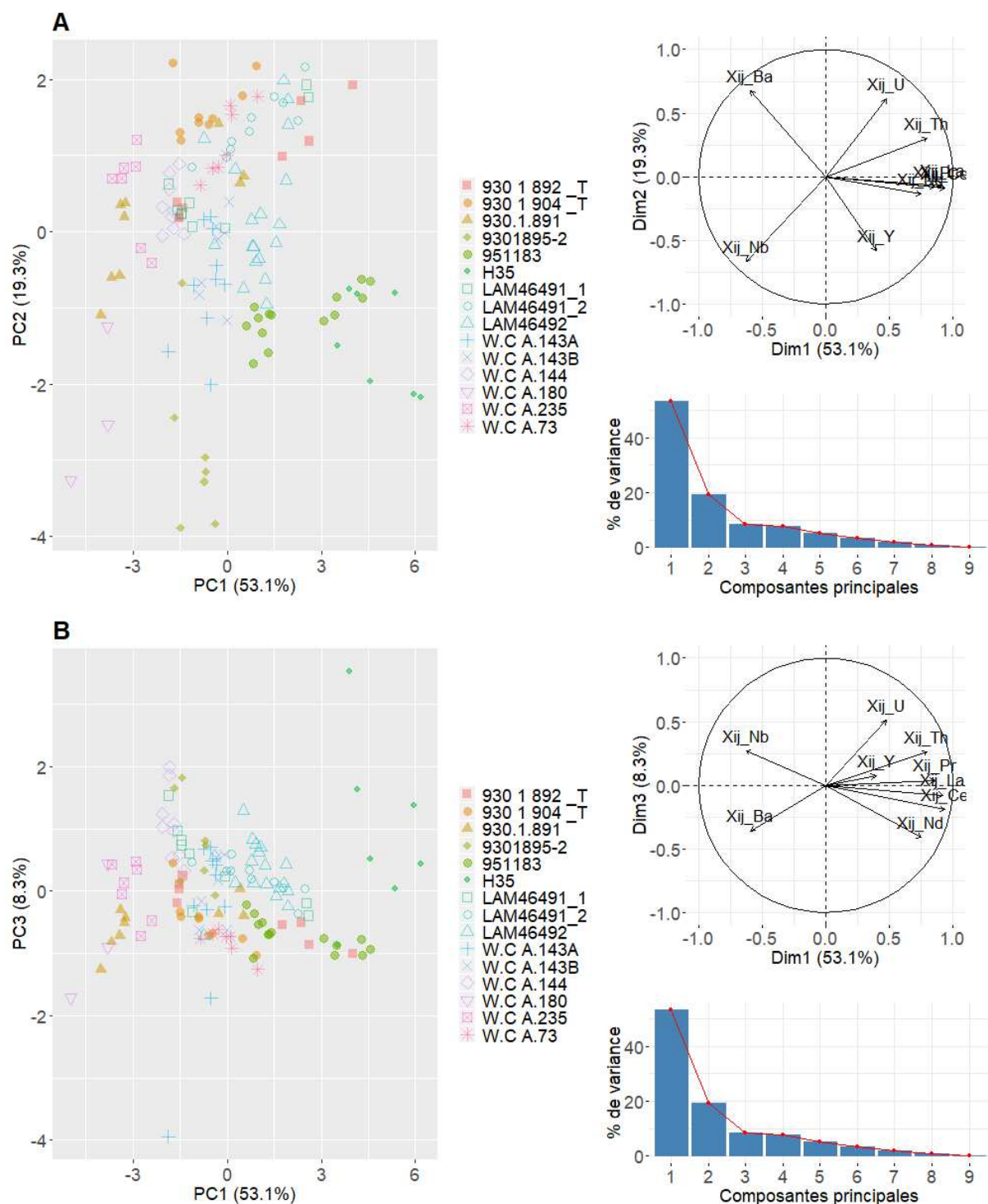
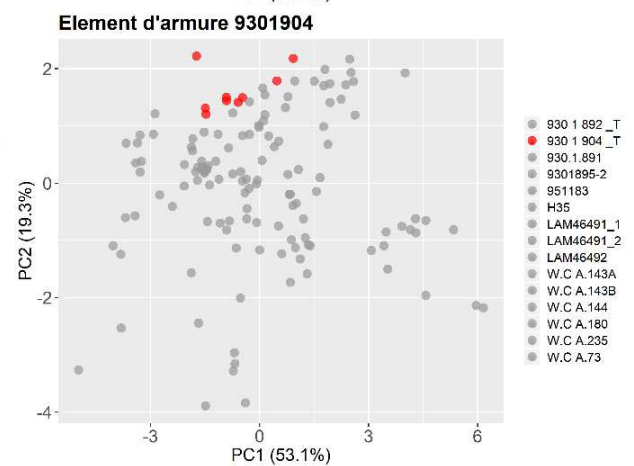
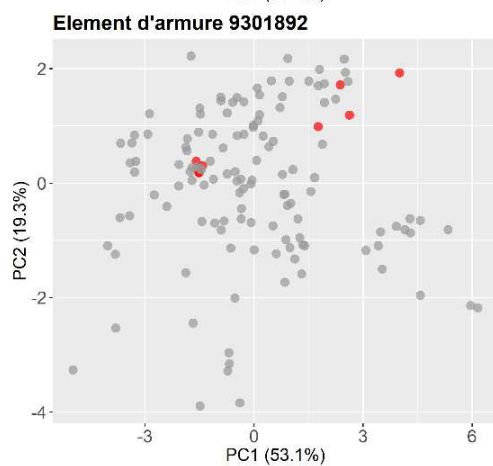
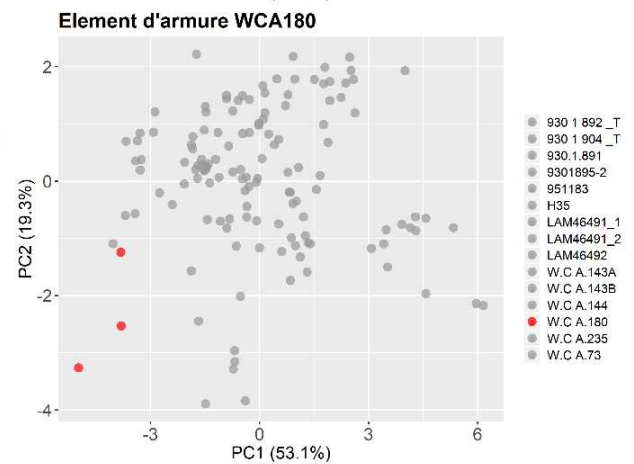
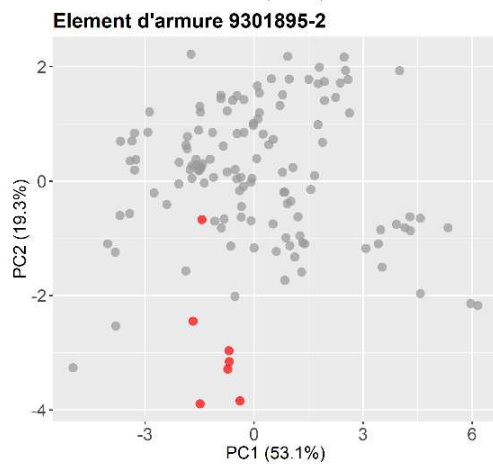
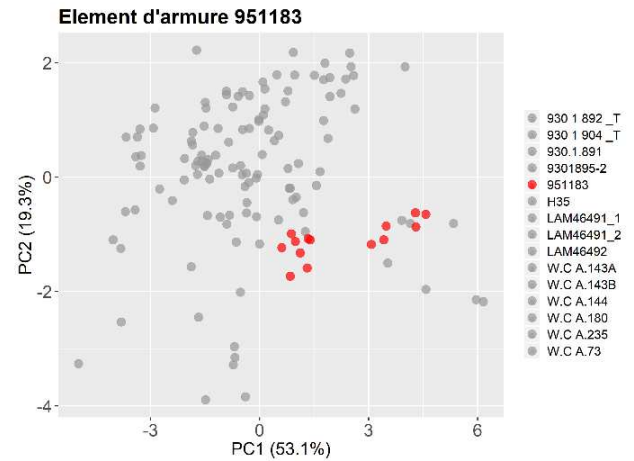
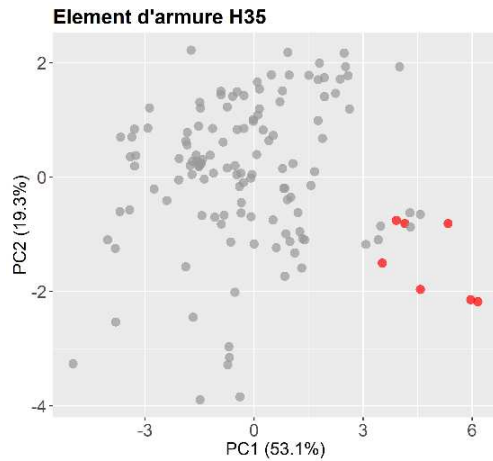


Figure 124 - Synthèse des résultats de l'ACP réalisée sur les données des éléments d'armures supposés de facture italienne. « A » axes PC1 et PC2, « B » axes PC1 et PC3. Chaque point représente une inclusion analysée.

Les échantillons H35 951183 et 9301895-2 se détachent du nuage de points central sous l'influence de la variable Xij_Ba. L'armure WCA180 s'en détache également selon Xij_Nb. En revanche, les autres éléments forment un groupe relativement homogène, et ce même lorsque plusieurs échantillons ont été prélevés sur une même armure. C'est le cas de des défenses de tête PAM et WCA143.

Pour conclure il est donc possible d'établir **un groupe homogène en regroupant les échantillons WCA143A, WCA143B, 9301892_T, 9301904_T, 9301891, LAM46491_1, LAM46491_2, LAM46492, WCA144, WCA235 et WCA73**. Dans la suite il sera fait référence à ce groupe par l'appellation « **Italie_Groupe1** ».



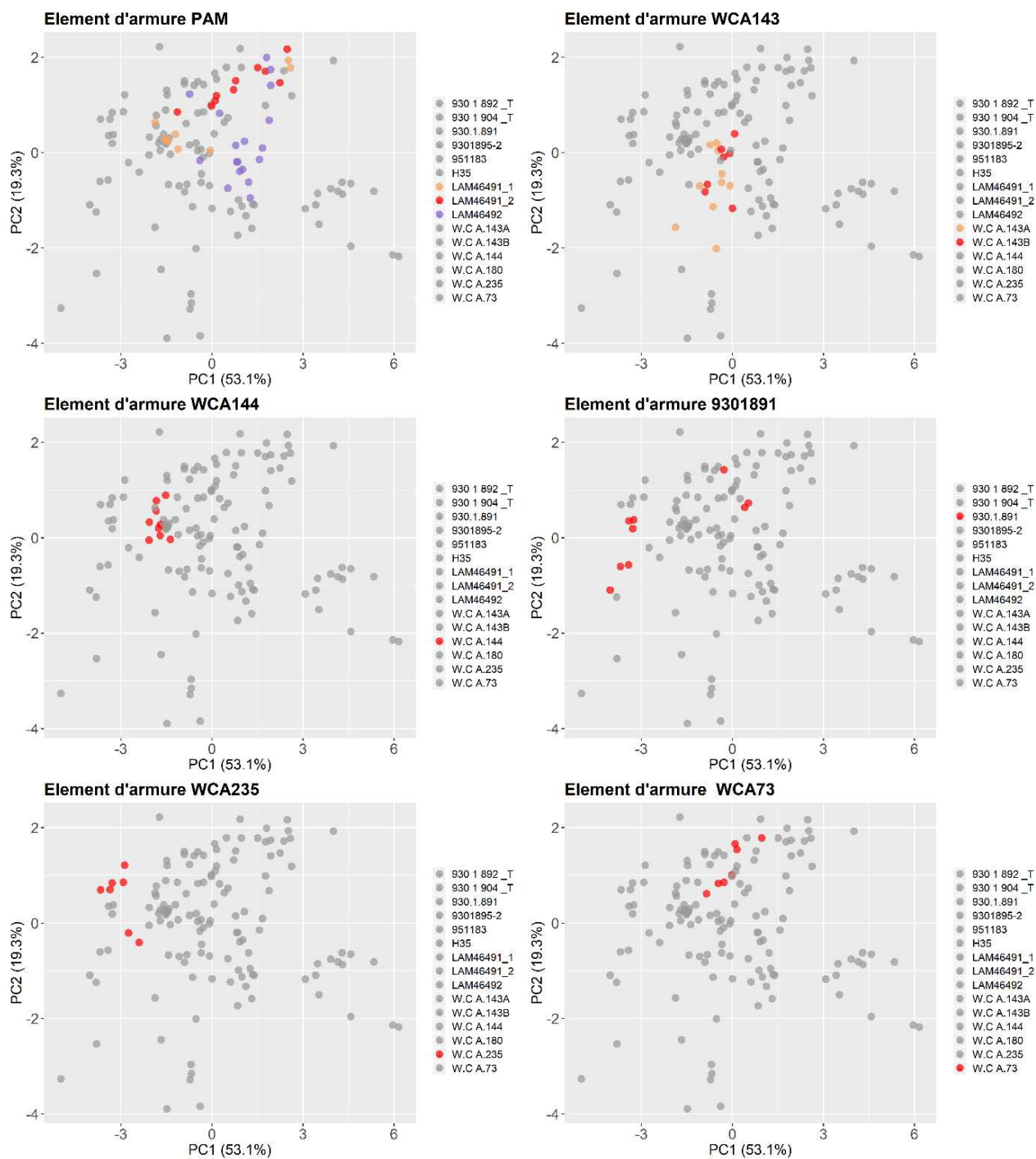


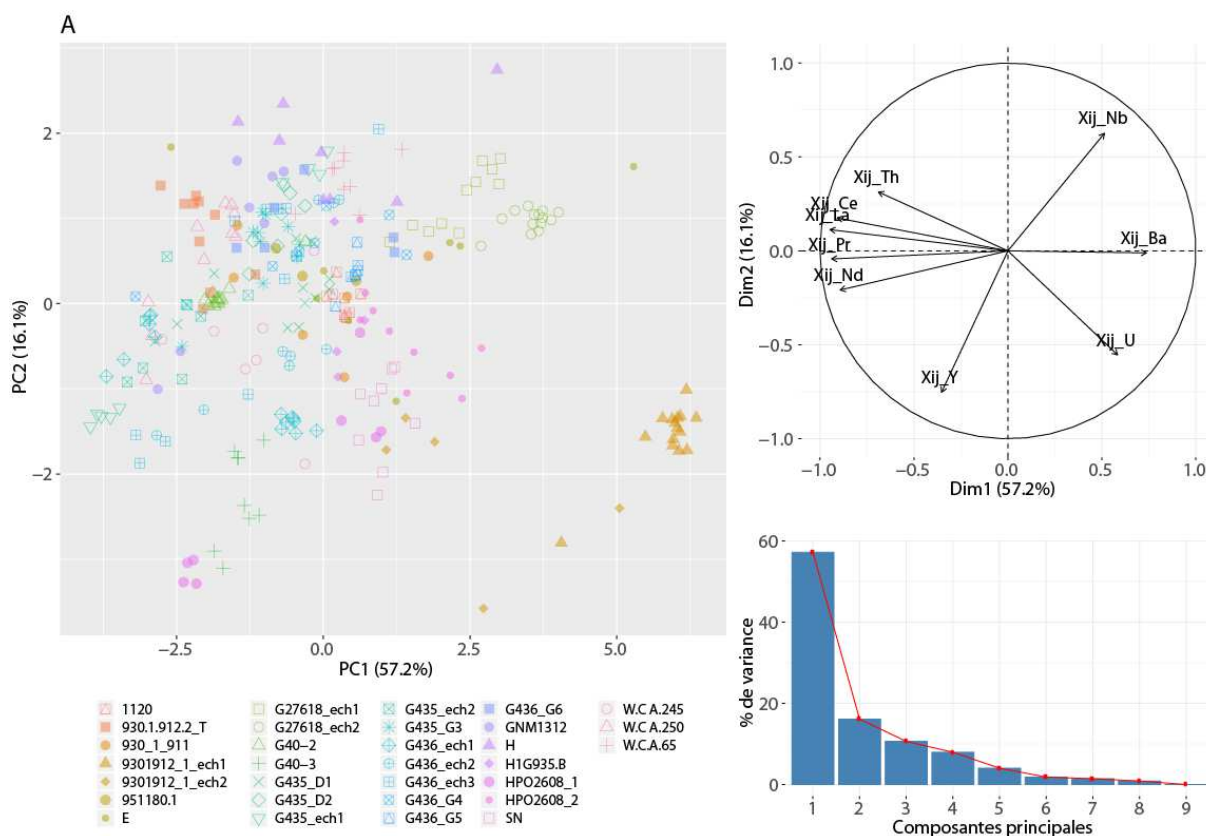
Figure 125 - Visualisation des projections de l'ACP réalisées sur les données des éléments d'armure supposés de fabrication italienne sur les composantes PC1et PC2. Chaque point représente une inclusion analysée.

iv. Corpus allemand

Le groupe « Allemagne » compte vingt éléments d'armures. Afin d'évaluer la dispersion de leur signature chimique, l'ACP a été utilisée sur les données transformées en log-ratio des éléments traces. Les projections sont visibles sur la figure 126 et la figure 127. Les trois premières composantes contiennent 90% de l'information.

Les projections sur les axes PC1 et PC2 présentent un nuage de points dense et quelques groupements de points plus isolés correspondant aux échantillons 9301912_1_ech1, 9301912_1_ech2, et G27618_ech2.

L'axe PC3 permet d'isoler les échantillons G40-3, G27618_ech1 et H1G935.B. Pour améliorer la lisibilité sur les axes PC1 et PC2, la position de chaque élément d'armure dans le nuage est différenciée sur la figure 127. Lorsque plusieurs échantillons ont été prélevés sur un même élément d'armure ils seront matérialisés sur le graphique par une couleur différente. Lorsque des assemblages par soudure sont présents sur un même échantillon, révélés par la présence de différentes familles d'inclusions ces dernières seront distinguées par un symbole différent.



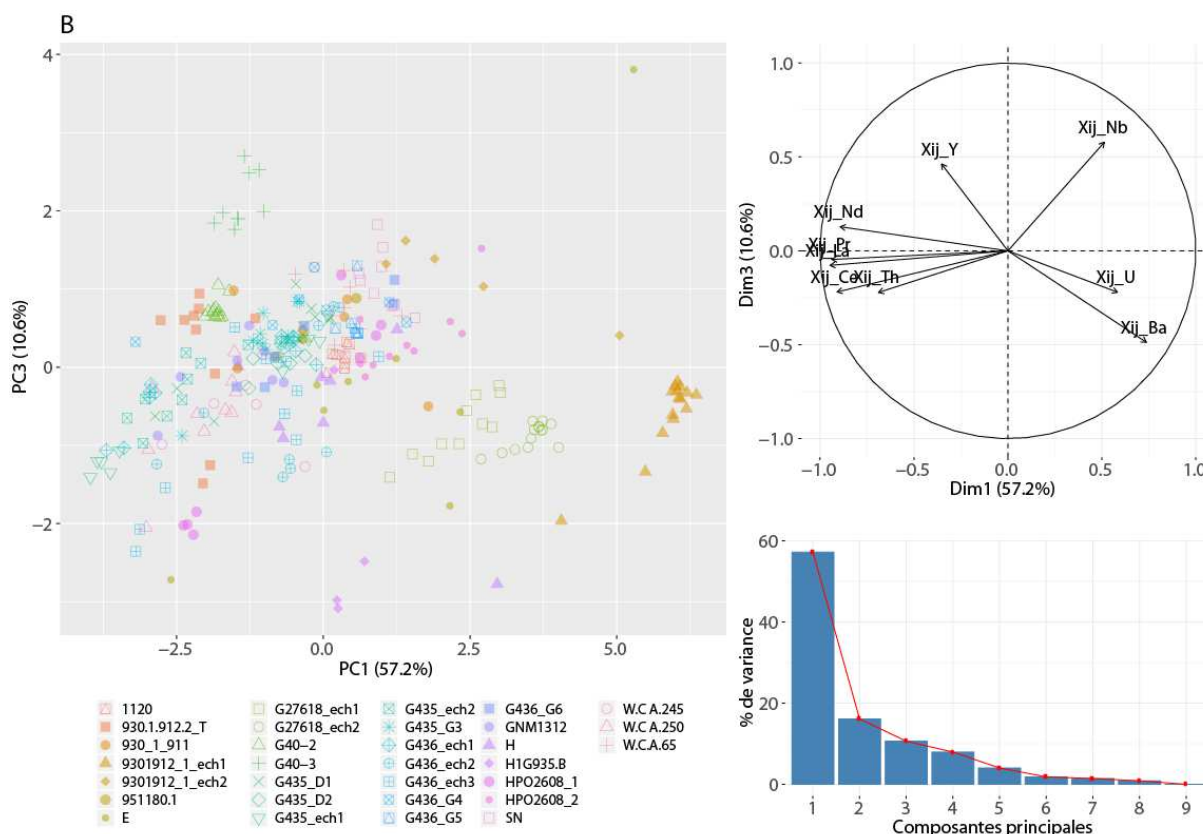


Figure 126-ACP réalisée sur les données des éléments d'armure supposés de provenance allemande et pour lesquels plusieurs prélèvements ont été réalisés. « A » axes PC1 et PC2, « B » axes PC1 et PC3. Chaque point représente une inclusion analysée.

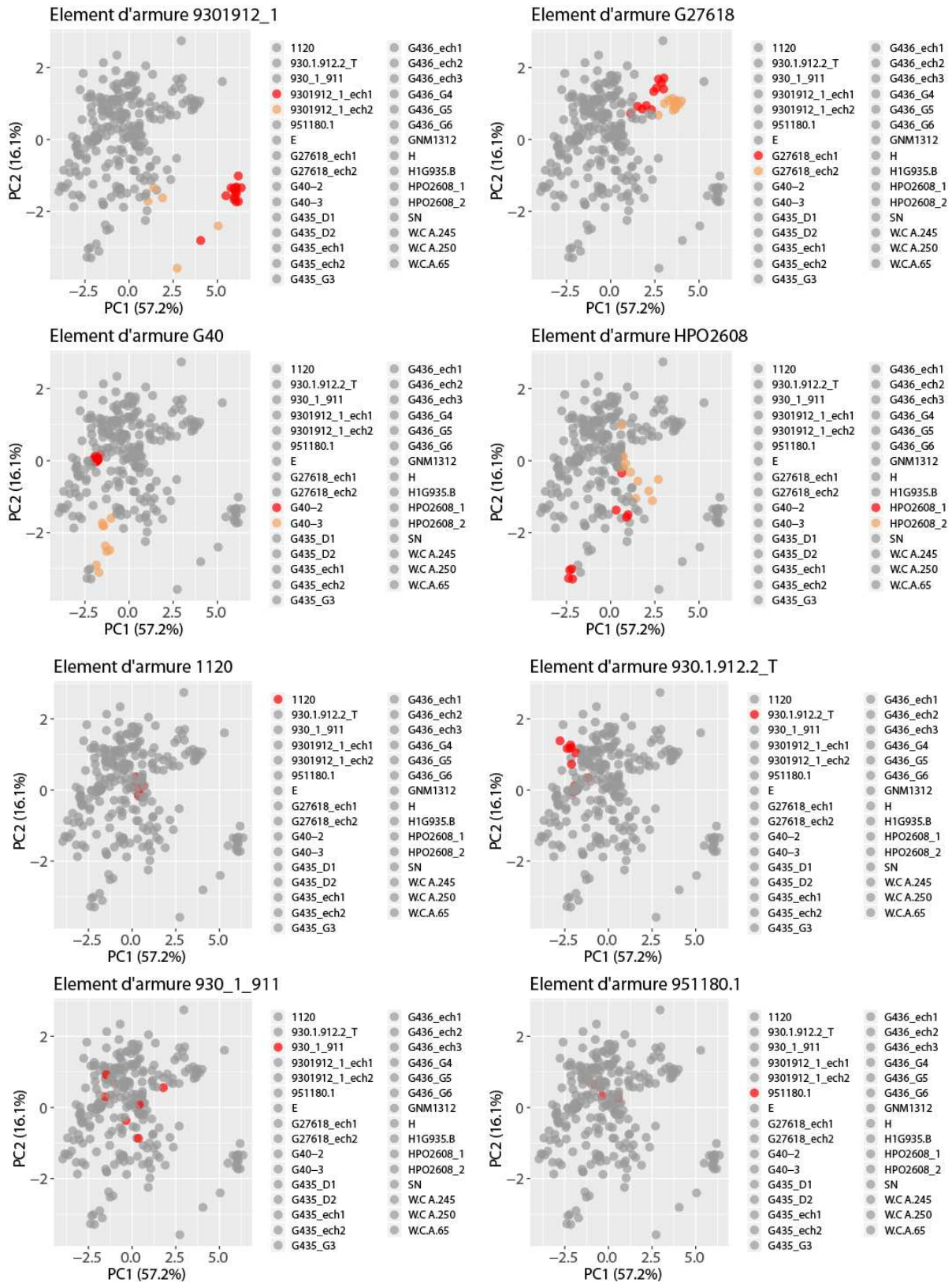
Les individus relatifs à l'échantillon 9301912_1_ech1 et 9301912_1_ech2 se recouvrent en partie. L'échantillon 9301912_1_ech1 se distingue de façon très nette du nuage de points central, les projections de l'échantillon 9301912_1_ech2 sont plus dispersées. L'échantillon G40-3 est très éloigné du G40-2, prélevé sur la même armure mais sur une autre partie de celle-ci. Il se recouvre en partie avec les inclusions de l'échantillon HPO2608_1 par ailleurs fortement dispersées selon les variables Xij_Y et Xij_Nb. Un dernier ensemble se distingue selon la variable Xij_Ba. Il s'agit des deux échantillons de l'élément G27618. Leurs projections sont proches mais ne se recouvrent pas. Ce résultat est confirmé sur la lecture des axes PC1 et PC3. Les autres échantillons forment un groupement plus dense. Toutefois quelques spécificités peuvent être observées.

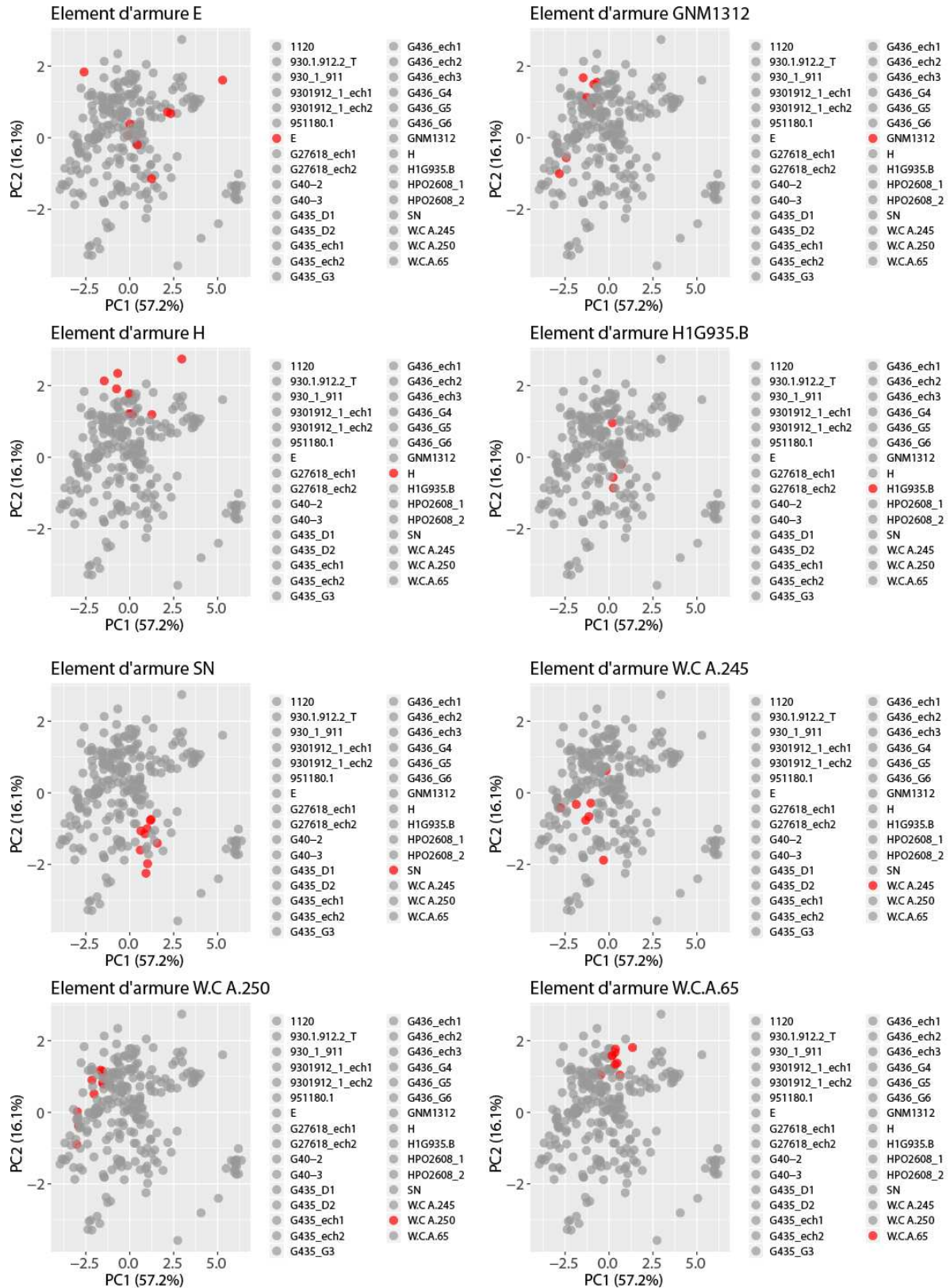
L'échantillon G435_ech1 présente deux familles d'inclusions qui sont nettement séparées. Ce résultat, déjà relevé dans le cas de l'analyse des éléments majeurs (voir p.263), se confirme avec celle des éléments traces. Sur l'élément d'armure G435_G les signatures chimiques de deux autres échantillons ont été étudiées. Elles se superposent.

Sur l'armure G436 cinq échantillons ont été étudiés. L'échantillon G436_ech1 présente deux familles d'inclusions qui sont nettement séparées. Les projections des autres échantillons de cet

élément d'armure plus ou moins dispersées se mélangent mais se distinguent de celles de l'échantillon G436_ech1 (famille d'inclusions n°2). Or, il faut rappeler que les échantillons G436_ech1 et G436_ech2 font initialement partie de la même tôle et se sont séparés lors de la réalisation du prélèvement. La soudure de deux lopins de métal d'origine différente est peut-être à l'origine de ce phénomène. La présence de familles d'inclusions différentes vient en tout cas renforcer cette hypothèse (voir figure 128).

L'échantillon E présente des projections très dispersées difficilement interprétables en termes de signature chimique. Les projections de l'échantillon SN sont légèrement isolées du groupement central et se confondent avec celles des échantillons de l'armure HPO2608. Les autres éléments d'armures se superposent dans le nuage de points central.





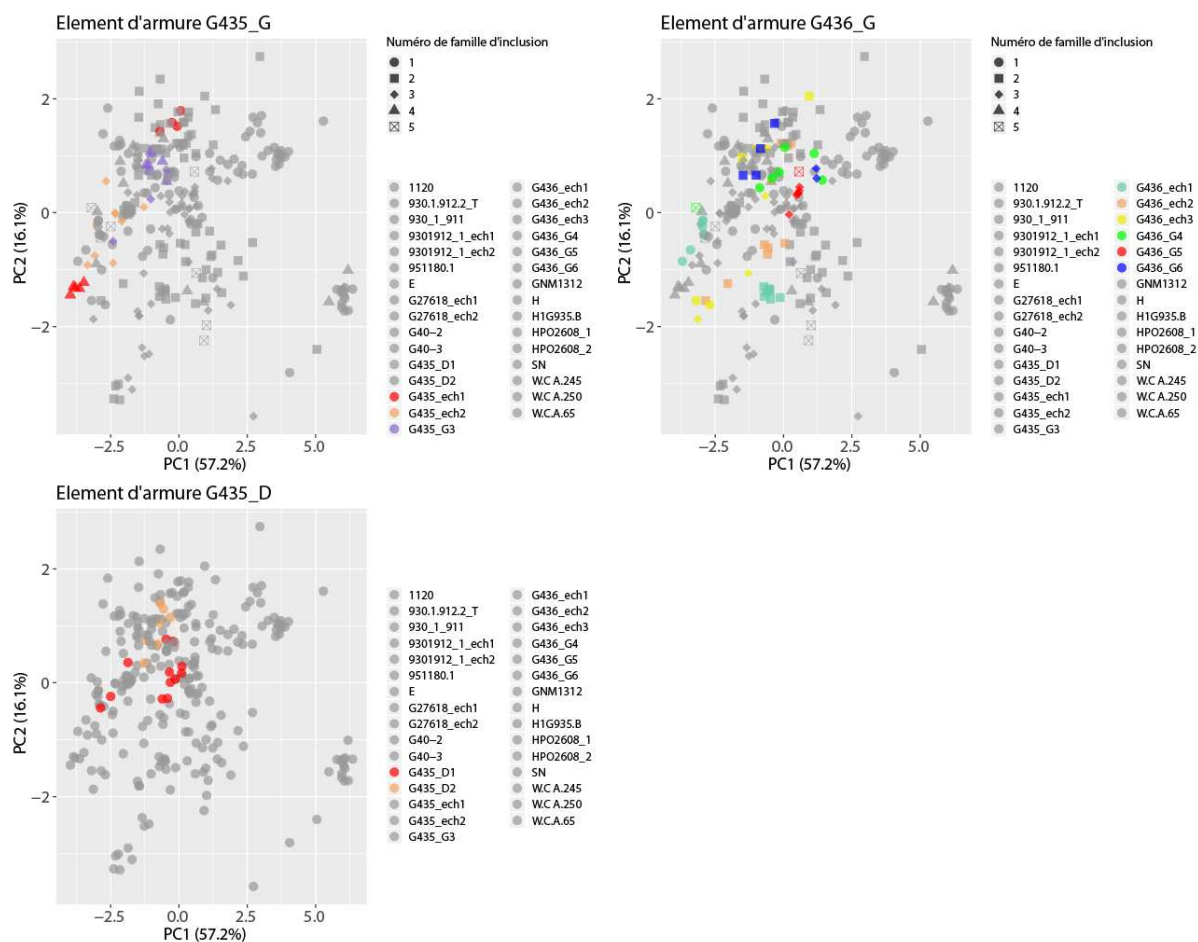


Figure 127 - Visualisation des projections de l'ACP réalisées sur les données des éléments d'armure supposés de provenance allemande sur les composantes PC1 et PC2. Chaque point représente une inclusion analysée.

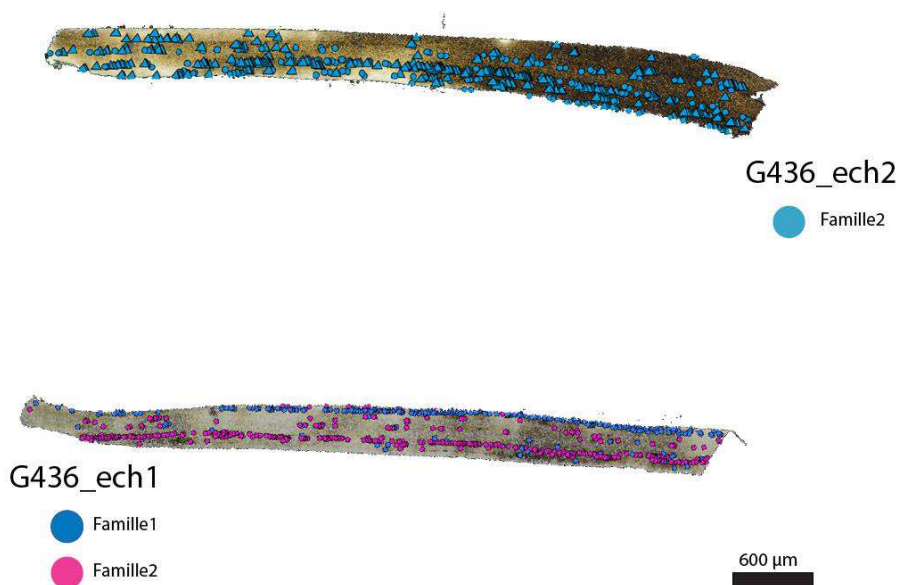


Figure 128 - Projection des familles d'inclusions sur les échantillons G436_ech1 et G436_ech2 après attaque au réactif Nital 3%

Pour conclure, le nuage de points regroupant les armures supposées de fabrication allemande semble plus hétérogène que celui formé par les armures supposées de facture italienne. Quelques échantillons ont pu être isolés du nuage de points central. Il s'agit des échantillons 9301912_1_ech1, 9301912_1_ech2, G27618_ech1, G27618_ech2, G40-3, et H1G935B. Les projections de l'échantillon E présentent une très forte dispersion difficile à relier à une signature chimique particulière.

Enfin, les projections des échantillons G435_D1, G435_D2, G435_ech1, G435_ech2, G435_G3, G436_ech1, G436_ech2, G436_ech3, G436_G4, G436_G5, G40-2, WCA250, WCA245, WCA65, 1120, 9301911, 9301912.2_T, 951180.1, GNM1312, HPO2608_1, HPO2608_2 SN et H se recouvrent largement. Dans la suite, il sera fait référence à ce groupe sous la mention : « **Allemagne_Groupe1** ». Le groupe « Allemagne » semble donc rassembler des provenances multiples. Il faut rappeler ici qu'il regroupe au moins trois centres de fabrication : Nuremberg, Augsbourg et Brunswick.

Sur la figure 129, les points ont été colorés en fonction des villes de fabrication allemandes. La figure 130 met en évidence la présence de marques sur les objets par une couleur différente car elle renforce l'hypothèse d'origine des pièces. Les résultats montrent qu'il n'existe pas de différence marquée entre les signatures chimiques des armures supposées issues de ces villes, résultat déjà observé sur les teneurs en manganèse et en phosphore.

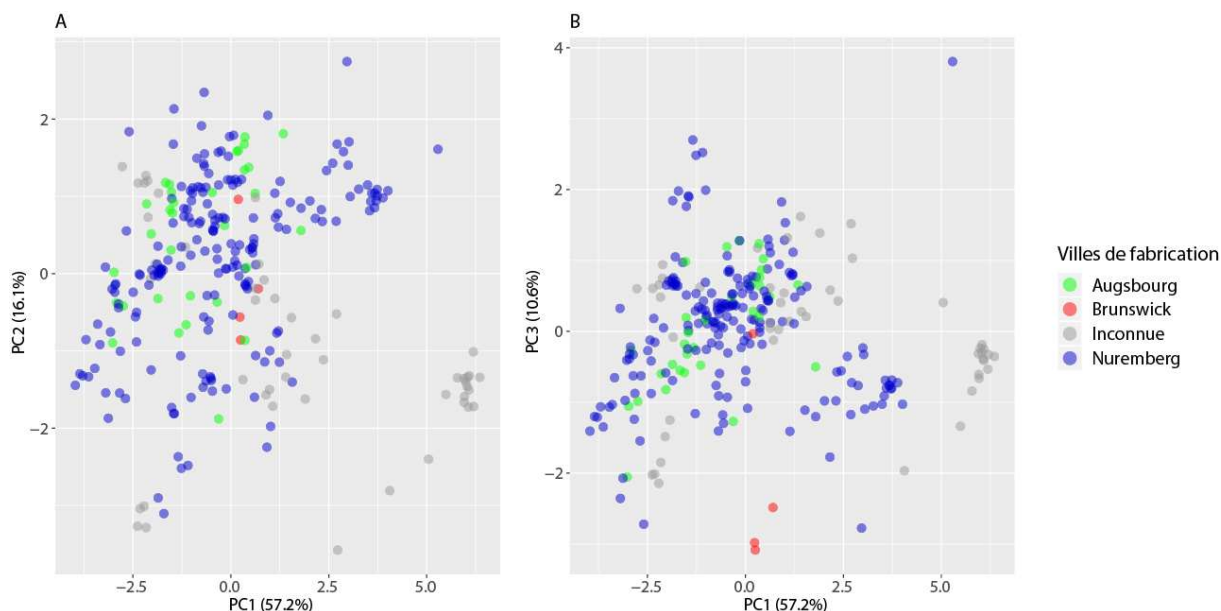
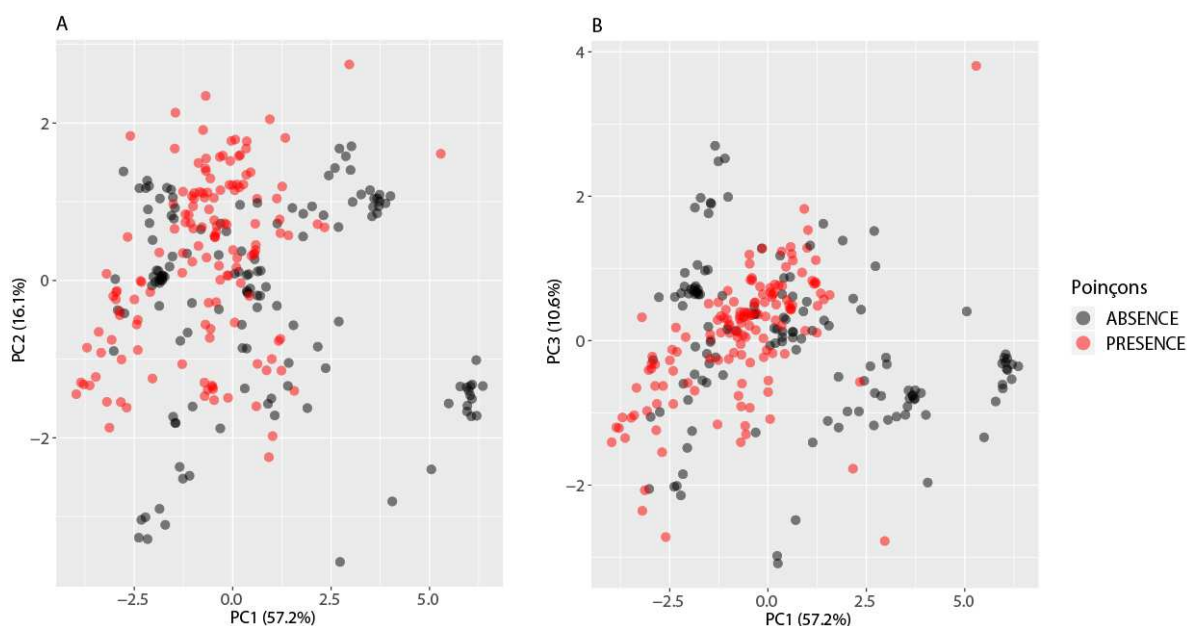


Figure 129 - Visualisation des projections de l'ACP réalisées sur les données des éléments d'armures supposés de provenance allemande en fonction des villes de fabrication sur les composantes PC1/PC2 « A » et PC1/PC3 « B ». Chaque point représente une inclusion analysée



v. Corpus français

Les éléments supposés d'origine française sont au nombre de 5. La figure 131 présente les résultats de l'ACP réalisée sur les données transformées en log-ratio des éléments traces. L'essentiel de l'information est porté sur les trois premières composantes. Aucun échantillon ne se sépare réellement des autres. Sur les axes PC1 et PC2, les projections des échantillons de l'élément 895.4.1.3 se confondent, toutefois une dispersion est visible selon les variables Xij_U et Xij_Ba et Xij_Nb. Celles de l'armure 895413 sont dispersées selon la variable Xij_Ba. Celles de l'armure G143 se recouvrent très légèrement mais sont dispersées selon la variable Xij_Nb. Les inclusions de l'échantillon G42_ech2 forment un nuage de points cohérent, faiblement éclaté selon la variable Xij_Nb. Enfin l'échantillon WCA.297 est faiblement dispersé sur l'axe PC1, ce qui a pour effet de l'isoler des autres. Il l'est davantage sur l'axe PC2. L'axe PC3 n'apporte pas d'information supplémentaire pour différencier des groupes.

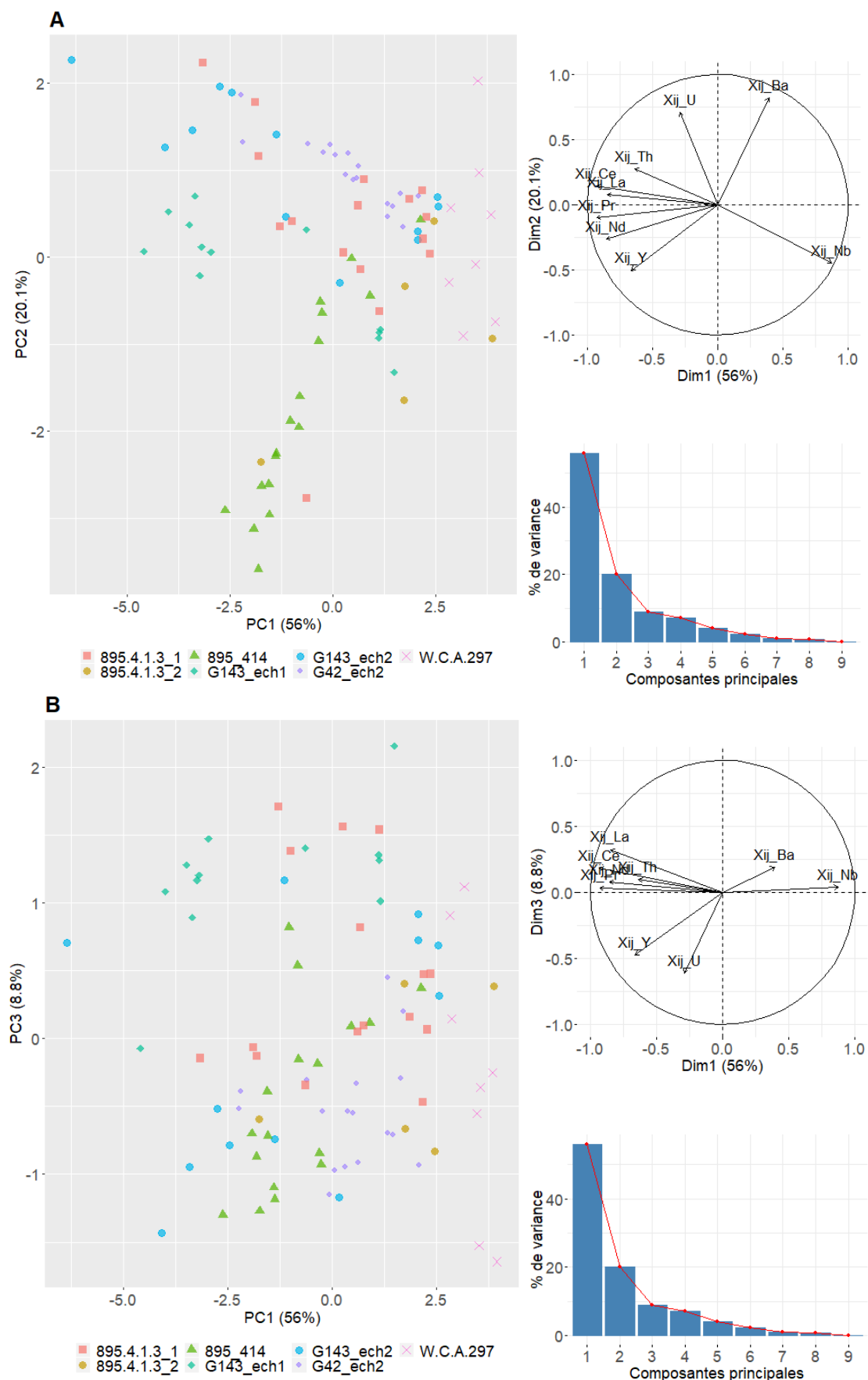


Figure 131 - Synthèse des résultats de l'ACP réalisée sur l'ensemble des éléments d'armures supposés de provenance française. « A » axes PC1 et « B » PC2, axes PC1 et PC3

vi. Bilan et confrontations

Les ACP réalisées sur les jeux de données des armures supposées de provenance allemande, italienne et française ont permis pour chacun de ces espaces de définir des groupes d'échantillons aux signatures chimiques proches. Nous allons à présent comparer ces signatures entre elles en commençant par l'Allemagne et l'Italie. Une ACP a été conduite sur l'ensemble des données transformées en log ratio, des armures supposées de facture allemande ou italienne. Les figures suivantes (figure 132, figure 133 et figure 134) présentent une synthèse des résultats en mettant en évidence les deux groupes majoritaires d'armures allemandes et italiennes déjà définis (Allemagne_Groupe1 et Italie_Groupe1). Les quatre premières composantes portent 90% de l'information. Les deux premières séparent nettement les deux groupes notamment par la variable Xij_Ba. Toutefois, une zone de recouvrement est visible. Le nuage de points allemand est quant à lui plus dispersé selon la variable Xij_Y. Sur la figure 133 la séparation est confirmée. Les nuages de points se déforment sous l'influence de la variable Xij_Nb. La figure 134 s'avère la moins discriminante. Le recouvrement est plus important. Elle permet toutefois d'isoler quelques groupements d'individus.

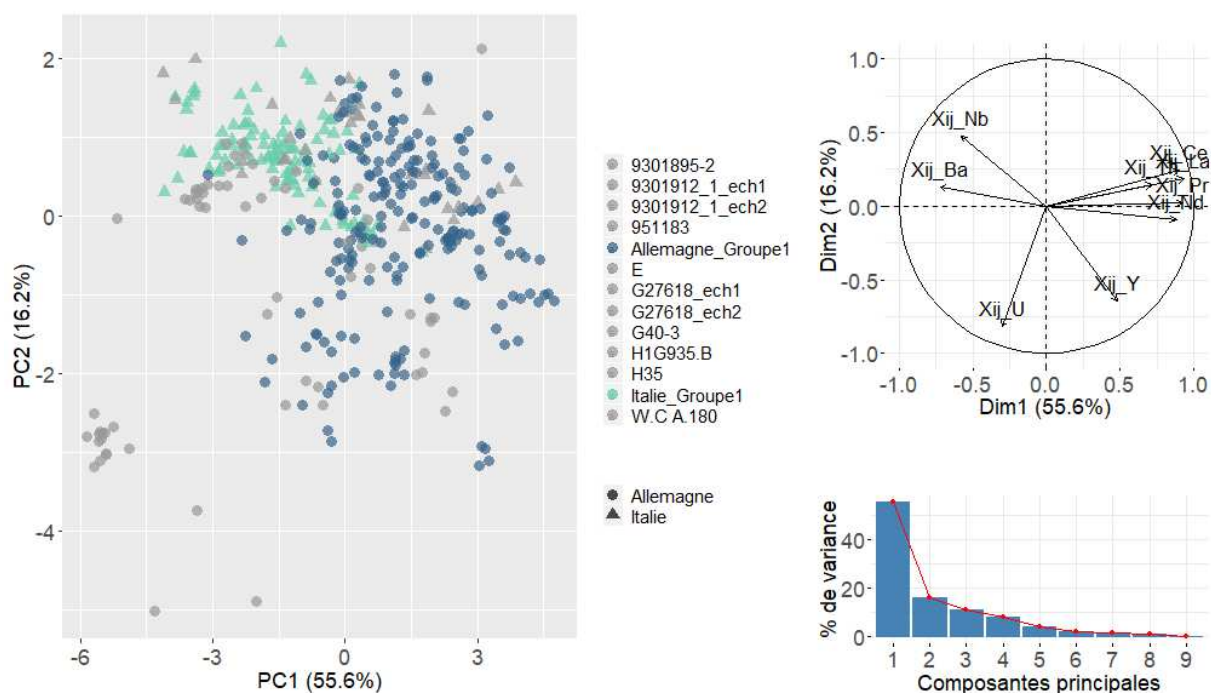


Figure 132 - Synthèse des résultats de l'ACP réalisée sur les données des éléments d'armures supposés de provenances allemandes et italiennes sur les composantes PC1/PC2

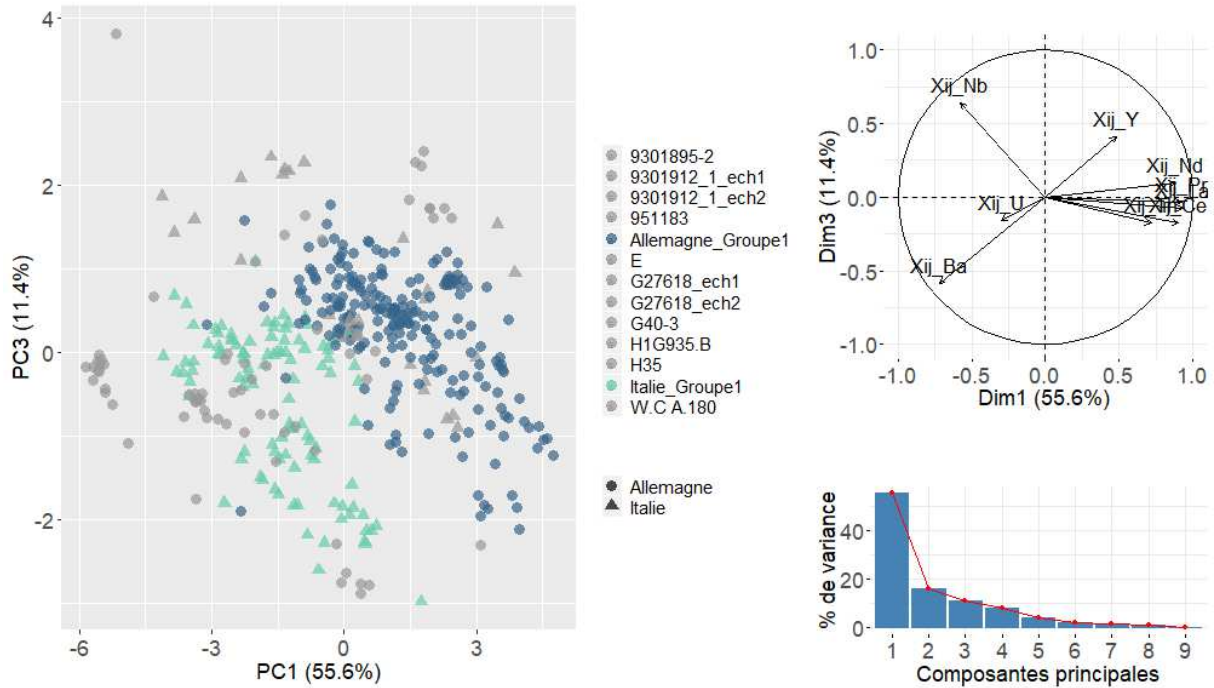


Figure 133 - Synthèse des résultats de l'ACP réalisée sur les données des éléments d'armures supposés de provenances allemandes et italiennes sur les composantes PC1/PC3

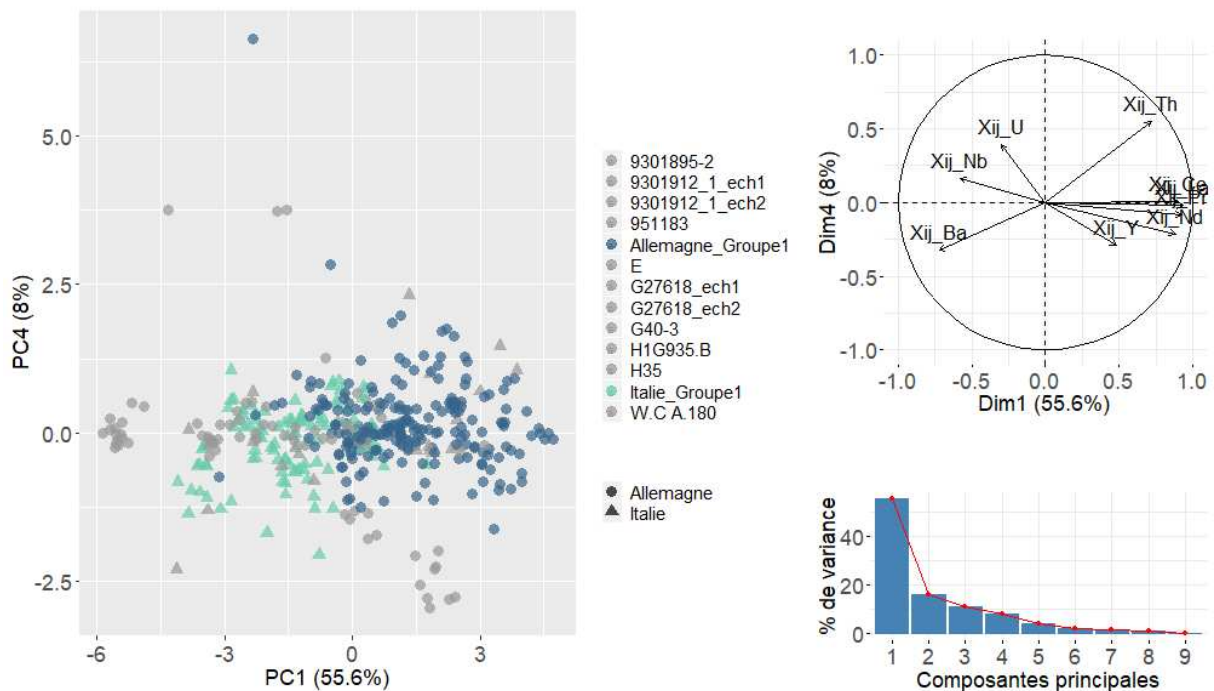


Figure 134 - Synthèse des résultats de l'ACP réalisée sur les données des éléments d'armures supposés de provenances allemandes et italiennes sur les composantes PC1/PC4

Les corpus allemands, italiens et français ont ensuite été comparés. Les figure 135, figure 136 et figure 137 projettent les résultats sur les quatre premières composantes de l'ACP effectuée. Le

nuage de points associé aux armures françaises n'est jamais distinguable de l'espace « Allemagne_Groupe1 » et ce quelle que soit la représentation.

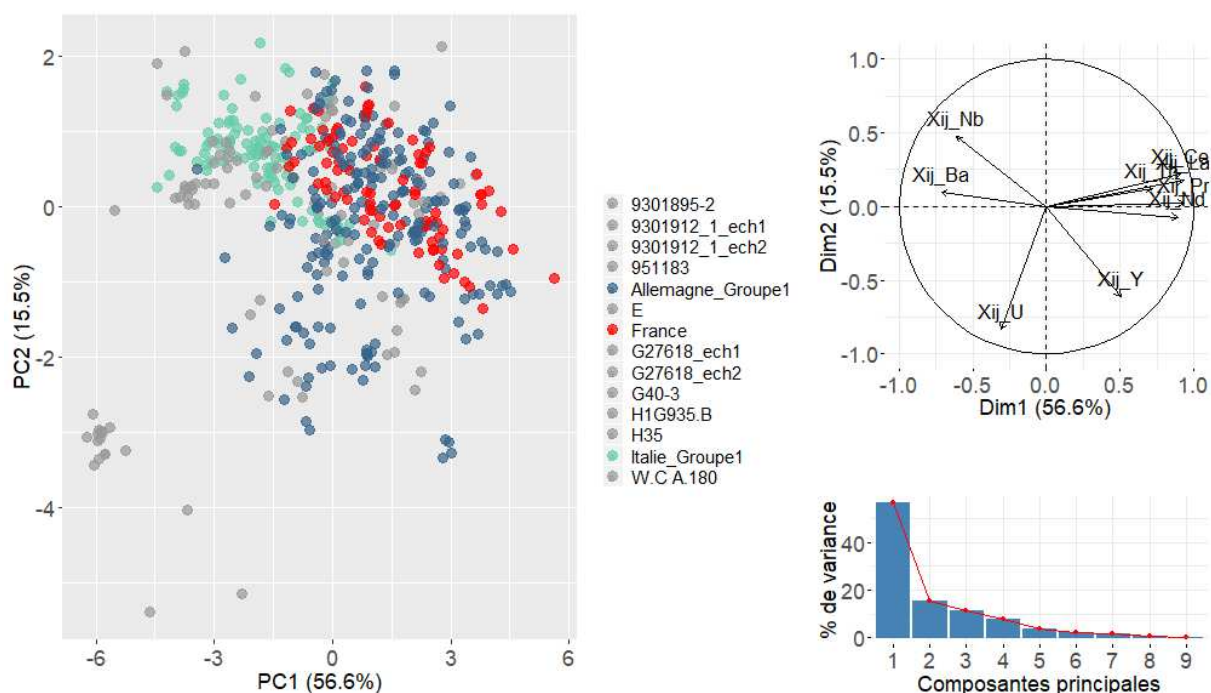


Figure 135 - Synthèse des résultats de l'ACP réalisée sur les données des éléments d'armures supposés de provenances allemandes françaises et italiennes sur les composantes PC1/PC2

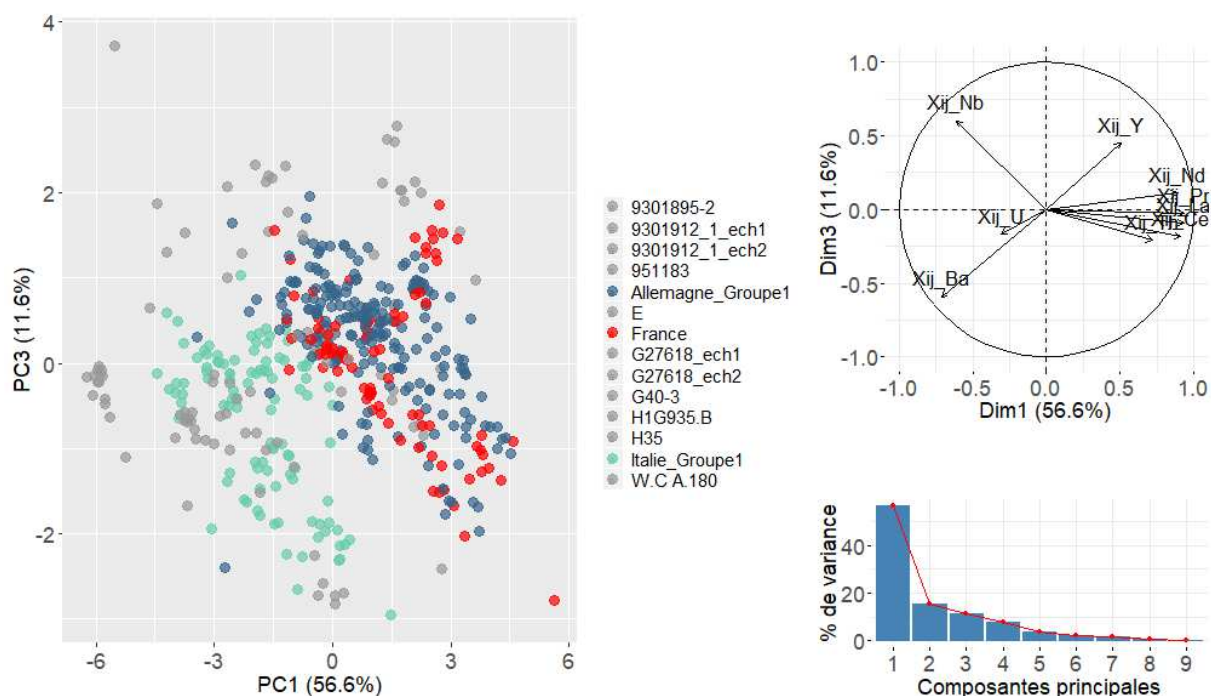


Figure 136 - Synthèse des résultats de l'ACP réalisée sur les données des éléments d'armures supposés de provenances allemandes françaises et italiennes sur les composantes PC1/PC3

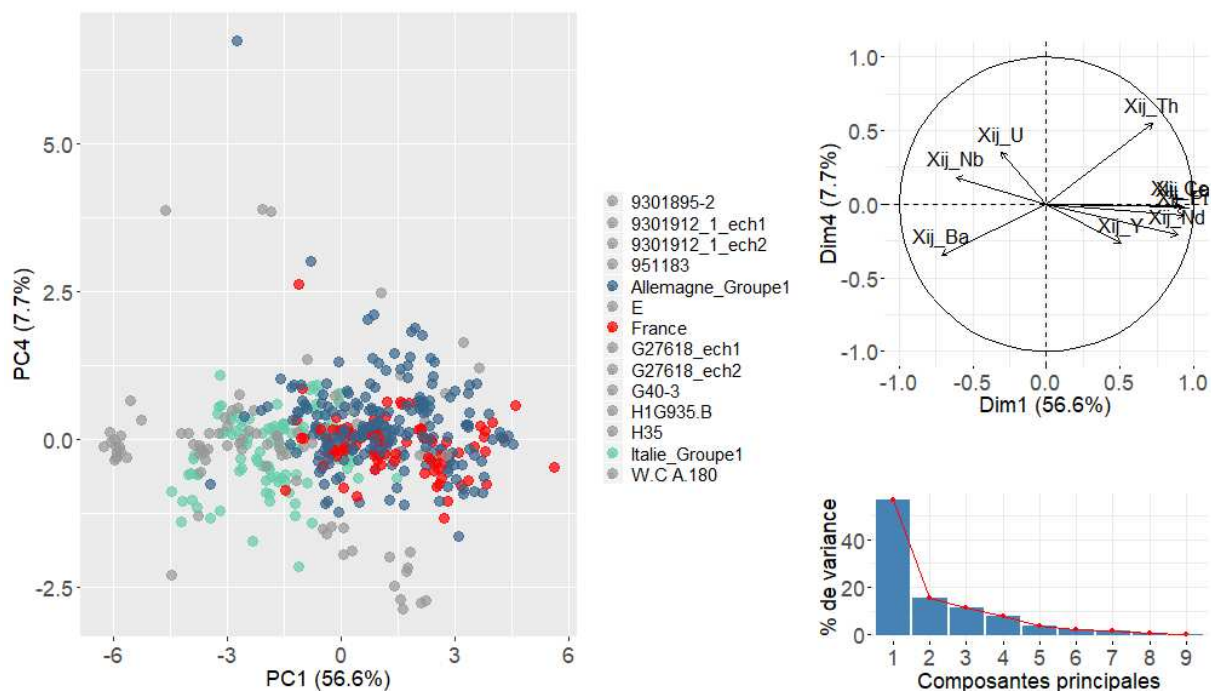


Figure 137 - Synthèse des résultats de l'ACP réalisée sur les données des éléments d'armures supposés de provenances allemandes, françaises et italiennes sur les composantes PC1/PC4

Le nuage de points français a ensuite été comparé séparément au groupe « Italie_Groupe1 » et « Allemagne_Groupe1 ». Les résultats des comparaisons menées avec le premier sont présentés figure 138, figure 139 et figure 140. Le nuage de points des armures supposées françaises a tendance à se séparer du nuage de points italien, même si un léger recouvrement subsiste.

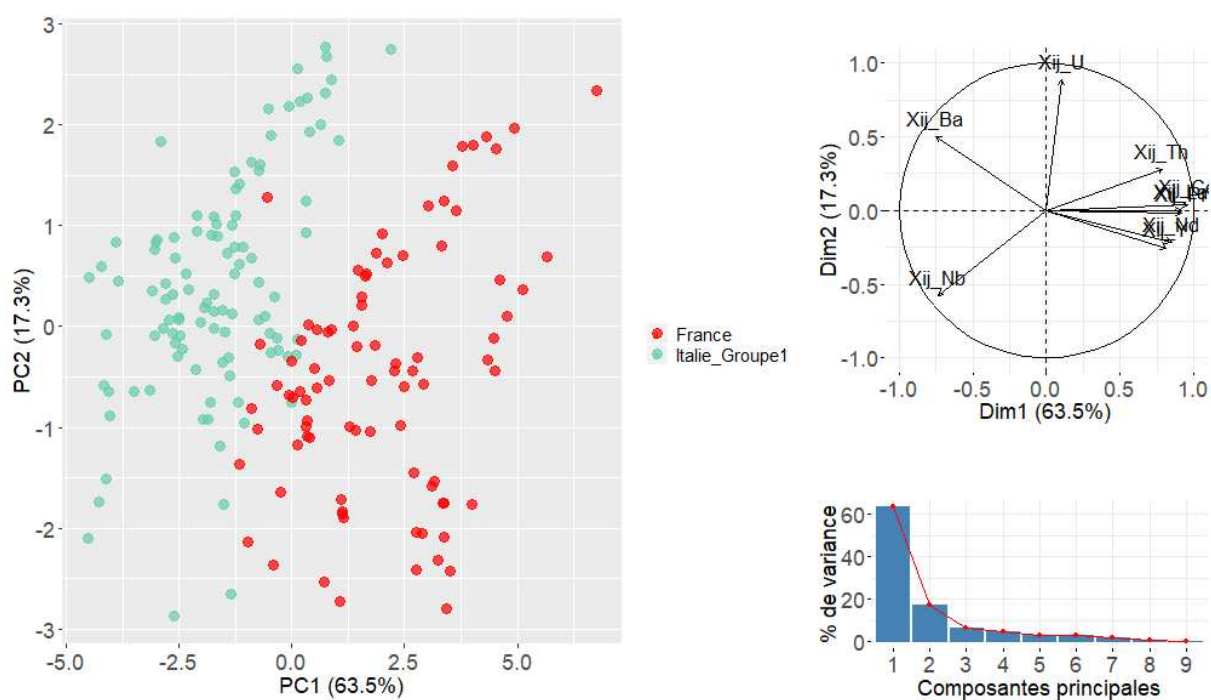


Figure 138 - Synthèse des résultats de l'ACP réalisée sur les données des éléments d'armures supposés de provenances françaises et celles appartenant au groupe « Italie_Groupe1 » sur les composantes PC1/PC2

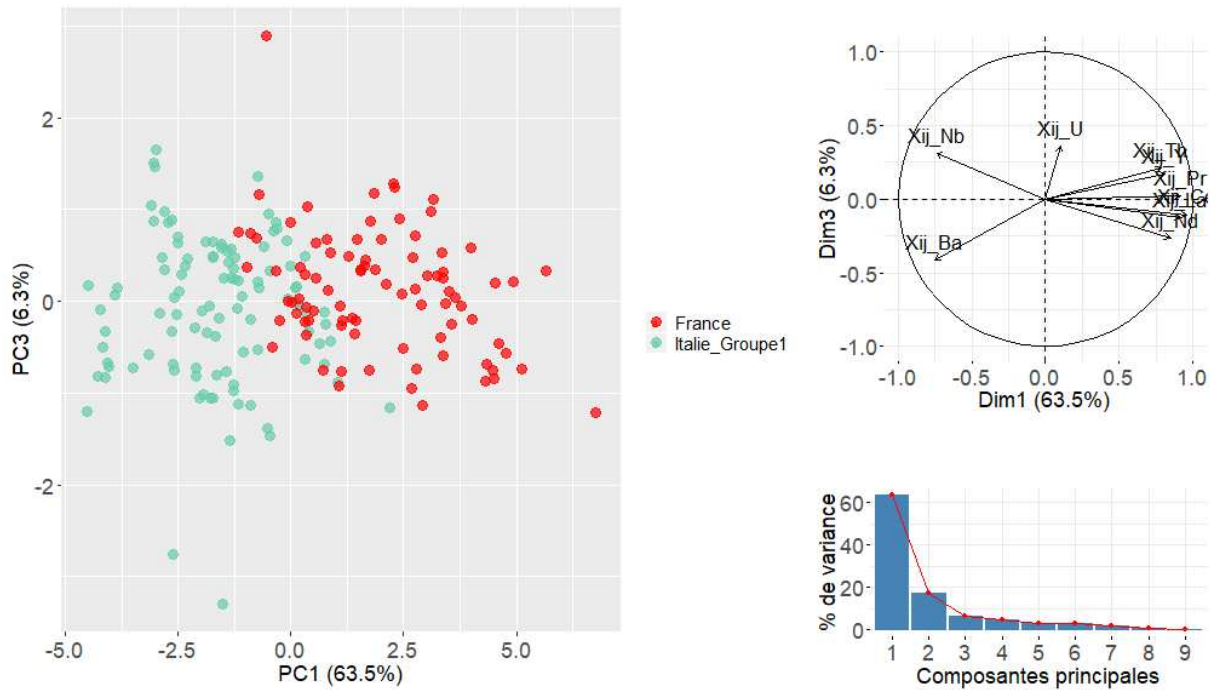


Figure 139 - Synthèse des résultats de l'ACP réalisée sur les données des éléments d'armures supposés de provenances françaises et celles appartenant au groupe « Italie_Groupe1 » sur les composantes PC1/PC3

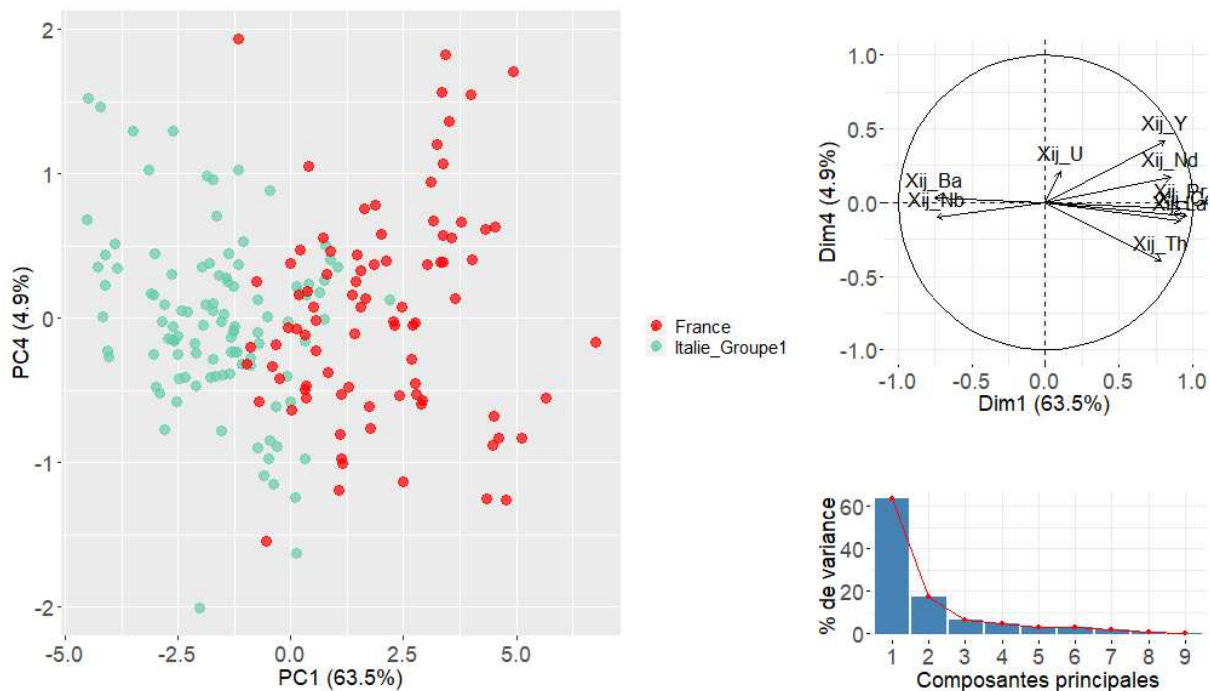


Figure 140 - Synthèse des résultats de l'ACP réalisée sur les données des éléments d'armures supposés de provenances françaises et celles appartenant au groupe « Italie_Groupe1 » sur les composantes PC1/PC4

Les résultats des comparaisons menées avec le groupe Allemagne_Groupe1 sont présentées figure 141, figure 142 et figure 143. Les deux nuages de points sont de nouveau indissociables quelle que soient les dimensions considérées.

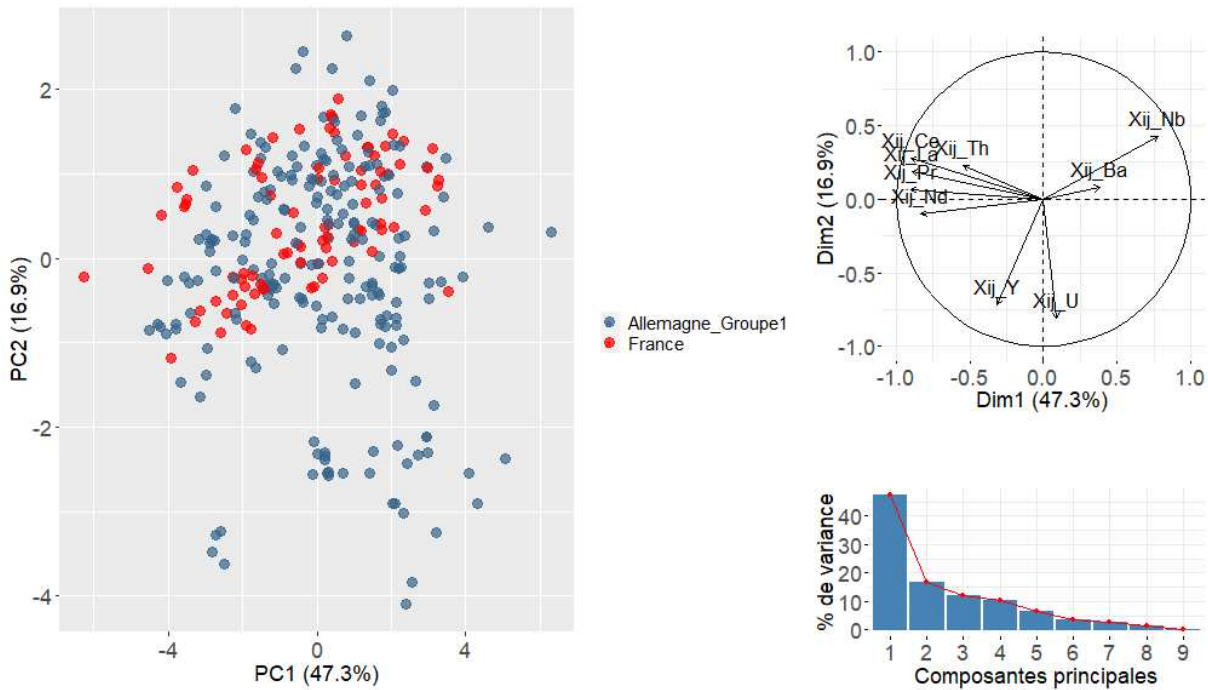


Figure 141 - Synthèse des résultats de l'ACP réalisée sur les données des éléments d'armures supposés de provenances françaises et celles appartenant au groupe Allemagne_Groupe1 sur les composantes PC1/PC2

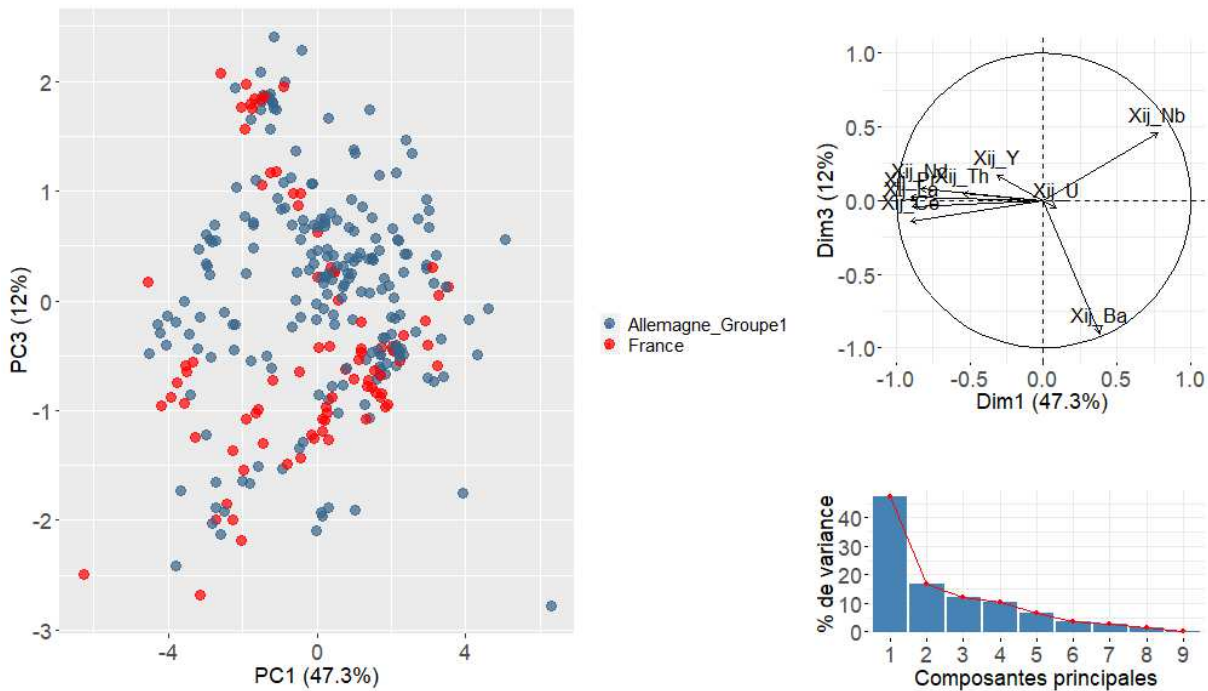
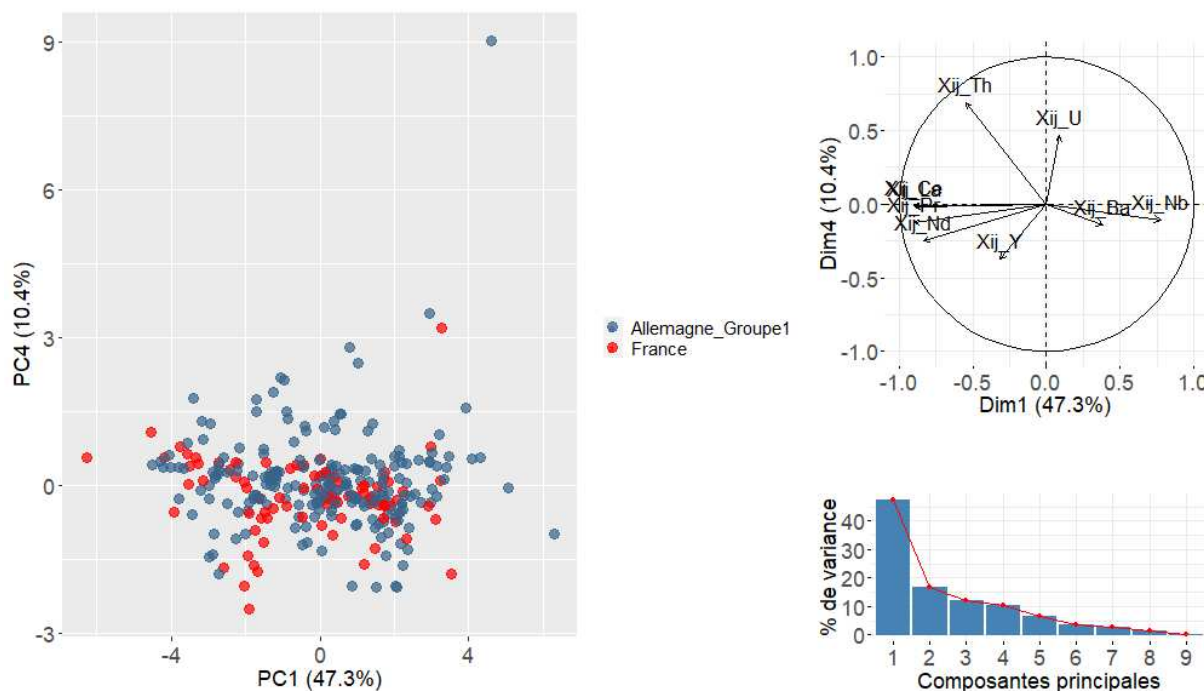


Figure 142 - Synthèse des résultats de l'ACP réalisée sur les données des éléments d'armures supposés de provenances françaises et celles appartenant au groupe Allemagne_Groupe1 sur les composantes PC1/PC3



Enfin, deux échantillons supposés de fabrication allemande (G27618_ech1 et G27618_ech2, voir figure 144) et un supposé de fabrication espagnole (HPO618, voir figure 145 et figure 146) ont des signatures chimiques compatibles avec le groupe Italie_Groupe1¹¹⁰.

¹¹⁰ Les positions dans le nuage de points des autres échantillons supposés de provenance allemande et italienne ont été reportées dans le volume Annexe.

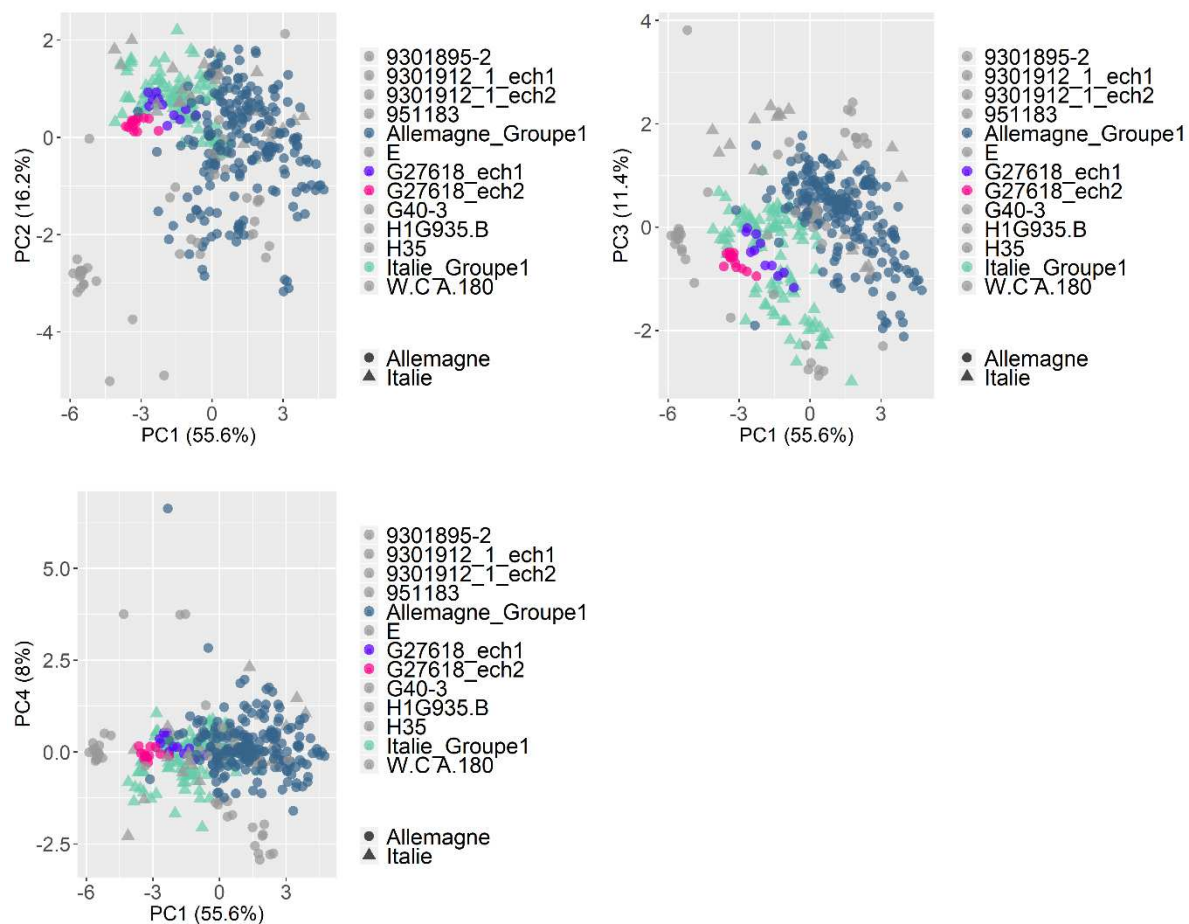


Figure 144 - Visualisation des projections des échantillons G27618_ech1 et G27618_ech2 sur les composantes PC1 et PC2 de l'ACP effectuée sur les données des éléments d'armures supposés de provenances allemandes et italiennes

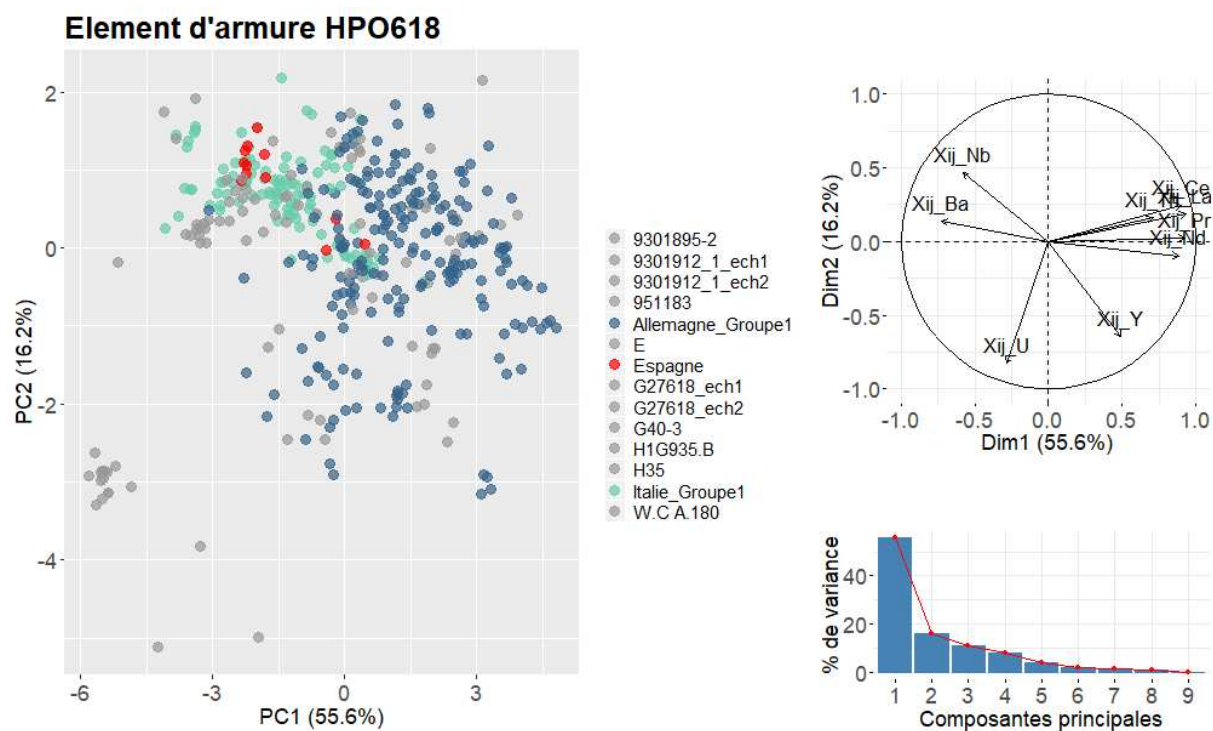


Figure 145 - Résultats de l'ACP effectuée sur les éléments d'armures supposés de provenance italiennes, allemande et espagnole (HPO618). Axes PC1 et PC2

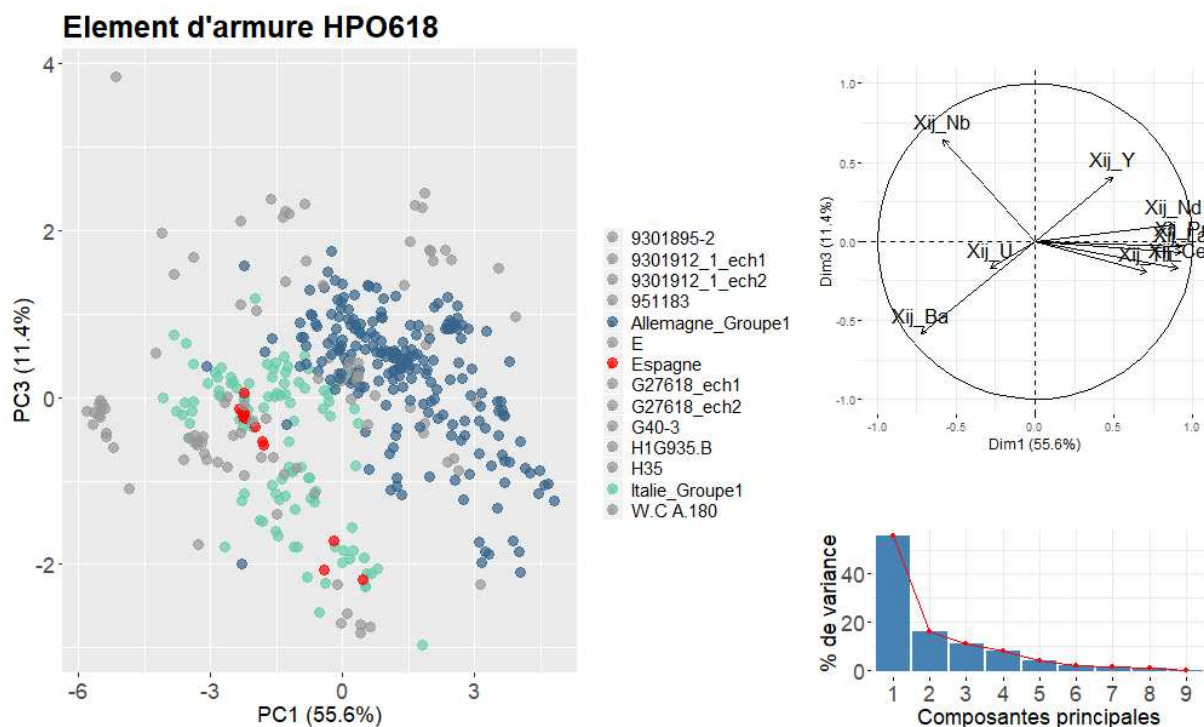


Figure 146 - Résultats de l'ACP effectuée sur les éléments d'armures supposés de provenance italiennes, allemande et espagnole (HPO618). Axes PC1 et PC3

Ainsi pour conclure il a été possible de mettre en évidence l'existence d'au moins deux groupes :

- Un groupe comptant des armures supposées de fabrication italienne nommé « **Italie_Groupe1** ». Il regroupe les échantillons WCA143A, WCA143B, 9301892_T, 9301904_T, 9301891, LAM46491_1, LAM46491_2, LAM46492, WCA144, WCA235 et WCA73.
- Un groupe comptant des armures supposées de fabrication allemande nommé « **Allemagne_Groupe1** ». Il regroupe les échantillons G435_D1, G435_D2, G435_ech1, G435_ech2, G435_G3, G436_ech1, G436_ech2, G436_ech3, G436_G4, G436_G5, G40-2, WCA250, WCA245, WCA65, 1120, 9301911, 9301912.2_T, 951180.1, GNM1312, HPO2608_1, HPO2608_2, SN et H. Il est beaucoup plus dispersé que le nuage de points italien et comprend certainement différents sous-ensembles. Ceci était déjà suggéré par la variabilité des teneurs en manganèse et phosphore mesurées. Cependant, il n'a pas été possible de discerner des sous-groupes dans cet ensemble avec les éléments traces qui ont été dosés. Par ailleurs, il n'est pas distinguable des armures supposées de facture française examinées dans cette étude. Il n'est pas non plus possible d'isoler dans ce nuage de points les différentes villes de fabrication allemandes.
- Certains échantillons d'armures supposées de fabrication allemande sont compatibles avec la signature chimique du groupe Italie_Groupe1. C'est le cas des deux échantillons prélevés sur

l'épaulière G27618. Une défense de tête supposée de provenance espagnole (HPO618) est également compatible avec le groupe Italie_Groupe1. Enfin, quelques échantillons issus d'armures supposées de fabrication allemande et italienne, possèdent des signatures chimiques distinctes des groupes Italie_groupe1 et Allemagne_Groupe1¹¹¹.

Afin de préciser la provenance du métal employé pour la fabrication des armures, l'étape suivante consiste à comparer leurs signatures chimiques avec celles d'espaces de production. Toutefois dans notre cas, le nombre restreint d'éléments traces qu'il a été possible de doser limite la portée des comparaisons. En effet, ceci a pour effet d'augmenter considérablement le recouvrement des signatures des espaces de production qui deviennent alors difficile à discriminer. Ainsi nous présenterons dans la suite uniquement les résultats pour deux espaces sidérurgiques qui ont permis des comparaisons pertinentes à savoir : la Lombardie et la Lorraine.

2) Comparaison avec les ensembles géochimiques de production

Pour chaque ensemble géochimique de production, les comparaisons ont été effectuées en deux étapes. Nous avons d'abord vérifié, grâce au filtre des teneurs absolues, que les concentrations en manganèse et phosphore étaient compatibles avec les espaces de production considérés. Puis, nous avons comparé leur signature chimique à celles des armures grâce à l'analyse multivariée sur les données transformées en log ratio des éléments traces.

a) La Lombardie

La signature chimique de l'espace lombard a été caractérisée par S. Leroy (S. Leroy, 2010). Ainsi nous avons cherché à comparer cette dernière avec celle des armures supposées de fabrication italienne (et notamment le groupe « Italie_Groupe1 »). Cet espace se caractérise par ses hautes teneurs en manganèse, et ses basses teneurs en phosphore. Par conséquent l'absence ou la présence de ces éléments au sein des inclusions d'armures peut constituer un premier filtre pour invalider une hypothèse de provenance.

i. Filtre des teneurs absolues en manganèse et phosphore

S. Leroy a mis en évidence que l'espace lombard qu'elle a caractérisé, était fortement typé par ses fortes teneurs en manganèse dans les scories analysés ($6,5 < \% \text{mass MnO} < 15,5$) (S. Leroy, 2010, p. 206). Ainsi ; l'absence de cet élément dans les inclusions d'un objet n'est pas compatible

¹¹¹ Voir p.289 pour l'Italie et p.293 pour l'Allemagne. Les projections de ces échantillons sur les composantes PC1 et PC2 de l'ACP réalisée sur les armures supposées de fabrication allemande et italienne ont été reportée dans le volume Annexes.

avec une provenance de cette région (S. Leroy, 2010, p. 207). Le phosphore peut également s'avérer discriminant. En effet, de fortes concentrations en phosphore dans les inclusions ($P_{2O5^*} > 4\% \text{mass}$) ne seraient pas compatibles avec cet espace sidérurgique de production (S. Leroy, 2010, p. 311).

Dans le cas des armures supposées de fabrication italienne, seul l'échantillon H35 ne possède pas de manganèse en quantité notable dans ses inclusions (voir figure 147). De plus, l'ensemble des armures du groupe « Italie_Groupe1 » présente des concentrations en manganèse supérieures à 2,5%mass, et inférieures à 1%mass en phosphore, compatibles avec l'espace lombard.

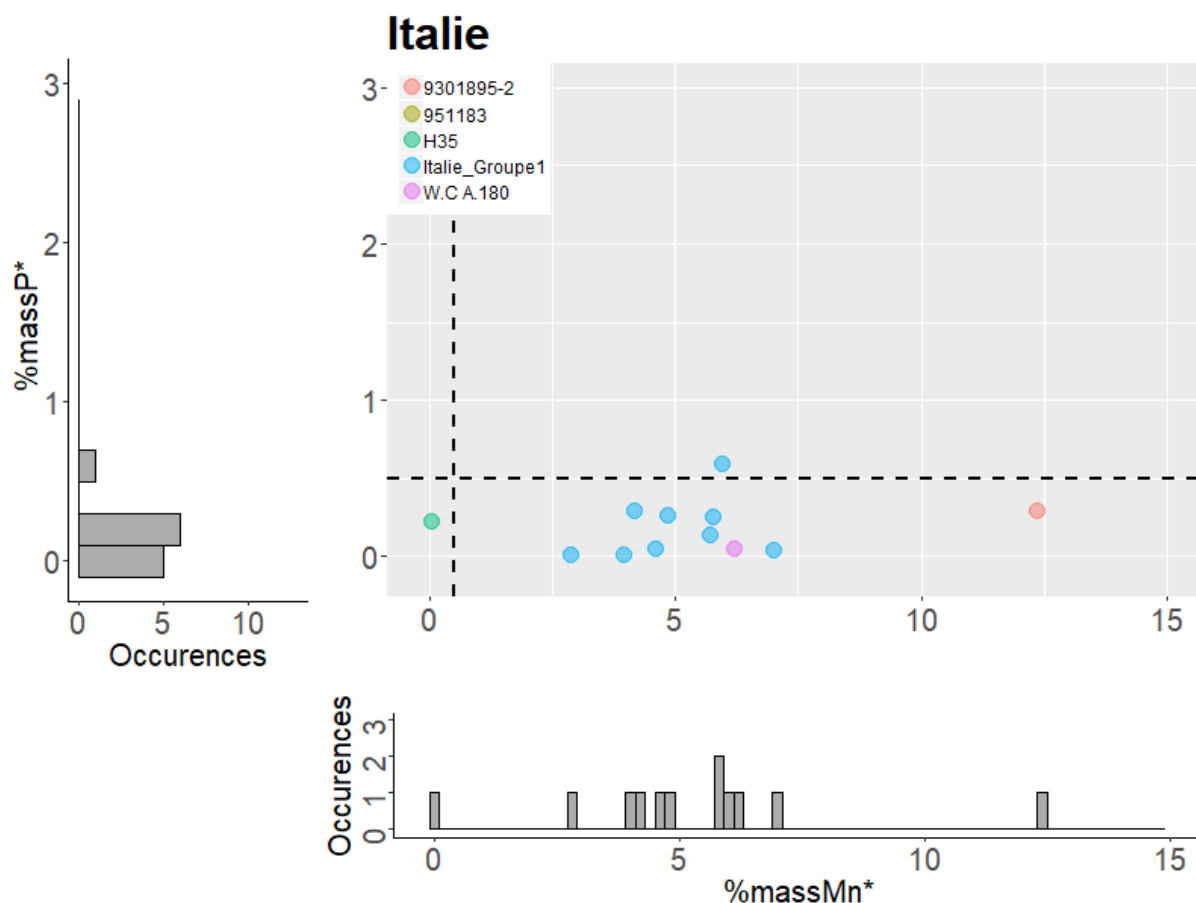


Figure 147 - Distribution des teneurs moyennes pondérées par la surface en manganèse et en phosphore pour les armures italiennes selon les groupes établis.

ii. Analyse multivariée

L'espace lombard défini par S. Leroy présente régulièrement des valeurs en dessous des limites de détection, notamment dans le cas des minerais. Afin de ne pas réduire considérablement le jeu de données nous avons choisi de suivre le protocole mis en place par S. Leroy en remplaçant les valeurs en limite de détection par la moitié de la valeur de la limite de détection. De plus les éléments Pr et Nb régulièrement en dessous des limites de détection pour cet ensemble géochimique ont été exclus.

Les résultats de l'ACP réalisée sont présentés sur les figure 148, figure 149, figure 150. Les quatre premières composantes sont porteuses de 90% de l'information. Les projections sur les axes PC1/PC2, PC1/PC3, PC1/PC4 mettent surtout en évidence la dispersion du nuage de points lombard. Les armures forment, elles, un groupe plus compact. Comme évoqué dans le chapitre 1 la dispersion de la signature lombarde est principalement causée par la présence de mesures en dessous des limites de détection pour certains éléments, ce qui rend les comparaisons avec nos objets assez délicates. L'échantillon H35 est isolé des autres sur les représentations PC1/PC2 et PC1/PC4. Sa compatibilité avec l'espace lombard pourrait être remise en cause sur la Figure 150, car ses projections ne se superposent pas avec ce dernier.

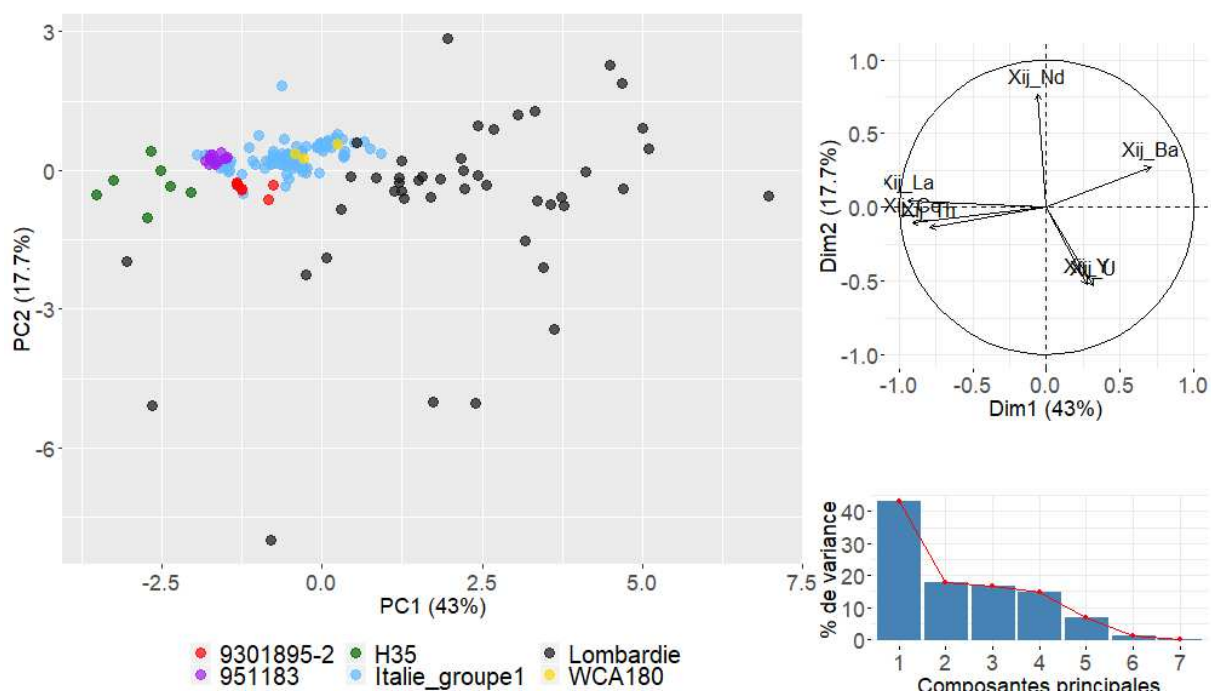
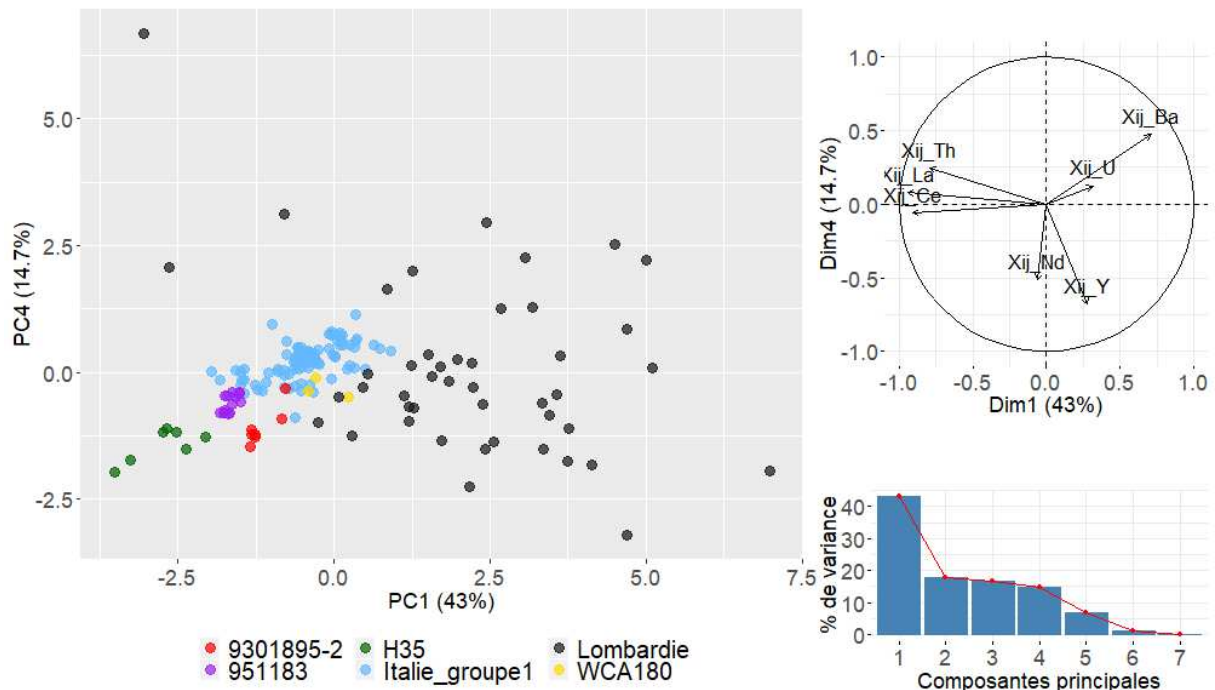
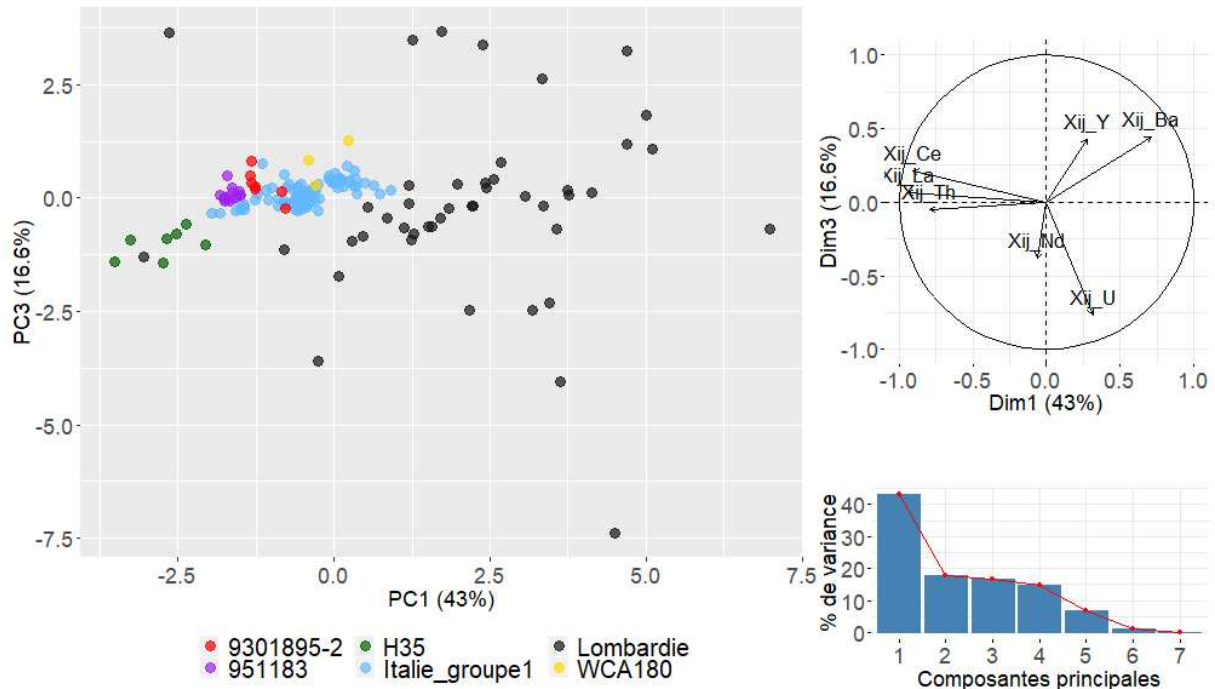


Figure 148 - Synthèse des résultats de l'ACP réalisée sur les données de l'espace lombard défini par (S. Leroy, 2010) et sur les échantillons d'armures supposées d'origine italienne. Axes PC1 et PC2



L'ACP mettant surtout en évidence la dispersion de l'espace lombard, une approche supervisée a également été testée sur ce jeu de données : l'analyse factorielle discriminante (AFD). Pour rappel l'utilisation de cette méthode repose sur la comparaison de groupes définis par l'opérateur. L'approche consiste à minimiser la variance intra-classe et à maximiser la variance inter-

classe. Le pouvoir discriminant de l'AFD est par nature supérieur à l'ACP. L'attribution d'une provenance repose sur le postulat suivant : si l'on ne peut pas séparer de façon significative la signature chimique d'un objet de celle d'un espace sidérurgique de production, alors son appartenance à cet espace peut être envisagée (voir chapitre 1). Les résultats de l'analyse factorielle discriminante entre l'espace lombard et chaque échantillon sont présentés figure 151¹¹².

Le groupe « Italie_Groupe1 » se recouvre en partie avec l'espace lombard sur l'axe LD1, ce qui corrobore sa compatibilité avec ce dernier. En revanche les autres échantillons peuvent tous être distingués de la Lombardie. Ainsi l'ACP et l'AFD ayant chacune permis d'isoler l'échantillon H35 de l'espace lombard, sa compatibilité avec cet espace peut être rejetée. Ceci est corroboré par l'absence de manganèse dans ses inclusions. Pour les autres échantillons (WCA 180, 951183 et 9301895-2) un doute demeure.

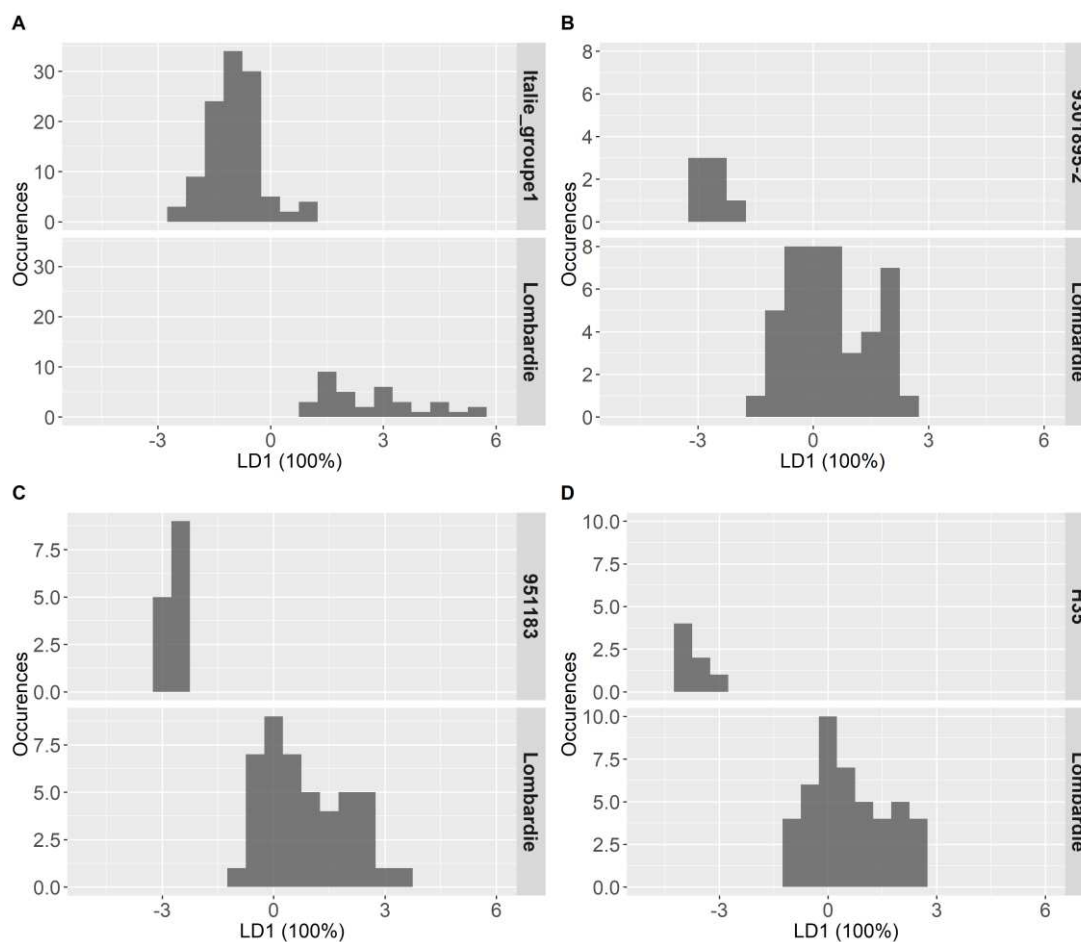


Figure 151 - « A » Synthèse des résultats de l'AFD comparant les données du groupe « Italie_Groupe1 » à celles de l'espace lombard défini par (S. Leroy, 2010), « B » Synthèse des résultats de l'AFD comparant les données de l'échantillon 9301895-2 à celles de l'espace lombard. « C » Synthèse des résultats de l'AFD comparant les données de l'échantillon 951183 à celles de l'espace lombard. « D » Synthèse des résultats de l'AFD comparant les données de l'échantillon H35 à celles de l'espace lombard.

¹¹² L'échantillon WCA180 n'a pas pu faire l'objet de cette analyse car le nombre d'individus pour cette classe était trop faible par rapport au nombre de variables considérées.

b) La Lorraine

Certains éléments du corpus étudié sont issus de sites archéologiques lorrains. C'est le cas des plaques de broigne de la ferme seigneuriale de Laquenexy. Par conséquent il apparaît pertinent de comparer leur signature chimique à celle des ensembles de production lorrains. Différents ensembles géochimiques de production lorrains ont été caractérisés par A. Disser et notamment la « Minette ». Une démarche similaire à celle présentée pour la Lombardie a été appliquée dans les paragraphes qui suivent.

i. Filtre des teneurs absolues pour le phosphore

Dans les espaces lorrains caractérisés par A. Disser, la « Minette » est considérée comme un minerai fortement typé, notamment par sa teneur en phosphore (A. Disser, 2014, p. 574). Même si, comme le précise l'auteur, sa teneur absolue ne peut pas être considérée comme un traceur spécifique de ce minerai du fait de sa forte variation, l'absence de cet élément au sein d'inclusions est un premier indice d'incompatibilité chimique. Comme vu précédemment, les échantillons du groupe « Italie_Groupe1 » présentent des teneurs en phosphore très faibles, non compatibles avec cet espace. Les teneurs des autres échantillons étudiés ont été reportées figure 152. Ainsi, moins d'une dizaine d'échantillons pourrait avoir une signature chimique compatible avec la « Minette » (%massP>0,5).

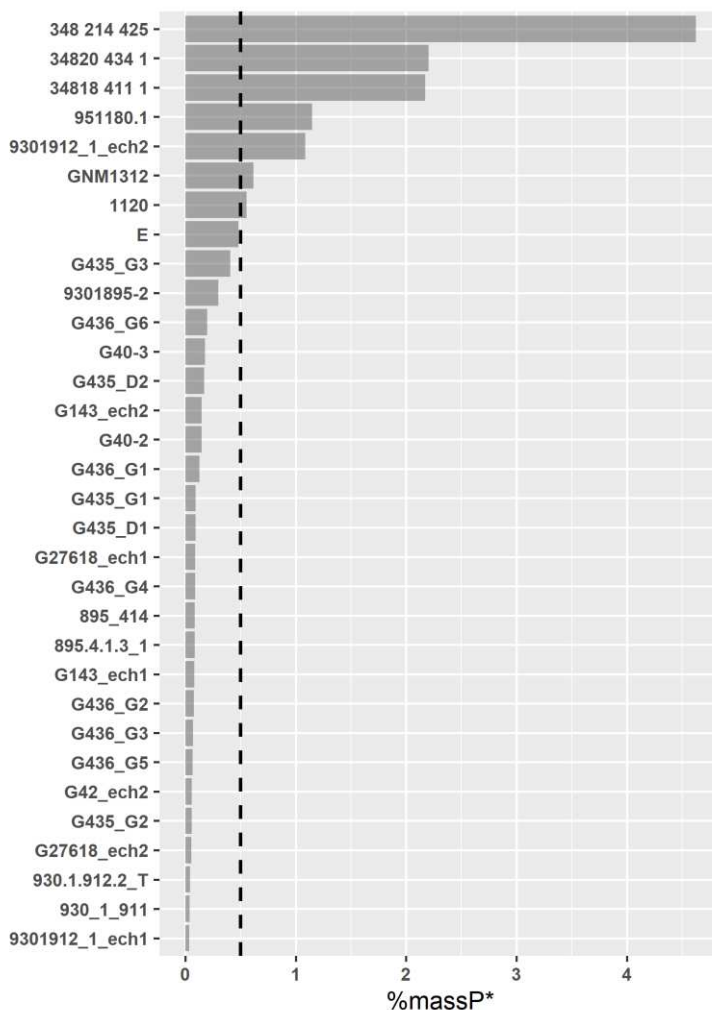


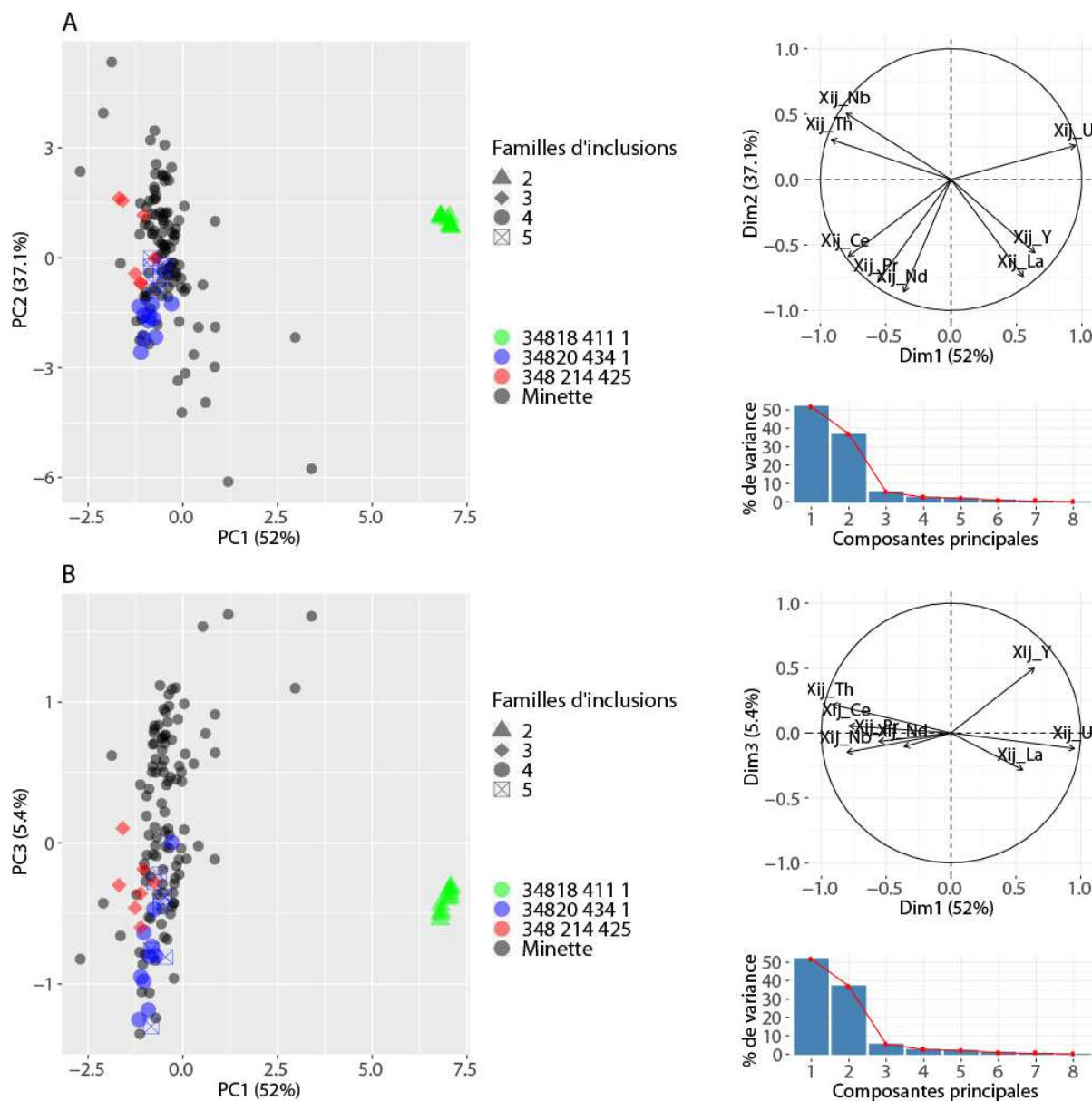
Figure 152 - Distribution de la teneur moyenne pondérée par la surface en phosphore dans les échantillons d'armures étudiés. Échantillons appartenant au groupe « Italie_Groupe1 » exclus

ii. Analyse multivariée

La comparaison par analyse multivariée a été possible pour trois échantillons issus du site de Laquenexy. Leurs teneurs en phosphore sont de plus compatibles avec l'ensemble « Minette » (voir figure 152). Il s'agit des échantillons 348.214.425 34818.411.1 et 34820.434.1. Les variables sélectionnées pour l'analyse multivariée sont les suivantes : Xij_Y, Xij_Nb, Xij_La, Xij_Ce, Xij_Pr, Xij_Nd, Xij_Th, Xij_U, La variable relative au barium a ici été exclue puisqu'elle n'est pertinente à utiliser que si l'on considère des espaces fortement typés par cet élément comme c'est le cas de la Lombardie. Les résultats sont présentés figure 153.

Les inclusions de l'échantillon 348.214.425 sont indissociables des données de l'espace « Minette ». Pour rappel l'échantillon 34820.434.1 possédait deux familles d'inclusions (numérotées 4 et 5) spatialement différenciées suite au premier tri inclusionnaire effectué sur les éléments majeurs, suggérant un assemblage de deux lopins de métal par soudure (voir p.263). L'analyse multivariée effectuée ici sur les éléments traces montre que les deux familles d'inclusions se

superposent à l'espace « Minette ». Ce résultat suggère que les deux lopins de métal qui constituent le métal seraient issus de cette région. Les différences observées sur les éléments majeurs supposent cependant qu'ils ne sont pas issus de la même opération de réduction. Enfin, le dernier échantillon, 34818.411.1, est clairement isolé de l'espace « Minette ».



Afin de valider la compatibilité chimique avec l'ensemble de production « Minette » des échantillons 348.214.425 et 34820.434.1, une nouvelle ACP a été réalisée en comparant chacun des échantillons uniquement à l'espace « Minette ». Les résultats sont présentés figure 154 et figure 155. Là encore, les projections des objets et de l'espace sidérurgique se confondent. De toute évidence le métal est donc issu de cet ensemble géochimique de production.

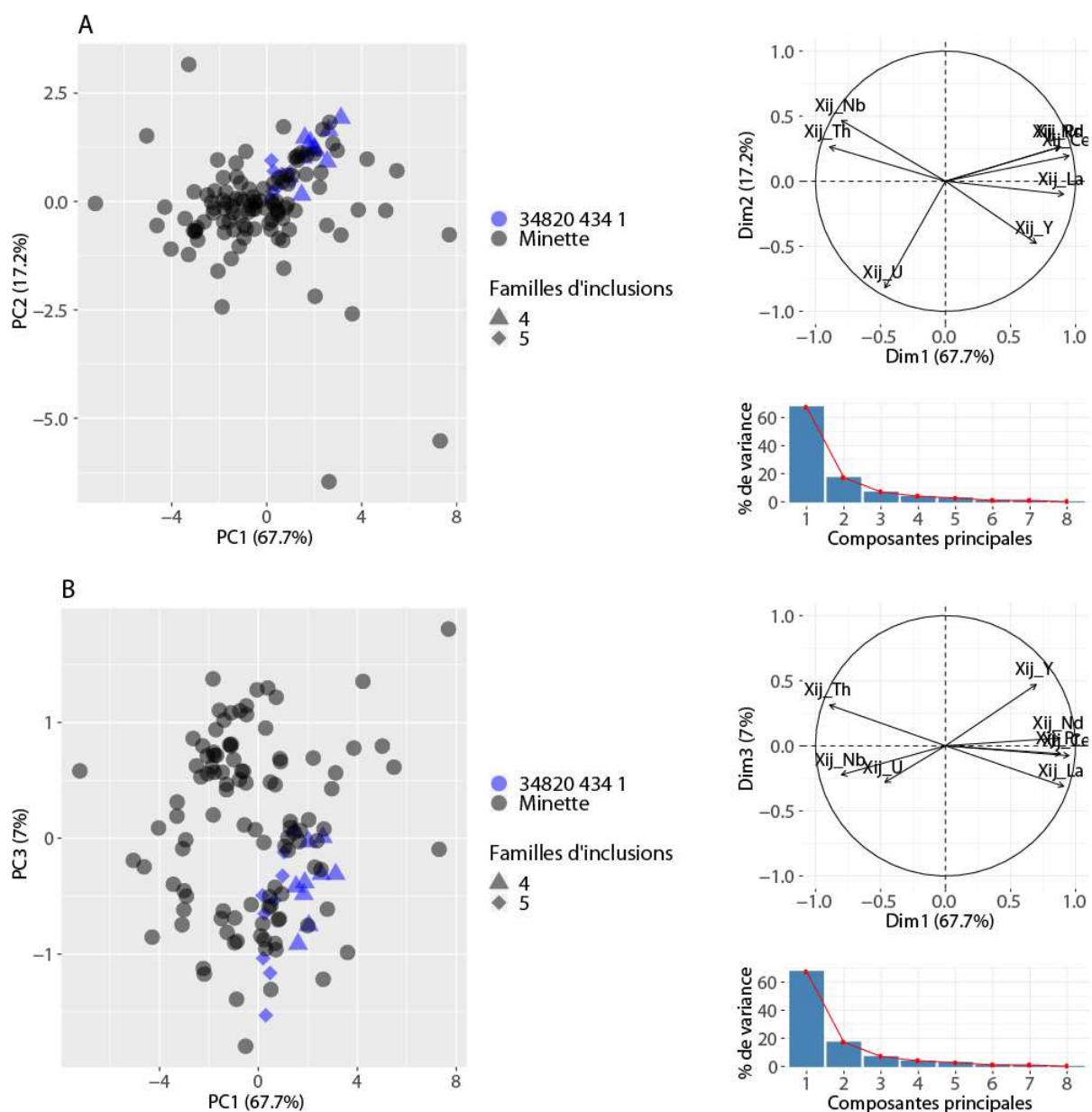


Figure 154 - Synthèse des résultats de l'ACP réalisée sur les données de l'espace Minette défini par A. Disser et sur l'échantillon 34820 434 1. « A » axes PC1/PC2 et « B » axes PC1/PC3

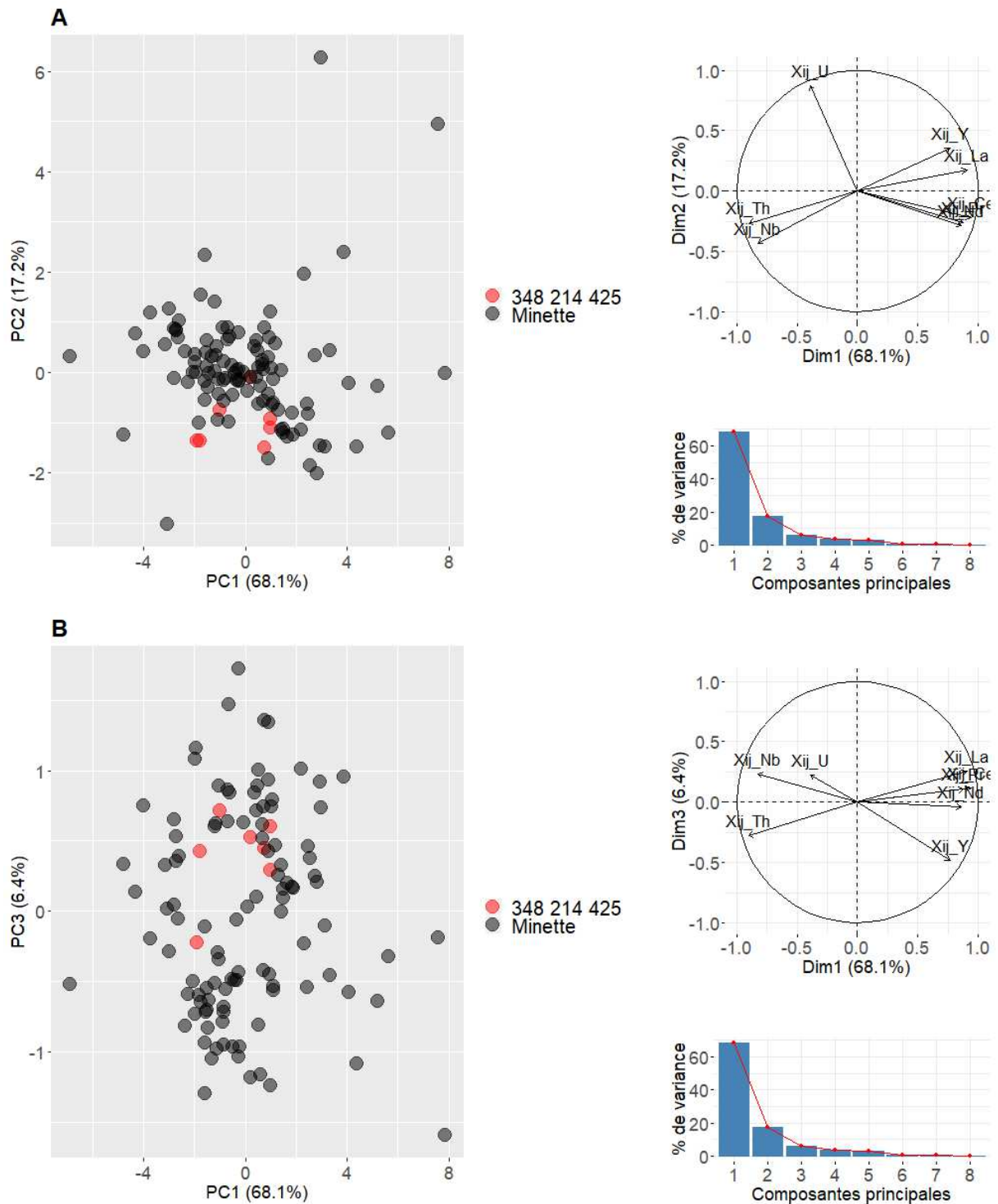


Figure 155 - Synthèse des résultats de l'ACP réalisée sur les données de l'espace Minette défini par A. Disser et sur l'échantillon 348 214 425

Ces deux premières parties nous ont permis, à travers les différents tests menés, de définir une méthodologie pour la comparaison de la signature chimique d'éléments d'armures d'origine inconnue. Nous allons à présent appliquer cette dernière aux deux armures semi-complètes étudiées : l'armure de Sainte Suzanne supposée de fabrication italienne, et celle de François de Montmorency, supposée de fabrication française.

3) Exemples des armures semi complètes

i. L'armure de Sainte Suzanne

Les échantillons de l'armure qui ont pu faire l'objet d'une étude de provenance sont rassemblés dans le tableau 26. Pour rappel, les différentes parties de l'armure sont présentées dans le Chapitre 2 (voir p.149).

Tableau 26 - Elément de l'armure de Sainte Suzanne étudiés dans cette partie

Armure ou Elément	Description	Datation	Lieu de fabrication supposé	Nombre d'échantillons étudiés	Numéro(s) du ou des échantillon(s) étudiés
STS_1	Cervelière	XIV ^e siècle	Indéterminé	1	STS_9
STS_3	Plastron	XV ^e siècle	Italie du Nord/Milan ?	1	STS_3
STS_4	Dossière (parties latérales)	XV ^e siècle	Italie du Nord/Milan ?	2	STS_4 STS_6
STS_7	Epaulière Droite	XV ^e siècle	Italie du Nord/Milan ?	1	STS_7
STS_8	Arrière bras	XV ^e siècle	Italie du Nord/Milan ?	1	STS_8
STS_10	Braconnière	XV ^e siècle	Italie du Nord/Milan ?	1	STS_10

La démarche suivie pour présenter les résultats a été décomposée en différentes étapes. Nous mettons d'abord en évidence les éventuelles hétérogénéités de fournitures en métal sur un même échantillon, suite au tri inclusionnaire des éléments majeurs. Puis nous vérifierons la distribution de la teneur en manganèse et en phosphore au sein des échantillons afin de déceler de premières spécificités. Ensuite nous nous pencherons sur l'hétérogénéité des fournitures de métal sur les différents éléments de l'armure. Pour cela, nous comparerons les signatures chimiques des échantillons de l'armure par analyse multivariée sur les éléments traces.

Enfin, la typologie de l'armure de Sainte Suzanne laisse supposer qu'elle serait de fabrication milanaise (O. Renaudeau, 2014). C'est pourquoi nous chercherons à comparer la signature chimique des éléments d'armures la constituant avec celles des autres armures supposées de fabrication italienne (Italie_groupe1) puis avec la signature chimique de l'espace lombard ¹¹³.

¹¹³ Cette dernière comparaison est illustrée dans le volume annexe

❖ **Différentes origines du métal au sein d'un même échantillon**

L'analyse physico chimique des inclusions a permis, après tri et élimination des ajouts de forge, de mettre en évidence des familles de compositions différentes et spatialement différenciées pour les échantillons 9, prélevé sur la cervelière et 6 prélevé sur la dossière (voir figure 156 et figure 157). Leurs structures se rapprochent ainsi de celle de l'échantillon H26 déjà présentée (voir p.263). Pour l'échantillon 9 seule la famille 2, associée au procédé de réduction directe, a été conservée dans la suite¹¹⁴. La signature chimique des éléments sidérophiles se perd en effet lors de la première étape de réduction du minerai de fer dans le cas du procédé de réduction indirecte (voir Chapitre 1).

Pour l'échantillon STS_6, trois principales familles d'inclusions ont été mises en évidence. La classe 1 est presque essentiellement contenue dans la partie aciérée, les classes 2, 3 dans la partie ferritique. L'ensemble des rapports élémentaires de la classe 1 sont constants. En revanche, une partie des inclusions de la classe 3 signe un enrichissement en aluminium (voir volume annexe). La classe 2, quant à elle, est associée au procédé de réduction indirecte avec la méthode de la régression logistique mais est située dans la zone indéterminée de l'abaque de discrimination. Par conséquent, un doute subsiste quant à la nature du procédé. Ainsi, compte tenu de la séparation spatiale de ces familles très tranchée nous avons décidé de conserver l'ensemble d'entre elles afin de comparer leurs signatures chimiques en éléments traces.

¹¹⁴ Les classes 1 et 3 étant associées au procédé de réduction indirecte aucune étude de provenance n'est envisageable sur cette partie du métal. Les résultats sur les procédés de réduction sont détaillés dans une partie spécifique p.115

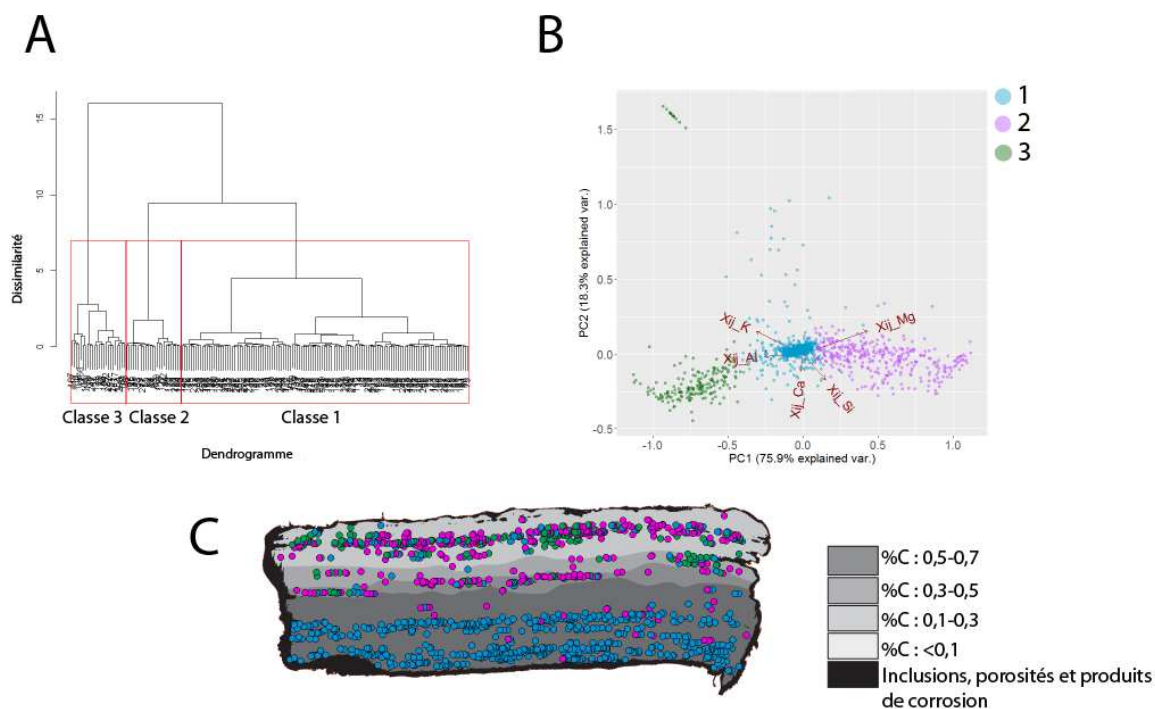


Figure 156 - Résultat du traitement multivarié sur l'échantillon STS6. « A » Dendrogramme 3 groupes ont été sélectionnés. « B » Visualisation des 3 groupes sur la PCA. Les familles 2 et 3 se distinguent chimiquement et spatialement de la famille 1. « C » Répartition des familles d'inclusions sur l'échantillon.

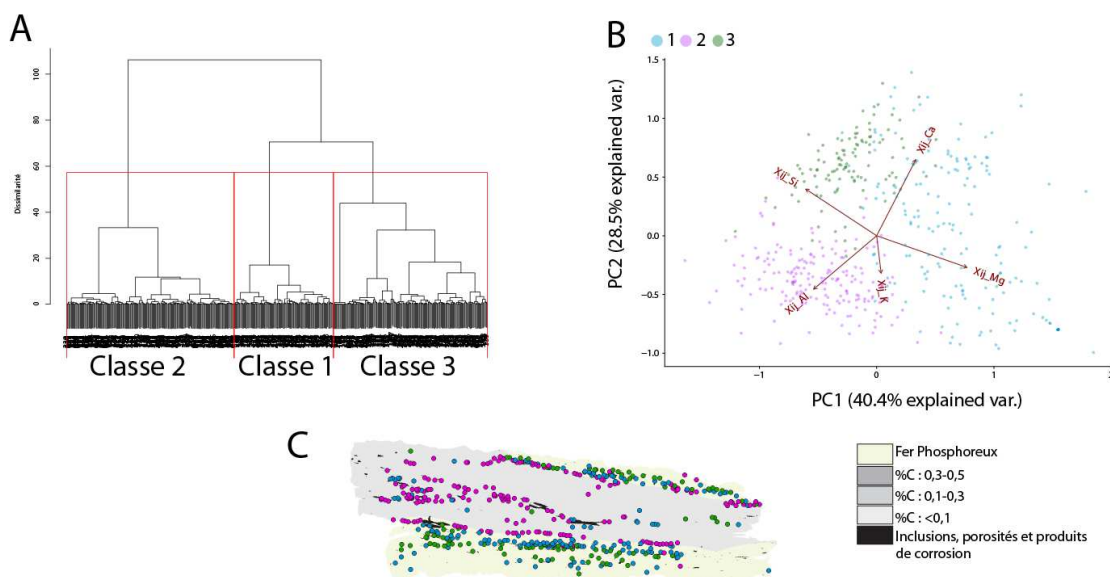


Figure 157 - Résultat du traitement multivarié sur l'échantillon STS9. « A » Dendrogramme 3 groupes ont été sélectionnés. « B » Visualisation des 3 groupes sur la PCA. Les familles 1 et 3 présentes majoritairement dans les zones riches en phosphore se distinguent chimiquement et spatialement de la famille 2. « C » Répartition des familles d'inclusions sur l'échantillon

❖ Hétérogénéité des fournitures de métal utilisé pour réaliser l'armure

➤ Filtre des teneurs absolues en manganèse et phosphore

Seul l'échantillon issu de la cervelière (STS_9) présente des teneurs en dessous des valeurs limites fixées (0,5%mass). Les autres échantillons possèdent des teneurs en manganèse supérieures à 2%mass et pas de phosphore (voir figure 158).

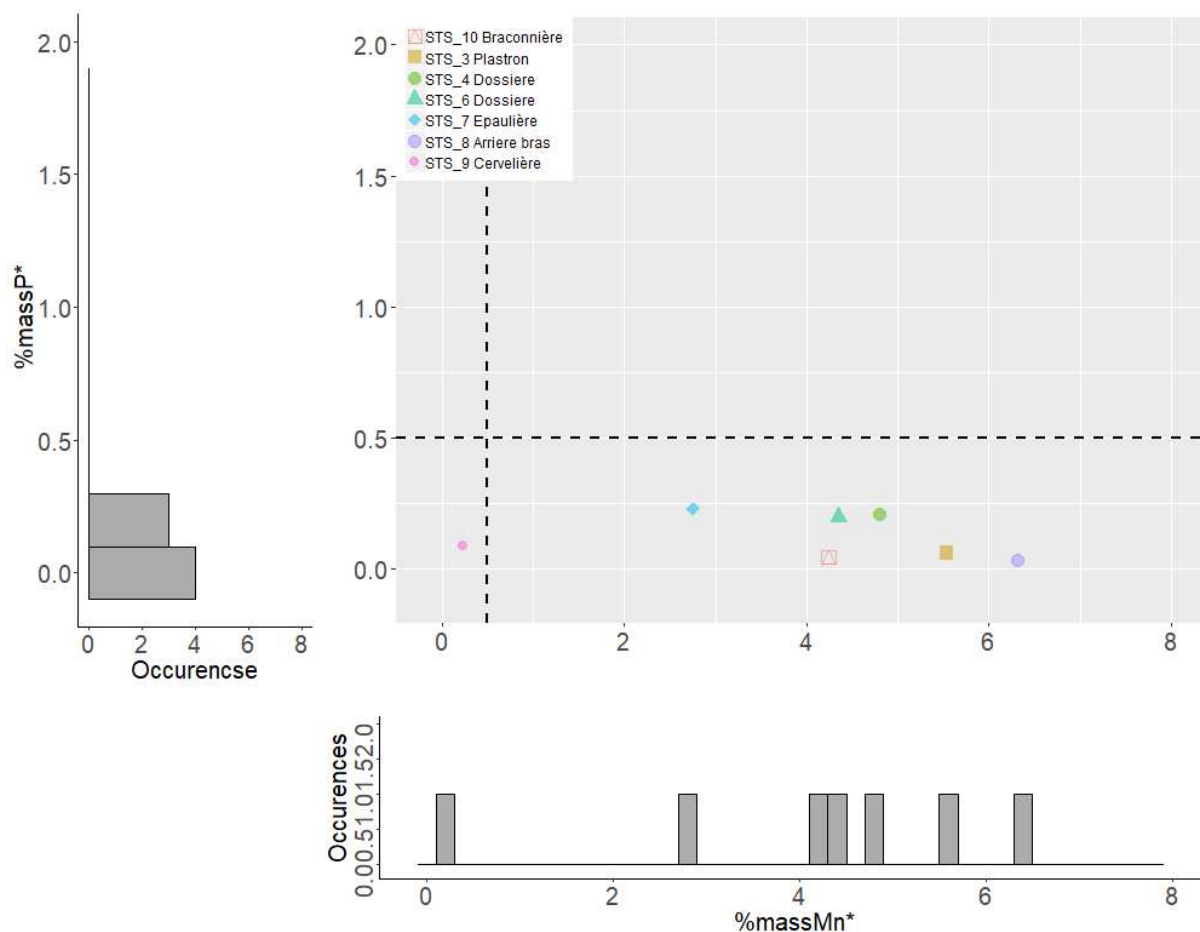


Figure 158 - Distribution des teneurs moyennes pondérées par la surface en manganèse et en phosphore pour les éléments de l'armure de Sainte Suzanne

➤ Analyse multivariée

Une ACP a été réalisée en considérant les données transformées en log-ratio des éléments traces dosés sur les éléments de l'armure de Sainte Suzanne. Les résultats sont présentés figure 159. Les axes PC1/PC2 mettent en évidence 3 groupes. Le premier est formé par l'échantillon 9 issu de la cervelière. Le deuxième par les échantillons 7 et 8 correspondants respectivement à l'épaulière droite ainsi qu'à l'arrière bras droit. Le troisième comprend les échantillons 3 (plastron), 4 (dossière), 6 (dossière) et 10 (braconnière). De plus, dans le cas de l'échantillon 6, les familles d'inclusions différenciées avec les éléments majeurs se confondent ici. Si les traces ne sont pas affectées par des différences de ratios, ceci implique que les deux lopins de métal constituant la dossière sont

certainement issus de la même région. Les différences observées sur les éléments majeurs supposent cependant qu'ils ne sont pas issus de la même opération de réduction.

Les axes PC1/PC3 confirment ces observations et permettent en outre de séparer les échantillons 7 et 8. Par conséquent, il semble que l'armure de Sainte Suzanne soit constituée de fournitures de métal d'origines bien différenciées qu'il reste à déterminer.

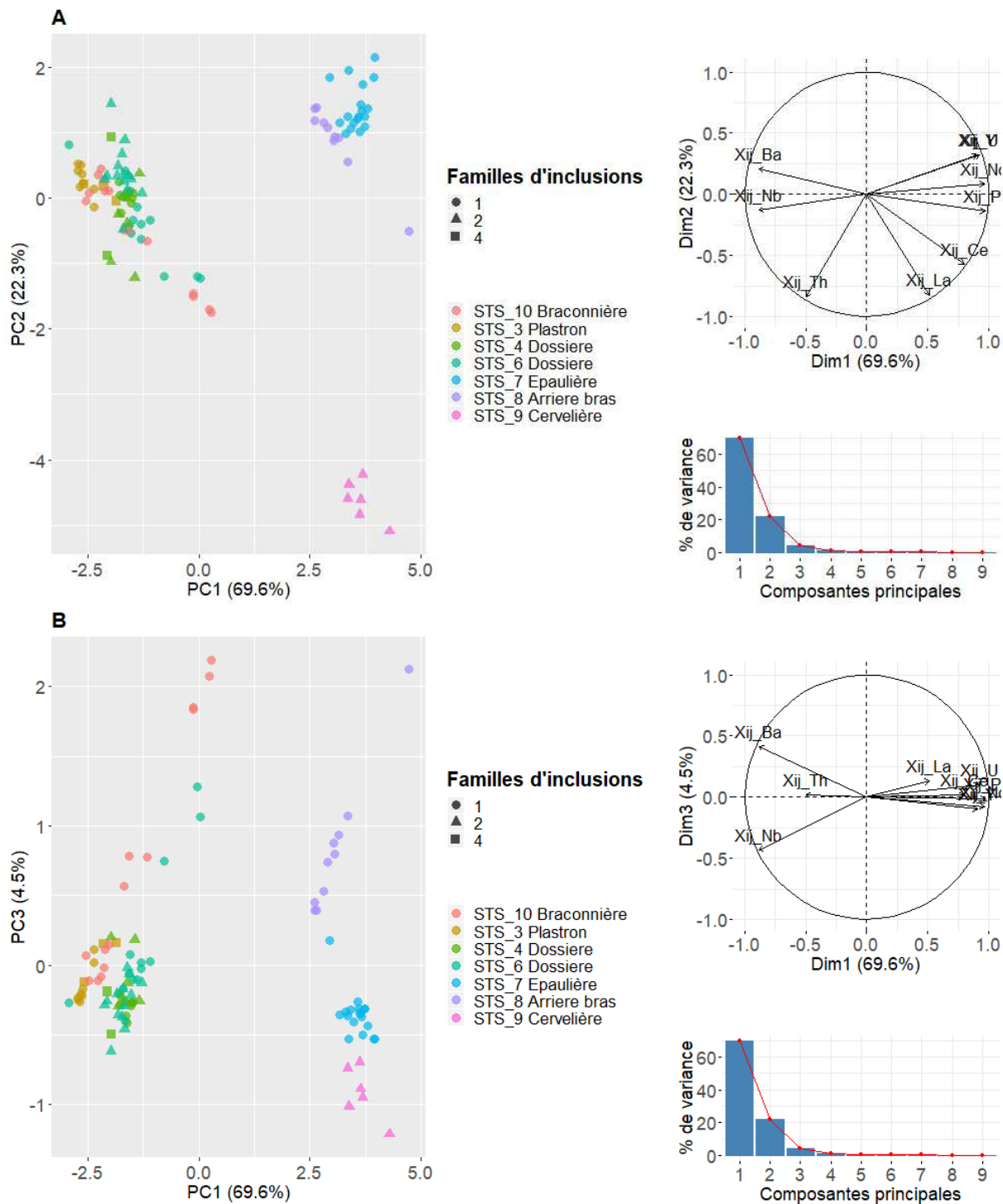


Figure 159 - Synthèse des résultats de l'ACP réalisée sur les données transformées en log ratio des éléments traces des échantillons de l'armure de Sainte Suzanne. « A » axes PC1 et PC2, « B » axes PC1 et PC3

❖ Provenance du métal

La figure 160 présente les résultats de l'ACP réalisée sur les données de l'armure de Sainte Suzanne et celles du groupe d'armure « Italie_groupe1 ». Sur les axes PC1 et PC2 un nuage de points dense est visible. Il regroupe les armures du groupe « Italie_groupe1 » et les échantillons prélevés sur le plastron, la braconnière et la dossière de l'armure de Sainte Suzanne. La cervelière (échantillon 9) ainsi que les défenses du bras droit (échantillons 7 et 8) forment des groupes de points isolés, qui signent des approvisionnements en métal différents. Les axes PC1/PC3 confirment ces observations.

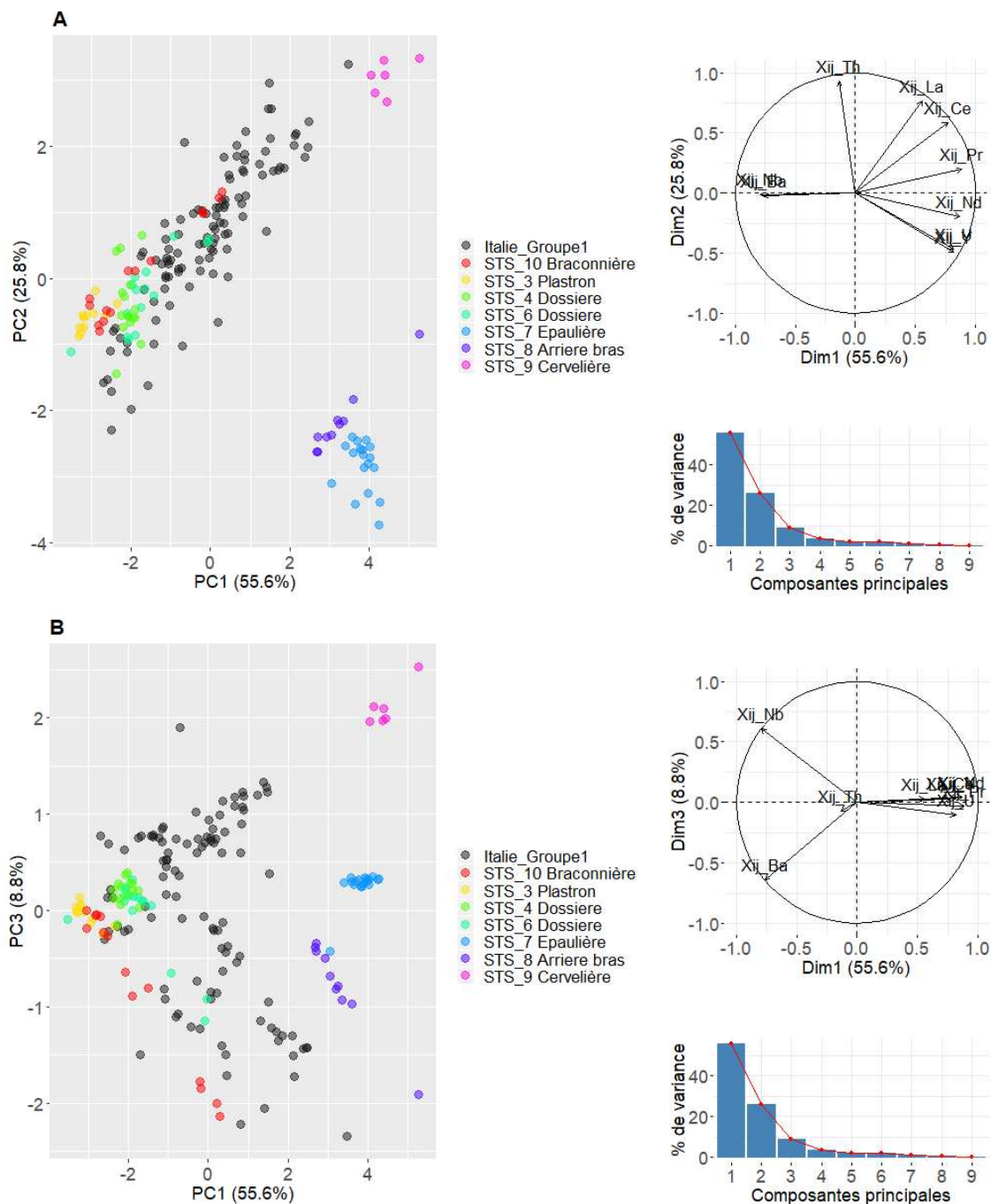


Figure 160 -ACP réalisée sur les données transformées en log ratio des éléments traces des éléments d'armure de Sainte Suzanne et sur celle du groupe « Italie_groupe1 ». « A » axes PC1 et PC2, « B » axes PC1 et PC3

La comparaison entre la signature chimique des éléments de l'armure de Sainte Suzanne et celle de l'espace lombard est présentée dans le volume annexe. La compatibilité avec cet espace est probable hormis pour la cervelière (échantillon STS_9). Ce résultat est corroboré par les faibles teneurs en manganèse mesurées dans les inclusions.

La même démarche va être suivie pour présenter les résultats de l'armure de François de Montmorency.

ii. Armure de François de Montmorency

Pour rappel, les différentes parties de l'armure sont présentées dans le Chapitre 2 (voir p. 158). Les échantillons de l'armure qui ont pu faire l'objet d'une étude de provenance sont rassemblés dans le tableau 27.

Tableau 27 – Éléments de d'armure de François de Montmorency étudiés dans cette partie

Armure ou Élément	Description	Datation	Lieu de fabrication supposé	Nombre de prélèvements	Numéro(s) du ou des échantillon(s) étudiés
Mont_3	Colletin	XVI ^e siècle	France	4	4_colletin_a 4_colletin_b 15_colletin
Mont_10	Epaulière Gauche	XVI ^e siècle	France	1	10_epauliere
Mont_11	Arrière bras gauche	XVI ^e siècle	France	1	11_epauliere
Mont_12	Cubitière	XVI ^e siècle	France	1	12_cubitiere
Mont_2	Gantelet gauche	XVI ^e siècle	France	1	2_gantelet
Mont_5	Tassettes jambe gauche	XVI ^e siècle	France	3	5_tassette 6_tassette 7_tassette
Mont_13	Tassettes jambe droite	XVI ^e siècle	France	2	13_tassette 14_tassette
Mont_8	Dossière	XVI ^e siècle	France	2	8_dossiere 9_dossiere

❖ Différentes origines du métal au sein d'un même échantillon

L'analyse physico chimique des inclusions a permis, après tri et élimination des ajouts de forge, de mettre en évidence des groupes spatialement différenciés seulement pour l'échantillon 13 issu d'une tassette (voir figure 161). Toutefois, les structures en bandes précédemment décrites associaient généralement une partie ferritique (parfois phosphoreuse) à un acier moyennement carburé. Or ici la microstructure de l'échantillon est composée d'une bande centrale légèrement plus carburée que ses extrémités. La famille 1 se distribue uniquement sur une des extrémités, tandis que la famille 2 s'étend sur les deux autres tiers de l'échantillon.

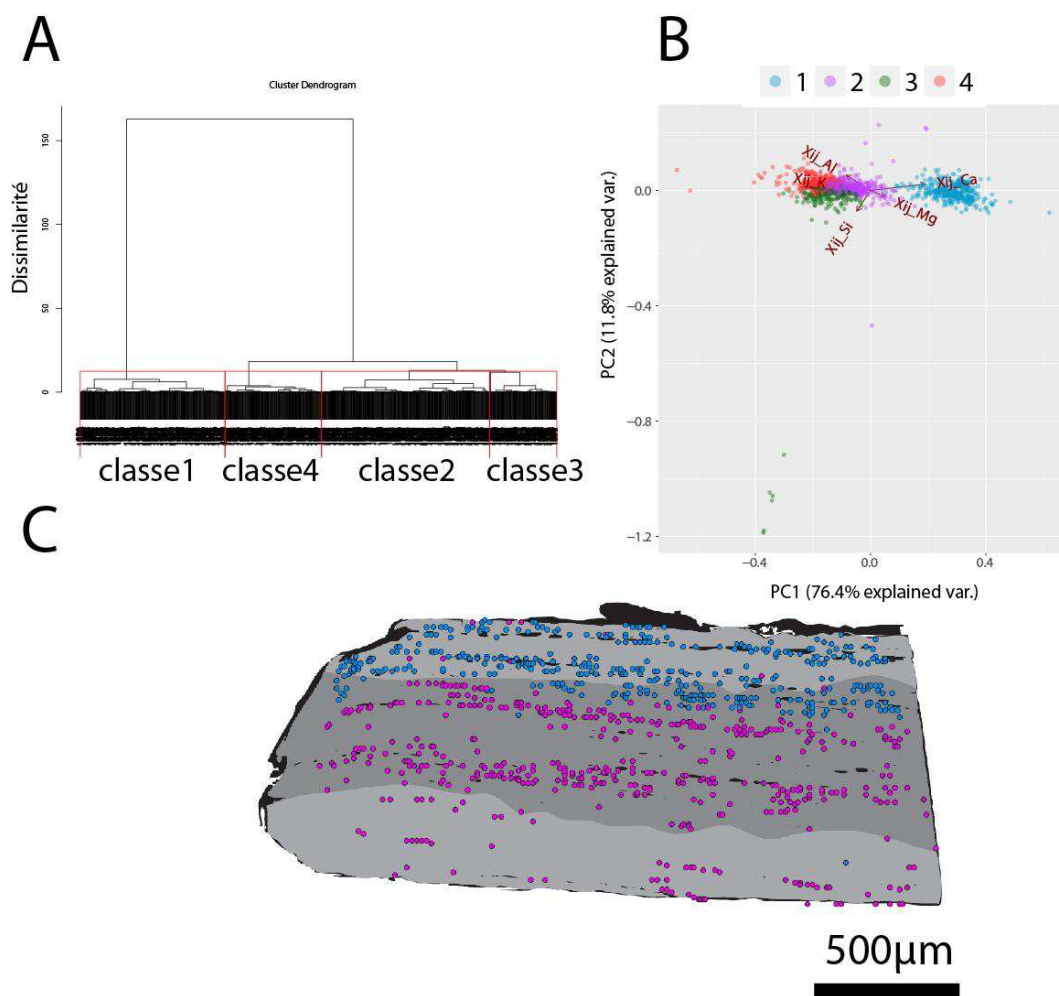


Figure 161- Résultat du traitement multivarié sur l'échantillon 13. « A » Dendrogramme 4 groupes ont été sélectionnés. « B » Visualisation des 4 groupes sur la PCA. Les familles 1 et 2 se distinguent chimiquement et spatialement. Les familles 3 et 4 de taille plus faible et plus dispersées ont été éliminées. « C » Répartition des familles d'inclusions sur l'échantillon.

❖ Hétérogénéité des fournitures de métal utilisé pour réaliser l'armure

➤ Filtre des teneurs absolues en manganèse et phosphore

La figure 162 présente la teneur moyenne pondérée par la surface des inclusions en phosphore en fonction de celle du manganèse pour les échantillons de l'armure de François de Montmorency. Hormis les échantillons 8_dossière et 15_colletin, prélevés respectivement sur la dossière et le gorgerin de l'armure, qui ne contiennent ni manganèse, ni phosphore, l'ensemble des échantillons contient du manganèse jusqu'à 4%mass mais pas de phosphore, selon les valeurs limites fixées.

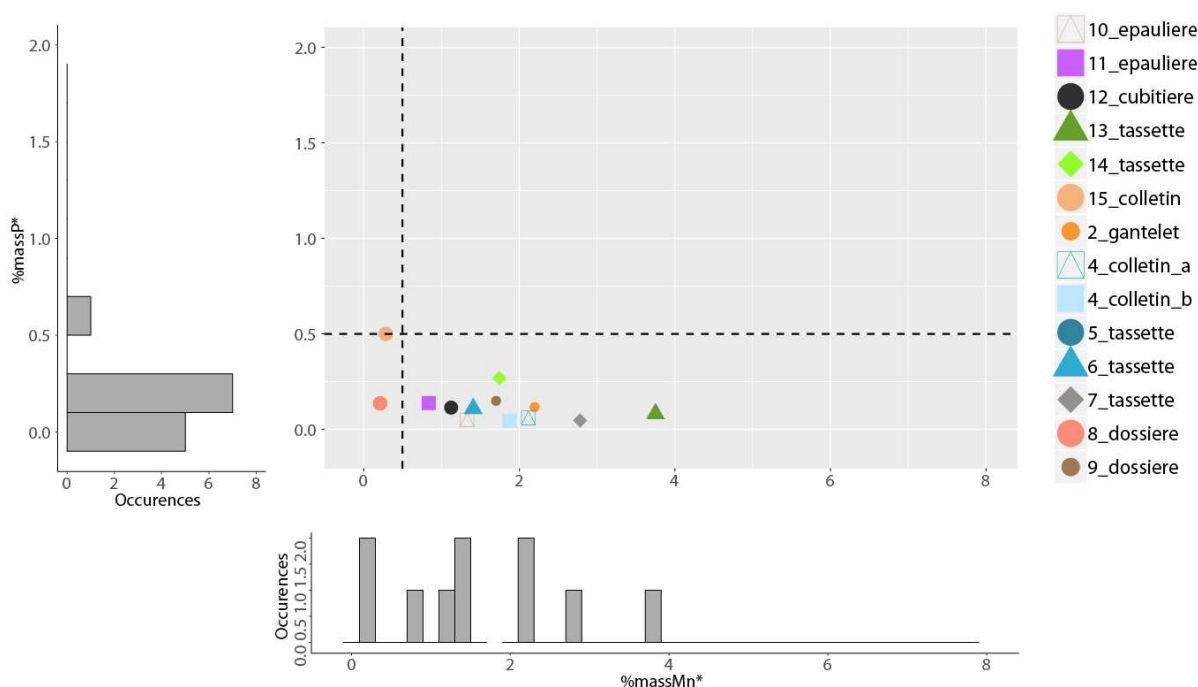


Figure 162 - Distribution des teneurs moyennes pondérées par la surface en manganèse et en phosphore pour les éléments de l'armure de François de Montmorency

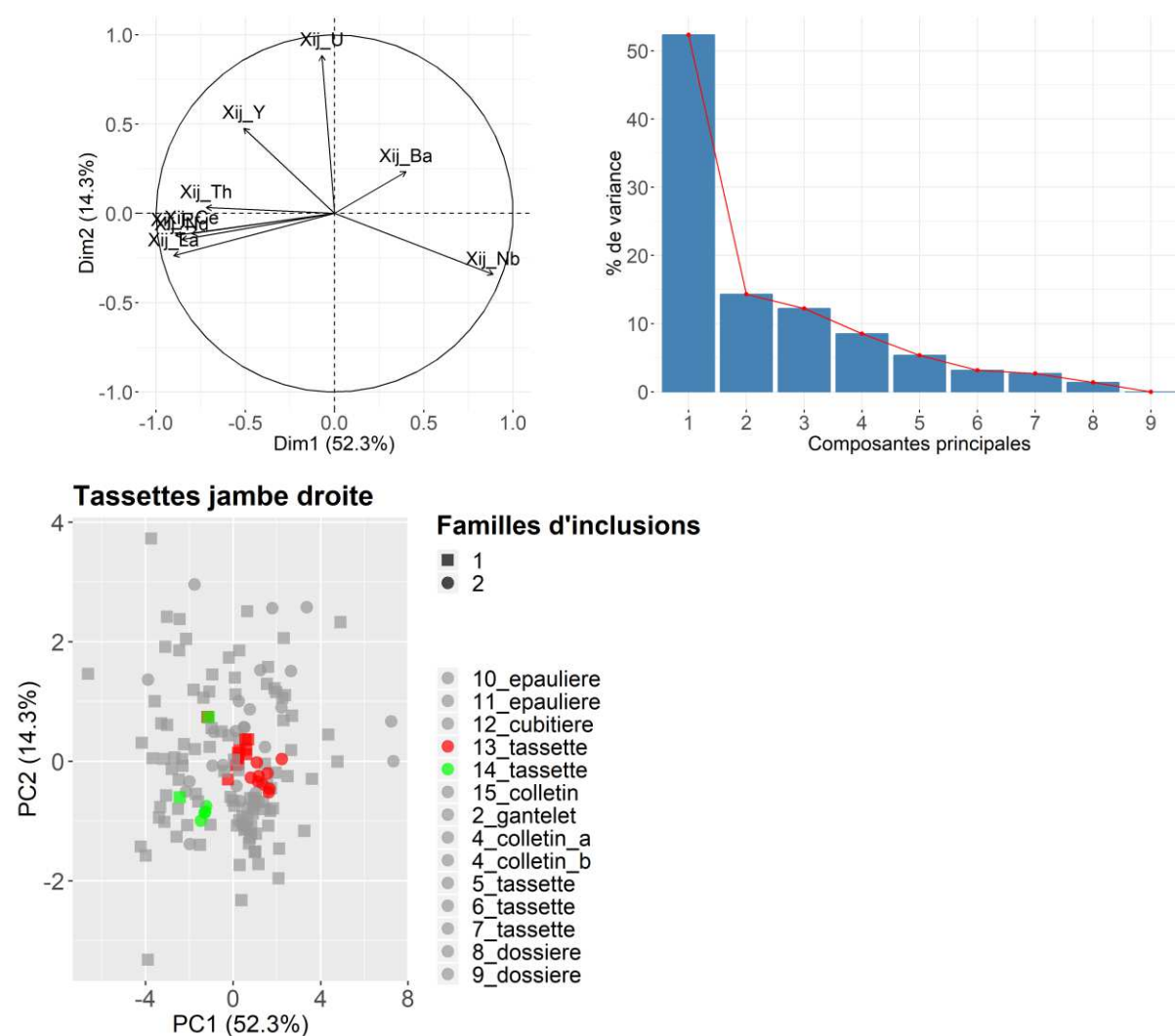
➤ Analyse multivariée

La figure 163 illustre les résultats obtenus sur les éléments de l'armure de François de Montmorency. Il a été vérifié que les composantes supérieures à PC2 n'apportaient pas d'information supplémentaire quant à la séparation des groupes, c'est pourquoi nous considérerons ici uniquement les projections sur les deux premières composantes. Pour améliorer la lisibilité de la représentation les résultats relatifs à chaque partie de l'armure sont présentés sur des schémas différents.

Pris dans sa globalité l'ensemble des éléments forme un nuage de points cohérent. Aucun échantillon ne se retrouve complètement isolé. Si l'on s'intéresse aux sous-ensembles définis ici (bras gauche, tassettes jambe gauche, tassettes jambe droite, dossière et colletin) des recouvrements sont systématiquement rencontrés. L'échantillon 13 issu d'une tassette de la jambe droite présentait

plusieurs familles d'inclusions spatialement différenciées suite au tri effectué sur les éléments majeurs (voir figure 161). Les éléments traces permettent également de différencier ces deux familles d'inclusions (classe 1 et classe 2). Toutefois leurs projections demeurent très proches. De plus, il est à noter que les échantillons « 4_colletin_a » et « 4_colletin_b » appartiennent initialement à la même lame du colletin qui s'est scindée en deux lors du prélèvement. Leurs projections se superposent, ce qui laisse supposer une même origine du métal. Par conséquent, au contraire des échantillons G436_ech1 et G436_ech2 issu du cuissard G436 gauche (voir p.283), il n'est pas possible de prouver ici que la tôle initiale ait été formée de deux lopins de métal soudés ensemble.

Ainsi, au contraire des fournitures en métal de l'armure de Sainte Suzanne qui présentaient plusieurs signatures chimiques typées et bien différenciées, l'armure de François de Montmorency présente des signatures chimiques indissociables ce qui suggère des fournitures en métal d'origines proches ou peu typées.



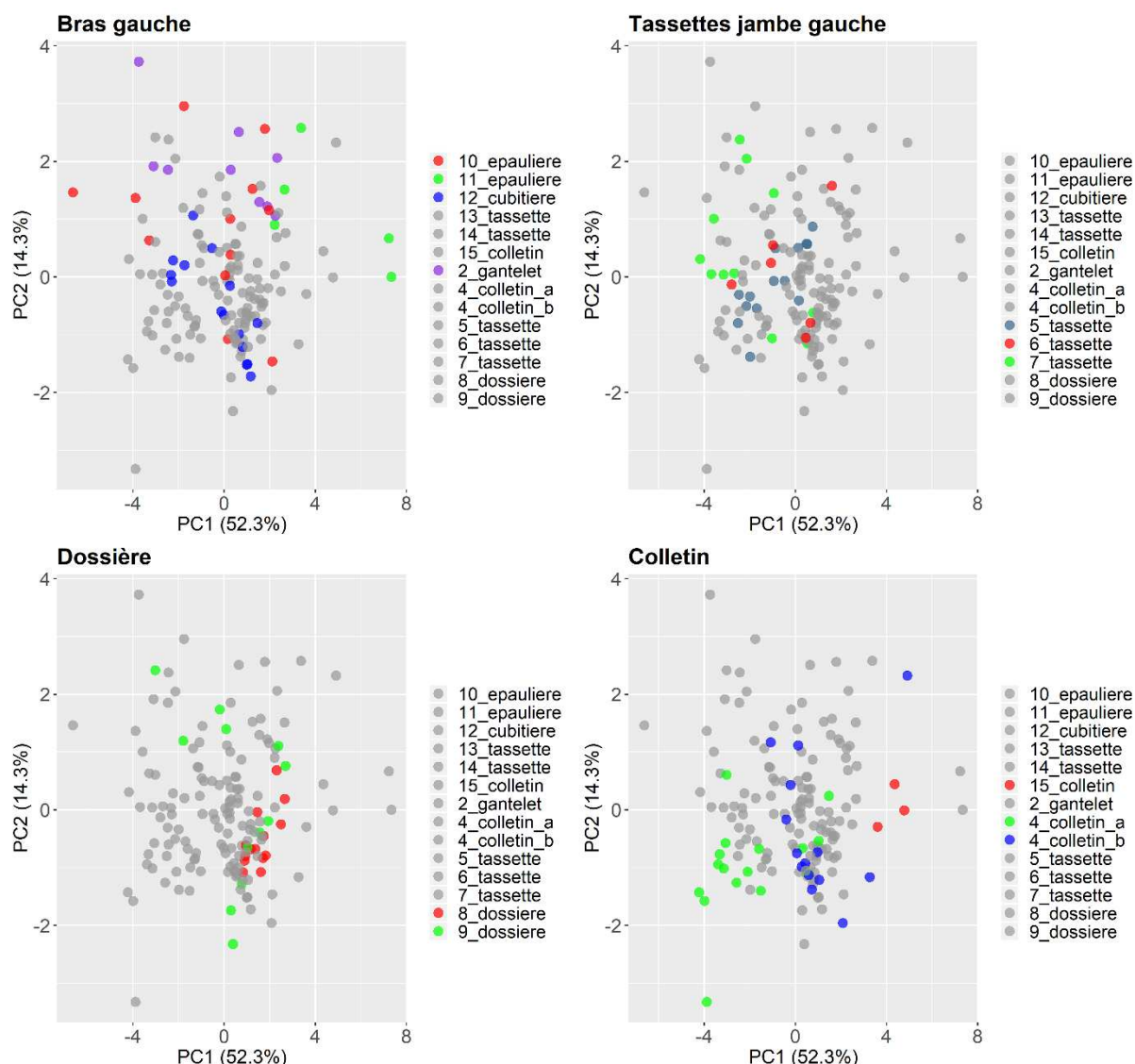


Figure 163 - Synthèse des résultats de l'ACP réalisée sur les données transformées en log ratio des éléments traces des échantillons de l'armure de François de Montmorency

Compte tenu des rapports privilégiés que la France aurait entretenus avec les armuriers lombards, et de la présence de manganèse dans les inclusions, il semble pertinent de comparer la signature chimique de cette armure avec celle du groupe « Italie_Groupe1 ».

❖ Provenance du métal

La comparaison des signatures chimiques du groupe Italie_Groupe1 avec les éléments de l'armure de François de Montmorency est présentée figure 164. Les échantillons 10_epauliere, 11_epauliere et 5_tassette présentent une importante dispersion. C'est pourquoi certains individus se mélangent avec l'espace Italie_groupe1. Cependant la majorité des projections de l'armure s'en différencie.

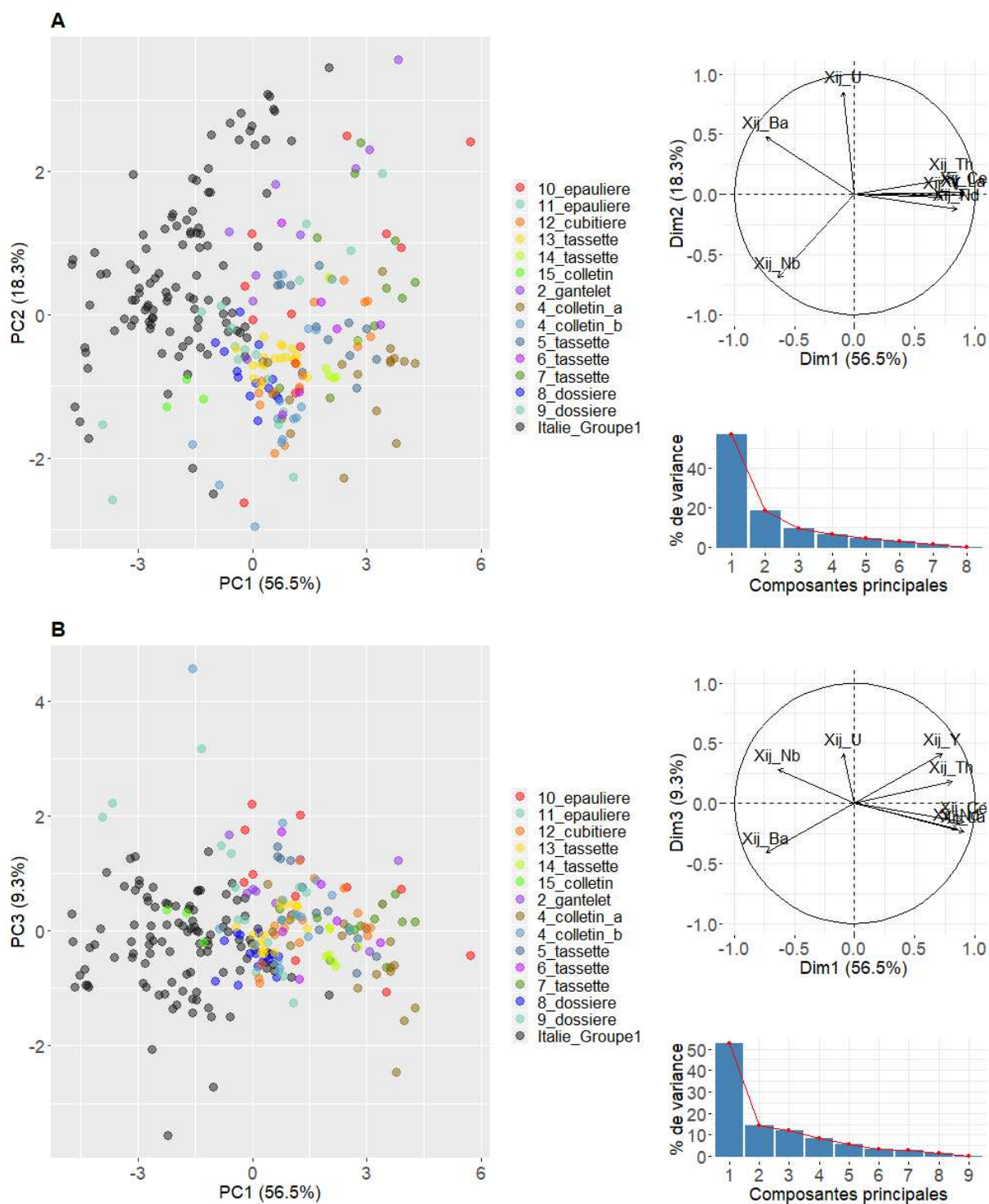


Figure 164 - Synthèse des résultats de l'ACP réalisée sur les données transformées en log ratio des éléments traces des échantillons de l'armure de François de Montmorency et sur celles des armures du groupe « Italie_groupe1 ». « A » axes PC1 et PC2, « B » axes PC1 et PC3

La prochaine étape consiste à préciser la provenance du métal utilisé pour la fabrication de l'armure, en effectuant des comparaisons entre les signatures chimiques de l'armure et celles d'espaces de production déjà caractérisés comme l'espace lombard. Malheureusement, elles n'ont

pas abouti sur un résultat positif¹¹⁵. La provenance du métal utilisé pour la fabrication de cette armure demeure par conséquent indéterminée.

4) Bilan

Au terme de cette partie, nous avons pu établir différents groupes de provenance. Un groupe d'armures supposées de fabrication italienne dénommé « **Italie_Groupe1** ». Il regroupe les échantillons WCA143A, WCA143B, 9301892_T, 9301904_T, 9301891, LAM46491_1, LAM46491_2, LAM46492, WCA144, WCA235 et WCA73. Un autre groupe comptant des armures supposées de fabrication allemande a également été défini sous l'appellation « **Allemagne_Groupe1** ». Il regroupe les échantillons G435_D1, G435_D2, G435_ech1, G435_ech2, G435_G3, G436_ech1, G436_ech2, G436_ech3, G436_G4, G436_G5, G436_G5, G40-2, WCA250, WCA245, WCA65, 1120, 9301911, 9301912.2_T, 951180.1, GNM1312, HPO2608_1, HPO2608_2 SN et H. Il est beaucoup plus dispersé que le nuage de points italien et comprend certainement différents sous-ensembles, suggéré par la variabilité des teneurs en manganèse et phosphore. Ce groupe n'est par ailleurs pas distinguable des armures supposées de facture française. Par conséquent, sa cohérence d'un point de vue chimique s'avère beaucoup moins forte que pour le groupe d'armure italienne.

Des comparaisons avec les ensembles géochimiques de production ont également été menées. Toutefois nous nous sommes heurtés ici à une difficulté majeure. La spécificité des inclusions d'armures qui sont de faible taille n'a permis de doser qu'un nombre restreint d'éléments traces ce qui diminue fortement le jeu de variables utilisables pour l'analyse multivariée. Ceci a pour effet de limiter la portée des comparaisons de part le recouvrement des signatures des espaces de production qui deviennent alors difficile à discriminer. Des confrontations pertinentes ont été obtenues seulement dans le cas des espaces lombards et lorrains, fortement typés. Elles ont permis de valider la compatibilité chimique entre l'espace lombard défini par S. Leroy et les armures du groupe Italie_Groupe1. Dans le cas de la Lorraine deux échantillons issus du site de Laquenexy se sont avérés compatibles avec l'espace « Minette » caractérisé par A. Disser. Il s'agit des échantillons 348.214.425 et 34820.434.1.

Enfin, les comparaisons menées sur les éléments d'armure de Sainte Suzanne et de François de Montmorency ont permis de dégager différentes origines pour le métal. Dans le cas de l'armure de Sainte Suzanne quatre groupes ont été formés. Un premier constitué des inclusions de la cervelière est incompatible avec l'espace lombard et le groupe Italie_Groupe1. Le second regroupe celles de la dossière, du plastron et de la braconnière est compatible avec les inclusions du groupe de

¹¹⁵ Ces comparaisons sont présentées en Annexes

provenance Italie_Groupe1, et enfin, le troisième et le quatrième comprennent l'arrière bras et l'épaulière droite. Ces deux échantillons pourraient aussi être compatibles avec l'espace lombard.

L'armure de François de Montmorency semble, elle, posséder des fournitures en métal d'origines proches ou peu typées puisqu'on observe un fort recouvrement des signatures chimiques. Ces dernières n'ont pas pu être rapprochées d'un ensemble géochimique de production et se distinguent du groupe d'armure italienne Italie_Groupe1. La provenance du métal reste donc indéterminée.

Pour conclure ce chapitre, il reste maintenant à présenter les résultats relatifs au procédé de réduction. Pour rappel, deux filières de réduction coexistaient à l'époque qui nous occupe. La filière directe, qui conserve la signature chimique de l'ensemble géochimique de production au sein des inclusions, et la filière indirecte, où cette dernière est perdue lors de la première étape de réduction. Ces deux procédés sont différenciables suite au tri inclusionnaire effectué sur les éléments majeurs.

III. Procédé de réduction

1) Résultats généraux

La distinction entre les deux procédés a été faite en couplant deux approches : l'une est basée sur l'emploi de la régression logistique, l'autre, graphique, fait intervenir un abaque de compatibilité. Chacune définit une compatibilité avec l'un ou l'autre des procédés et une zone d'indétermination. Par mesure de prudence, le procédé de réduction a été rangé dans la catégorie « Indéterminé » lorsqu'une incompatibilité forte entre les deux approches a été rencontrée (voir Chapitre 3). De plus, certains des échantillons (une vingtaine) ne possédaient pas suffisamment d'inclusions (<20) pour que des conclusions fiables puissent être tirées. Dans ce cas, le procédé a également été considéré comme « Indéterminé ». Les résultats des deux approches sont rassemblés pour chaque échantillon dans le volume annexe.

Les résultats relatifs à la détermination du procédé de réduction sont présentés figure 165 pour l'ensemble des échantillons du corpus. Dans certains cas, différentes familles d'inclusions spatialement différenciées ont parfois été identifiées au sein d'un même échantillon¹¹⁶. Parfois les signatures chimiques de ces familles ont pu être associées à des procédés distincts. Les deux échantillons dans ce cas sont regroupés dans le groupe PM (pour « Procédé Multiple »).

Plus de la moitié des échantillons sont associés au procédé de réduction directe, et seulement un tiers d'entre eux au procédé de réduction indirecte. Le procédé n'a pas pu être déterminé pour une trentaine des échantillons (catégorie « Ind »).

¹¹⁶ Ce cas de figure a été traité à plusieurs reprises notamment p.278

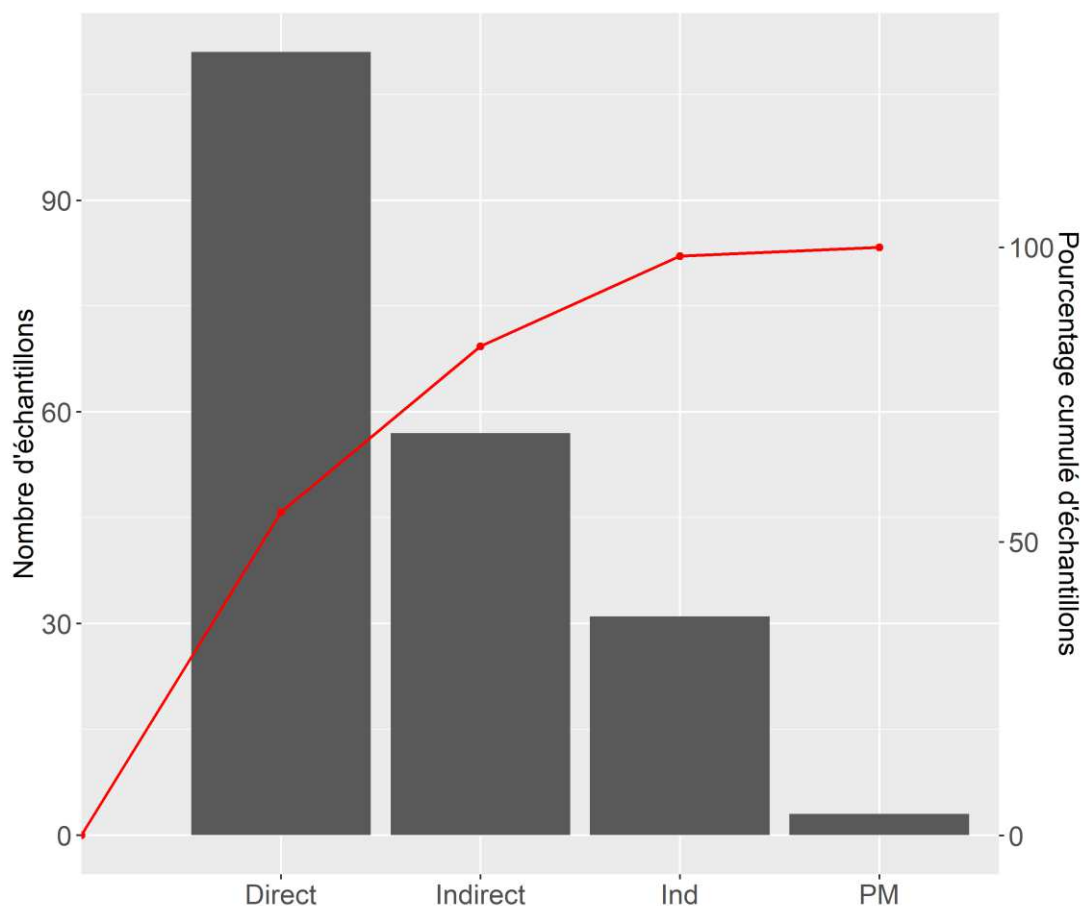


Figure 165 - Procédé de réduction déterminé pour l'ensemble des échantillons du corpus. « Direct » procédé direct, « Indirect » procédé indirect, « Ind » procédé indéterminé, « PM », présence des deux procédés au sein de l'échantillon dans des familles d'inclusions différentes

a) Nature du métal issu du procédé de réduction indirecte

Les échantillons associés au procédé de réduction indirecte sont en moyenne moins carburés que ceux issus du procédé direct (voir figure 166). La présence de fer phosphoreux a été relevée indépendamment du type de procédé. Ainsi, il ne semble pas y avoir de tendance particulière concernant le phosphore. En revanche, les métaux complètement décarburés sont plus nombreux dans le cas du procédé de réduction indirecte. Ces résultats seront commentés et discutés plus en détails dans le chapitre suivant.

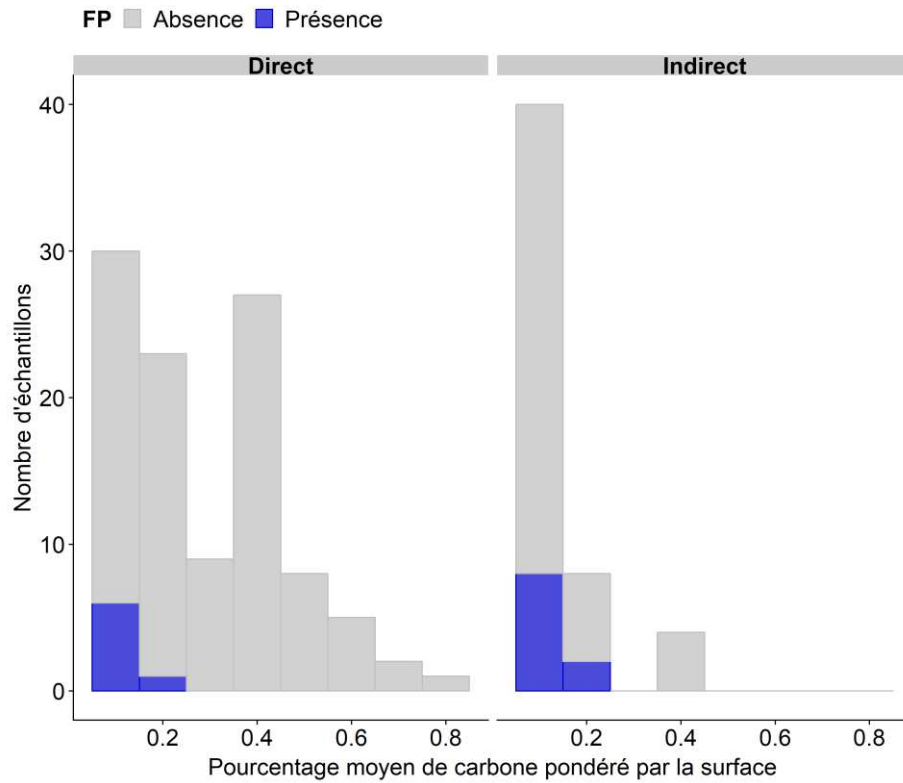


Figure 166 - Occurrences des deux procédés en fonction du taux de carbone. « FP » fer phosphoreux (%massP>0,1 dans le métal).

b) Période de fabrication

La première occurrence du procédé de réduction indirecte au sein des échantillons est visible au XIV^e siècle (voir figure 167). Au XV^e siècle et XVI^e siècle le procédé direct est largement majoritaire ce n'est qu'au XVII^e siècle que la tendance s'inverse.

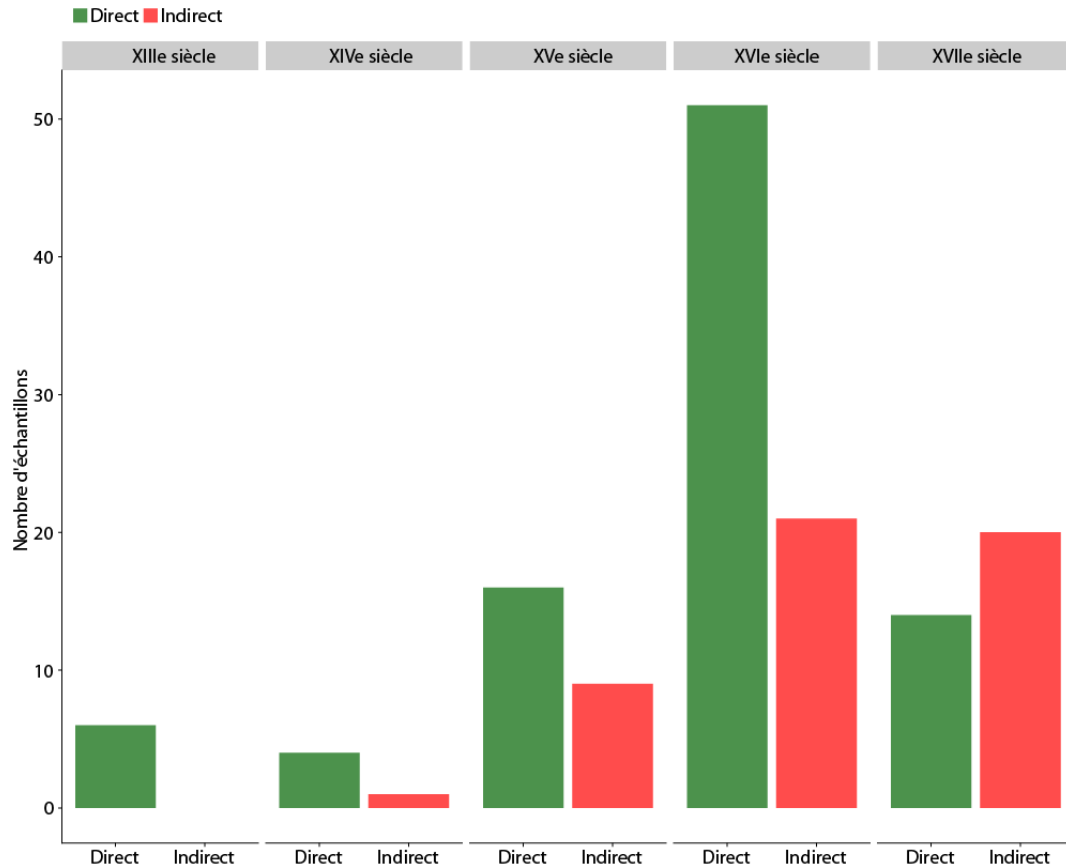


Figure 167 - Distribution des procédés de réduction directe et indirecte en fonction du siècle considéré

L'installation du procédé de réduction indirecte ne s'est pas faite de façon uniforme en Europe et dépend de la région considérée (voir Chapitre 1). Le paragraphe suivant détaille ainsi les résultats par rapport au lieu supposé de fabrication des pièces. Pour rappel, trois grands centres de fabrication sont présents dans le corpus étudié : « l'Allemagne », « L'Italie » et la « France »¹¹⁷.

¹¹⁷ Pour rappel le groupe « Allemagne » rassemble des pièces supposées avoir été fabriquées dans des lieux précis comme Nuremberg, Augsbourg et Brunswick ou simplement désignées comme de typologie « allemande ». Le groupe « Italie » comprend des pièces supposées avoir été fabriquée en Italie du Nord, pour la plupart sans doute à Milan ou peut être dans d'autres villes comme Brescia. Elles sont dites de « typologie italienne ». Le groupe « France » rassemble les pièces dites de typologie « française »,

2) Lieu de fabrication supposé des pièces

a) *L'Allemagne*

La figure 168 identifie, en fonction de la datation des pièces et pour chaque échantillon, le type de procédé associé. Les premières occurrences du procédé de réduction indirecte apparaissent au XV^e siècle. Le procédé direct reste toutefois majoritaire dans les pièces étudiées et demeure présent même au début du XVII^e siècle.

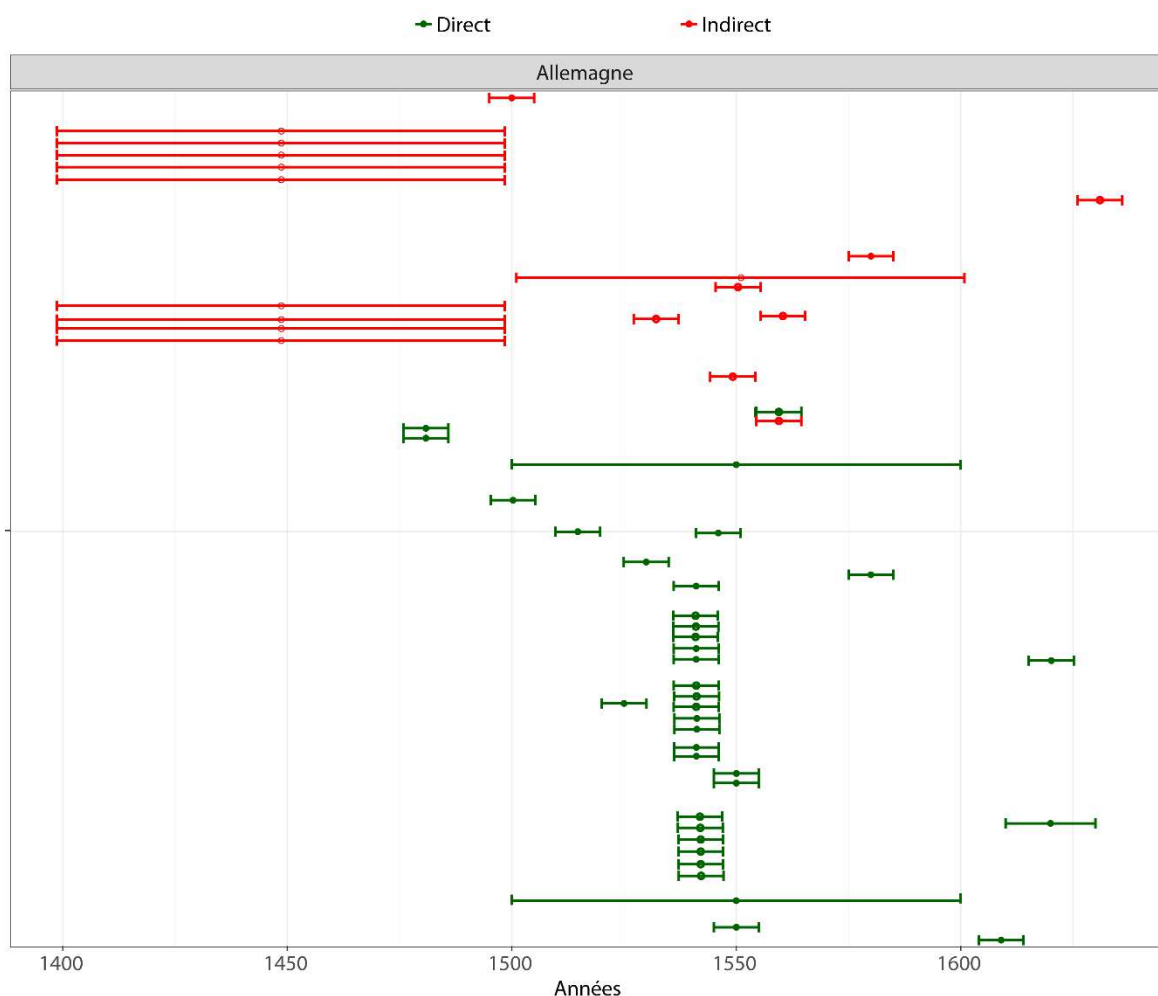


Figure 168 - Procédé de réduction : résultats généraux sur les pièces allemandes. Chaque point représente un échantillon d'armure étudié. Les marges d'erreurs associées aux datations des pièces ont été ajoutées. Les échantillons accolés verticalement font partie de la même pièce

La figure 169 présente les résultats des éléments d'armures qui sont supposés avoir été fabriqués à Nuremberg, ville allemande la mieux représentée dans notre corpus. Le procédé direct est majoritaire. Les pièces marquées d'un poinçon (du maître ou de la ville) ont été identifiées. La présence de marques sur les pièces ne semble pas être corrélée avec l'utilisation de l'un ou l'autre des procédés de réduction.

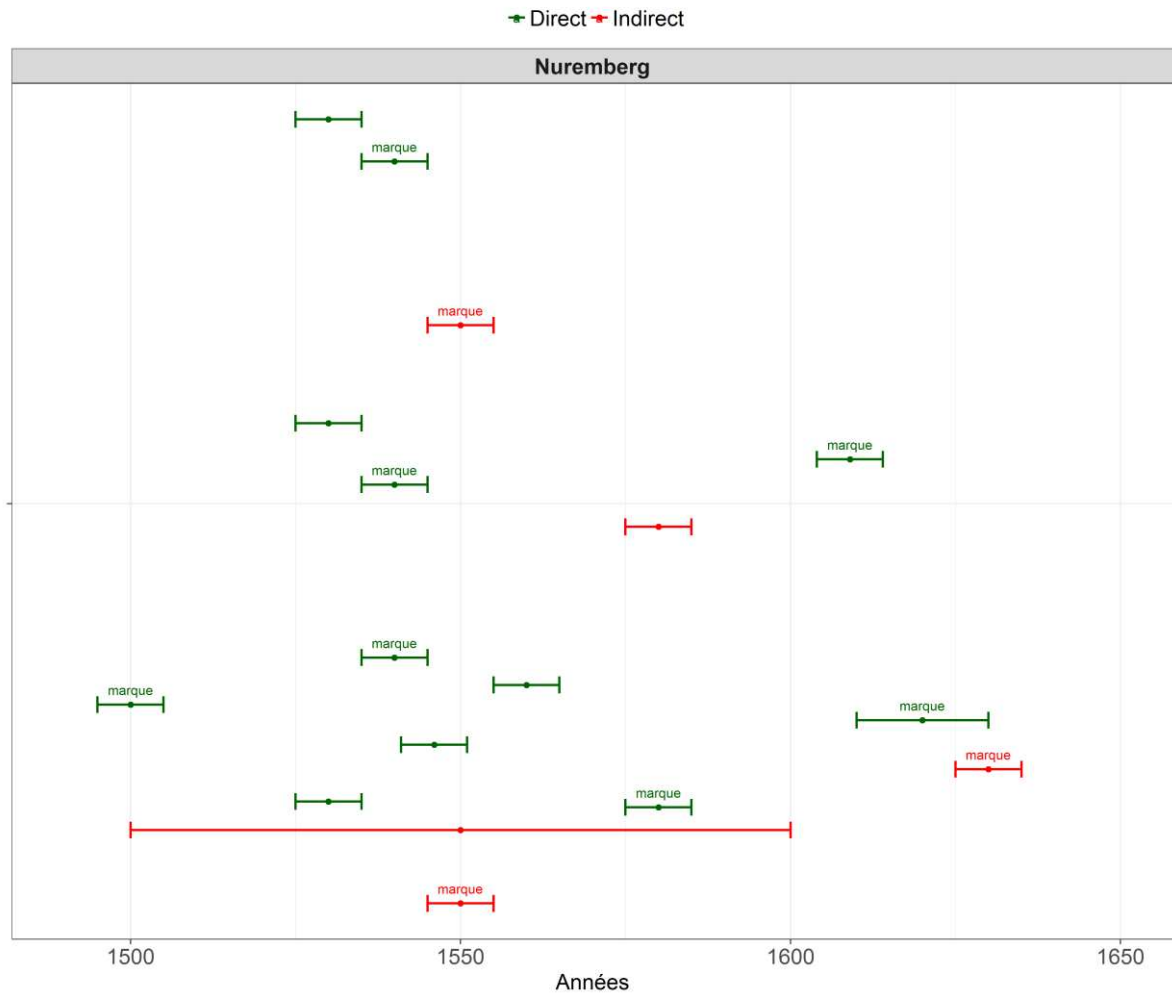


Figure 169 - Procédé de réduction : résultats généraux sur les pièces issues de Nuremberg. Chaque point représente un élément d'armure étudié. Les marges d'erreurs associées aux datations des pièces ont été ajoutées. Un label « marque » a été ajouté pour les éléments porteurs d'une marque de la ville ou de l'armurier.

b) L'Italie

La figure 170 identifie, en fonction de la datation des pièces et pour chaque échantillon, le type de procédé associé. Dans le cas des pièces supposées de fabrication italienne, le procédé direct est très largement majoritaire. Seules quatre occurrences du procédé indirect sont recensées. Les éléments issus de l'armure de Sainte Suzanne ont été repérés par un label sur la figure 170. La cervelière a été exclue, sa typologie ne permettant pas de lui attribuer une provenance italienne, tout comme l'échantillon issu de la cubitière, qui ne présentait pas suffisamment d'inclusions. Seule l'épaulière gauche contient des familles d'inclusions associées au procédé de réduction indirecte.

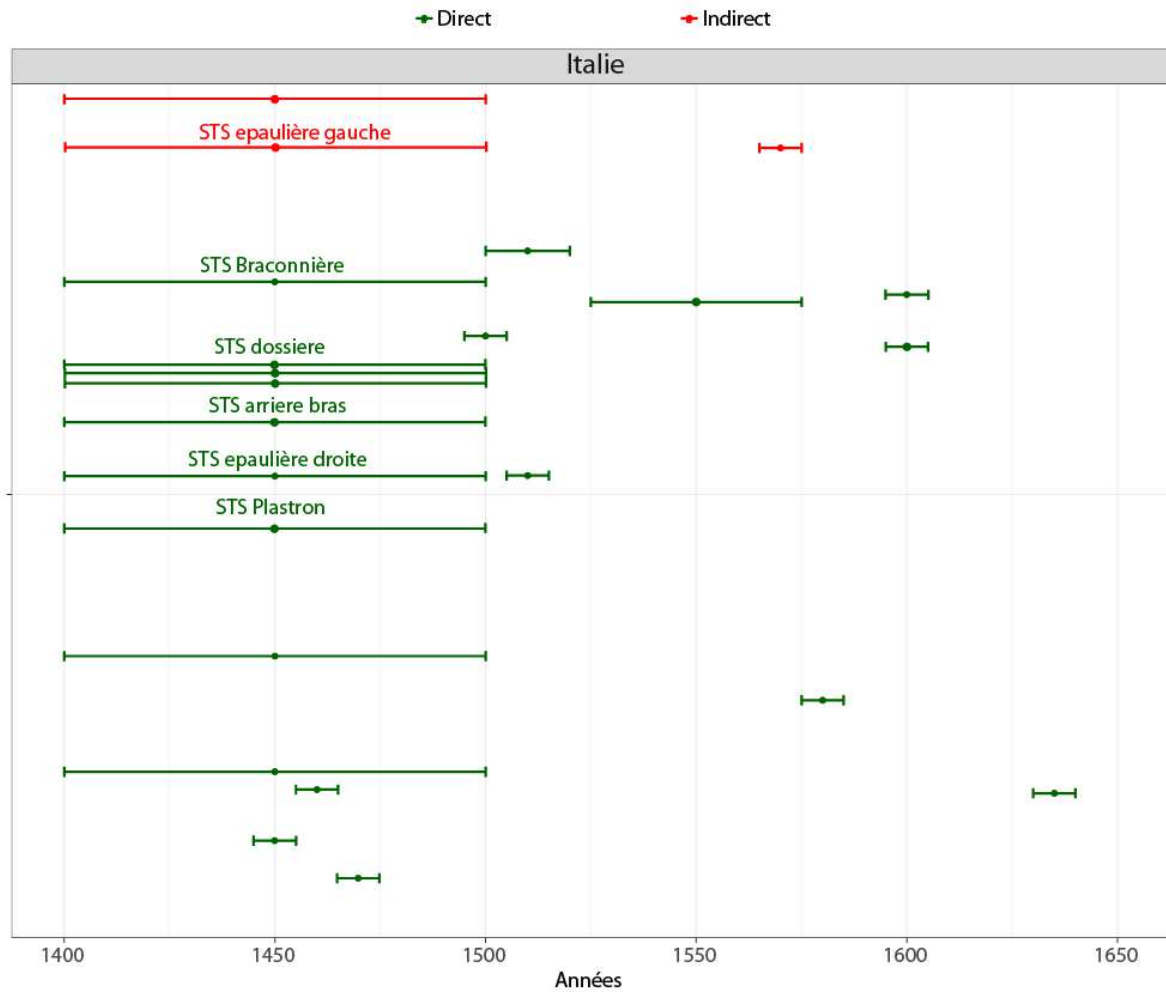


Figure 170- Procédé de réduction : résultats généraux sur les pièces italiennes. Chaque point représente un échantillon d'armure étudié. Les marges d'erreurs associées aux datations des pièces ont été ajoutées. Les échantillons accolés verticalement sont issus de la même pièce

c) La France

La figure 171 identifie, en fonction de la datation des pièces et pour chaque échantillon, le type de procédé associé. Dans le cas des pièces supposées d'origine française le procédé direct prédomine également. Les éléments issus de l'armure de François de Montmorency ont été mis en évidence sur la figure 171. Deux occurrences du procédé indirect sont recensées. Elles sont présentes sur un échantillon issu du colletin et sur la défense de tête.

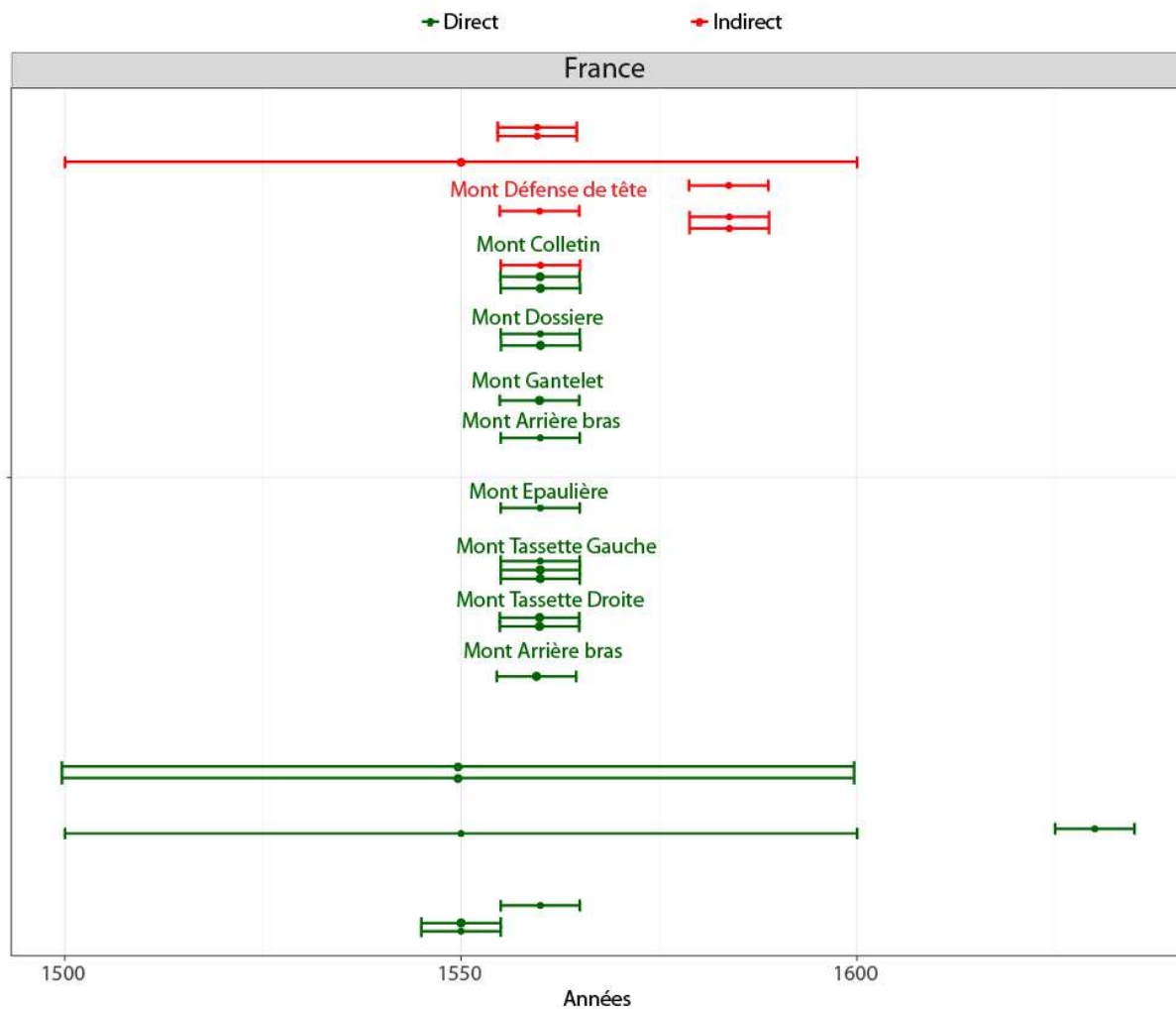


Figure 171- Procédé de réduction : résultats généraux sur les pièces françaises. Chaque point représente un échantillon d'armure étudié. Les marges d'erreurs associées aux datations des pièces ont été ajoutées. Les échantillons accolés verticalement sont issus de la même pièce

Chapitre 5 : Nature, circulation et production du métal utilisé pour la fabrication des armures : synthèse et discussion

Dans le chapitre précédent, les résultats relatifs à la nature, l'origine mais également le procédé de réduction du métal utilisé pour la fabrication des armures, ont été présentés en détails. Nous allons à présent rassembler ces résultats et les discuter selon différents axes de réflexion. Tout d'abord, nous établirons un bilan général sur la nature du métal et son comportement mécanique. Ensuite, nous discuterons du lien susceptible d'exister entre le type de métal utilisé par les armuriers avec l'usage de l'armure, la richesse de son porteur et son lieu de fabrication. Puis, nous verrons quelle lecture des résultats peut être tirée afin d'appréhender l'organisation des productions au sein des ateliers, aussi bien pour la réalisation d'une armure complète que pour des pièces de qualité constante, parfois produites en très grande quantité. Enfin, nous replacerons l'armure dans l'histoire de la métallurgie du fer, afin de discuter de la diffusion du procédé de réduction indirecte, et de son utilisation pour la fabrication des armures.

I. Nature et qualité du métal, synthèse

1) Nature du demi-produit livré aux armuriers

S'il ne le fabriquait pas lui-même, l'armurier recevait dans son atelier un demi-produit particulier, les fameuses plates de métal, qui se présentaient sous forme de tôle (voir Chapitre 1). Dans cette partie, nous allons caractériser la nature de ce demi-produit, en synthétisant les résultats présentés dans le chapitre précédent.

a) **Nature du métal : composition en carbone et en phosphore**

Nos résultats montrent que la microstructure du métal pouvait être variable. Plusieurs catégories de métal peuvent être mises en évidence en fonction du taux de carbone et de phosphore :

- Les **alliages très faiblement carburés** ($\%C^* < 0,1$)
- Les **alliages aciérés**
 - Les alliages faiblement carburés ($\%C^* : 0,1-0,3$)
 - Les alliages moyennement carburés ($\%C^* : 0,3-0,6$)
 - Les alliages fortement carburés ($\%C^* > 0,6$)
- Les **fers phosphoreux** : cette catégorie regroupe des alliages faiblement carburés ($\%C^* < 0,3$) avec une teneur en phosphore supérieure ou égale à 0,1%mass.

La figure 172 présente la part d'échantillons pour chacune des classes définies¹¹⁸. Les alliages faiblement carburés sont majoritaires, suivis des alliages très faiblement et moyennement carburés. Les fers phosphoreux représentent environ 15% des échantillons. La place des aciers fortement carburés est très minoritaire (environ 3%). Au premier coup d'œil, cette distribution semble déjà refléter la diversité des alliages ferreux qui pouvaient circuler au Moyen Âge (J.-F. Belhoste, 2001, p. 546; P. Braunstein and E. Landsteiner, 2011, p. 433; P. Dillmann, L. Pérez, and C. Verna, 2011 a, p. 20–30). De plus, nous savons grâce à la littérature que ces alliages étaient de nature très hétérogène (voir Chapitre 1). Qu'en est-il des armures ?

¹¹⁸ Les alliages trempés ont été exclus puisque leur teneur en carbone n'a pas été estimée

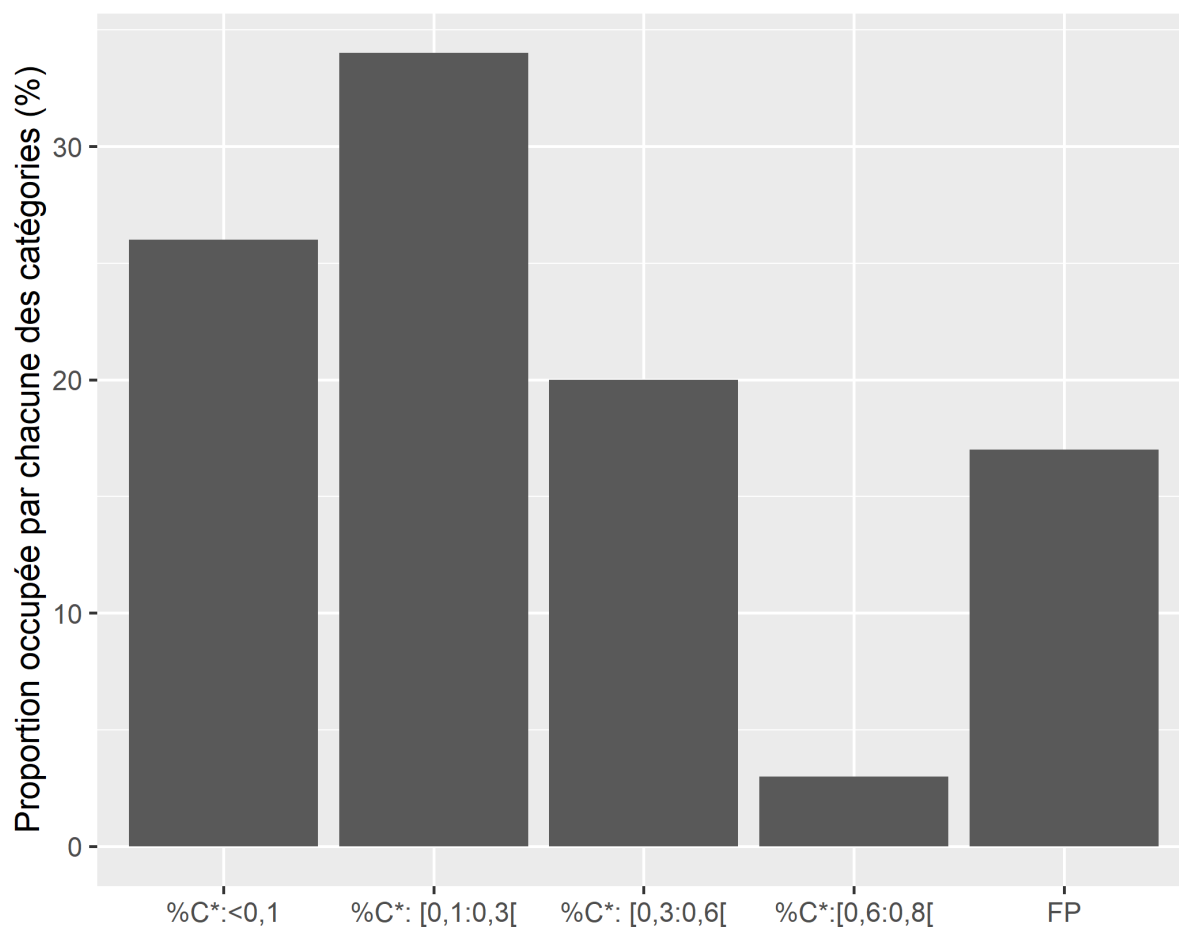


Figure 172 - Part d'échantillons occupée par chacune des catégories définies. Les alliages trempés ont été exclus de ce classement puisque leur teneur en carbone n'a pas été estimée

b) Hétérogénéité du métal

Du point de vue des teneurs en carbone et phosphore, différents types d'hétérogénéités ont pu être mis en évidence. Cette dernière peut être évaluée à différentes échelles, celle de l'échantillon et celle de la tôle.

i. Echelle de l'échantillon

Pour rappel, 80% des échantillons présentent une structure métallographique homogène du point de vue de la teneur en carbone (écart-type moyen < 0,1). Seuls quelques échantillons sont porteurs d'une distribution en carbone très hétérogène (écart-type moyen supérieur à 0,2). Par rapport à la littérature sur les alliages ferreux anciens, ceci est une première spécificité à souligner.

La variabilité de la teneur en carbone observée sur 20% des échantillons peut avoir différentes origines. Elle peut d'abord être attribuée à :

- L'hétérogénéité initiale du métal utilisé qui reflète celle de la loupe
- À la présence d'un gradient de teneur en carbone qui pourrait résulter d'une opération de cémentation destinée à durcir le métal en l'aciérant. Ceci concerne une dizaine d'échantillons¹¹⁹.
- Enfin, elle peut aussi refléter la présence de « structures en bandes », soit un assemblage d'au moins deux matériaux de teneurs en carbone différentes. Ceci concerne 17 échantillons.

Cette dernière catégorie suggère la mise en place d'une opération spécifique de mise en forme du métal par soudure de deux lopins de nature différente. Elle pourrait également avoir été utilisée pour associer un métal faiblement carburé à un fer phosphoreux, et ceci pour trois échantillons.

Au total, pour cinq échantillons, nous avons pu montrer que les fournitures de métal employées étaient distinctes au sein des deux matériaux assemblés, ce qui conforte l'hypothèse d'un assemblage du métal par soudure¹²⁰. Pour les 15 autres échantillons où des familles d'inclusions différentes n'ont pas pu être identifiées, l'hétérogénéité en teneur en carbone ou en phosphore observée résulte, sans doute, de celle de la loupe initiale compactée. Toutefois, il est également possible qu'une soudure ait été effectuée entre deux lopins de métal de nature différente mais de même origine, ce qui ne nous permettrait pas de différencier leurs signatures chimiques.

Dans la littérature, des structures en « bandes » ou encore dites « mixtes » ont été mises en évidence dans les travaux de A. Williams et N. Girault (voir Chapitre 1), qui se sont intéressés à la nature du métal de matériel défensif médiéval. Cependant, en l'absence d'analyses chimiques des inclusions, ils n'ont pas pu déterminer l'origine de ces structures métallographiques particulières.

ii. Echelle de la tôle

La variabilité de la teneur en carbone et en phosphore a pu être également évaluée à l'échelle de la plate d'armure lorsque plusieurs prélèvements ont été réalisés. Il faut rappeler que dans le cas de ces objets, principalement issus de collections de musées, la multiplication des prélèvements sur une même plate d'armure a rarement pu être réalisée. Ce fut possible pour cinq

¹¹⁹ Cette opération a aussi pu être réalisée par l'armurier à l'issue de la fabrication de la pièce

¹²⁰ La distinction des familles a été réalisée sur les éléments majeurs mais n'a pas pu être confirmée sur les éléments traces pour tous les échantillons. En effet pour deux échantillons (STS_6 et 34820.434.1) des familles d'inclusions différentes ont été mises en évidence uniquement dans le cas des éléments majeurs. Si les traces ne sont pas affectées par des différences de ratios ceci implique que les deux lopins de métal constituant la pièce considérée sont certainement issus de la même région. Les différences observées sur les éléments majeurs supposent cependant qu'ils ne sont pas issus de la même opération de réduction. Enfin pour les échantillons H26, STS_9 et K229a des familles d'inclusions différentes ont été mises en évidence dans le cas des éléments majeurs, mais leurs signatures chimiques ont été associées à des procédés distincts (ou le procédé n'a pas pu être déterminé).

pièces. Des structures métallographiques différentes entre deux échantillons ont été relevées pour trois plates. C'est le cas par exemple de la cervelière issue de l'armure de Sainte Suzanne (un fer phosphoreux pour un échantillon, un alliage moyennement carburé pour l'autre), de la dossière de François de Montmorency (un alliage ferritique pour l'un, un alliage moyennement carburé pour l'autre) et enfin, d'une plaque de broigne issue du site de Montbaron (LAM46519). Ce constat a également été effectué par d'autres auteurs. Ainsi, sur le gorgerin étudié par N. Girault les deux échantillons prélevés sont de nature ferritique tandis que, sur le plastron, l'un présente une structure « composite » de ferrite et d'acier, l'autre est un acier d'une bonne homogénéité de teneur en carbone (autour de 0,1%). Ceci laisse sous-entendre que la tôle utilisée n'était pas forcément de nature homogène, et soulève un problème crucial du point de vue de la représentativité d'un seul prélèvement par plate. Toutefois, dans le cas de pièces muséales, la multiplication des prélèvements sur un même objet est, comme nous l'avons dit, rarement possible. Par conséquent, si nos analyses mettent en avant l'existence de ce phénomène, nous ne pouvons pas à ce stade en estimer le poids sur une grande échelle.

Une fois que l'armurier avait à disposition ces plates de métal, qui pouvaient être, nous l'avons vu, de natures variées, son travail consistait à les mettre en forme. Les traitements thermiques et mécaniques jouent ici un rôle majeur que nous allons rappeler et synthétiser dans la partie suivante.

2) Le travail du métal : traitements thermiques et mécaniques

Le martelage du métal augmente la densité des dislocations et crée un écrouissage des grains ce qui va en augmenter la dureté jusqu'à le rendre très difficile à travailler. Il était donc souvent nécessaire, dans le travail de forge, d'alterner des phases de déformation plastique avec des phases de chauffe. Ainsi, la grande majorité des échantillons étudiés (90%) présentait des grains équiaxes et des inclusions non métalliques allongées selon une direction privilégiée, suggérant un recuit survenu après déformation du métal par martelage.

Pour rappel, d'autres traitements thermiques, mécaniques et thermochimiques ont été soulignés dans le chapitre précédent : Déformation du métal non suivi d'un recuit ayant permis une recristallisation des grains sous une forme équiaxe (« E »), chauffe et maintien prolongé en température (« CP »), trempe (« T »), possible cémentation (« Grad »), et enfin une surchauffe suivie d'un refroidissement relativement rapide traduits par des structures de Widmanstätten « Wid ». Enfin, la catégorie « A » regroupe les échantillons qui ne présentaient aucune de ces structures

particulières. Le métal a cependant obligatoirement subi une succession d'étapes de martelages et de recuits (voir tableau 28).

L'ensemble des traitements thermiques rencontrés classiquement dans le cas des alliages ferreux anciens est donc présent. Cependant, nos résultats montrent que la majorité des échantillons (environ 60%) n'a pas reçu de traitement particulier, en dehors de la succession de phases de martelage et recuit indispensables à la déformation du métal.

Tableau 28 - Traitements thermiques et mécaniques relevés sur les échantillons

	T	E	CP	Grad	WID	A
% d'échantillons	8	3	14	4	13	61

Pour rappel, les structures de trempe ont été qualifiées d'« homogènes » sur deux échantillons car elles étaient uniquement constituées de martensite et/ou de bainite, et « hétérogènes » sur les 14 autres échantillons car elles contenaient une ou plusieurs autres phases comme la ferrite ou la perlite. L'hétérogénéité des structures observées peut dépendre de différents facteurs, comme la teneur en carbone ou encore la vitesse de refroidissement.

Deux échantillons, G436_ech1 et G40_1 (voir tableau 29) issus de deux cuissards présentaient des structures de trempe composées de martensite et bainite entremêlées avec des zones ferritiques (voir figure 173).

Tableau 29 - Détails des échantillons G436_ech1 et G40-1

Désignation des échantillons	Armure ou Élément	Désignation	Datation	Lieu de fabrication supposé	Marque ou poinçon	Description marque et/ou attribution au travail d'un armurier	Musée
G436_ech1	G436_G	Cuissard	1535-1540	Allemagne/Nuremberg	Présence	Marque de la ville de Nuremberg et de Valentin Siebenbürger, armurier nurembergeois	Musée de l'Armée
G40-1	G40	Elément d'une armure de cavalier	1533	Allemagne/Nuremberg	Absence	Armure réalisée par Hans Ringler, armurier nurembergeois	Musée de l'Armée



Figure 173 - micrographie de l'échantillon G436_ech1 après attaque au réactif Nital 3%.

Cette structure peut être rapprochée de celles des aciers modernes : les aciers dits « dual phase ». Ils sont généralement composés de deux phases : une phase ductile, la ferrite et une phase dure, la martensite. Cette microstructure peut être obtenue en effectuant un maintien en température dans le domaine biphasé de l'austénite et de la ferrite, comme schématisé avec des hachures bleues sur la figure 174, suivi d'une trempe¹²¹ (I. Pushkareva, 2009).

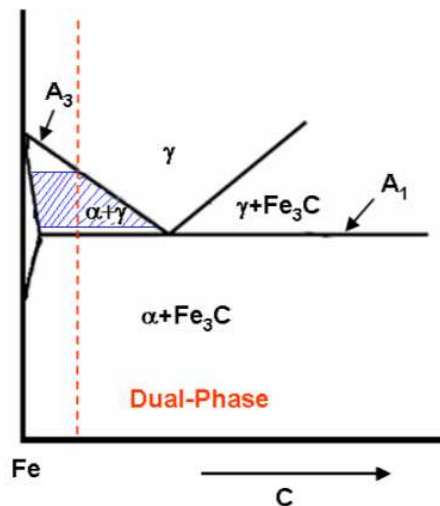


Figure 174 - Schéma du diagramme Fe-C illustrant le domaine biphasé de l'austénite et de la ferrite utilisé pour former les acier dual phase, d'après (I. Pushkareva, 2009)

Les traitements thermiques et mécaniques sont généralement utilisés pour améliorer les propriétés mécaniques du métal selon son utilisation. Le paragraphe suivant discute l'influence des structures sur le comportement mécanique du métal en commençant par traiter de sa composition.

¹²¹ Sur la micrographie présentée de l'échantillon G436_ech1 on relève la présence de structures de Widmanstätten sur les bords de l'échantillon qui témoignent d'une surchauffe. Ceci suggère que la température a pu être plus importante que l'intervalle présenté pour la formation des aciers duals phases, au moins localement.

3) Comportement mécanique du métal

a) **Composition du métal : teneurs en carbone et phosphore**

La figure 175 présente la distribution des valeurs de dureté en fonction des cinq catégories de teneur en carbone et phosphore précédemment définies, en l'absence de traitement thermique ou mécanique spécifique, ce qui correspond à la majorité des échantillons du corpus étudié¹²². L'intervalle des valeurs attendues de dureté pour des structures à l'équilibre de teneur homogène en carbone a été reporté en grisé (V. F. Buchwald, 2005, p. 67).

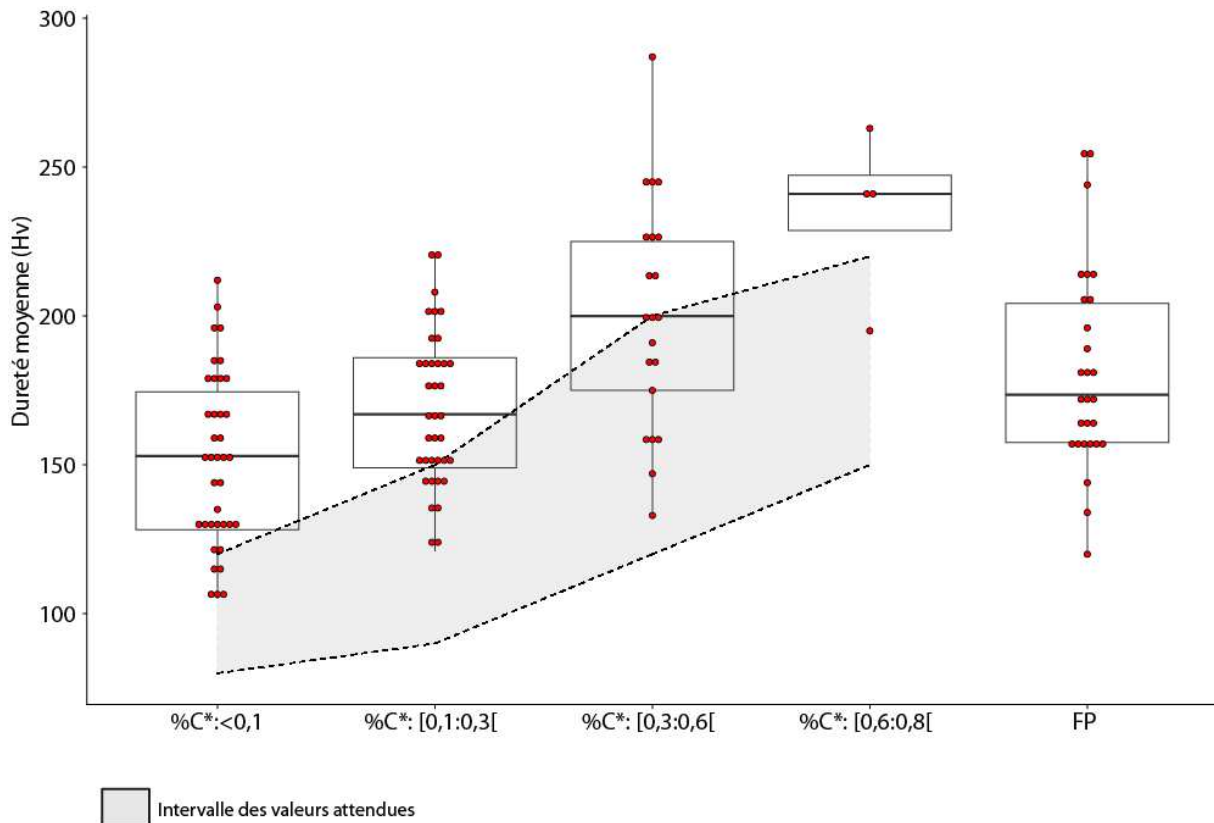


Figure 175- Distribution de la dureté moyenne pour chacune des catégories définies en fonction de la nature du métal. En grisé, intervalle des valeurs attendues défini par V. F. Buchwald pour des structures à l'équilibre (V. F. Buchwald, 2005, P.67)

La présence de phosphore permet d'accroître la dureté. Ainsi, en moyenne, les fers phosphoreux, alors qu'ils possèdent des teneurs en carbone faibles (%C <0,3), possèdent une dureté égale à celle des aciers moyennement carburés.

Pour les alliages carburés dépourvus de phosphore (%massP<0,1), les valeurs de dureté augmentent, sans surprise, avec la teneur en carbone et donc la proportion de perlite dans l'alliage. Cependant, plus on descend vers les catégories à bas taux de carbone, plus on s'éloigne des intervalles attendus pour des aciers homogènes. Les alliages très faiblement carburés (%C <0,1%mass) ont, pour plus de 75% d'entre eux, des valeurs de dureté supérieures aux valeurs

¹²² Les échantillons présentant des structures ont été exclus du graphique puisqu'ils font l'objet d'une discussion spécifique dans la suite de cette partie.

attendues, parfois même estimées à plus du double de celles-ci. Pour rappel, aucun des facteurs évoqués classiquement en métallurgie comme augmentant la dureté (présence de carbone, de phosphore, traitements thermiques et mécaniques et taille de grain) ne permet d'expliquer ce phénomène (voir Chapitre 4).

La présence de duretés anormalement élevées dans le cas d'échantillons d'armure de nature ferritique a également été relevée, notamment par A. Williams (A. Williams, 2003) et M. Fulford (M. Fulford et al., 2005) sur un échantillon issu d'une armure romaine datée entre le I^{er} et le III^e siècle. Ce phénomène pourrait avoir différentes causes. Il pourrait d'abord être lié à la présence d'éléments dans le métal autre que le phosphore. Pour rappel, sur ce lot d'échantillons de notre corpus, des analyses complémentaires ont été menées pour doser les éléments As, Si, Mn, Co, Ni, Cr, Cu (voir Chapitre 4). Quelques échantillons (6) présentaient des teneurs en Si, Mn ou Ni supérieures à 0,1%mass. De l'arsenic a été rencontré régulièrement dans les échantillons, en moyenne à hauteur de 0,1%mass. D'après F. Tylecote (F. Tylecote and R. Thomsen, 1973), de la même façon que le phosphore, cet élément en solution solide peut durcir le fer. Les niveaux d'arsenic recensés par ces auteurs dans le métal sont compris entre 0,049 et 0,27%mass, ce qui est proche des teneurs moyennes quantifiées dans notre cas. Il est donc possible que cet élément soit responsable des valeurs de duretés relativement élevées observées. Cependant, nous manquons ici d'un référentiel de comparaison afin de valider cette hypothèse. En effet, les auteurs ne disent pas à partir de quel seuil de concentration l'augmentation de dureté serait clairement perceptible. De plus, contrairement au phosphore, la présence d'arsenic n'a été que peu recensée dans la littérature concernant les fers anciens. Il ne fait pas non plus partie des éléments classiquement cités dans la littérature des alliages ferreux modernes comme élément durcissant (voir Chapitre 1).

La dureté élevée du matériau pourrait être expliquée par une seconde hypothèse. Elle serait causée par un refroidissement par trempe suivi d'un vieillissement du matériau, c'est à dire un léger revenu¹²³. Ce type d'opération donnerait naissance à des carbures de tailles nanométriques¹²⁴. Toutefois, sur l'échantillon STS_7, analysé à l'aide d'un Microscope Electronique à Transmission, nous n'avons pas pu valider la présence de ce type de carbure. De plus, d'autres impuretés comme l'azote pourraient également jouer un rôle dans le durcissement du matériau. Afin de véritablement trancher sur cette question, il faudrait connaître précisément la composition des échantillons concernés. Ceci impliquerait de disposer d'une quantité de matière suffisante pour effectuer des

¹²³ Le vieillissement après trempe et ses conséquences sur la dureté du métal ont été décrits en détail dans le Chapitre 1.

¹²⁴ La teneur en carbone dans le métal pourrait par conséquent être supérieure à celle estimée par métallographie.

dosages quantitatifs sur une large gamme d'éléments¹²⁵. Or la faible taille des échantillons dont nous disposions empêchait le recours à ce type d'analyse.

Dans le cas de l'étude menée par M. Fulford (M. Fulford et al., 2005) 17 éléments dont le carbone, l'arsenic, et le phosphore ont été quantifiés pour un échantillon qui présentait une structure ferritique à larges grains équiaxes (100µm de taille) d'une dureté moyenne de 188 Hv. Néanmoins, le niveau des teneurs mesurées ne leur ont pas permis de conclure sur la cause de ce durcissement structural qui, comme le concluent les auteurs, demeure inexpliqué.

b) Propreté inclusionnaire

Le comportement mécanique du métal est également fortement influencé par un autre critère : la présence des inclusions non métalliques décrites dans le chapitre 4, qui fragilisent le métal. En effet elles peuvent jouer le rôle de sites d'amorçage de rupture dans le métal (A. Juhin, 2005). Dans le cas des alliages ferreux anciens, ce paramètre, la propreté inclusionnaire, est crucial à considérer car ces derniers possèdent des taux d'inclusions et de porosités bien supérieurs aux aciers modernes (voir Chapitre 1).

La Figure 2 présente, pour chacune des catégories d'alliage définies, la propreté inclusionnaire correspondante. Pour rappel plus de 75% des échantillons a un taux inférieur à 3%. Le taux d'inclusion a été estimé par A. Williams sur une trentaine d'échantillons issus d'éléments d'armures. Les valeurs sont inférieures à 3%, excepté pour trois échantillons, ce qui concorde avec nos résultats (A. Williams, 2003, p. 939).

¹²⁵ Plusieurs dizaines de mg voire jusqu'à 1g de matière seraient nécessaires selon le type d'appareil et le nombre d'éléments analysés (A. Feillolay and S. Ryser, 1987).

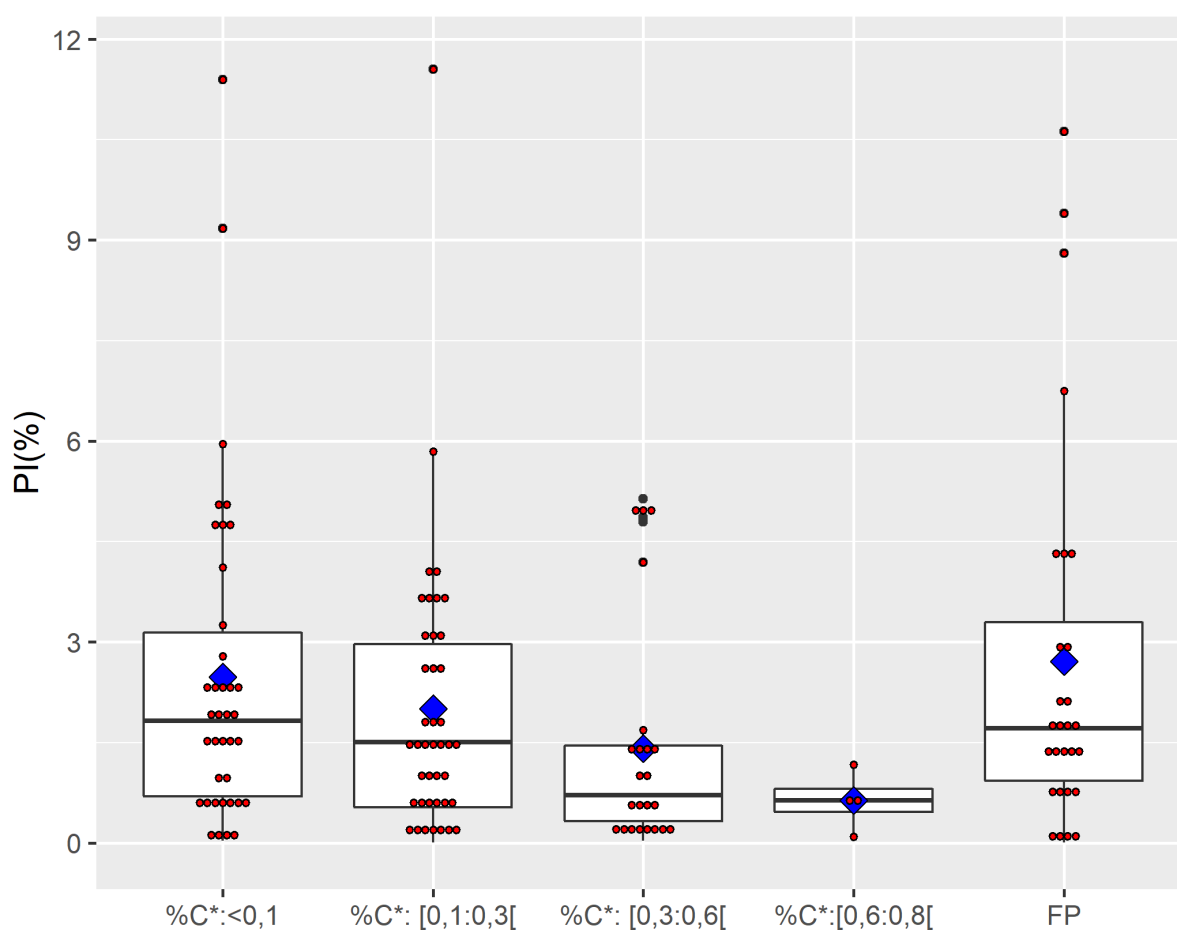


Figure 176 - Distribution de la propreté inclusionnaire en fonction de la nature du métal. Les valeurs moyennes sont représentées par les losanges bleus

Les propretés calculées diminuent avec l'augmentation de la teneur en carbone. Ce phénomène a déjà été recensé dans la littérature des alliages ferreux anciens (A. Williams, 2003, p. 933). Les alliages très faiblement carburés, pourraient contenir de plus importantes quantités d'inclusions que les alliages plus aciérés. Par conséquent, pour A. Williams, l'emploi de matériaux peu carburés ne devait pas améliorer les propriétés mécaniques des armes (A. Williams, 2012, P.65).

Dans le cas des armures, compte tenu de l'erreur de mesure effectuée (voir chapitre 3), il apparaît difficile de réellement quantifier l'impact du taux d'inclusions sur la fragilité du matériau en fonction de la nature du métal. On peut cependant supposer qu'il devrait y avoir des différences de comportements sensibles entre les métaux comptant respectivement les plus hauts ($PI > 5\%$) et les plus bas taux d'inclusions ($PI < 0,5\%$). La difficulté réside à quantifier cette différence. A. Williams a mesuré la ténacité de fer forgé moderne avec un taux d'inclusion croissant (A. Williams, 2003, p. 931). La présence de 2% d'inclusions réduirait la ténacité d'au moins un quart. Cependant cette dernière est dépendante d'un certain nombre d'autres facteurs (nature de l'alliage, traitements

thermiques, taille de grain...) dont les effets cumulés nous semblent difficiles à prévoir, particulièrement dans le cas des alliages ferreux anciens de nature plus hétérogène que les alliages ferreux modernes.

c) Traitements thermiques et mécaniques

La figure 177 présente la distribution de la dureté pour chaque traitement thermique ou mécanique considéré. Elle permet de définir deux grands groupes. Le premier comprend l'essentiel des échantillons (90% d'entre eux) d'une dureté comprise entre 100 et 250Hv et ce, quel que soit le traitement thermique ou mécanique considéré. Le second comprend les échantillons de dureté supérieure à 300 Hv, qui sont porteurs de structures de trempe, excepté pour un échantillon qui révèle une structure fortement écrouie. La trempe constitue ici le facteur d'accroissement de dureté le plus marqué. Par conséquent ce premier traitement thermique nous permet de définir une nouvelle catégorie d'alliages ferreux qui se différencie par leur dureté élevée.

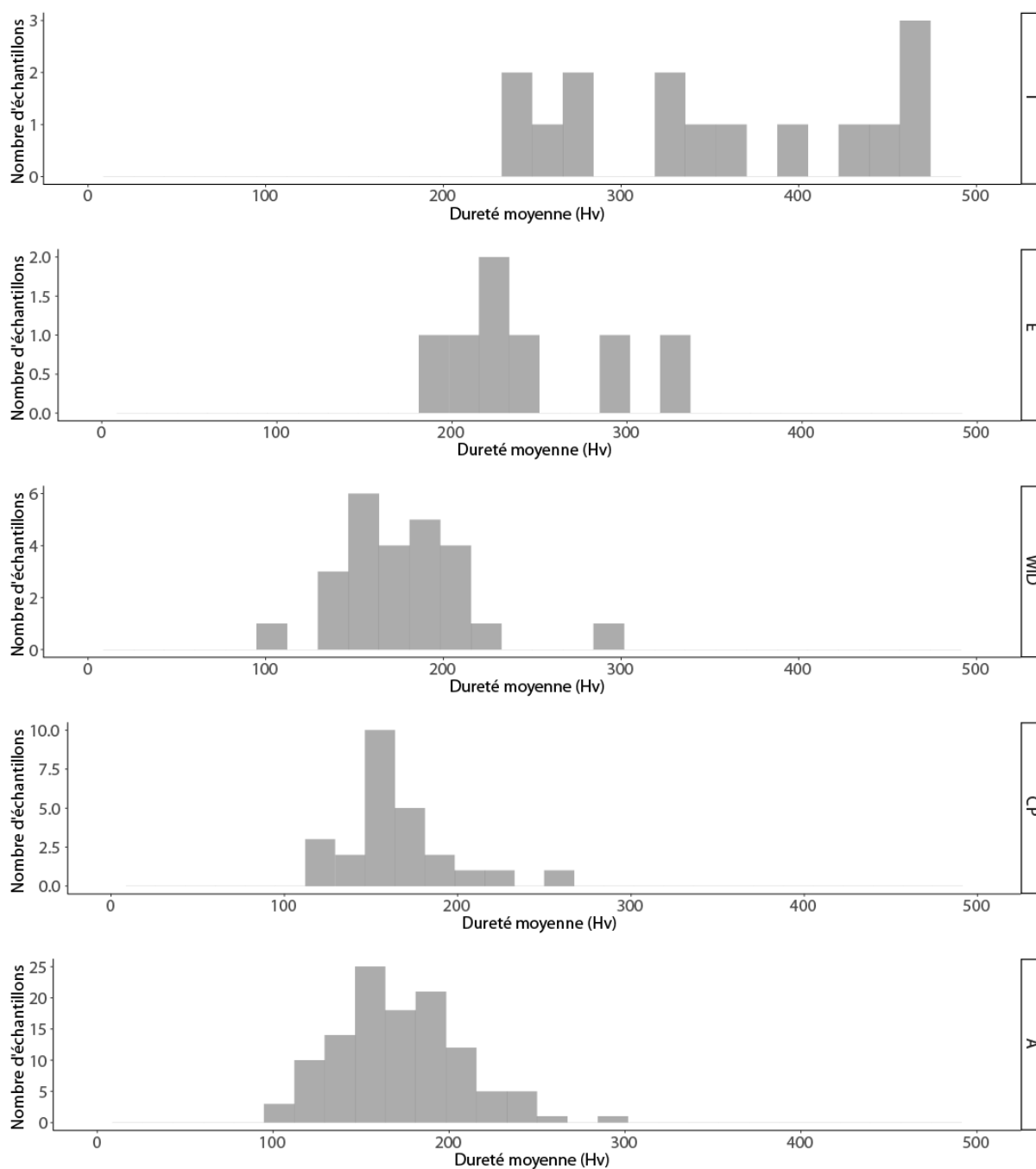


Figure 177 - Distribution de la dureté moyenne en fonction des traitements thermiques et mécaniques associés. « T » échantillons trempés. ; « T » échantillons trempés. « E » : Structures écrouies, Catégorie « FP » fer phosphoreux (%massP>0,1 dans le métal), « CP » : Chauffe et maintien prolongé en température. « A » aucune spécificité relevée..

d) Structures hétérogènes

Dans cette partie nous allons discuter de l'intérêt, d'un point de vue mécanique, de deux structures hétérogènes : les aciers dual phase, d'une part, et les structures en bandes, d'autre part. Pour rappel, deux cuissards présentaient des structures de trempe hétérogènes composée de martensite et bainite entremêlées avec des zones ferritiques (voir p. 332). Cette structure peut être

rapprochée de celles des aciers modernes : les aciers dual phase. La coexistence de la ferrite, phase molle, avec la martensite, phase dure issue de l'austénite permettrait d'obtenir un bon compromis entre résistance mécanique et ductilité (I. Pushkareva, 2009). Sur les courbes de traction des aciers dual phase¹²⁶ la déformation suit trois étapes : les deux phases sont élastiques, puis la ferrite est déformée plastiquement tandis que la martensite est élastique et enfin, les deux phases se déforment plastiquement (F. M. Al-Abbasi and J. A. Nemes, 2003).

Ce type d'acier est employé aujourd'hui dans le secteur de l'automobile comme pièce de renfort par exemple, du fait de leur forte capacité d'absorption d'énergie et de leur résistance mécanique. La présence de ce type de microstructure pourrait, pour les raisons précédemment évoquées, améliorer les capacités défensives de l'armure, capable d'absorber les chocs mais également d'y résister.

Un autre type de structure pourrait permettre d'effectuer un compromis entre ductilité et résistance mécanique. Il s'agit des structures en bandes.

Dans le corpus étudié, les structures en bande représentent 10% des échantillons étudiés soit une vingtaine. Pour rappel, ces structures juxtaposent plusieurs bandes de métal de ductilité différente. La transition entre deux bandes est matérialisée par une significative chute de la dureté. Un assemblage de ces matériaux par soudure a pu être démontré pour au moins cinq échantillons. Dans la suite nous ferons référence à ces échantillons sous l'appellation de « structures en bandes soudées » afin de les différencier des autres. Il reste à déterminer pourquoi les armuriers auraient eu recours à ce type de matériau. Là encore, il est possible de consulter la littérature moderne afin de dégager des pistes de réflexions.

Actuellement, des solutions alternatives sont recherchées afin d'optimiser la résistance au choc des matériaux dans de nombreux secteurs industriels comme l'aéronautique ou encore l'automobile. Des structures composites combinant une, ou plusieurs couches, de deux matériaux aux propriétés différentes sont ainsi réalisées. Ces « structures sandwich » sont généralement composées d'une ou deux faces rigides appelées « peaux » ainsi que d'une âme centrale (voir figure 178). Cette dernière est choisie de manière à pouvoir dissiper l'énergie due au choc (P. Lhuissier and L. Laszczyk, 2012). Ces structures présenteraient ainsi de bonnes capacités d'absorption d'énergie, ce qui en fait des candidats potentiels pour des protections contre les ondes de choc ou des impacts. Des combinaisons acier/polymères sont par exemple rencontrées dans la littérature (D. Verchere, 2011).

¹²⁶ voir par exemple (P. J. Jacques et al., 2007)

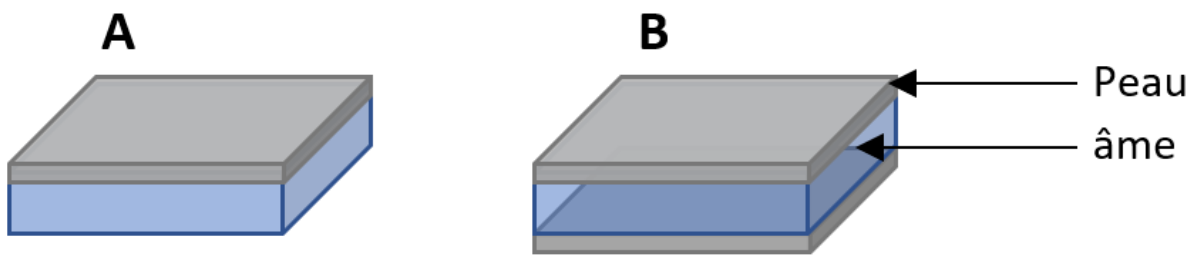


Figure 178 - Représentation schématique de structures sandwich « A » asymétrique et « B » symétrique

Bien que les matériaux actuels qui composent les faces externes et surtout l'âme des structures sandwich, soient très éloignés des structures en bandes, le principe d'associer un matériau dur et résistant en sandwich avec un matériau plus mou possédant de plus fortes capacités d'absorption d'énergie peut être repris ici. L'assemblage de deux bandes de métal de ductilité différente, a pu être réalisé afin d'améliorer les propriétés défensives de l'armure, soumise à des chocs violents.

On retrouve peut-être la trace de ce matériau particulier à Nuremberg. D'après l'article de A.F von Reitzenstein sur la réglementation nurembergeoise, le métal livré aux batteurs d'armure par les marteleurs est dénommé « Zeug » (F. von Reitzenstein, Alexander, 1959). Rappelons que dans les sources écrites les désignations des alliages ferreux sont multiples. Elles peuvent faire référence, non pas à la nature du produit, mais à l'atelier ou à la région qui l'a fabriqué, ce qui constitue un gage de qualité pour l'acheteur (P. Dillmann, L. Pérez, and C. Verna, 2011 a, p. 22; C. Verna, 2017, p. 217–235). Cependant, parfois le sens du mot réside ailleurs. L'enquête menée sur le terme *merlaria* par C. Verna lui a par exemple permis de conclure qu'il désignait un produit brut issu de la réduction (C. Verna, 2001 a, p. 106–108). Ainsi, comme nous allons le voir, l'interprétation du terme « Zeug » s'avère complexe. La réglementation précise qu'il devait être constitué « nicht anders denn von halb stählernem Zeug » que nous avons traduit par « au moins à moitié d'acier » (voir Chapitre 1). Il devait de plus être estampillé d'une marque particulière. L'emploi de marques ou de blasons était un gage de qualité du métal livré en réponse à une demande particulière (P. Dillmann, L. Pérez, and C. Verna, 2011 a, p. 20). Ainsi, on peut supposer que l'armure fabriquée à partir de ce matériau répondait à une qualité spécifique d'objet fini, peut être souhaitée par l'acheteur. L'armurier avait aussi la possibilité de fabriquer son propre matériau dénommé « gewellten Zeug », « durch das Wellen (Verschweißen) von Stahl und Eisen » que nous traduirons par « en soudant du fer avec de l'acier ». L'association de fer et d'acier pourrait suggérer qu'une soudure aurait été réalisée entre les deux matériaux lors de la forge de la tôle par l'armurier dans son propre atelier.

Une autre mention pourrait renvoyer aux structures en bande soudées. En effet, le terme de « harnois soudé » a été rencontré par différents auteurs. D'après N. Baptiste, il pourrait désigner une catégorie de harnois particulier qui se distingue des autres par son mode de fabrication (N. Baptiste, 2016, p. 204). L'auteur appuie cette hypothèse sur les phénomènes de délaminations observées visuellement sur toute la surface de certaines pièces armures. Pour lui, ce sont les marques d'anciennes soudures que l'altération progressive des pièces avec le temps met en évidence.

Cependant, pour s'assurer que le métal issu de structures soudées possède réellement des propriétés mécaniques de résistance aux chocs « supérieures » à celles de l'acier ou de l'acier trempé, d'autres facteurs, doivent être considérés. Les propriétés mécaniques du métal vont, en effet, dépendre de multiples critères (nature de l'alliage, propreté inclusionnaire, traitements thermiques, taille de grains ...) dont les effets cumulés sont difficiles à prévoir et qui peuvent conduire à un comportement aléatoire des alliages. C'est ce que concluent deux études qui se sont intéressées à la résistance d'agrafes utilisées dans des bâtiments médiévaux. Les essais de traction réalisés ont révélé des comportements très variables, causés par la microstructure hétérogène du matériau (A. Juhin, 2005, p. 63; M. L'Héritier, I. Guillot, and P. Dillmann, 2019). Pour caractériser le comportement mécanique des alliages ferreux anciens à plus grande échelle, il faudrait pouvoir effectuer ce type d'essai sur d'une large gamme de fers et aciers anciens de natures diverses afin d'établir, si c'est possible, des modèles de référence. Dans le cadre de cette étude la faible taille de nos échantillons ne permettait malheureusement pas d'effectuer ce type de mesure.

Enfin, il est aussi possible que ces structures illustrent une opération de recyclage. C'est l'hypothèse émise par A. Williams (A. Williams, 2003, p. 591). Pour lui, le métal utilisé pour fabriquer le « gewellten Zeug » pouvait provenir de pièces d'armures obsolètes ou de chutes de tôles qui étaient recyclées et ensuite soudées entre elles. S'il s'agit d'un recyclage il n'est pas certain qu'une qualité spécifique de métal fût recherchée.

4) Bilan : une qualité de métal particulière pour les armures ?

Nous venons de voir que le métal utilisé pour la fabrication des armures pouvait être de diverses natures. Pour rappel, les alliages très faiblement carburés ont une dureté moyenne de 150 Hv. Les alliages faiblement et moyennement carburés, ainsi que les fers phosphoreux permettent d'obtenir une dureté moyenne de 180 Hv. Les alliages fortement carburés se situent à une dureté intermédiaire de 260Hv. Pour finir, les aciers trempés présentent les valeurs de duretés les plus élevées. Elles sont en moyenne deux fois plus importantes que celles des alliages très faiblement,

faiblement et moyennement carburés. Ils demeurent cependant très minoritaires dans le corpus étudié (voir figure 179).

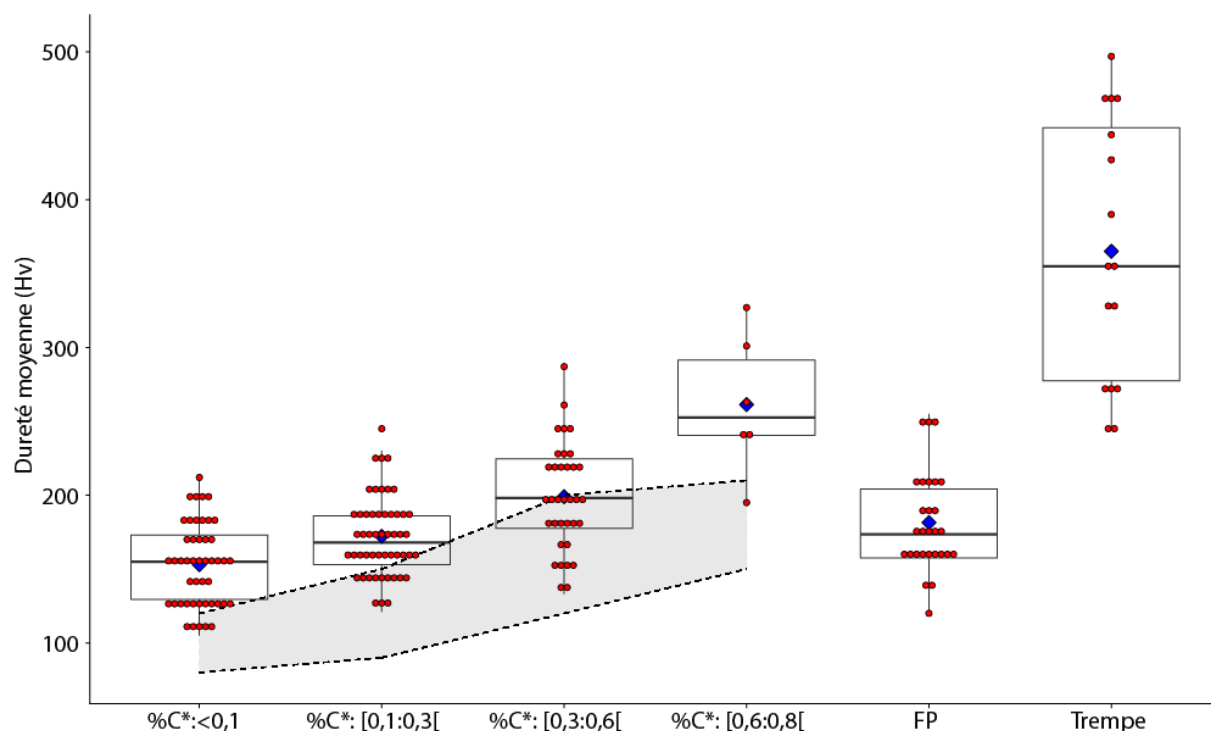


Figure 179 - Distribution de la dureté moyenne pour chacune des catégories définies. Les valeurs moyennes pour chaque catégorie sont représentées par des losanges bleus. En grisé, intervalle des valeurs attendues défini par V. F. Buchwald pour des structures à l'équilibre (V. F. Buchwald, 2005, p.67).¹²⁷

Nous avons souhaité comparer ces résultats avec ceux de la littérature. A. Williams a effectué des mesures de microdureté¹²⁸ sur plusieurs centaines d'échantillons d'armures (voir Chapitre 1), ce qui constitue un bon référentiel de comparaison. Sur la figure 180, la catégorie des fers phosphoreux n'est pas représentée puisque l'auteur n'a pas systématiquement recherché la présence de phosphore au sein du métal. De la même manière, nous avons exclu la catégorie des alliages fortement carburés puisque la classification de l'auteur la confond avec celle des aciers moyennement carburés.

Les résultats sont d'une grande cohérence avec les nôtres. La catégorie des alliages trempés est plus étendue, elle court de 170 à 870 Hv mais demeure centrée, comme dans notre cas, autour de 300Hv. On remarquera également que les alliages très faiblement carburés (%C<0,1) ont aussi des duretés centrées autour de 170 Hv, le fer de faible dureté (Hv<100Hv) est, là encore, presque absent du corpus de pièces étudié.

¹²⁷ Les échantillons porteurs de structures en bandes ont été exclus du graphique, puisqu'ils ont fait l'objet d'une discussion dans la partie précédente.

¹²⁸ Ces mesures ont été effectuées à une masse différente de la nôtre : 100g. Par conséquent les valeurs relevées ne sont pas directement comparables aux nôtres puisque la dureté Vickers dépend de la charge appliquée. C'est pourquoi nous chercherons à comparer ici uniquement des ordres de grandeurs.

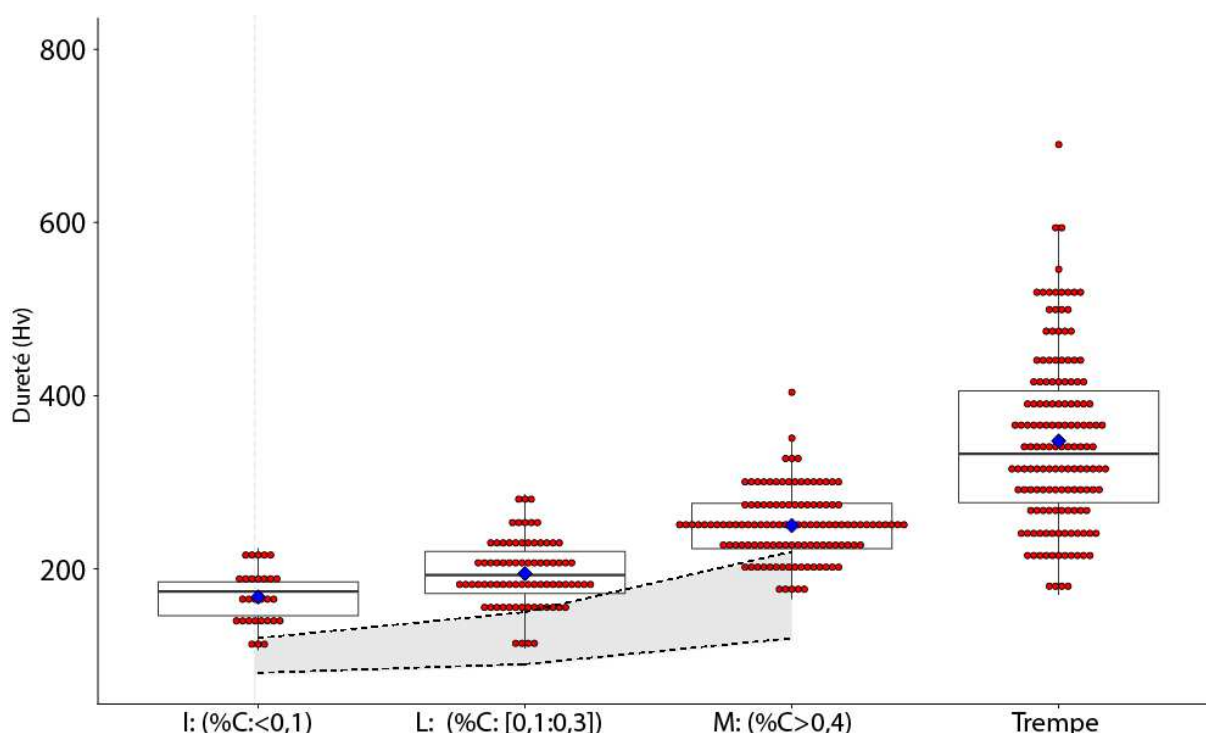


Figure 180 - Distribution de la dureté moyenne pour chacune des catégories définies par A. Williams. Les valeurs moyennes pour chaque catégorie sont représentées par des losanges bleus. En grisé, intervalle des valeurs attendues défini par V. F. Buchwald pour des structures à l'équilibre (V. F. Buchwald, 2005, P.67).

Les catégories définies correspondent-elles à celles rencontrées de manière générale dans les objets anciens médiévaux ou des spécificités sont-elles notables ? Pour y répondre, nous avons fait le choix de comparer nos résultats à d'autres objets de différents usages.

En l'absence à ce jour de synthèse générale qui traiterait de cette question, nous avons sélectionné plusieurs études susceptibles de mettre en évidence des spécificités particulières par rapport à notre questionnement. Toutefois, la nature du métal ne pourra pas être discutée selon l'ensemble des paramètres précédemment définis (taux de carbone, taux d'éléments en solution solide, taux d'inclusions et de porosité, traitements thermiques et mécanique, dureté...). Chaque auteur a, en effet, mis en place ses propres critères pour caractériser le métal.

a) Les épées européennes du XI^e siècle au XVII^e siècle

La métallurgie des épées a fait l'objet de plusieurs publications. A. Williams a compilé un certain nombre de données sur des analyses qu'il a lui-même menées ainsi que celles d'autres auteurs (A. Williams, 2012). Le travail de forge de ces objets était bien particulier et très différent de celui des armures. Il n'en sera pas question ici. Nous allons simplement comparer les différentes variétés de métal recensées par l'auteur aux nôtres afin de relever d'éventuelles spécificités. Cinq catégories sont citées à partir du XI^e siècle jusqu'au XVII^e siècle (A. Williams, 2012, p. 232) :

- IIA. Les épées faites d'une **seule pièce d'acier et trempé**

- IIB. Les épées faites de **différentes pièces d'acier et trempé**
- IIC. Les épées faites de **différentes pièces d'acier**
- III. Les épées faites **d'extrémités aciérées et trempées et d'un cœur en fer**
- IV. Les épées faites **d'extrémités aciérées et faiblement carburé** ($\%C < 0,4$) (cœur indéterminé)

La figure 181 présente la part occupée de chacune des catégories. L'acier est nettement majoritaire, les épées constituées uniquement de fer sont absentes¹²⁹. Comme le rappelle l'auteur, l'épée devait d'abord posséder un bon tranchant. Cependant, elle était également soumise à des chocs violents, susceptibles de l'endommager considérablement (A. Williams, 2003, p. 11). La catégorie III rappelle les structures en bande associant plusieurs feuilles de métal de ductilité différente dans le cas des pièces d'armures. Elle pourrait avoir été utilisée, de la même manière que pour les pièces défensives, pour améliorer la résistance au choc de l'arme. La présence de phosphore ne semble pas avoir été systématiquement recherchée. Cet élément pourrait par exemple se retrouver dans des épées présentant des cœurs en fer.

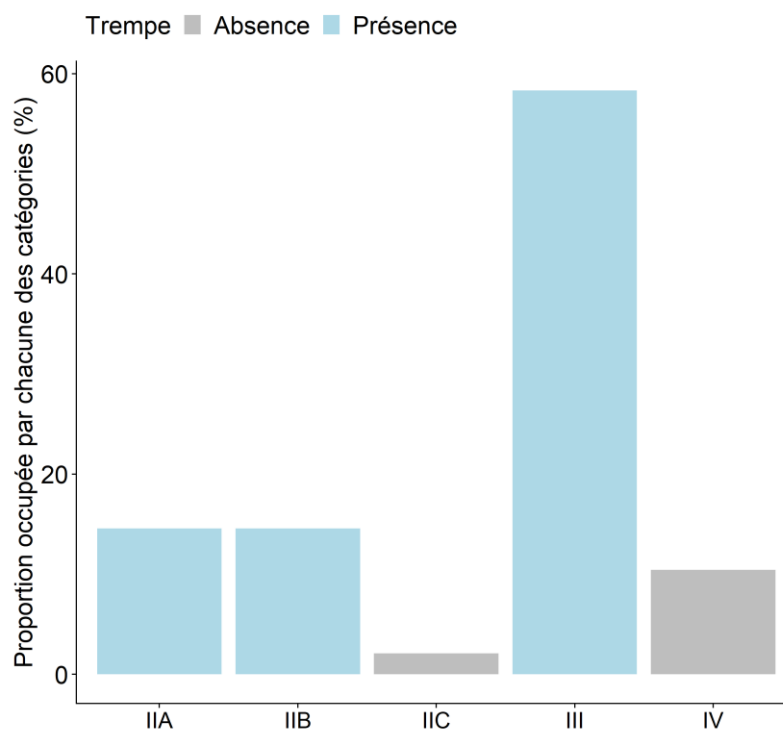


Figure 181 - Distribution de chaque catégorie de métal rencontrées dans les épées recensées par A. Williams du XI^e siècle jusqu'au XVII^e siècle

Pour conclure, selon cette étude, l'acier trempé apparaît comme très majoritaire dans les épées étudiées. La classe prédominante (III) peut être rapprochée de celle des structures en bandes

¹²⁹ L'auteur signale la présence de ce type de lame mais dans des épées antérieures au XI^e siècle

trempées dans le cas des pièces d'armures. On ne retrouve pas toute la diversité des alliages définie dans notre cas.

b) Les bombardes du XV^e siècle

La fin du XIV^e siècle et le début du XV^e voit l'ère des gros canons en fer forgé appelés « bombardes ». La fabrication de ces canons demandait d'importante quantité de métal, mais également un savoir-faire très particulier pour effectuer l'assemblage des différentes parties. Deux études principales se sont intéressées à la nature du métal utilisé pour fabriquer ces objets (R. D. Smith and R. R. Brown, 1989; E. Bérard et al., 2015). Au total, en rassemblant les résultats de ces études, 10 bombardes ont été étudiées, 49 prélèvements ont été réalisés. La présence de structures fantômes a été systématiquement recherchée pour déceler la présence de phosphore. Les résultats sont synthétisés sur la figure 182 « A » et comparés aux nôtres figure 182 « B ».

Presque toutes les catégories de métal précédemment définies dans le cas des armures sont rencontrées. Les alliages très faiblement carburés sont très majoritaires et l'acier beaucoup plus rare. Aucune occurrence de métal trempé, ni de structure en bandes n'a été relevé. Enfin, les auteurs soulignent la présence de nombreuses hétérogénéités en teneur en carbone et une absence de sélection spécifique de matériau pour la réalisation des différentes parties des pièces (E. Bérard et al., 2015).

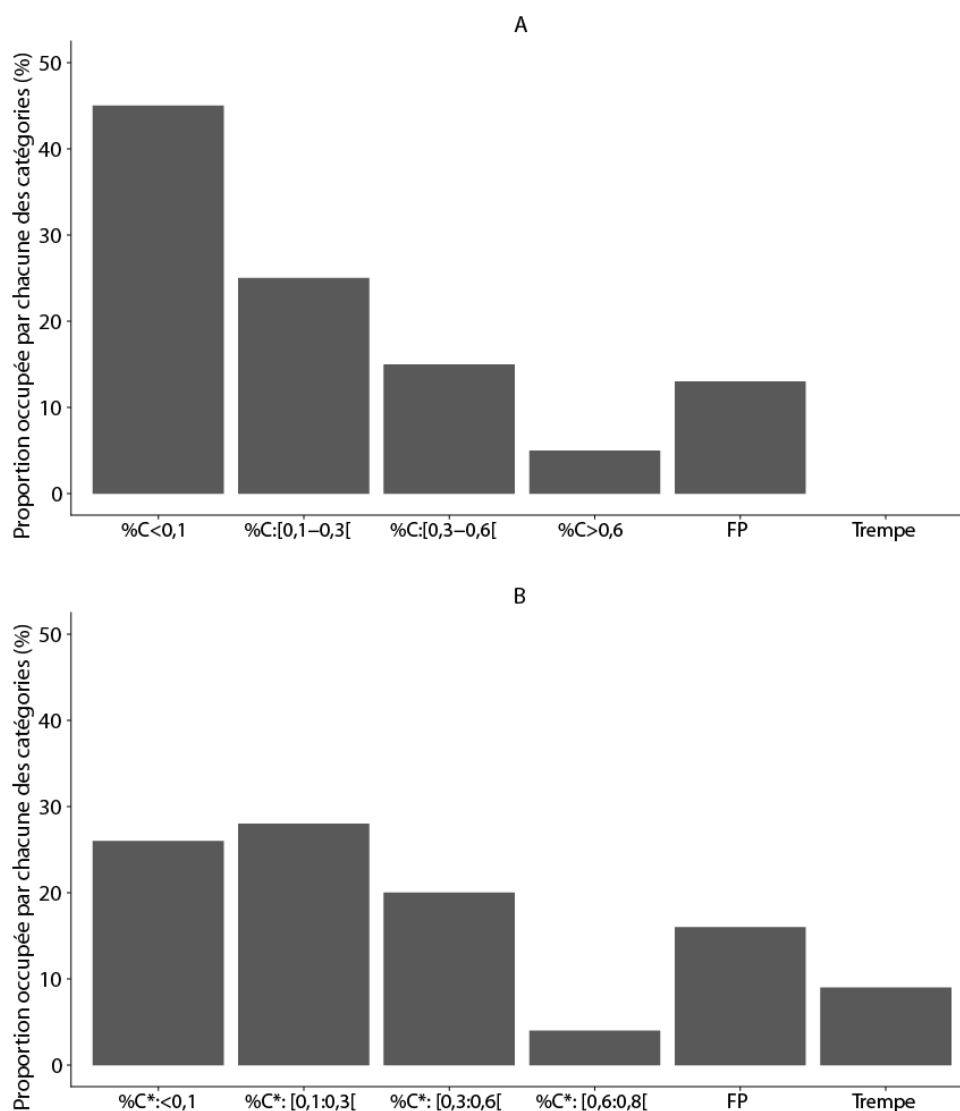


Figure 182 - « A » nature des alliages observée dans les bombardes du XV^e siècle, « B » nature des alliages relevée dans cette étude

Pour conclure, l'étude métallographique des bombardes ne met pas en évidence l'emploi de matériaux spécifiques et présente une grande diversité de structures, souvent très hétérogènes. Par rapport à nos résultats, l'acier est beaucoup plus rare, l'acier trempé est, lui, absent.

c) Les clous et rivets du site de Vestby Mark

V.F Buchwald a rassemblé un certain nombre de données sur une vingtaine de clous et rivets retrouvés sur le site de Vestby Mark datant du IX^e siècle au Xe siècle (V. F. Buchwald, 2005, p. 304–306). Les forgerons installés sur le site travaillaient sur la réparation des bateaux. Les clous étaient en effet très utilisés en charpenterie navale. L'auteur a défini différentes catégories de métal : les alliages très faiblement carburés qui ne contiennent pas (ou très peu) de carbone et de phosphore (%C<0,1), les aciers ferrito-perlitiques (%C:[0,1-0,4]), les fers phosphoreux (FP) et les aciers

phosphoreux (Fe-C-Pstructure). Afin de pouvoir comparer ces résultats aux nôtres, nous avons fusionné les deux dernières catégories dans le groupe « FP » (voir figure 183).

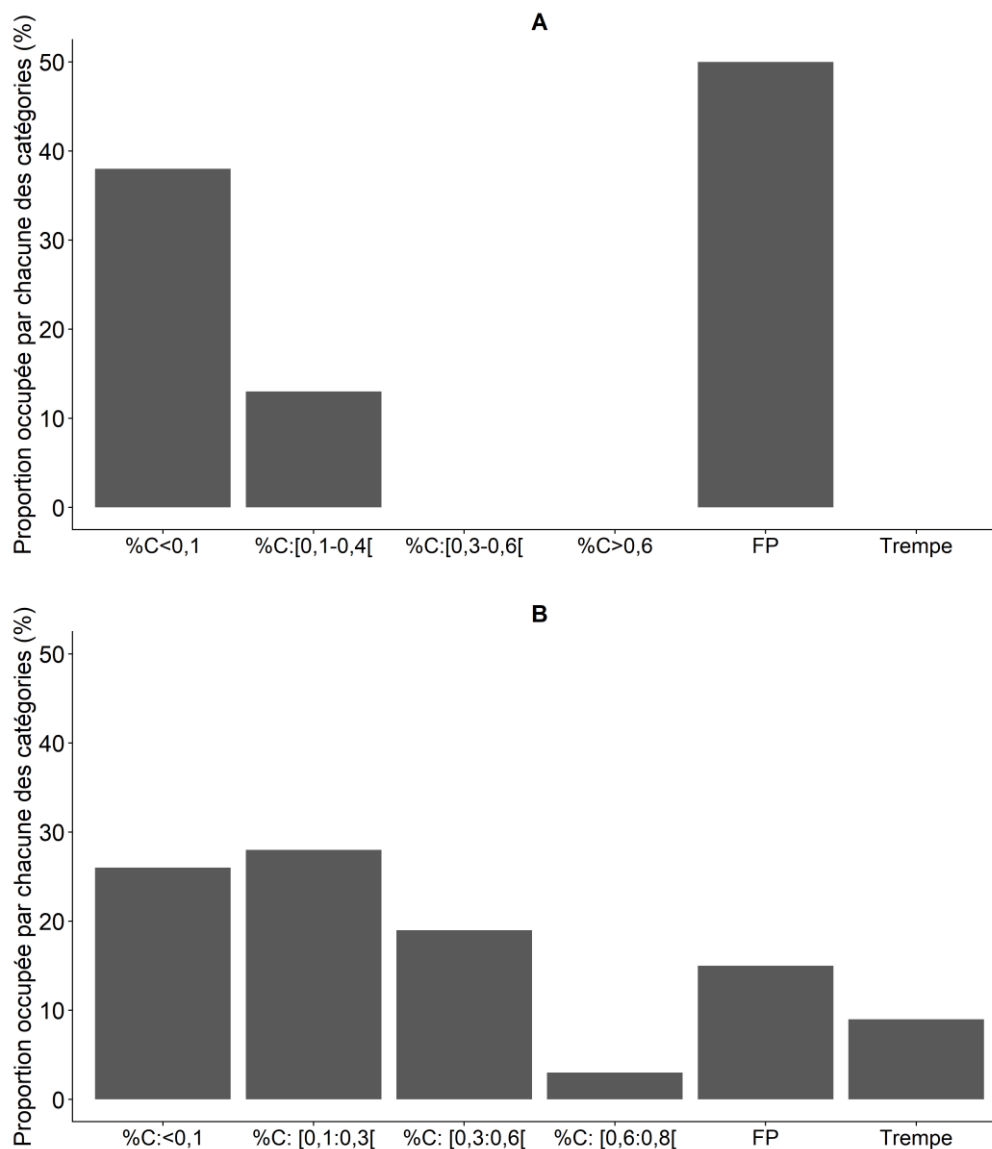


Figure 183 - « A » nature des alliages observée dans les clous et rivets du site de Vestby Mark, « B » nature des alliages relevée dans cette étude

Les valeurs de dureté moyenne ont été calculées pour chaque clou ou rivet ainsi que pour chaque catégorie à partir des données recensées par V.F Buchwald. ». La moitié des clous étudiés est en fer (%C<0,1). De plus, comme l'illustre la figure 184, la dureté est plus faible ($H_v < 100$), que celle mesurée dans nos échantillons pour le même type de métal. Cinq autres clous sont constitués de fer phosphoreux, l'acier est très minoritaire. Enfin, aucun traitement thermique n'a été mentionné par l'auteur.

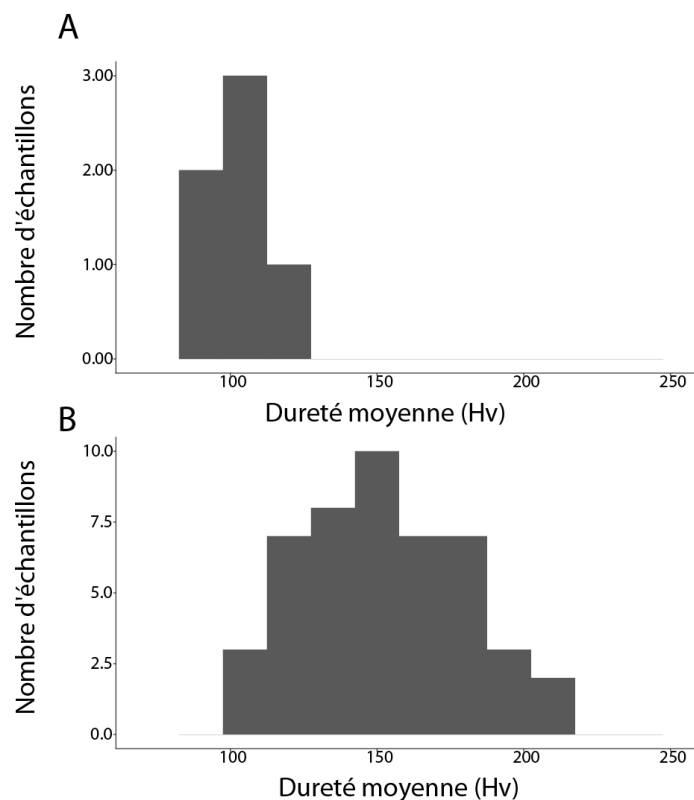


Figure 184 - « A » : Dureté moyenne pour les alliages très faiblement carburés (%C<0,1) dans les clous et rivets du site de Vestby Mark « B » : Dureté moyenne pour les alliages très faiblement carburés (%C<0,1) dans cette étude.

d) Conclusion

La qualité d'un métal peut être définie comme une variété de métal, identifiée par ses propriétés mécaniques¹³⁰. Ainsi, les mesures de microdureté effectuées sur notre corpus nous permettent de dégager au moins trois qualités distinctes au sein des armures.

- **Les alliages de dureté faible : (100<Hv<150)** : Ils sont minoritaires dans le corpus étudié (20% des échantillons) et sont essentiellement composés d'aciers faiblement carburés et de quelques échantillons de fer phosphoreux.
- **Les alliages de dureté moyenne : (150≤Hv≤250)** : Cette catégorie comprend l'essentiel du corpus étudié (67% des échantillons). Elle rassemble des alliages de diverses natures (acier, fer phosphoreux) dont la dureté est centrée autour de 200Hv et ce quel que soit le traitement thermique ou mécanique considéré.
- **Les alliages de dureté élevée : (Hv>250)** : Ce sont presque exclusivement des alliages ferreux trempés. Ils sont très minoritaires (12% des échantillons)

¹³⁰ Cette notion est à considérer au sens descriptif, sans y attribuer un jugement de valeur. Elle permet de rendre compte de la diversité des produits qui circulaient au Moyen Âge. Un métal avec des propriétés spécifiques pouvait être recherché par certains acheteurs pour une application particulière. A titre d'exemple le fer du Minervo a pu être désigné comme *mol* et celui de Comminges comme *dur* (C. Verna, 2001 a, p. 224)

Enfin, les structures en bandes soudées et les aciers dual phase peuvent être regroupés dans deux dernières catégories d'alliages. Elles pourraient résulter d'une action délibérée de l'armurier pour améliorer les capacités d'absorption et de résistance au choc des armures. Les structures en bandes soudées pourraient également être issues d'un recyclage de métal.

Les comparaisons menées avec les trois corpus (épées, bombardes et clous et rivets) laissent deviner qu'une qualité particulière de métal pour la fabrication des armures était recherchée. L'armurier semblait apporter une importance au matériau utilisé puisque le fer de faible dureté ($H_v < 100$), par exemple employé pour la fabrication de clous et de rivets, est absent de notre corpus, mais également de celui de A. Williams. Toutefois, il ne semble pas que les choix opérés aient été aussi drastiques que dans le cas des épées par exemple, où l'acier semble avoir été majoritairement privilégié et la tempe largement pratiquée. Dans le cas des armures, une plus grande diversité des structures est observée. Ce constat pourrait s'expliquer par différentes raisons : la première, fait écho à l'évolution typologique ainsi qu'à l'usage de l'armure, sous l'influence de différents facteurs tant militaires que sociaux, elle a subi de profonds changements morphologiques entre le XIII^e siècle et le XVII^e siècles susceptibles d'avoir impacté la nature du métal employé ; la seconde, établirait un lien entre le type d'alliage employé et le centre de fabrication de la pièce. Il est en effet possible que selon leur localisation géographique et les possibilités qu'offrait le marché du fer, les armuriers n'aient pas tous privilégié le même métal.

II. Nature du métal et usage de l'armure

Dans cette partie, afin d'apprécier une vision d'ensemble, nous avons rassemblé nos données et celles de la bibliographie (notamment les études de A. Williams). La représentativité du corpus par type de défense en est, de ce fait, largement améliorée (voir figure 185). La figure 186 présente l'évolution de la dureté du métal pour chaque type de défense entre le XIII^e siècle et le XVII^e siècle. Afin d'améliorer la lisibilité du graphique, nous avons choisi de regrouper les défenses de tête avec les défenses de cou, les défenses de jambes avec celles de hanches, et, enfin, les défenses de bras, épaules et mains, après avoir vérifié que cela ne causait pas de perte d'information. De plus, nous nous sommes aussi affranchis dans ce but de la taille respective des corpus de chaque défense. La figure 187 présente la part occupée par chacune des catégories de métal pour chaque type de défense. Les catégories des fers phosphoreux (FP) et des structures en bande (SB) ont été ajoutées à titre qualitatif puisque ces dernières n'ont pas été systématiquement mise en évidence par tous les auteurs¹³¹. Leurs parts sur le graphique sont donc très probablement sous-estimées.

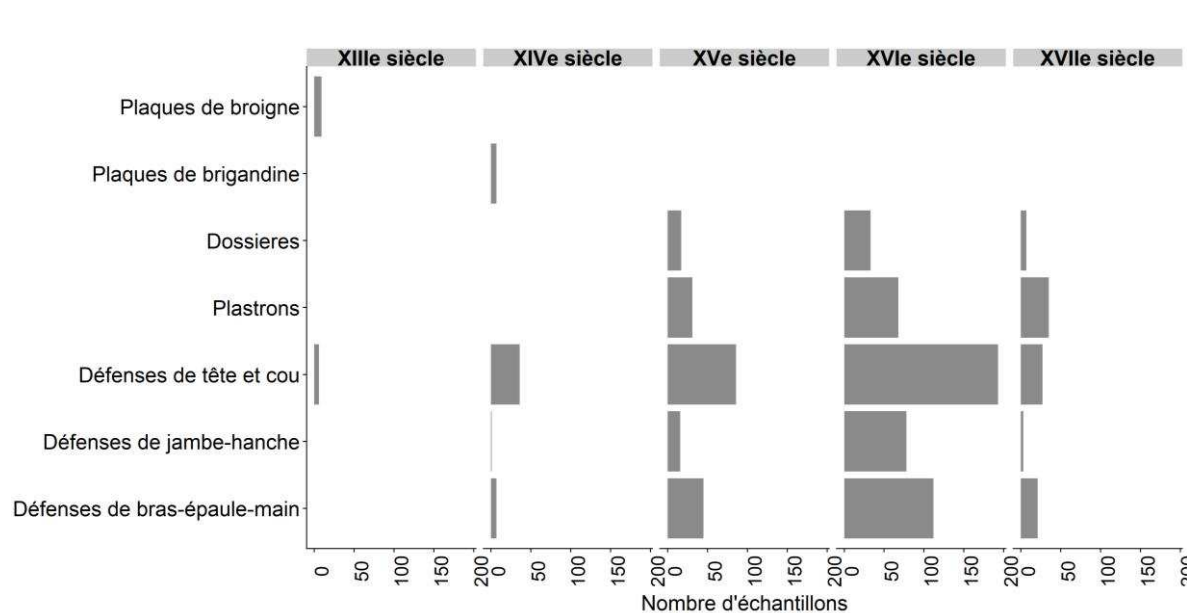


Figure 185 - Nombre d'échantillons considérés pour chaque type de défense pour nos données et celles de la littérature

Au XIII^e siècle et XIV^e siècle, les défenses sont constituées d'alliages de dureté moyenne ($H_v < 250$) ou faible ($H_v < 150$). Les alliages de dureté élevée ($H_v > 250$) sont très minoritaires. Au XV^e siècle ces derniers occupent une plus grande place. Ils représentent environ 30% des alliages, quel que soit le type de défense, excepté pour les défenses de jambe et de hanche où ils sont majoritaires. Les proportions varient légèrement au XVI^e siècle. Au XVII^e siècle, une chute de la proportion des alliages de dureté élevée est observée. Les alliages de dureté moyenne sont nettement majoritaires, excepté pour les défenses de monture pour lesquelles un très faible nombre

¹³¹ Les acier dual phase ne seront pas représentés ici. Ils ne concernaient que deux échantillons dans le corpus étudié et n'ont pas été mis en évidence par les autres auteurs.

d'échantillons a pu être étudié (voir figure 185). Les alliages de faible dureté demeurent minoritaires excepté dans le cas des plastrons.

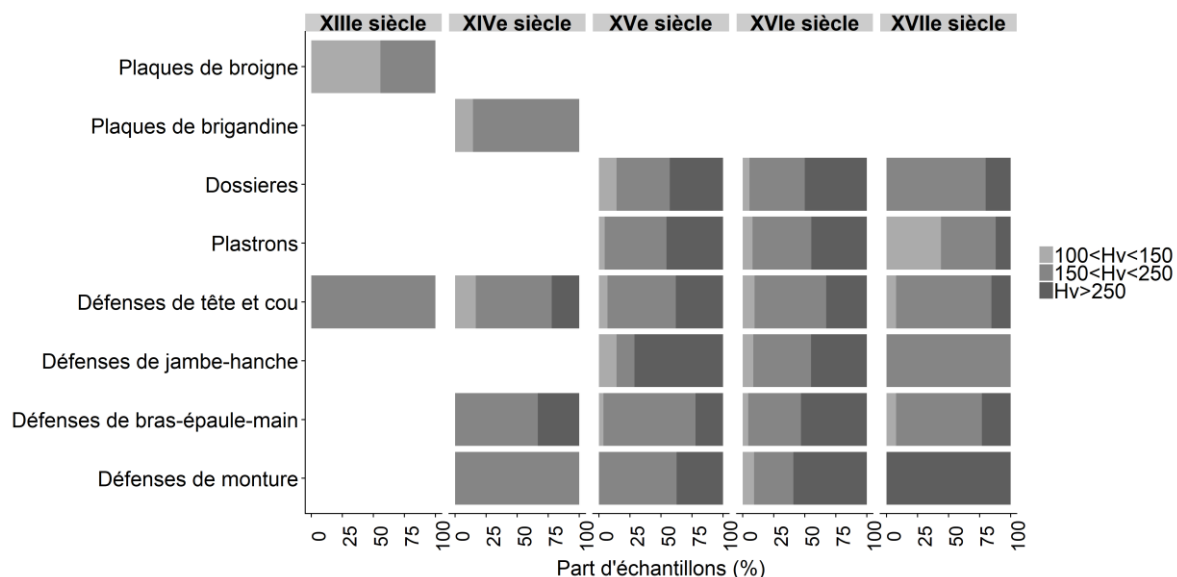


Figure 186 - Evolution de la dureté du métal pour chaque type de défense entre le XIIIe siècle et le XVIIe siècle en prenant en compte nos données et celles de la littérature

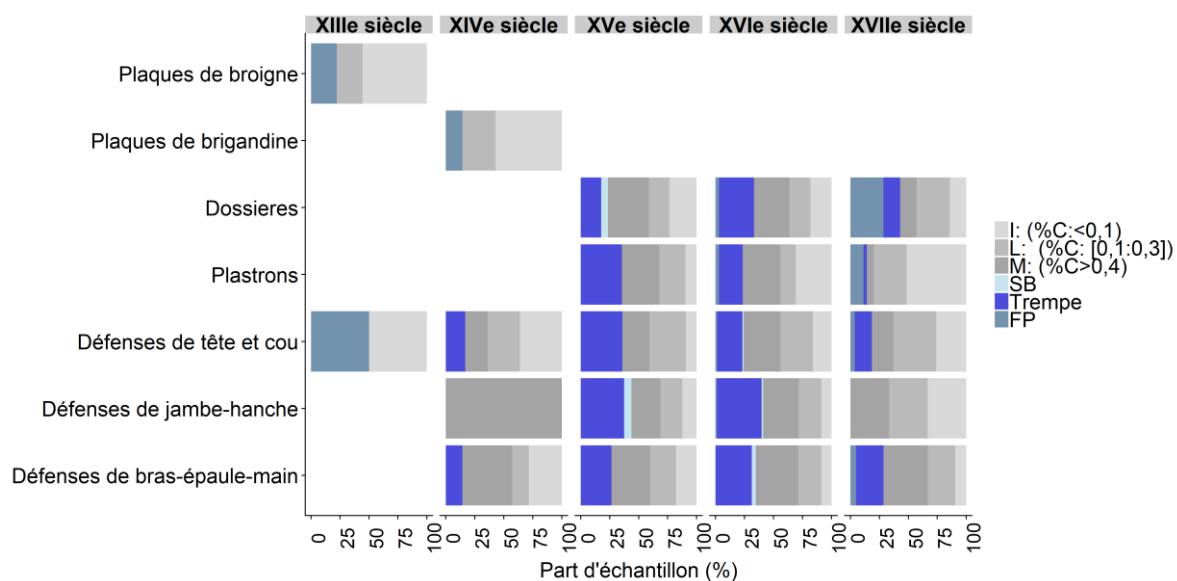


Figure 187 - Nature du métal utilisé pour chaque type de défense entre le XIIIe siècle et le XVIIe siècle en prenant en compte nos données et celles de la littérature

Les défenses de buste (plastron, dossière, armure de plaque) et de tête protègent les parties vitales du combattant. On pourrait donc s'attendre à y trouver les pièces les plus résistantes. Pourtant, ce n'est pas ce qui est observé. Il semble, au contraire, que l'ensemble des défenses suive un schéma similaire avec une augmentation des alliages de dureté élevée au XV^e et XVI^e siècles et

une diminution de ceux-ci au XVII^e siècle. Les défenses de monture, essentiellement représentatives des XV^e siècle et XVI^e siècle, présentent un schéma similaire.

La généralisation du port du harnois complet, recouvrant l'ensemble des membres du combattant au XV^e siècle aurait été adoptée pour répondre à l'emploi de certaines armes offensives sur le champ de bataille comme le grand arc anglais ou l'arbalète. Si les armuriers ont su développer un savoir-faire spécifique pour conférer à la tôle la forme voulue, certains ont également davantage utilisé des alliages de nature plus dure ou durcis par traitement thermique, par rapport aux siècles précédents et suivants. Toutefois, comme l'illustre la figure 187, ces alliages, majoritairement trempés, se retrouvent souvent à parts égales avec d'autres alliages aciérés mais de dureté moindre. Comme nous l'avons déjà évoqué, pour des pièces soumises à rude épreuve comme les armures, la résistance du métal tout comme sa capacité à dissiper l'énergie dû au choc sont deux facteurs cruciaux à considérer. Les armuriers ont ainsi peut-être été amenés à effectuer un compromis entre résistance mécanique et ductilité du métal, afin d'améliorer les propriétés défensives des armures. Il serait toutefois intéressant de discerner dans ce paysage les armures dénommées « à l'épreuve », pour lesquelles la résistance à un projectile (arbalète ou arme à feu) aurait été éprouvée lors d'un test. Un ou deux poinçons auraient été apposés sur ces pièces. Toutefois, leur identification reste délicate car ces marques peuvent être confondues avec celles des armuriers et l'apposition de poinçons sur les pièces n'était pas systématique.

Au XVII^e siècle, la baisse sensible d'alliages de dureté élevée pourrait correspondre au déclin du port de l'armure complète. En effet avec la généralisation de l'emploi des armes à feu, l'armure était soumise à plus rude épreuve. Il est difficile de déterminer précisément le degré de protection qu'offrait une armure face à ces nouvelles armes. A. Williams a tenté d'estimer l'énergie nécessaire qui la rendrait inefficace en fonction de la distance de tir. Il a ainsi défini quatre catégories de métal en considérant la teneur en carbone et en inclusions de ce dernier ainsi que la présence ou l'absence de trempe. Son étude fait cependant abstraction d'autres critères influant sur la dureté du métal comme la présence de phosphore ou encore la taille de grain. Selon lui, à longue portée, la nature du métal utilisé pouvait faire une différence mais à courte portée aucune (A. Williams, 2003, p. 947). La solution choisie par les armuriers aurait alors été d'augmenter l'épaisseur¹³² de l'armure au détriment d'une certaine mobilité (C. Gaier, 2004, p. 177). Une des armures étudiées par A. Williams illustre cette hypothèse. Elle porte une marque de l'épreuve laissée par la balle utilisée pour tester la résistance de la pièce. Or, l'échantillon prélevé est uniquement constitué de ferrite (A. Williams, 2003, p. 673). Pour valider ce résultat, il faudrait toutefois pouvoir analyser davantage de pièces éprouvées.

¹³² Ce paramètre n'a malheureusement pas pu être pris en compte dans cette étude

Un dernier type d'objet pourrait faire l'objet d'une discussion. Il s'agit des armures dites d'apparat. Ce terme est hérité de l'historiographie pour désigner des armures d'abord réalisées à des fins de représentations au XVI^e siècle, souvent caractérisées par la richesse de leurs ornements et réservées à une clientèle fortunée. Toutefois, il n'était pas exclu qu'elles aient pu être portées au combat. A. Williams a par exemple mise en évidence que certaines des armures issues de l'atelier des Negrolì, assimilées à des objets de parade, étaient parfois constituées d'acier (A. R. Williams, 2003, P.210). Notre corpus ne comptait que peu de pièces de ce type, mais certaines, comme l'armure de François de Montmorency, sont effectivement constituées en partie d'acier de dureté moyenne¹³³. La nature du métal utilisé ne permet donc pas ici de justifier un usage impropre à la guerre.

Rappelons également que le corpus de pièces étudié par A. Williams est presque exclusivement composé d'objets de musées. C'est aussi le cas d'une grande partie de nos échantillons. Or, comme nous l'avons vu au chapitre premier, les pièces les plus prestigieuses ont eu plus de chances d'être conservées. De ce fait, les résultats présentés mettent essentiellement en lumière l'équipement porté par les plus fortunés. Qu'en est-il de celui des autres hommes de guerre et notamment des gens de pied ?

¹³³ Les résultats sur l'armure de François de Montmorency sont détaillés p.392

III. Qualité de l'équipement défensif et richesse du porteur

Relier les pièces conservées à leur porteur, ou à la richesse de celui-ci est une entreprise qui peut s'avérer difficile. Ceci tient, d'une part, au caractère hétérogène des collections de musées qui rassemblent des objets d'origines diverses, et, d'autre part, à la spécificité même de cet objet qui a pu appartenir à différents propriétaires, à la suite d'une récupération sur un champ de bataille par exemple. De plus, comme l'ont montré plusieurs auteurs (voir Chapitre 1) les puissants et les combattants n'étaient pas les seuls à posséder un équipement défensif, les bourgeois et habitants des villes pouvaient également disposer d'un équipement défensif opérationnel (P. Contamine, 1996). Compte tenu de ces éléments, nous avons établi deux catégories :

- **Catégorie 1** : Elle rassemble des pièces d'armures dont le propriétaire est connu et fait partie de la population fortunée ¹³⁴.
- **Catégorie 2** : Elle rassemble des pièces d'armures destinées à des combattants peu fortunés identifiées grâce à leur typologie (pièces d'armures destinées à l'infanterie ou à des mercenaires comme les lansquenets)

Là encore, afin d'améliorer la représentativité du corpus étudié, nous avons rassemblé nos données et celles de la littérature sur la figure 188, qui présente l'évolution de la dureté des alliages pour chaque catégorie entre le XIV^e siècle et le XVII^e siècle. Seuls les XV^e et XVI^e siècles pourront être discutés. La catégorie 1 rassemble 121 échantillons tandis que la catégorie 2 n'en comprend que 30. Cependant, afin d'améliorer la lisibilité du graphique, nous nous affranchirons ici de la taille des deux corpus.

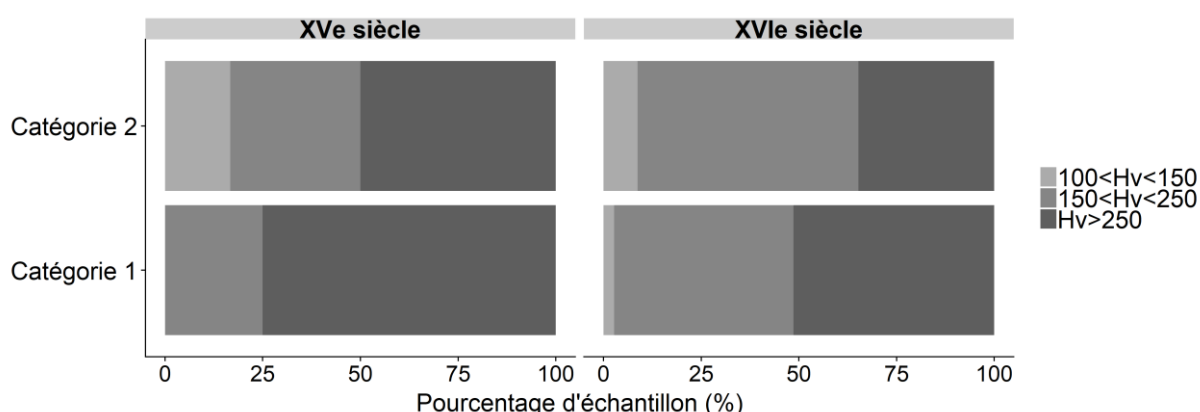


Figure 188 - Evolution de la dureté du métal pour les armures de la catégorie 1 et 2

¹³⁴ Le nom du propriétaire, ou celui de sa famille est connu et clairement identifié.

Les armures de la catégorie 1 et 2 présentent en majorité des alliages d'une moyenne et grande dureté au XV^e et XVI^e siècles. Les proportions observées sont, en effet, très proches de celles de la figure 186. Cependant, en moyenne, les armures de la catégorie 1 présentent des duretés supérieures à celles de la catégorie 2, où les alliages de dureté faible et moyenne occupent une place plus importante, particulièrement au XV^e siècle. Par conséquent, comme nous pouvons le supposer, les plus fortunés semblent avoir bénéficié d'armures fabriquées à partir d'un métal de bonne résistance. Cependant, les résultats montrent que les combattants aux moyens plus modestes n'étaient pas à l'inverse complètement démunis, puisque la dureté du métal est majoritairement de dureté moyenne voire élevée dans un tiers des cas au XVI^e siècle. Ceci peut faire écho à deux faits. D'abord à la présence de plus en plus marquée de professionnels de guerre au sein des armées à partir du XV^e siècle. Ensuite, à la normalisation et la prise en charge progressive des gouvernements urbains, royaux et princiers de l'équipement des gens de guerre (C. Gaier, 1973, p. 89), (P. Contamine, 1986, p. 326–327). Ces changements en matière de composition des armées vont ainsi permettre une répartition plus homogène du matériel et contribuer à diminuer les écarts entre combattants de fortunes différentes (C. Gaier, 2004, p. 166).

Un autre facteur pourrait influencer la nature du métal employé. Il s'agit du centre de fabrication. En effet, il n'est pas certain que l'ensemble des armuriers avaient à disposition le même type de matériau au même moment, et il est aussi possible qu'une ou plusieurs qualités de métal aient été privilégiées par certains centres de fabrication.

IV. Spécificités techniques et centres de production

1) Centre de fabrication et nature du métal

Dans les collections d'armures, le lieu de fabrication d'une pièce peut être déterminé de différentes façons. Il peut d'abord être relié à l'identification d'une marque d'un atelier ou de la ville apposée sur la pièce. Cependant, en l'absence de poinçon, c'est la typologie de la pièce qui fait foi, même si elle peut être parfois sujette à débat dans le cas de productions très similaires. Rappelons par conséquent que les résultats qui vont être discutés dépendent directement de l'exactitude de cette identification. Pour rappel, dans le corpus étudié, trois grands centres de fabrication sont présents : « l'Allemagne », « L'Italie » et la « France ». Le groupe « Allemagne » rassemble des pièces supposées avoir été fabriquées dans des lieux précis comme Nuremberg (9 d'entre eux), Augsbourg (4 d'entre eux), et Brunswick (1 élément), ou simplement désignées comme de typologie « allemande ». C'est le cas des pièces datées du XV^e siècle. Le groupe « Italie » comprend des objets supposés avoir été fabriqués en Italie du Nord, pour la plupart sans doute à Milan ou peut être dans d'autres villes comme Brescia. Elles sont dites de « typologie italienne ». Le groupe « France » rassemble les pièces dites de typologie « française », leur lieu précis de fabrication est inconnu.

La figure 189 présente la part de chacune des catégories définies en fonction du siècle et du lieu supposé de fabrication des pièces tandis que, la figure 190 illustre l'évolution de la dureté des alliages pour chaque grand groupe, « Allemagne », « Italie » et « France ». Les siècles antérieurs au XV^e siècle ne sont pas pris en compte puisque la provenance des objets demeure inconnue à ces périodes. De plus, le cas du XVII^e siècle est difficile à discuter au vu du faible nombre de pièces pour lesquelles une hypothèse de provenance est posée. C'est pourquoi nos propos s'appliqueront uniquement aux XV^e et XVI^e siècles.

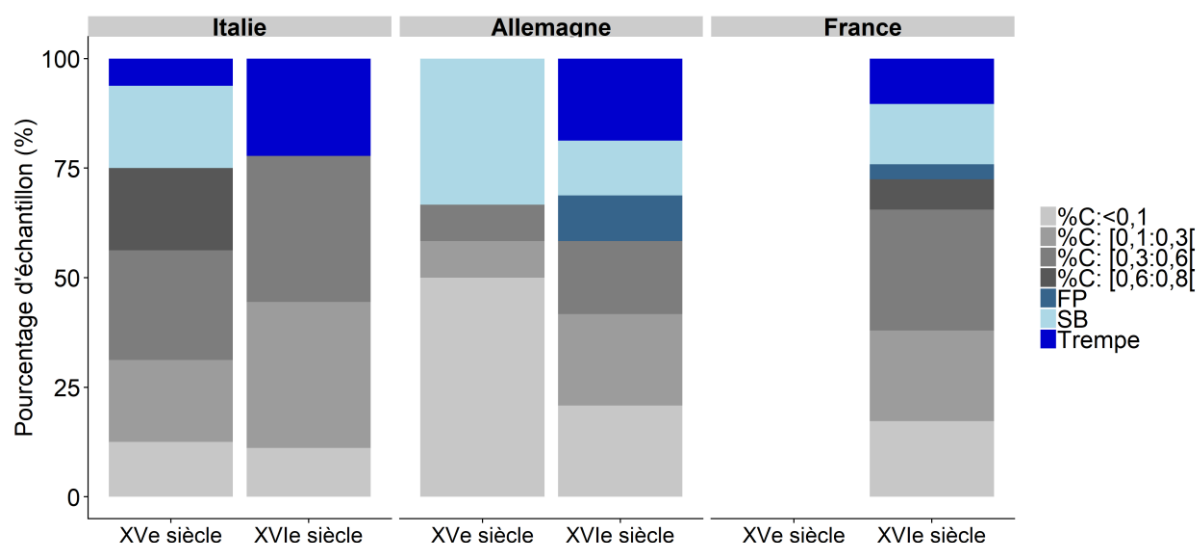


Figure 189 - Parts de chacune des catégories définies en fonction du siècle et du lieu supposé de fabrication des pièces

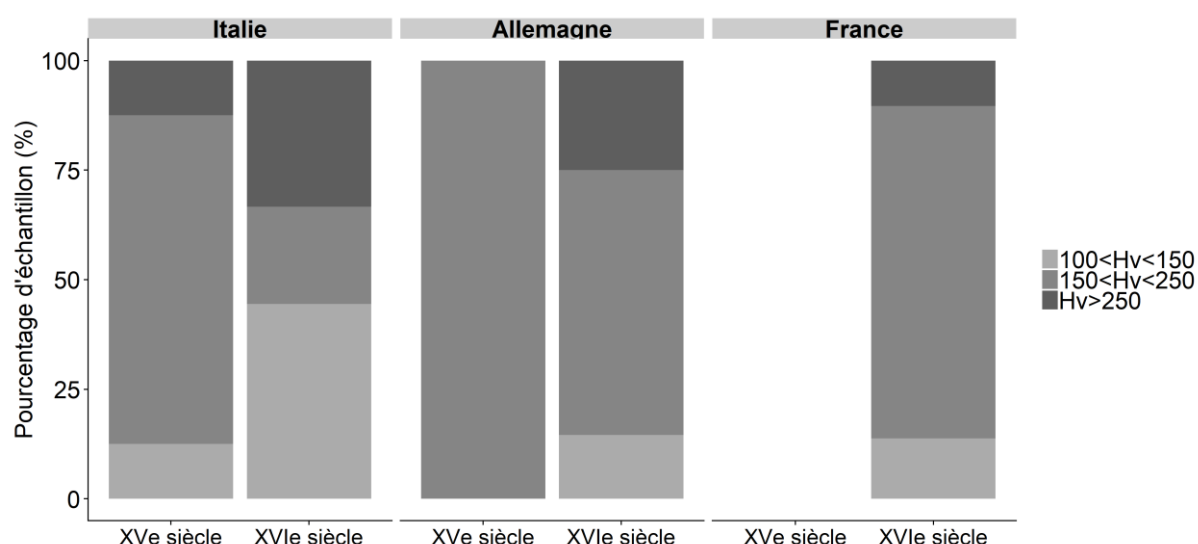


Figure 190 - Evolution de la dureté du métal en fonction du lieu supposé de fabrication des pièces

Du point de vue des gestes techniques, nos analyses apportent un nouvel éclairage puisqu'elles révèlent des occurrences de trempe sur des pièces supposées de fabrication française au XVI^e siècle. Signalons aussi qu'une défense de tête espagnole au XV^e siècle a également fait l'objet d'une trempe (voir Chapitre 4). Ceci prouve que ce traitement thermique, qui joue un rôle déterminant sur la dureté finale du métal, était également mis à profit aux mêmes périodes dans des centres de production de moins grande importance. De façon générale, nos analyses métallographiques ne permettent pas de dégager des gestes techniques spécifiques relatifs à un centre de production. Au contraire, on constate une certaine homogénéité des savoir-faire entre les centres. Qu'en est-il de la nature du métal ?

Intéressons-nous pour cela aux deux plus grands pôles de productions : l'Italie et l'Allemagne. La plupart des catégories de métal recensées sont présentes en Allemagne. Néanmoins, comme précédemment évoqué, ce groupe est composé de plusieurs centres de fabrication, comme les villes de Nuremberg et Augsburg, au XVI^e siècle. La ville de Nuremberg est la mieux représentée dans le corpus étudié. Comme l'illustre la figure 191, toutes les catégories de métal recensées sont présentes.

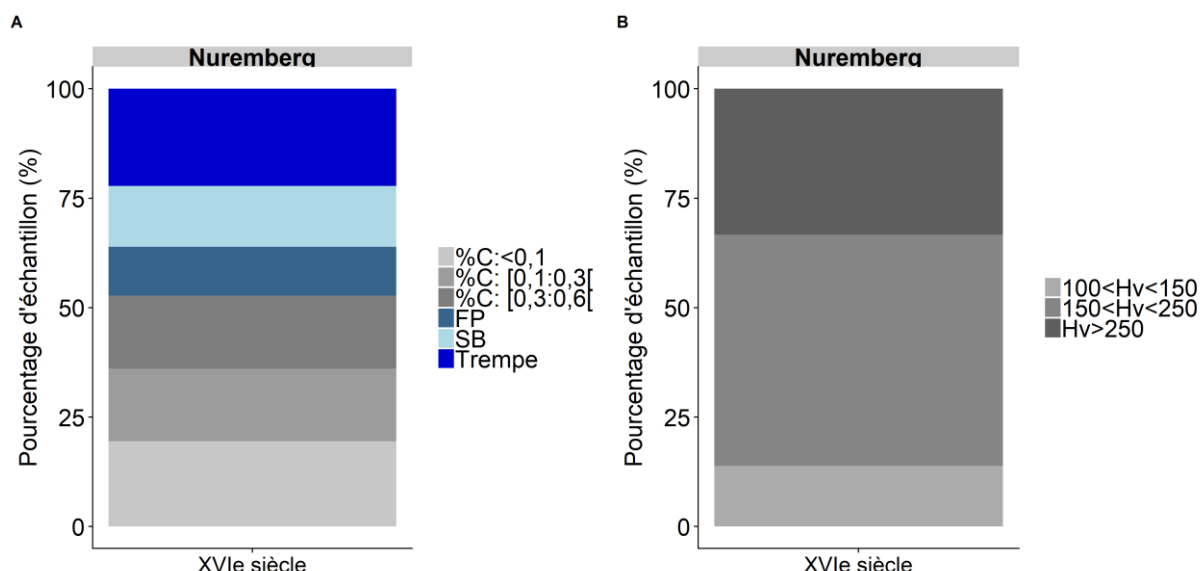


Figure 191 - « A » Nature du métal rencontré dans les armures nurembergeoises. « B » dureté du métal

Au contraire, les armures italiennes ne présentent pas toute cette diversité. La catégorie des fers phosphoreux est, en effet, absente dans le corpus étudié¹³⁵. Ce résultat est peut-être à mettre en relation avec la localisation géographique du centre. La présence de phosphore en solution solide dans le métal est, en effet, liée à la nature du minerai initial qui a été utilisé. Pour produire du fer phosphoreux, il faut au préalable que le minerai en contienne en quantité suffisante. Par conséquent, la nature du métal peut aussi avoir un lien direct avec l'origine de celui-ci.

Des différences de proportions des alliages ont été relevées en comparant ces résultats avec la littérature (notamment les études de A. Williams). L'auteur a en particulier montré une baisse sensible des alliages trempés dans les armures italiennes au XVI^e siècle (voir Chapitre 1 p.89), ce que nous n'avons pas pu mettre en évidence. Ces différences n'ont pas pu être expliquées autrement que par la spécificité des deux corpus comparés, qui se distinguent notamment par leur taille.

¹³⁵ A.Williams a néanmoins relevé la présence de phosphore (%mass>0,1) sur 3 éléments d'armures supposés de fabrication italienne et datés du XVe siècle (A. Williams, 1991). Ceci montre qu'il n'est pas exclu que du fer phosphoreux ait été utilisé à cette période en Italie.

2) Origine du métal

Dans ce paragraphe nous discuterons en détail le cas des échantillons dont la signature chimique a pu être étudiée, c'est-à-dire ceux associés au procédé de réduction directe. La question de l'indirect sera traitée dans un paragraphe ultérieur (p. 389). Dans le corpus étudié, nous avons à disposition un certain nombre de pièces supposées de fabrication allemande, italienne et française dont nous avons pu étudier la cohérence chimique afin de déterminer l'origine des approvisionnements en métal des armuriers. La démarche mise en place a permis de définir un groupe d'armures italiennes, le groupe « Italie_Groupe1 », cohérent d'un point de vue de sa signature chimique. Les armures françaises présentaient un fort recouvrement chimique avec un groupe d'armures allemandes nommé « Allemagne_Groupe1 », empêchant de distinguer des sous-ensembles de provenance. Certains éléments supposés de fabrication allemande ou italienne possédaient cependant des signatures clairement distinguables du groupe « Italie_Groupe1 » et « Allemagne_Groupe1 ». Enfin, deux échantillons issus de plaques de broigne seraient compatibles avec l'espace Lorrain « La Minette ». Nous allons à présent discuter des résultats en commençant par les deux grands pôles de production internationaux : l'Italie du Nord et l'Allemagne. Nous finirons cet exposé par les centres secondaires et les armures supposées de fabrication française.

a) *La Lombardie et les armures supposées de fabrication italienne*

Pour rappel, le groupe « Italie » comprend des pièces supposées avoir été fabriquées en Italie du Nord, pour la plupart sans doute à Milan ou peut être dans d'autres villes comme Brescia. Elles sont dites de « typologie italienne ». Si les signatures chimiques de la plupart des armures se recouvrent dans le groupe « Italie_Groupe1 » certaines armures ont des signatures qui s'en distinguent nettement. C'est le cas de deux défenses de tête H35, 951183, WCA180 ou de la défense de bras 9301895-2. L'hypothèse d'une origine lombarde du métal constituant l'ensemble de ces armures supposées de facture italienne s'est donc posée. L'incompatibilité chimique avec l'espace lombard défini par S. Leroy a pu être prouvée seulement pour une armure supposée de fabrication italienne : une défense de tête H35. Enfin, certaines armures dont la typologie suggère qu'elles sont issues d'autres centres de production, ont une signature chimique compatible avec la Lombardie et le groupe Italie_Groupe1, c'est pourquoi un paragraphe leur sera dédié. Les trois cas de figures ont été synthétisés dans le tableau 30.

Nous discuterons tour à tour le cas des armures supposées de fabrication italienne dont les signatures chimiques seraient compatibles avec l'espace lombard, puis celles qui présentent une

*Chapitre 5 : Nature, circulation et production du métal utilisé pour la fabrication des armures
: synthèse et discussion*

incompatibilité avec ce dernier, et enfin celles qui seraient issues d'autres centres de production mais qui ont une signature chimique compatible avec les armures lombardes.

Tableau 30 - Synthèse des résultats sur l'origine et la nature du métal des armures supposées de fabrication italienne ou celles compatibles avec la signature chimique des armures Italie_Groupe1. Entre parenthèses, nombre d'échantillons.

	Groupe d'armures	Nombre d'échantillons	Lieu de fabrication supposé des pièces	Compatibilité avec l'espace lombard possible (S. Leroy)	Catégories de métal
Armures supposées de fabrication italienne	Italie_Groupe1	11	Italie	Oui	Nombre d'échantillons 100<Hv<150 150<Hv<250 Hv>250 FP %C*:<0,1 %C*:[0,1-0,3] %C*:[0,3-0,6] %C*:[0,6-0,8] SB Trempe Alliages aciers
	Incompatible avec Italie_Groupe1	4	Italie	Oui ? (3) Non (1)	Nombre d'échantillons 100<Hv<150 150<Hv<250 Hv>250 FP %C*:<0,1 %C*:[0,1-0,3] %C*:[0,3-0,6] %C*:[0,6-0,8] SB Trempe Alliages aciers
Armures issues d'autres centres	Compatible avec Italie_Groupe1	3	Allemagne Espagne	Oui	Nombre d'échantillons 100<Hv<150 150<Hv<250 Hv>250 FP %C*:<0,1 %C*:[0,1-0,3] %C*:[0,3-0,6] %C*:[0,6-0,8] SB Trempe Alliages aciers

i. Signatures chimiques compatibles avec la Lombardie : Italie Groupe1

Il apparaît que, pour une majorité des pièces italiennes étudiées, les armuriers auraient utilisé un métal issu d'une même origine (ou chimiquement très proche) et potentiellement compatible avec la signature chimique de l'espace lombard défini, par S. Leroy. Du point de vue de la nature du métal, toutes les catégories sont représentées, mise à part celles des alliages très faiblement carburés et des fers phosphoreux (voir tableau 30, Italie_Groupe1). Cependant, les alliages aciérés de dureté moyenne ou élevée prédominent largement.

Par conséquent, pour le groupe Italie_Groupe1, les résultats vont dans le sens d'un approvisionnement local en métal majoritairement aciéré. L'absence de fer phosphoreux corrobore cette hypothèse, le phosphore n'est présent qu'en très faible quantité dans les minerais lombards analysés par S. Leroy (S. Leroy, 2010, p. 311). Ce résultat ne paraît pas surprenant. En effet la Lombardie était réputée pour sa fabrication d'acier (R.-H. Bautier, 1960, p. 10; J.-F. Belhoste, 2001, p. 548). De plus, les sources dépouillées ont montré que les armuriers milanais, qui drainaient une grande partie de l'activité armurière de la région, entretenaient un rapport privilégié avec les producteurs de fer lombard, et parfois dans le cadre de grande entreprise familiale comme celle des Missaglia, avaient investi dans des mines et des forges lombardes (F. Menant, 1988, p. 142; J.-F. Belhoste, 2001, p. 567). Par conséquent, il semble naturel qu'ils aient utilisé cette matière première abondante et de bonne qualité pour la fabrication de leurs pièces.

ii. Signatures chimiques incompatibles avec la Lombardie

Certains éléments d'armures, supposés de fabrication italienne présentent des signatures chimiques distinctes du groupe de provenance « Italie_Groupe1 »¹³⁶. Une incompatibilité avec la Lombardie a pu être clairement démontrée pour la défense de tête H35, datée du XV^e siècle, et typologiquement associée aux productions italiennes. Ce résultat peut être interprété de différentes façons. Si elle est bien de facture italienne alors cela signifie que les armuriers pouvaient avoir recours à des approvisionnements extérieurs à la Lombardie. Cette hypothèse semble probable compte tenu de l'étendue du marché du fer à cette époque (J.-F. Belhoste, 2001, p. 545–552). Toutefois, ce résultat pourrait aussi nous faire reconsidérer le lieu de fabrication de la pièce et remettre en cause son identification typologique.

¹³⁶ Ceci n'implique pas pour autant une incompatibilité avec l'espace lombard défini par S. Leroy, qui, comme nous l'avons vu à travers l'exemple de l'armure de sainte Suzanne, compte certainement différents sous ensemble de production.

iii. Cas des armures typologiquement associées à d'autres centres de production

Ce dernier groupe comporte des armures dont la typologie les associe à d'autres centres de production (Allemagne ou Espagne) mais qui possèdent des signatures chimiques confondues avec celle du groupe « Italie_Groupe1 ». Il s'agit d'une épaulière supposée de fabrication nurembergeoise (échantillons G27618_ech1, et G27618_ech2) et d'une défense de tête supposée de fabrication espagnole (HPO618). Or, comme évoqué au Chapitre 1, nous savons que le fer lombard était exporté, car réputé de bonne qualité¹³⁷. Il est donc tout à fait possible que des armuriers allemands voire espagnols en aient profité. Cependant, ce résultat pourrait aussi questionner le rapprochement systématique entre la typologie des pièces et un centre de production. La pratique de la copie était, en effet, répandue au Moyen Âge.

On fabrique ainsi volontairement des objets dénommés dans les sources comme à la façon d'Italie ou d'Allemagne (D. Robcis, 1998), c'est-à-dire morphologiquement proches de productions réputées, mais qui ont bel et bien été fabriqués dans d'autres centres armuriers. Ces mentions constituent pour la pièce comme une publicité qui met en avant une forme ou une technique de fabrication particulière imitant celle d'une production renommée (D. Robcis, 1998; P. Dillmann, L. Pérez, and C. Verna, 2011 a, p. 61).

La défense de tête H35 pourrait ainsi faire écho à ce type de pratique, puisqu'elle est typologiquement associée aux productions italiennes, mais sa signature chimique se distingue clairement de la Lombardie et des autres armures italiennes du groupe « Italie_Groupe1 »¹³⁸. En suivant le même raisonnement, l'épaulière G27618 pourrait être une imitation d'armure allemande fabriquée en Italie du Nord à partir d'un métal lombard. En revanche cet argument apparaît moins convaincant dans le cas de la défense de tête espagnole HPO618. Si la fabrication d'armures dites à la façon d'Italie ou d'Allemagne semble répandue (D. Robcis, 1998), cela n'est pas attesté pour les d'armures de fabrication espagnole.

b) Les pièces supposées de fabrication allemande

i. Considérations générales

Le groupe « Allemagne » rassemble des pièces supposées avoir été fabriquées dans des lieux précis comme Nuremberg (9 d'entre eux), Augsbourg (4 d'entre eux), et Brunswick (1 élément), ou

¹³⁷ Le métal était par exemple exporté vers Gênes qui le redistribuait vers Narbonne et à Barcelone (R.-H. Bautier, 1960, p. 10), (J.-F. Belhoste, 2001, p. 549). On le retrouve également aux péages suisses (F. Morenzoni, 2001). La mention de « fer de Lombardie » est aussi rencontrée à Albi dans la deuxième moitié du XIV^e siècle (A. Vidal, 1906, p. 224)

¹³⁸ Il est possible que ce type d'objet ait été réalisé par des armuriers italiens installés dans d'autres centres. On sait par exemple que certains armuriers italiens ont été invités à venir s'installer en France (voir Figure 10)

simplement désignées comme de typologie « allemande » (8 éléments). La moitié des armures étudiées forme un groupe à la signature chimique dispersée appelé « Allemagne_Groupe1 ». Par conséquent, il est fort possible que des sous-ensembles de provenance soient confondus du fait, là encore, du nombre réduit d'éléments traces analysés et du recouvrement des signatures. Les résultats généraux sur les armures supposées de fabrication allemande sont synthétisés dans le tableau 31.

Tableau 31 - Synthèse des résultats sur l'origine et la nature du métal des armures supposées de fabrication allemande.

Groupe	Nombre d'échantillons	Provenance supposée des pièces	Catégories de métal
Allemagne_Groupe1	18	Allemagne	Nombre d'échantillons 100 < Hv < 150 150 < Hv < 250 Hv > 250 FP %C* < 0,1 %C* : [0,1;0,3] %C* : [0,3;0,6] %C* : [0,6;0,8] SB Trempe Alliages aciers
Incompatible avec Allemagne_Groupe1	7	Allemagne	Nombre d'échantillons 100 < Hv < 150 150 < Hv < 250 Hv > 250 FP %C* < 0,1 %C* : [0,1;0,3] %C* : [0,3;0,6] %C* : [0,6;0,8] SB Trempe Alliages aciers

Au sein de l'ensemble Allemagne_Groupe1, contrairement au groupe « Italie_Groupe1 », les alliages très faiblement carburés ($\%C < 0,1$) sont bien représentés tandis que les alliages fortement carburés sont absents. Il peut sembler étonnant de ne pas trouver d'occurrence de fers phosphoreux. En effet, les villes de fabrication allemande comme Nuremberg se trouvent non loin de régions susceptibles d'en produire, comme le Haut Palatinat qui compte des minerais riches en phosphore (V. F. Buchwald, 2008, p. 211). Il faut préciser ici qu'une dizaine d'échantillons issus

d'armures allemandes de notre corpus sont constitués de fer phosphoreux. Cependant, une étude de provenance n'a pas pu être envisagée dans leur cas, car soit ils étaient associés au procédé de réduction indirecte, soit le nombre d'inclusions qu'ils contenaient s'avérait insuffisant. Par conséquent, l'utilisation de fer phosphoreux n'est pas à exclure.

Pour conclure, les approvisionnements allemands semblent plus diversifiés que leurs voisins italiens. Cette diversité reflète peut-être le caractère multiple du groupe « Allemagne » qui comprend, à l'inverse de son voisin italien, plusieurs centres de fabrication situés dans des régions distinctes. La ville de Nuremberg est la mieux représentée dans le corpus étudié, c'est pourquoi nous lui avons consacré le paragraphe suivant.

ii. La ville de Nuremberg

Nuremberg bénéficiait d'une situation géographique très favorable à proximité de différentes régions sidérurgiques prospères comme le Haut Palatinat, la Styrie ou encore les Alpes lombardes. De plus, c'est un des centres de production pour lesquels nous avons quelques indices sur la nature du métal utilisé grâce aux sources écrites. On sait par exemple que les marchands de Nuremberg ont entretenu d'étroites relations avec plusieurs de ces régions pour le commerce des alliages ferreux comme le Haut Palatinat et le district d'Innerberg au XVI^e siècle et XVII^e siècle (P. Braunstein et al., 2011).

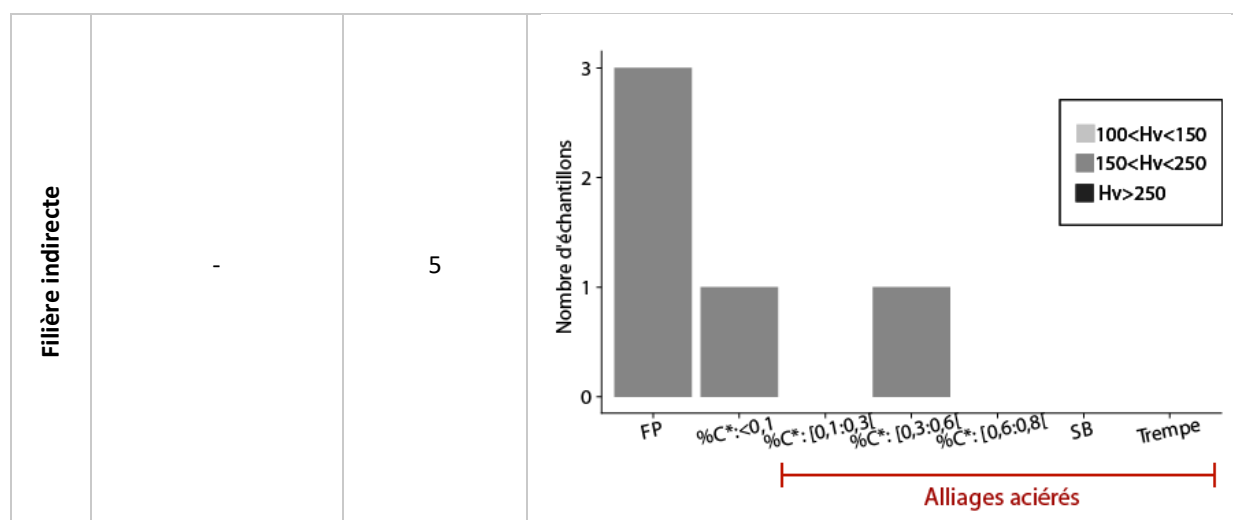
Pour rappel, l'article de A. F von Reitzenstein sur la réglementation des armuriers, précise qu'une catégorie spécifique d'artisan, les marteleurs, était chargée d'approvisionner en métal les armuriers. Le matériau était principalement issu de la région du Oberpfalz. Ensuite il était transformé par les marteleurs en tôles et, enfin, livré aux armuriers (F. von Reitzenstein, Alexander, 1959). Ainsi, comme précédemment évoqué p. 340 les marteleurs étaient tenu de fournir un matériau constitué « au moins à moitié d'acier » dénommé « Zeug ». Toutefois, l'armurier avait aussi la possibilité de fabriquer son propre matériau « en soudant » du fer et de l'acier. Le « Zeug » renverrait donc à l'utilisation d'un matériau « mixte ». Toutefois la signification exacte des termes employés demeure inconnue et sujette à des interprétations. Pour rappel, l'association de fer avec de l'acier pourrait suggérer qu'une soudure aurait été réalisée entre les deux matériaux lors de la forge de la tôle. Cependant, selon A. Williams, la référence « à moitié d'acier », n'implique pas forcément une soudure et pourrait aussi renvoyer à un acier faiblement carburé (A. Williams, 2003, p. 591). De plus, les pièces réalisées en fer ne faisant pas l'objet d'un contrôle de la ville, elles ne devaient par conséquent pas porter de poinçon (M. Pfaffenbichler, 1992, p. 30). L'apport des sources archéométriques sur cette question est primordial puisqu'elles nous permettent d'accéder directement à ces informations dans le matériau.

Voyons à présent quelle lecture peut être tirée de nos résultats sur ce sujet. Le tableau 32 illustre l'hétérogénéité des fournitures en métal utilisées pour la ville de Nuremberg au XVI^e et XVII^e siècle. Les échantillons associés au procédé de réduction indirecte ont été reportés dans le tableau à titre indicatif. La question de l'indirect est traitée en détail p. 389.

*Chapitre 5 : Nature, circulation et production du métal utilisé pour la fabrication des armures
: synthèse et discussion*

Tableau 32 - Synthèse des résultats sur l'origine et la nature du métal des armures supposées de facture nurembergeoise.

			Catégories de Métal
Groupe	Nombre d'échantillons		
Filière directe	Compatible avec Allemagne_Groupe1	10	
	Compatible avec Italie_Groupe1	2	
	Incompatible avec Allemagne_groupe1 et Italie_Groupe1	1	



Si l'on se réfère au tableau 32, tous les cas de figure se trouvent rassemblés. Le métal peut venir de la filière directe et indirecte. Lorsqu'il est issu de la filière directe sa provenance semble variable, la nature de l'alliage également. Seuls les alliages fortement carburés semblent véritablement exclus de ce paysage. Toutefois, ceci peut être lié au hasard des pièces sélectionnées. S'il nous est difficile d'identifier le métal qui pourrait être issu de la région du « Oberpfalz », en l'absence de corpus de comparaison, il est certain que les armuriers nurembergeois avaient à disposition plusieurs sources d'approvisionnements.

Même s'il est impossible de déterminer précisément de quoi ce matériau « mixte », dénommé « Zeug » était composé, on peut supposer qu'il devait contenir du carbone en quantité suffisante pour qu'un changement des propriétés physiques du métal soit perceptible et puisse l'identifier. Nous avons ainsi formé deux grandes catégories : celle regroupant les qualités de métal qui pourraient être compatibles avec l'emploi de ce matériau (SB, Trempe, M :(%C>0,4)) et celles qui ont peu de chance de l'être (I:(%C<0,1), L:(%C:[0,1-0,3]), FP). La figure 192 rassemble l'ensemble des pièces portant une marque de Nuremberg issues de notre corpus d'étude et de la littérature. Le peu de pièces étudiées antérieures au XV^e siècle ne permet pas de discuter de la nature des matériaux utilisés avant que la mention explicite de l'emploi d'un matériau mixte soit attestée par l'édit de 1497. Toutefois, on constate que même après cette date il n'y a pas de préférence majeure pour les matériaux plus carburés, bien au contraire. L'emploi de matériau faiblement carburé est toujours attesté et demeure majoritaire. La part des alliages faiblement carburés augmente encore légèrement entre 1550 et 1600 pour finir par devenir clairement majoritaire après 1600.

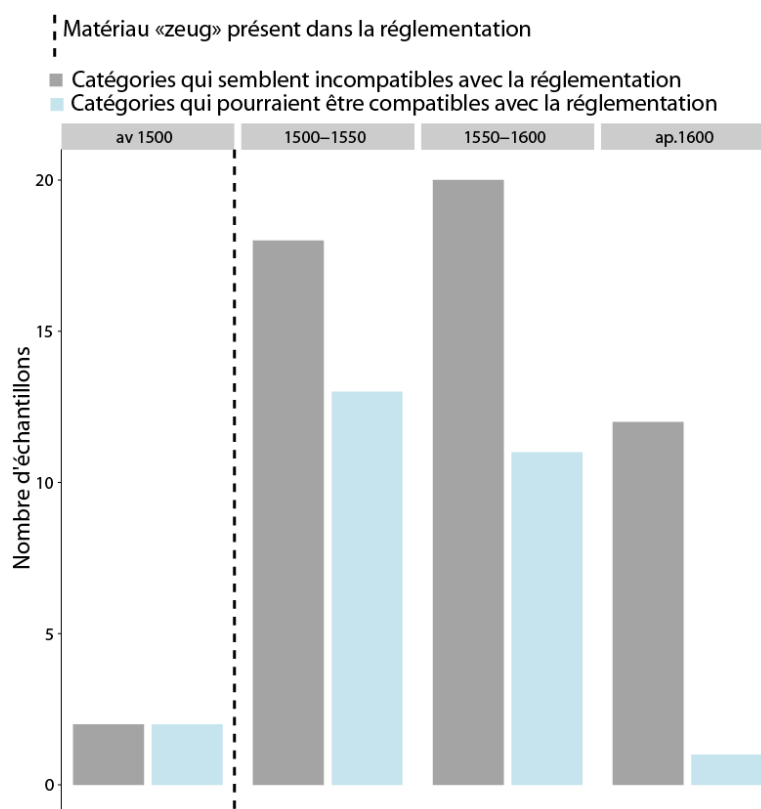


Figure 192 - Evolution de la nature du métal employée dans les armures nurembergeoises marquées

La lecture des sources normatives laissait sous-entendre que le but de cette mesure consistait à contrôler la qualité du métal utilisé pour la fabrication des armures estampillées de la marque de la ville, afin de contrer la vente de pièces fabriquées à partir d'un métal jugé de moins bonne qualité. Or, force est de constater qu'un commerce d'armures fabriquées à partir d'alliages peu carburés a perduré. C'est aussi le constat qu'avait fait A. Williams, relevant la part importante de métal faiblement carburé dans les armures nurembergeoises. Comme mis en évidence précédemment par différents auteurs (J.-P. Sosson, 1990, p. 340; P. Bernardi, 2009), nos résultats confirment que les sources normatives ne reflètent pas complètement la réalité et ne peuvent constituer l'unique grille de lecture pour appréhender l'organisation professionnelle des armuriers, vraisemblablement plus complexe. Cette question mériterait d'être approfondie par l'étude de la signature chimique d'un corpus de pièces nurembergeoises plus vaste, afin de préciser l'origine des fournitures de métal employées et dégager la présence de différents fournisseurs.

c) Les centres secondaires

Ce paragraphe est dédié à souligner les résultats obtenus pour des centres moins connus que l'Italie du Nord ou les centres germaniques. Les pièces françaises possèdent des signatures chimiques qui se recouvrent largement avec le groupe Allemagne_groupe1. Il n'a malheureusement pas été possible de les distinguer. On notera cependant que toutes les catégories de métal sont présentes (voir tableau 33). Par conséquent, plusieurs sources d'approvisionnement ont sans doute été mobilisées. Pour rappel, aucune armure française ne possédait une signature chimique compatible avec l'espace lombard ou le groupe Italie_Groupe1.

Tableau 33 - Synthèse des résultats sur l'origine et la nature du métal des armures supposées de fabrication française

Filière de réduction	Groupe	Nombre d'échantillons	Catégories de Métal
Directe	France (Compatible avec Allemagne_Groupe1)	20	
Indirecte	France (Non Compatible avec Allemagne_Groupe1)	8	

La France a entretenu d'étroites relations avec les armuriers lombards puisque certains ont été encouragés à venir s'installer dans des centres de production français, comme à Tours pour en développer la production armurière durant les XV^e et XVI^e siècles (S. Painsonneau, 2004, P.25). De plus, jusqu'au XVI^e siècle, les décorations des armures françaises se rapprochent beaucoup du style italien, rendant plus délicate leur identification typologique. Une des armures du corpus étudié est dans ce cas. Il s'agit de fragments de pièces de harnois articulé issu du Chateau de l'Avant-Garde de

Pompey (Moselle), datée de la première moitié du XVI^e siècle et dont les décorations l'identifieraient comme une pièce française ou italienne. Les analyses métallurgiques ont révélé un métal, faiblement carburé et de dureté moyenne, excepté pour un échantillon qui est un fer phosphoreux (voir Figure 193). Ce type d'alliage n'a pas été rencontré dans les armures supposées de fabrication italienne¹³⁹, en revanche, il a été retrouvé dans des armures identifiées comme de typologie française, ce qui pourrait corroborer une telle origine¹⁴⁰.

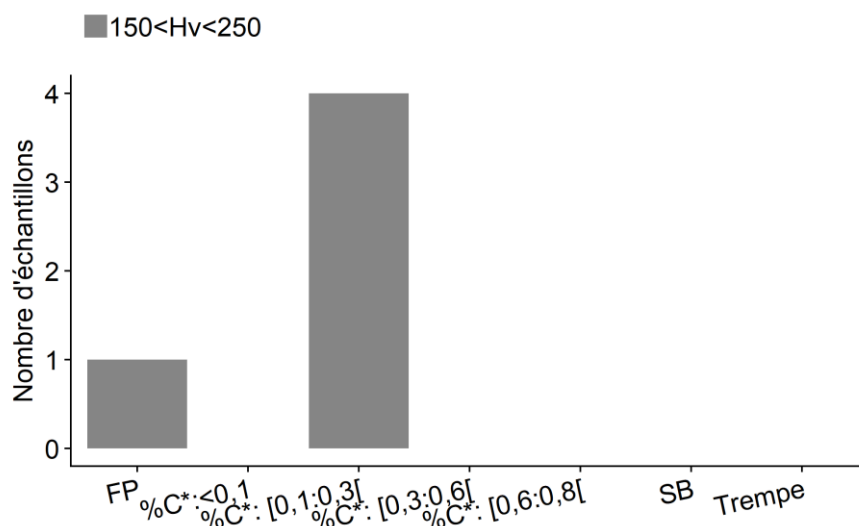


Figure 193 - Nature et dureté du métal pour les pièces de harnois articulé retrouvées au Chateau de l'avant garde de Pompey

Si on considère le fer phosphoreux, la Lorraine était une région qui en produisait. L'exemple des plaques de broigne de Laquenexy (Moselle) apporte à ce sujet un éclairage intéressant. Trois des quatre plaques sont constituées de fer phosphoreux. Deux d'entre elles ont pu être rapprochées de la Minette Lorraine. L'origine de la dernière plaque étudiée demeure indéterminée. Sous réserve que l'identification de ces pièces en tant que plaque de broigne soit correcte, ce résultat suggère que cette armure a été fabriquée dans la région, avec du métal produit au moins en partie, à proximité. Si la prédominance de certains grands centres de production est clairement établie du fait de leur volume d'exportations, ce résultat illustre l'existence d'une production à l'échelle locale en Lorraine. Dans cette région, la ville de Metz, par exemple, aurait compté des armuriers fournissant le duc de Bar (J. Schneider, 1952, p. 222). Ce résultat pourrait y faire écho.

¹³⁹ Rappelons que l'espace lombard défini par S. Leroy est une région où le phosphore n'est présent qu'en de très faible quantité

¹⁴⁰ Il n'est cependant pas possible de pousser davantage l'interprétation des résultats en termes de signature chimique car le métal est associé à la filière indirecte

V. Organisation des productions au sein des ateliers

La nature et l'origine du métal utilisé pour la fabrication des armures pouvait, comme nous venons de le voir, fortement varier entre les différents centres, et même à l'échelle d'un même centre de production, comme l'a illustré l'exemple de Nuremberg. Cependant qu'en est-il à l'échelle d'un même atelier ? Des spécificités peuvent-elles être mises en évidence ? De même, peut-on dégager des similitudes dans le choix et le travail du métal sur des pièces constituant une même armure ou sur un ensemble de pièces de qualité constante ? Ce sont les questions auxquelles nous allons tenter de répondre dans cette partie.

1) La réalisation d'une armure complète

a) L'armure de Sainte Suzanne

La morphologie de l'armure de Sainte Suzanne l'associe aux productions italiennes, voire milanaises, datées du XV^e siècle. Seule la cervelière serait antérieure et daterait du XIV^e siècle. Le reste de l'armure forme un ensemble cohérent. En l'absence de marque apposée sur les pièces il n'est pas possible de relier l'armure à un atelier en particulier. Cependant nous allons voir comment les analyses archéométriques peuvent nous permettre d'éclairer ce point.

La figure 194 synthétise l'ensemble des résultats en termes de structure métallographique et de provenance des matériaux. La cervelière est clairement isolée des autres éléments car elle contient du fer phosphoreux, d'une part, et par sa signature chimique, d'autre part. Ces résultats viennent conforter le fait qu'elle ne soit pas contemporaine du reste de l'armure.

Différents approvisionnements en métal ont été mis en évidence sur les autres éléments. L'épaulière gauche se distingue des autres car elle est associée au procédé de réduction indirecte. L'épaulière droite, l'arrière-bras, le plastron, la braconnière et les deux extrémités de la dossière sont compatibles avec l'espace lombard. Toutefois différents sous-groupes ont été différenciés. L'épaulière droite et l'arrière-bras ont des signatures chimiques très proches mais que nous avons pu différencier. Le plastron, la braconnière et la dossière forment, eux, un unique groupe de provenance bien différencié du groupe précédent. Ce sont les éléments les plus carburés de l'armure. Néanmoins, ils divergent du point de vue de la nature du métal.

La dossière a été réalisée en 3 parties. Les deux prélèvements situés aux extrémités (échantillons 4 et 6) présentent un gradient de teneur en carbone¹⁴¹. Le prélèvement réalisé sur la

¹⁴¹ Le prélèvement 6 de taille plus importante que le 4 a permis de mettre en évidence deux principales familles d'inclusions. C'est pourquoi nous avons conclu que ces deux parties de la dossière étaient constituées de deux lopins de métal soudés ensemble, opérations qui aurait pu donner naissance au gradient de teneur en carbone observé. Toutefois nous avons pu montrer que la signature chimique en élément trace était identique, ce qui n'est pas le cas des éléments majeurs. Ceci implique que les deux lopins de métal sont certainement

partie centrale de la dossière présente une structure totalement différente, d'acier trempé d'une grande dureté. Le plastron est constitué d'un métal très carburé, présentant un léger gradient en teneur en carbone. Enfin, la lame de la braconnière étudiée est constituée d'un acier écroui et d'une grande dureté.

Si des approvisionnements d'une même origine ont été utilisés pour la fabrication de ces trois éléments, on pourrait supposer qu'ils aient été fabriqués dans le même atelier. Cependant si tel est le cas, le travail du métal a considérablement varié. Doit-on l'attribuer à l'intervention de différentes mains pour réaliser les diverses parties ?

Ce constat rappelle celui effectué sur l'armure AVANT (voir Chapitre 1). Pour rappel cette armure datée du XV^e siècle a été fabriquée à Milan par différents maîtres ayant chacun apposé individuellement leur poinçon. L'étude des marques de martelage observées par N. Dupras ont montré que deux armuriers issus d'un même atelier pouvaient avoir chacun des habitudes de travail différentes. De plus, les analyses métallographiques menées par A. Williams ont révélé que pour 3 éléments (relatifs aux épaulières) signés de la main d'un même maître, trois qualités de métal différentes étaient observées : un acier fortement carburé, un acier très faiblement carburé ainsi qu'un acier moyennement carburé et trempé. L'armure de Sainte Suzanne semble tout à fait refléter ces résultats. Le fait que les défenses du bras droit ainsi que l'épaulière gauche présentent des fournitures en métal distinctes de ce premier groupe, pourrait suggérer qu'elles aient été réalisées dans d'autres ateliers milanais, à l'instar de l'armure AVANT.

Il faut faire remarquer ici qu'en dépit des hétérogénéités de structure observées, les duretés globales de chacune des parties sont très proches, situées autour de 190Hv. Seule la braconnière et la partie centrale de la dossière font ici exception avec des duretés nettement plus élevées (supérieures à 300Hv). Si les variations observées ne reflètent pas la marque d'un atelier ou d'un armurier, elles pourraient avoir un lien avec l'usage des différentes parties de l'armure. L'épaulière gauche était, par exemple, soumise à rude épreuve lors de la charge du cavalier. Pourtant, si elle est constituée d'acier, la dureté du métal est du même ordre de grandeur que l'épaulière droite moins exposée. De plus, d'un point de vue statistique, nous n'avons pas pu mettre en évidence des choix en termes de dureté des alliages en fonction du type de pièce (voir p.352).

issus de la même région, mais pas de la même opération de réduction. Le prélèvement 4 ne contredit pas cette hypothèse mais le plus faible nombre d'inclusions n'a pas permis une identification aussi claire des familles d'inclusions (voir Chapitre 4).

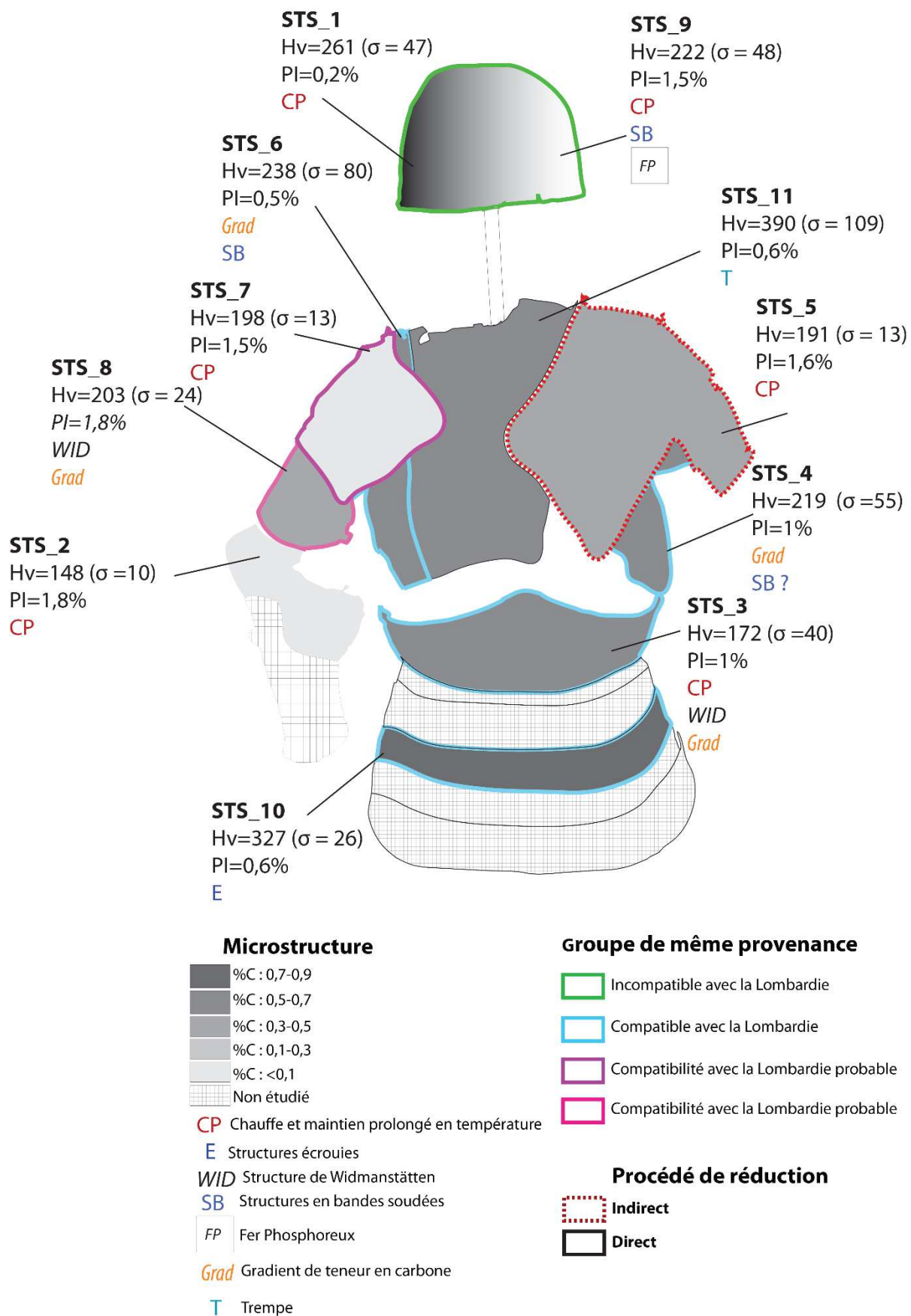


Figure 194 - Synthèse des résultats issus de l'analyse des éléments de l'armure de Sainte Suzanne

b) L'armure de François de Montmorency

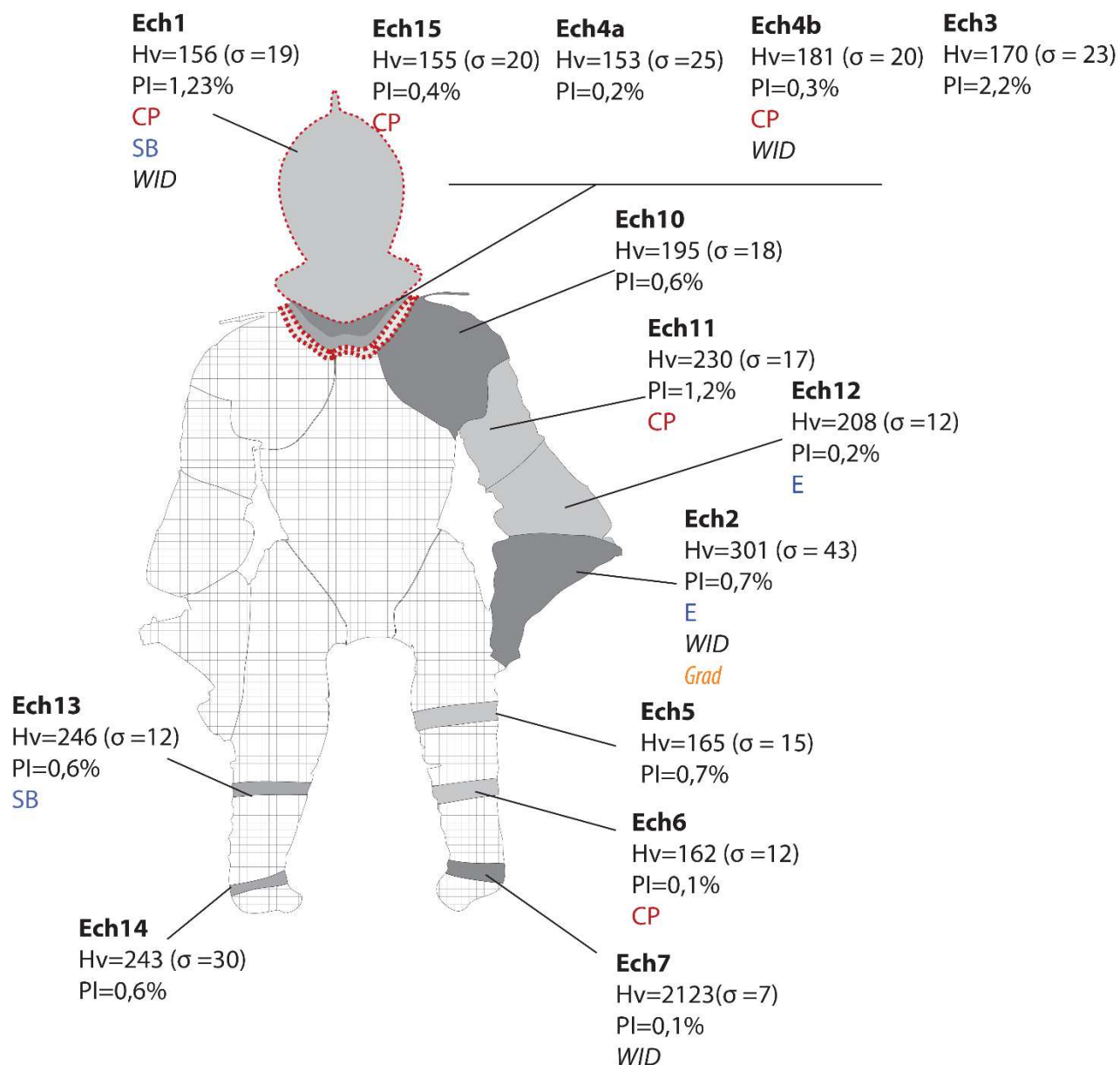
L'armure de François de Montmorency est datée du XVI^e siècle et supposée de fabrication française. Toutefois, on ignore où elle a été fabriquée. Si ses productions sont auparavant mal connues, l'armurerie française a connu au XVI^e siècle un nouvel essor, notamment dans la fabrication d'armure à destination d'une clientèle fortunée. L'armure de François de Montmorency en constitue un bel exemple.

La figure 195 récapitule l'ensemble des informations acquises sur les échantillons prélevés. Au moins deux fournitures en métal différentes se dégagent. En effet, la défense de tête et une lame du colletin sont associées au procédé de réduction indirecte tandis que les autres éléments sont issus du procédé de réduction directe. Il est possible que des sous-ensembles de provenance soient compris dans ce dernier groupe, cependant nous n'avons pas pu les mettre en évidence avec les éléments dosés du fait de l'importance du recouvrement des signatures chimiques (voir p. 316).

Ainsi, ces résultats nous permettent d'émettre deux suppositions. Soit l'armurier en charge de la confection de l'armure utilisait plusieurs sources d'approvisionnement en fonction des possibilités qu'offrait le marché, soit l'existence de fournitures différentes signe l'implication d'un second atelier. Comme dans le cas de l'armure de Sainte Suzanne les catégories de métal utilisées pour fabriquer la pièce diffèrent grandement selon l'élément d'armure examiné. C'est particulièrement flagrant sur le colletin. Trois prélèvements ont été réalisés (ech4A et ech4b, ech15), or des taux de carbone très variables sont observés. L'hétérogénéité se traduit également à travers la mesure de dureté, parfois variables entre deux tassettes par exemple. Les mesures sont plus homogènes sur le colletin.

Les différentes lames formant le colletin et les tassettes sont de faibles tailles. Par conséquent, il est possible qu'elles aient été réalisées à partir de chutes de différentes tôles, ce qui expliquerait les hétérogénéités observées. La mise en forme de pièces de taille plus imposante comme la défense de tête ou la dossière, demandait en revanche à l'armurier d'utiliser une seule et même tôle, qu'il mettait ensuite en forme. Cependant, cette dernière pouvait aussi présenter des hétérogénéités comme le révèle les deux prélèvements effectués sur la dossière.

Ainsi, il est possible, compte tenu de la fonction de cette armure visiblement à but de représentation, que les armuriers n'aient pas accordé un intérêt crucial aux choix des matériaux employés et que l'accent ait été plutôt porté sur le travail de décoration, pour conférer à l'armure un rendu final néanmoins très homogène.



Microstructure

	%C : 0,7-0,9
	%C : 0,5-0,7
	%C : 0,3-0,5
	%C : 0,1-0,3
	%C : <0,1
	Non étudié

Procédé de réduction

	Indirect
	Direct

CP Chauffe et maintien prolongé en température

E Structures écrouies

WID Structure de Widmanstätten

SB Structures en bandes

FP Fer Phosphoreux

Grad Gradient de teneur en carbone

T Trempe

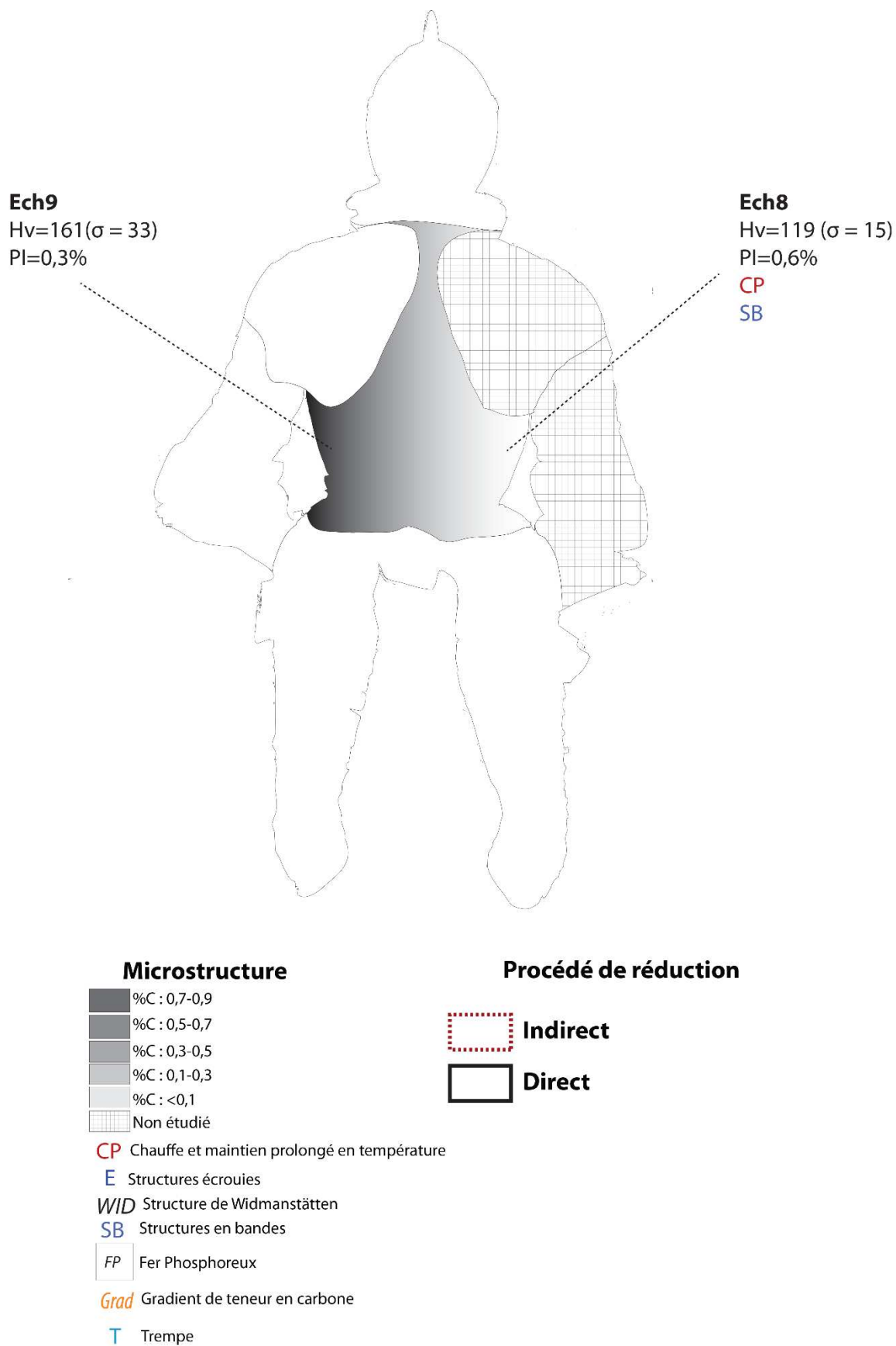


Figure 195 - Synthèse des résultats issus de l'analyse des éléments de l'armure de François de Montmorency

c) L'armure de cavalier nurembergeoise G40

Cette armure est une armure de cavalier commandée à l'armurier nurembergeois Hans Ringler par Otto Henri. Plusieurs prélèvements ont été réalisés, à la fois sur les défenses relatives au combattant (cuissard) et à celles de sa monture. L'ensemble des résultats est synthétisé figure 196.

Ils révèlent des différences en termes de nature des matériaux entre les protections du combattant et celles du cheval. L'échantillon prélevé sur le cuissard présente, en effet, une structure de trempe du type « dual phase » ce qui n'est pas le cas des trois autres. L'échantillon G40-2 relatif au poitrail est un acier faiblement carburé mais homogène, le G40-3 est également un acier faiblement carburé mais plus hétérogène¹⁴². Enfin, le dernier échantillon est de nature entièrement ferritique, néanmoins il est plus altéré par la corrosion que les deux autres. Par conséquent il est possible qu'une partie de l'information sur la microstructure du métal ait été perdue.

Sur les deux pièces ayant pu faire l'objet d'une étude de provenance (G40-2 et G40-3), des hétérogénéités très marquées en termes d'approvisionnements ont été relevées, suggérant peut-être l'implication d'un second atelier. De plus, le métal du cuissard a été volontairement durci pour lui conférer une plus grande résistance. Ceci pourrait suggérer qu'un plus grand soin était apporté aux défenses du cavalier qu'à celles de sa monture. Toutefois, pour s'en assurer il faudrait pouvoir étudier d'autres parties de l'armure du cavalier. De plus, ce résultat nous paraît difficilement généralisable. Les données de la littérature ont, en effet, montré que certaines armures de chevaux pouvaient avoir fait l'objet d'une trempe (voir Figure 187). Par conséquent, il pourrait aussi s'agir d'une spécificité de pratique d'atelier. Il est regrettable que la provenance du métal relatif au cuissard n'ait pas pu être étudiée ici. Ce résultat resterait donc à confirmer à l'aide de nouvelles analyses.

¹⁴² L'ensemble des micrographies sont disponibles en Annexes

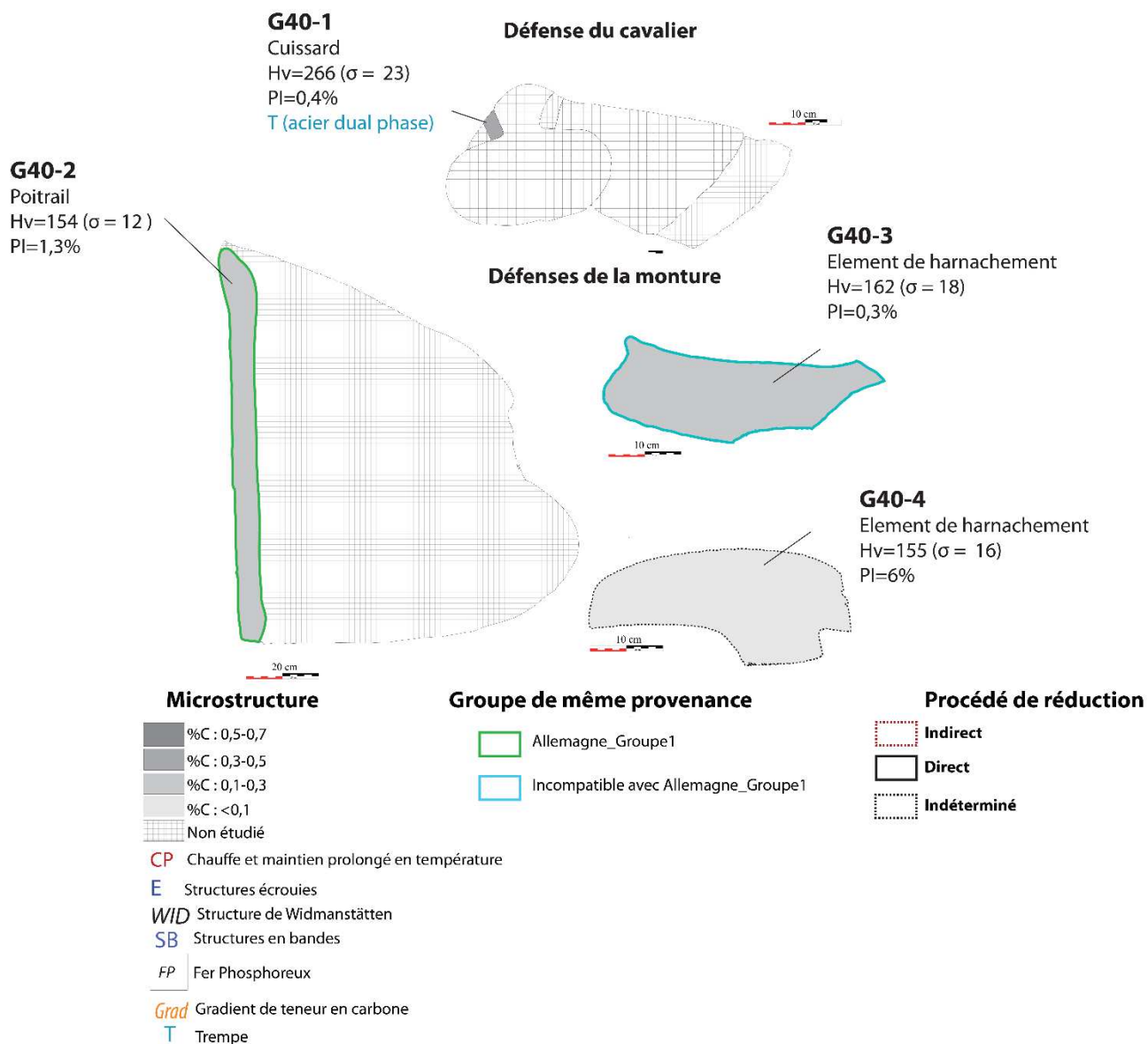


Figure 196 - Synthèse des résultats issus de l'analyse des éléments de l'armure G40

d) Bilan

Compte tenu des exemples qui viennent d'être présentés, qu'est-il possible de conclure en termes de pratique d'atelier sur la fabrication d'une armure complète ? Les trois armures présentaient des hétérogénéités à la fois du point de vue de la nature du métal mais également de son origine. L'explication de ces hétérogénéités demeure sujet à débat.

Ainsi, il est possible que certaines pièces fassent vraiment l'objet d'une attention très particulière en termes de choix des matériaux et de traitements thermiques pour obtenir la résistance finale souhaitée. C'est le cas par exemple de la dossière de Sainte Suzanne ou du cuissard de l'armure G40. Toutefois cela ne se vérifie pas pour toutes les parties. Certaines au contraire, ne semblent pas avoir bénéficié d'un choix spécifique de matériau ni d'un traitement de forge particulier. Doit-on relier cela à l'usage des diverses pièces ? Cette supposition pourrait être faite dans le cas de l'armure G40 où une attention plus particulière a pu être apportée en priorité sur la résistance des pièces du cavalier, cependant elle n'a pas été vérifiée d'un point de vue statistique sur le corpus de pièces étudiées (voir p.352).

Nous pourrions aussi interpréter ces résultats comme l'implication de plusieurs ateliers. La diversité des fournitures de métal employées pourrait, en effet, être expliquée de deux manières. Il est possible que l'armurier, à la tête de son atelier, possédait des approvisionnements en métal multiples, et ne sélectionnait la qualité de ces derniers que pour réaliser certaines pièces d'armures. Les éléments d'épaules de l'armure AVANT signés par Bellino Corio possèdent ainsi chacun une qualité de métal particulière, dont au moins une a fait l'objet d'un traitement thermique. Ou, la participation de plusieurs ateliers est à envisager. Il apparaît difficile de donner davantage de crédibilité à l'une ou l'autre de ces hypothèses. En effet même si la pièce est signée de la main d'un maître, ce qui en principe atteste son lieu de fabrication, il y a certaines données qui nous échappent comme par exemple les possibilités de sous-traitance.

En définitive, ces hétérogénéités relèvent surtout le caractère composite d'une armure, qui doit réellement être considérée comme un ensemble d'objets pouvant chacun avoir leur propre spécificité et être issus de mains différentes. Ce constat rejoint celui fait par Sylvio Leydi qui soulignait, dans le cas de la ville de Milan, la difficulté d'identifier la *signature* d'un atelier quand plusieurs mains sont inévitablement intervenues avec sans doute leurs savoir-faire propres. On peut alors se demander quelle était la nature précise de l'intervention du maître qui apposait la marque de son atelier sur les pièces. Supervisait-il l'ensemble des opérations de fabrication, du choix du métal jusqu'au traitement thermique final de celui-ci, ou s'assurait-il simplement de l'homogénéité finale de la pièce ? Nos résultats iraient plutôt en faveur de cette seconde hypothèse, mais elle mériterait d'être confirmée par l'analyse d'un corpus de pièces d'armures complètes plus vaste.

A la fin du Moyen Âge, la réorganisation des armées va conduire à la fabrication de pièces d'armures de qualité constante, parfois en grande quantité, que certains historiens qualifient alors de production « en série ». Les ateliers répondant à ce type de commande ont-ils mis au point un type d'organisation différente en termes de choix et de travail du métal ?

2) La réalisation de pièces en séries ou de qualité constante

Dans cette partie, nous allons étudier deux ensembles. Le premier compte des pièces issues d'un même atelier, celui de Valentin Siebenbürger. Leur rendu final très semblable pourrait témoigner d'une production de qualité constante. Par qualité constante, on entendra à la fois une homogénéité dans l'allure finale des objets mais également dans le choix et le travail des matériaux employés. La seconde pourrait illustrer une production en série, c'est à dire d'objet de qualité constante, produits à une grande échelle. Il s'agit des cuirasses du site de Valenciennes.

a) L'exemple de Valentin Siebenbürger

Valentin Siebenbürger est un armurier nurembergeois dont les productions sont bien identifiées dans les collections grâce au poinçon qu'il apposait régulièrement sur ses pièces. Deux paires de cuissards (dénommées G435 et G436) d'apparence similaire ont été étudiées. Elles portent chacune deux poinçons, celui de Valentin Siebenbürger et celui de la ville de Nuremberg. Un récapitulatif des résultats est présenté figure 197 et figure 198.

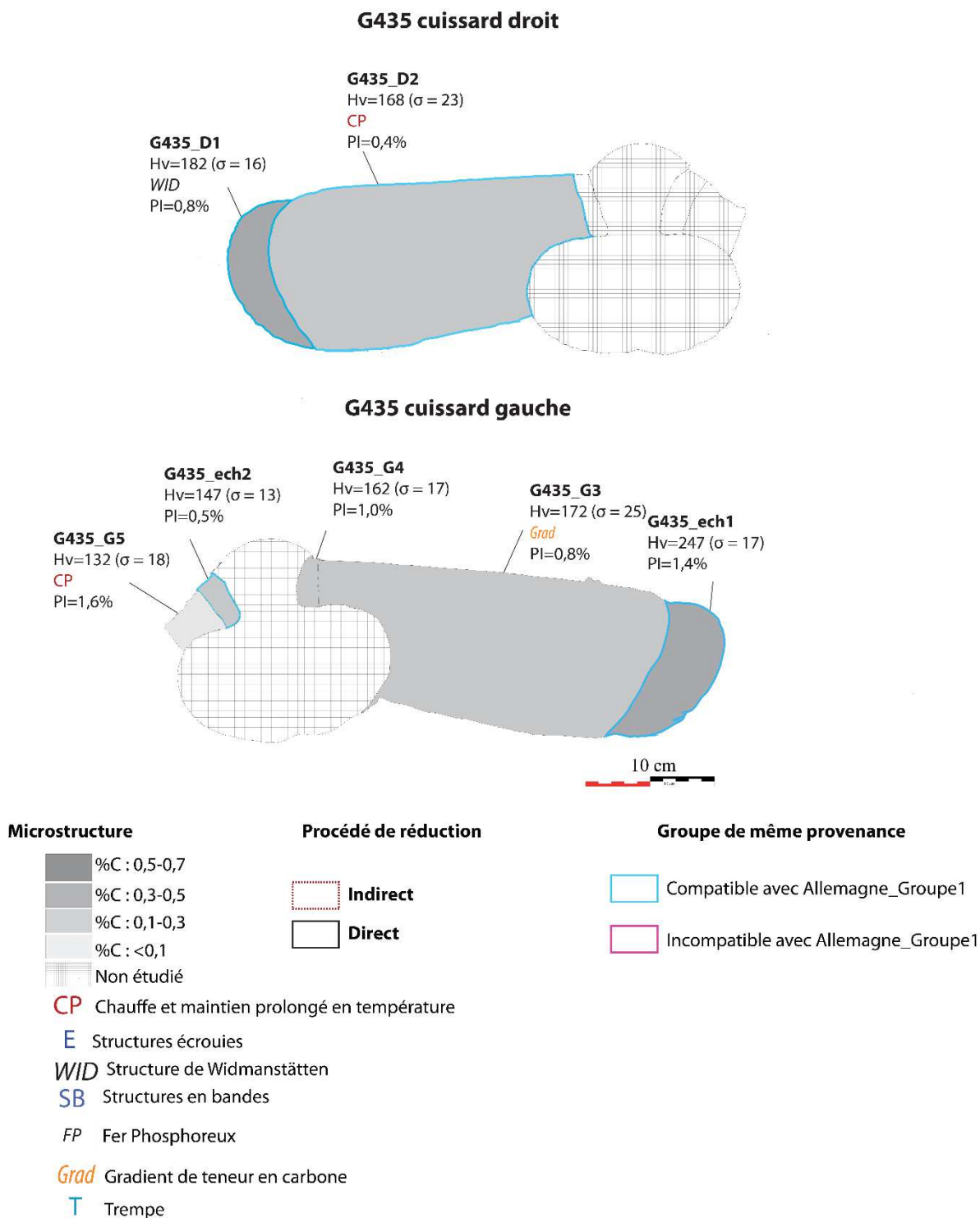


Figure 197 - Synthèse des résultats issus de l'analyse de la paire de cuissard G435

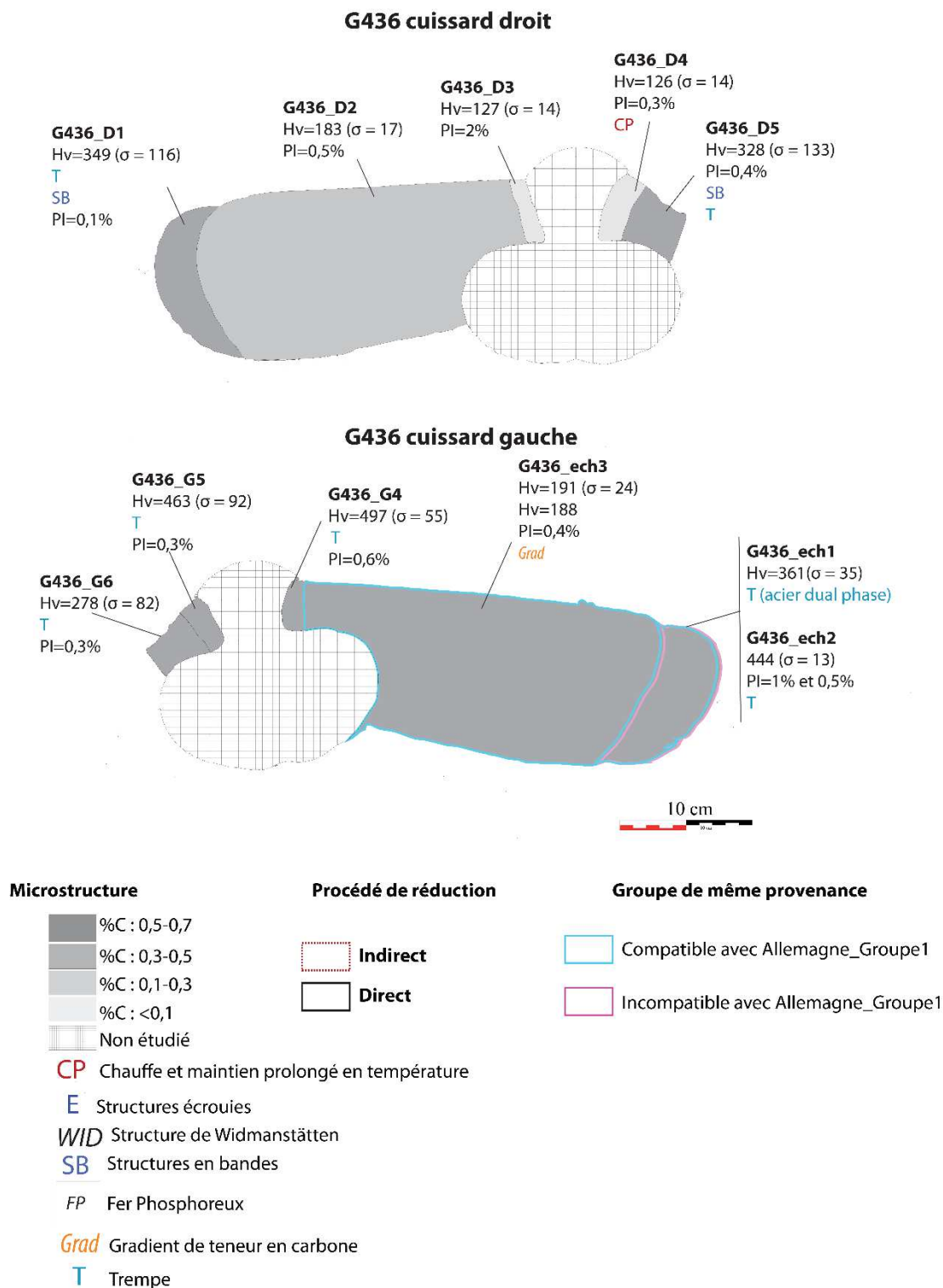


Figure 198 - Synthèse des résultats issus de l'analyse de la paire de cuissard G436

Les cuissards gauche et droit de la paire G435 présentent une certaine homogénéité dans le choix et le travail des matériaux utilisés. Ainsi, la partie centrale est légèrement moins carburée que l'extrémité haute du cuissard. Les matériaux aciérés prédominent ici largement puisque seul l'échantillon 5 du cuissard gauche est de structure ferritique. De plus, aucun des échantillons étudiés

n'est porteur de structure de trempe. Au contraire, l'ensemble G436 présente d'importantes variations du point de vue de la nature du métal. Ainsi, toutes les parties du cuissard gauche G436, excepté la partie centrale sont trempées, alors que chez son homologue droit seule la partie supérieure du cuissard l'est (échantillon 5). Une structure type « dual phase » a été relevée pour l'échantillon 1. Cependant, il est peu probable que cette dernière ait été réalisée volontairement par l'armurier. Les échantillons G436_ech1 et G436_ech2 font en effet initialement partie de la même tôle, et se sont séparés lors de la réalisation du prélèvement. Nous avons conclu que la soudure de deux lopins de métal d'origine différente était sans doute à l'origine de ce phénomène, puisque les signatures chimiques des deux échantillons diffèrent (voir Chapitre 4). Ainsi, les deux tôles soudées ne devaient pas posséder le même taux de carbone ce qui a engendré, suite à la trempe, la formation de structures différentes : l'une homogène (échantillon 2) et l'autre hétérogène, assimilée à celle d'un acier « dual phase » (échantillon 1).

De plus, fait surprenant par rapport à l'ensemble du lot, les lames situées juste au-dessus et en dessous du genou du cuissard G436 droit sont uniquement composée de ferrite. Peut-être cette partie a-t-elle fait l'objet d'une réparation ultérieure ce qui expliquerait la différence de qualité du métal employé. Cette hypothèse mériterait d'être confirmée par l'étude de la signature chimique du métal.

Ainsi, sur une même paire de cuissard une certaine homogénéité dans le choix et le travail des matériaux utilisés transparait. En revanche, si l'on compare deux pièces de qualité finale en apparence semblable (les deux cuissards gauche ou droit par exemple) ce n'est plus le cas ; la paire G436 présentant un métal globalement de meilleure résistance (car trempé) que son homologue G435.

Enfin, sur le lot d'échantillons qu'il a été possible d'analyser les fournitures utilisées se confondent dans le groupe *Allemagne_Groupe1* ». Seule la signature chimique de l'échantillon, G435_ech1, a pu être différenciée des autres. Bien que le groupe *Allemagne_Groupe1* puisse, comme nous l'avons déjà évoqué, compter différents sous-ensembles de production, les fournitures de métal des cuissards appartenant à ce groupe sont ici toutes aciérées. Ceci pourrait suggérer que l'armurier nurembergeois se serait approvisionné chez le même fournisseur de métal. Afin de déterminer si l'armurier possédait un ou plusieurs fournisseurs, il faudrait pouvoir caractériser la signature chimique d'autres pièces issues de cet atelier.

L'apposition de marque authentifie le lieu de fabrication de la pièce et constitue un gage de qualité pour l'acheteur (voir Chapitre 1). Pourtant, d'un point de vue métallurgique, la signature de l'atelier n'est pas identifiée par le travail du métal, puisque deux paires de cuissards en apparence identique, présentent des structures très hétérogènes. Ce constat fait écho à celui posé précédemment dans le cas de la production d'armure complètes. Il interroge sur la nature de

l'intervention du maître qui apposait la marque de son atelier sur les pièces, et en définitive sur la signification de la signature d'un atelier. Incontestablement, cette dernière ne reflète pas le savoir-faire d'une seule main, qui aurait scrupuleusement contrôlé chaque étape de fabrication des objets.

b) L'exemple de Valenciennes

La fouille de l'atelier d'un fondeur à Valenciennes a mis au jour plusieurs centaines de cuirasses typologiquement datées de la première moitié du XVII^e siècle et destinées à la cavalerie légère (P. Korpiun et al., 2010, p. 6). Les circonstances d'acquisition de ce stock par le fondeur Perdry, demeure inconnues. Toutefois, en tant que munitionnaire du roi d'Espagne, on sait que ce dernier était impliqué dans la fourniture d'armes. L'étude de cet équipement offre ainsi la possibilité de s'intéresser à la fabrication d'un matériel de qualité homogène à destination de l'armée.

Pour rappel, dans le but de distinguer différentes tailles, les pièces ont fait l'objet de prises de mesures (voir Chapitre 2). Suite au traitement statistique effectué, trois familles ont ensuite été définies, qui pourraient correspondre à des tailles différentes (voir détails des analyses dans le Chapitre 2). L'existence de tailles illustre directement un type de production « en série » que C. Gaier qualifie de « prêt à porter », c'est-à-dire élaborée en grande quantité, en différentes tailles et ajustable à chacun des combattants.

Ce type de réalisation peut supposer l'emploi de forme ou de patrons définis en plusieurs tailles pour l'élaboration des cuirasses. L'organisation d'un atelier pour produire ce type de pièce est donc interrogée de façon tout autre que dans le cas d'une production d'armure complète. Déterminer les capacités de production d'un atelier s'avère être un exercice délicat car un grand nombre d'inconnues demeure. Cependant, les rares contrats dépouillés impliquent le plus souvent plusieurs armuriers dans le cas de commandes importantes (plusieurs centaines de pièces, voir Chapitre 1)¹⁴³. Ainsi, si son origine est inconnue, la taille impressionnante de ce lot peut laisser supposer l'intervention de plusieurs ateliers. De plus, même si les pièces n'ont pas fait l'objet d'une seule commande il est également fort probable qu'elles soient issues de plusieurs fournisseurs. Cette hypothèse est soutenue par la distinction de différentes types au sein de cet ensemble déjà très homogène (quatre types de plastrons et trois types de dossières). Si plusieurs ateliers sont intervenus, étaient-ils responsables de réaliser l'ensemble des tailles ou seulement certaines d'entre elles ? Qu'en est-il du métal ? Peut-on dégager la signature de différents ateliers ?

La nature du métal employé varie indépendamment de la typologie des cuirasses ou de la taille de celle-ci (voir figure 199). C'est un métal en majorité faiblement carburé qui a été utilisé. Les

¹⁴³ Voir par exemple au Chapitre 1 le contrat passé à deux armuriers parisiens (M. Bernard, 2012, p. 226,244) ou encore les commandes massives de l'Empereur Maximilien aux armuriers d'Innsbruck (A. Williams, 2003, p. 596-455-460)

deux dossières étudiées sont constituées de fer phosphoreux. Toutefois, pour définir s'il s'agit bien là d'une spécificité, il faudrait le vérifier sur un nombre plus important de pièces. La dureté du métal est en conséquence assez faible par rapport à l'ensemble de notre corpus d'étude. Elle ne dépasse pas 190Hv et demeure en moyenne inférieure à 150Hv. Ces résultats concordent avec la baisse sensible d'alliages durs constatée au XVII^e siècle.

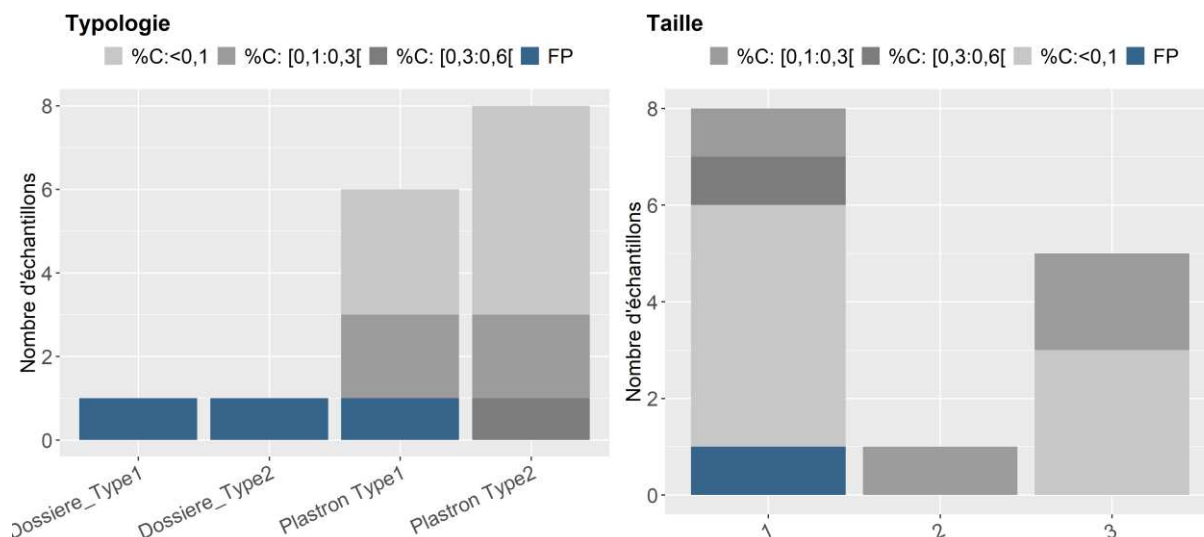


Figure 199 - Nature du métal selon les tailles pour les plastrons et les types définies pour les plastrons et dossières

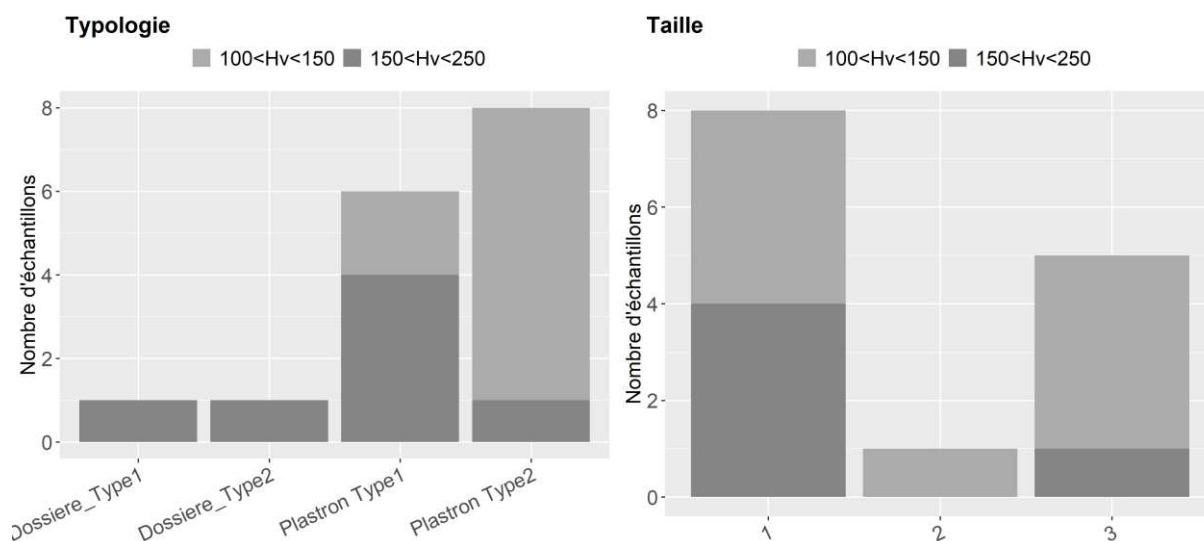


Figure 200 - Dureté du métal selon les tailles pour les plastrons et les types définies pour les plastrons et dossières

De plus, la très grande majorité des échantillons est associée au procédé de réduction indirecte ce qui n'a malheureusement pas permis l'étude de l'homogénéité des fournitures en termes de signature chimique. Seul un prélèvement issu de la dossière 1002-5-16 pourrait être associé au procédé de réduction directe¹⁴⁴. Néanmoins, la présence de fer phosphoreux implique au

¹⁴⁴ Toutefois la probabilité estimée par régression logistique demeure proche de la zone d'indétermination ($p=0,15$). Ce résultat est par conséquent à considérer avec prudence.

moins deux approvisionnements en métal distincts, qui pourraient suggérer l'implication de plusieurs ateliers. Au vu de la taille impressionnante de ce lot, il est possible que ces pièces aient été collectées dans différents ateliers puis revendues par des intermédiaires au fondeur Perdry.

Comme évoqué précédemment, les anciennes « principautés belges » ont connu une activité armurière florissante qui suffisait à combler la demande locale sans recourir massivement aux importations. Des villes comme Bruxelles ou encore Tournai ont connu une prospérité importante dans la fabrication d'armures (C. Gaier, 1973, p. 241). Or on sait notamment que les fondeurs Perdry fournissaient en artillerie cette dernière (P. Korpiun et al., 2010, p. 156). Il est possible que ces pièces en soient issues. Ceci demeure cependant hypothétique, puisque le procédé de réduction indirecte empêche d'établir toute filiation chimique avec un ensemble sidérurgique de production. Nous savons toutefois qu'au XVII^e siècle il était bien implanté dans ces régions.

VI. L'armure replacée dans l'histoire de la métallurgie du fer

1) Nature du métal et filières de réduction

Comme nous l'avons vu au Chapitre 1, deux filières de réduction peuvent être rencontrées au cours de notre période d'étude. La plus ancienne, la filière directe, s'opérait dans un bas fourneau où la température n'excédait pas les 1400°C. La seconde filière, dite indirecte, possède différentes variantes (P. Dillmann, L. Pérez, and C. Verna, 2011 a, p. 42) sur lesquelles nous n'allons pas revenir. Par filière indirecte nous entendrons ici l'association d'un foyer de réduction appelé « haut fourneau » construit pour obtenir exclusivement de la fonte liquide récupérée par coulée périodique à la base du four, avec un foyer d'affinage où la fonte était décarburée pour donner du fer (ou éventuellement de l'acier) forgeable, comme dans le cas du procédé wallon (J.-F. Belhoste, 2001, p. 578). Cette filière serait apparue en Europe à la fin du XIII^e siècle. Lors de l'affinage, l'oxydation du carbone pouvait être poussée jusqu'à l'obtention de fer totalement décarburé. Toutefois, si elle était interrompue avant d'avoir retiré tout le carbone un acier, il était possible d'obtenir un acier par décarburation. Il faut faire remarquer qu'au moment de sa première diffusion, la production d'acier n'intéresse que très secondairement la filière indirecte (P. Dillmann, L. Pérez, and C. Verna, 2011 a, p. 44).

Nos résultats vont dans le sens de ce constat (voir figure 201). Dans le cas de la filière directe toutes les catégories d'alliages définies précédemment sont présentes. Les alliages faiblement et moyennement carburés sont majoritaires. Au contraire, pour la filière indirecte les alliages très faiblement carburés sont nettement majoritaires. Ainsi, les aciers obtenus par décarburation lors de l'étape d'affinage demeurent rares.

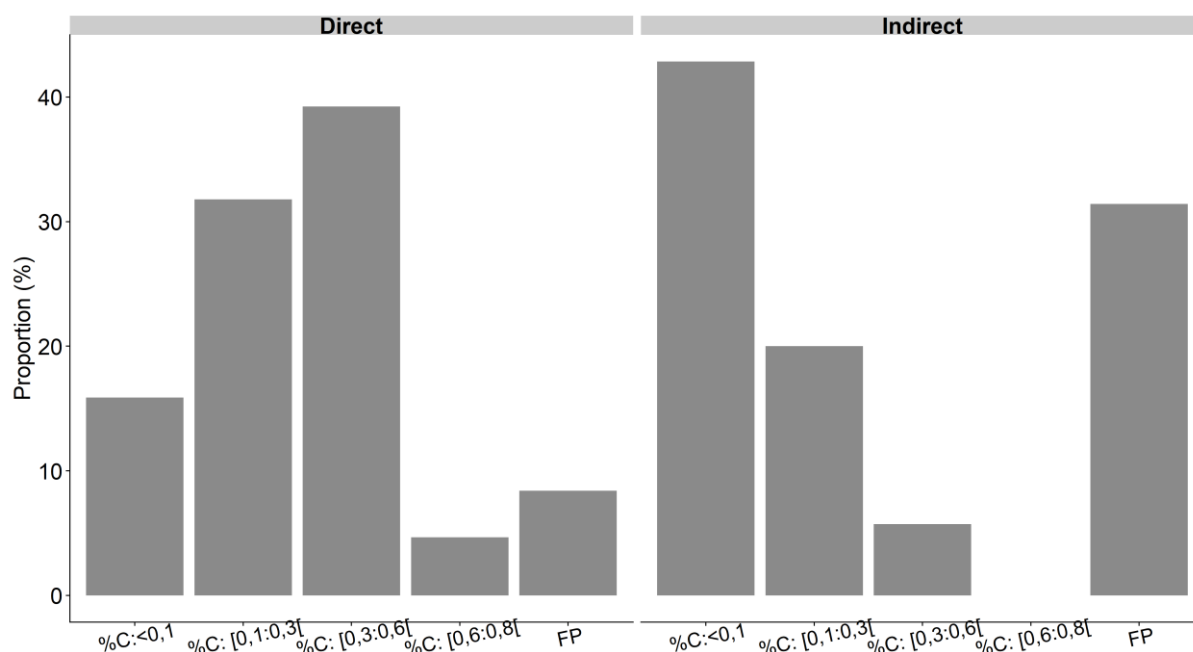


Figure 201 - Catégories de métal recensées dans chacune des filières de réduction

2) Diffusion du procédé de réduction indirecte

L'intérêt principal du haut fourneau est qu'il permettait de fabriquer un produit très homogène (la fonte), en grande quantité¹⁴⁵ et bien épuré (J.-F. Belhoste, 2001, p. 578). Toutefois, la productivité de cette nouvelle filière pour produire des alliages ferreux forgeables pouvait être ralentie par différents facteurs, comme l'étape d'affinage, au moins à l'origine de celle-ci (P. Dillmann and M. L'Héritier, 2017).

Ainsi, comme nous l'avons déjà évoqué au Chapitre 1, l'implantation de ce nouveau procédé ne s'est pas faite de façon fulgurante et homogène en Europe. L'adoption d'une innovation technique est en effet liée à de multiples facteurs non seulement techniques, mais aussi économiques, politiques et sociaux. Les études archéométriques s'avèrent ici d'une grande aide car elles révèlent l'utilisation concrète de ce nouveau procédé pour la production d'objets forgés, et par voie de conséquence, son importance au sein du marché du fer.

Nos résultats confirment la concomitance des deux procédés pour les armures et ce y compris pour des périodes tardives (XVIIe siècle), même si à cette période le procédé indirect est

¹⁴⁵ La production d'une tonne par jour est considérée comme habituelle sous forme de gueuse de 150kg à 500 kg. A la même époque au XIVe siècle la production hebdomadaire des forges hydrauliques est comprise entre 500kg et une tonne tant à Albiès dans les Pyrénées qu'à Byrkenott en Angleterre (C. Verna, 2001 a, p. 85), (D. Arribet-Deroin, 2010)

devenu majoritaire dans les échantillons analysés. Pour rappel, dans le corpus étudié, nous avons à disposition un certain nombre de pièces supposées de provenance allemande, italienne et française. La figure 202 présente la part occupée par chacun des procédés pour ces trois groupes. En Allemagne, les premières preuves d'existence du procédé de réduction indirecte sont datées du début du XIV^e siècle dans le comté de la Marck (N. Björkenstam and S. Fornander, 1985). Le procédé se diffuserait ensuite progressivement en Europe au cours des XV^e et XVI^e siècles. On le retrouve en Wallonie au XIV^e siècle, dans certaines régions du royaume de France à la fin du XIV^e siècle et en Angleterre au cours des XV^e et XVI^e siècles (P. Dillmann and M. L'Héritier, 2017). Or, fait qui peut paraître surprenant, le procédé de réduction directe reste plus fréquemment rencontré dans les armures supposées de facture allemande, et française au XVI^e siècle (voir figure 202) où le procédé indirect est pourtant bien implanté en Europe occidentale.

Le cas de l'Italie du Nord est particulier. Pour rappel, des installations spécifiques de réduction du minerai de fer étaient en place dès le XIII^e siècle couplant deux ateliers le *furnus* qui réduisait le minerai de fer et la *fusina*, qui transformait le métal obtenu. Toutefois, si la production de fonte était probablement possible dans ces ateliers, rien n'indique à ce stade qu'elle ait été habituelle, comme c'était le cas dans les hauts fourneaux wallons (M. Arnoux, 2001). Les premières certitudes de l'utilisation du procédé de réduction indirecte dans les alpes italiennes remontent plutôt à la fin du XV^e siècle ou au début du XVI^e siècle (J.-F. Belhoste, 2001, p. 585). Nos résultats mettent en évidence une occurrence de métal issu de la filière indirecte au sein des armures supposées de fabrication italienne au XV^e siècle (l'épaulière gauche de l'armure de Sainte Suzanne), et une seule au XVI^e siècle (défense de tête WCA148). Là encore, le procédé de réduction directe demeure majoritaire.

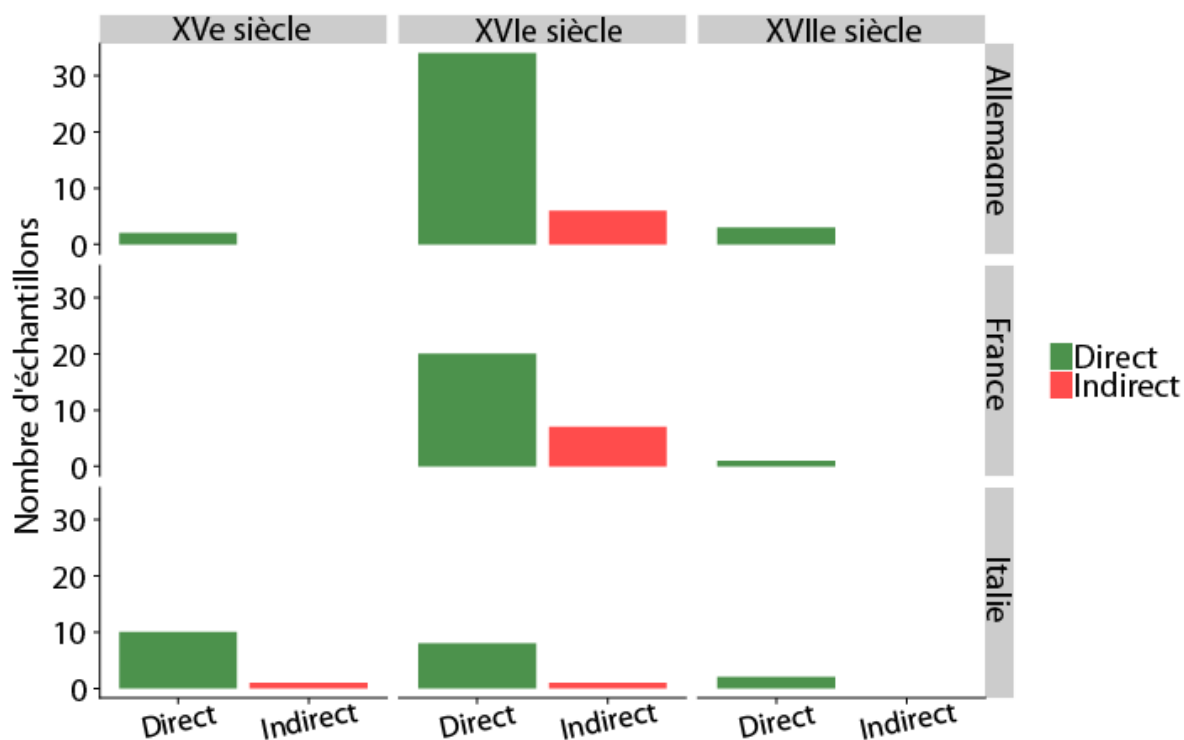


Figure 202 - Occurrences du procédé de réduction directe et indirecte pour les échantillons supposés d'origine allemande, française et italienne de notre corpus

D'autres études archéométriques portant sur des renforts de cathédrales du Nord de la France ont révélé que le procédé de réduction indirecte était majoritaire dans ce cas au XVI^e siècle (P. Dillmann and M. L'Héritier, 2017). Par conséquent, ces résultats contrastent avec les nôtres. Il est évidemment possible qu'une partie du métal utilisé soit issu d'un processus de recyclage d'anciennes tôles produites par la filière directe. Cette part de métal recyclé est difficile à quantifier. Les structures en bandes constituées de différentes familles d'inclusions pourraient en être issues. Toutefois, elles sont très minoritaires dans les échantillons étudiés (moins d'une dizaine). Aucune preuve ne permet donc d'affirmer que le fer recyclé aurait tenu une part majeure dans la fabrication des pièces. C'est aussi ce que conclue l'étude de M. L'Héritier et al.¹⁴⁶ (M. L'Héritier and P. Dillmann, 2009). Cependant la fabrication d'armures demandait un approvisionnement en métal d'un autre type que celui employé dans la construction, puisque ce dernier se trouvait sous la forme de tôle. De plus nous avons vu que la fabrication d'armures répondait à deux types de commandes : l'une qualifiée de « haute qualité » à destination des particuliers, l'autre, de volume plus important, concernait la réalisation d'équipements plus ordinaires à destination des armées. Partant de ce constat, est-il possible d'établir un lien entre la fabrication des armures et le type de procédé de réduction qui a servi à produire le métal ?

¹⁴⁶Les auteurs estiment que le fer recyclé par agglomération et corroyage ou ajout de matière représente au moins 10% des usages des fers dans les bâtiments étudiés

3) Filières de réduction et production des armures

Comme nous l'avons déjà évoqué, la prise en charge plus accentuée des gouvernements urbains, royaux et princiers, en matière d'équipements défensifs à la fin du Moyen Âge, a entraîné une généralisation du port de l'armure et par voie de conséquence une demande plus forte en matériel. Ceci s'est notamment traduit par l'établissement de commandes importantes passées au XVI^e siècle et XVII^e siècle dans le but d'équiper les combattants et notamment des gens de pied. Par conséquent les armuriers devaient être capables de délivrer un nombre conséquent de pièces (plusieurs centaines voire milliers) en un temps limité. Et, pour fabriquer des armures, il fallait du métal, en quantité.

A. Williams a ainsi supposé que le procédé de réduction indirecte aurait pu être privilégié dans le cadre de fabrication massive d'armures (A. Williams, 2003, p. 889). Il suppose que dans le cadre de ce type de production « en série », il était souhaitable pour les armuriers de disposer d'une quantité importante de matière première à bon prix et suggère ici le recours à la filière indirecte.

Afin d'évaluer cette question les catégories définies p.355 ont été reprises ici.

- **La catégorie 1** rassemble des pièces d'armures dont le propriétaire est connu et fait partie de la population fortunée, soit 12 éléments d'armures.
- **La catégorie 2** rassemble des pièces d'armures destinées à des combattants peu fortunés, identifiées grâce à leur typologie (pièces d'armure destinées à l'infanterie ou à des mercenaires comme les lansquenets) qui comprend 6 éléments d'armures.

La figure 203 présente les résultats obtenus. Pour les armures de la catégorie 1, le procédé direct est nettement majoritaire. Cependant, quelques occurrences du procédé de réduction indirecte sont relevées au XVI^e siècle. Ces résultats sont cohérents avec les résultats généraux présentés sur l'ensemble du corpus où le procédé de réduction directe est majoritaire au XVI^e siècle. Les pièces appartenant à la catégorie 2 ne sont pas nombreuses dans le corpus étudié par rapport à la catégorie 1. Les deux procédés sont présents en des proportions similaires. Ainsi, même si cette question mériterait l'analyse d'un corpus plus large, les résultats actuels ne montrent pas que ce type de pièces était majoritairement fabriqué à partir d'un métal issu de la filière indirecte.

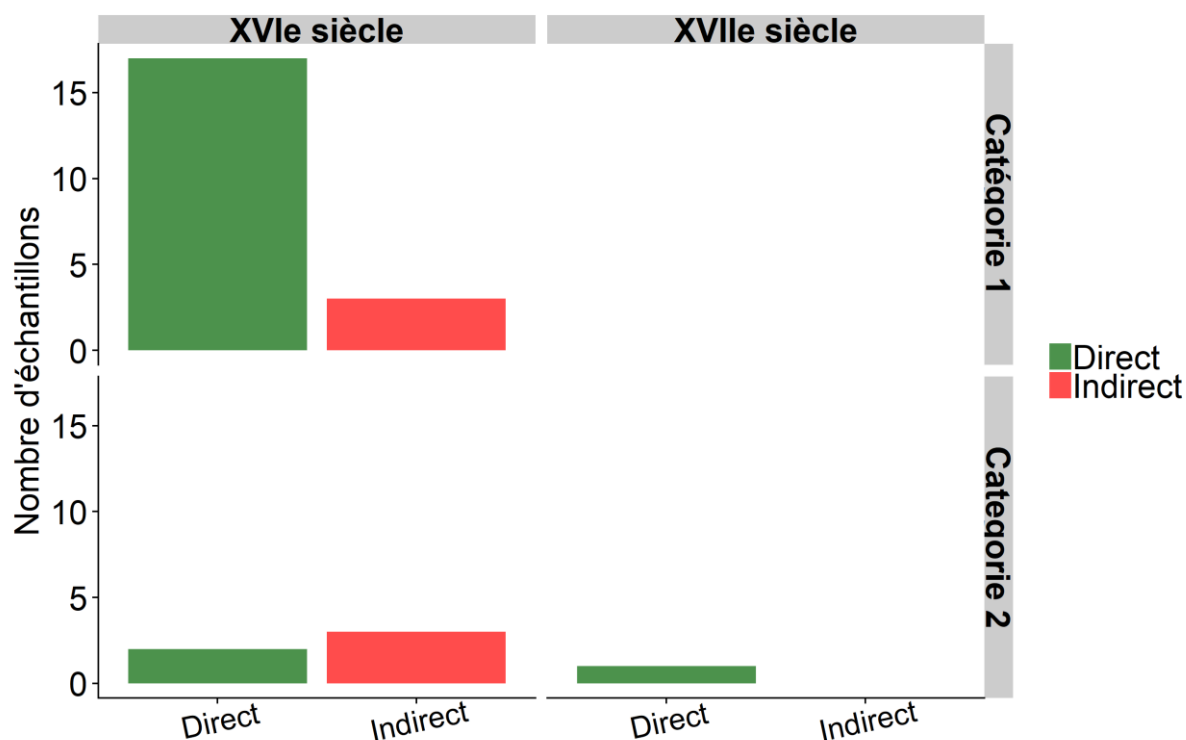


Figure 203 - Occurrences du procédé de réduction directe et indirecte en fonction de la richesse du porteur de l'armure

Par ailleurs, il apparaît difficile d'évaluer le coût du métal en fonction de la filière de production à l'échelle européenne sur la période considérée, du fait de la complexité du marché du fer, qui comprend un grand nombre d'acteurs et d'intermédiaires, comme l'ont démontré plusieurs études¹⁴⁷. De plus, face à une demande plus forte, il est possible que les armuriers aient privilégié des fournisseurs capables de leur assurer la livraison de métal en grande quantité, mais ceci n'implique pas forcément le recours à la filière indirecte. Le district d'Innerberg a ainsi été un interlocuteur privilégié des armuriers nurembergeois au XVI^e et au début du XVII^e siècle et, d'après les données recueillies par Ph. Braunstein et al., était capable de concurrencer les haut fourneaux contemporains jusqu'au début du XVII^e siècle en terme de volume de production (P. Braunstein and E. Landsteiner, 2011, p. 413). Une autre solution pour les armuriers aurait consisté à augmenter le nombre de leurs fournisseurs ou encore à les diversifier.

¹⁴⁷ Cette complexité est déjà visible même avant le XVI^e siècle (P. Dillmann, L. Pérez, and C. Verna, 2011 a, p. 23), (C. Verna, 2017, p. 239–259), (C. Verna, 2000). Pour le fer lombard voir par exemple (F. Morenzoni, 2001). Pour les XVI^e et XVII^e siècles voir (P. Braunstein and E. Landsteiner, 2011) et (C. Evans, 2011)

Conclusion générale et perspectives

Cette thèse visait à éclairer, les dimensions techniques, sociales, et économiques de production et d'utilisation des armures en Europe du XIII^e siècle au XVII^e siècle. Dans ce but, nous avons choisi d'aborder l'étude de cet objet par la matière : le métal. Notre problématique a été orientée selon plusieurs axes, choisis pour leur pertinence au regard de la nature de nos sources :

- La morphologie de l'armure du XIII^e siècle au XVII^e siècle a évolué sous l'influence de différents facteurs tant militaires que sociaux. Ce premier axe de recherche avait pour but de déterminer si des choix particuliers, en termes de nature du métal, et du travail de forge avaient été faits en réponse à ces changements.
- Le second questionnait l'existence de spécificités entre les différents centres de production européens, en termes d'approvisionnement en métal mais aussi de savoir-faire techniques.
- Le troisième consistait à éclairer l'organisation des productions au sein des ateliers, aussi bien pour la réalisation d'une armure complète que pour des pièces de qualité constante, parfois produites en très grande quantité.
- Enfin, le dernier interrogeait l'armure sous l'angle de l'histoire des techniques, et plus particulièrement sur l'emploi d'une innovation technique pour la fabrication des armures : le procédé de réduction indirecte.

Afin de répondre à ces questions, nous avons dû, dans un premier temps, mettre en place un corpus représentatif à la fois de l'évolution de l'équipement défensif des combattants mais également des grands centres de production européens. Nous avons fait le choix de mettre en avant l'étude de différents corpus clefs. Ainsi, des pièces de typologies allemande, italienne mais aussi de centres de production moins étudiés jusque-là, comme pour la France, ont été sélectionnées. Le mode de production des objets tenait également une place centrale dans notre questionnement. Les armuriers répondaient, en effet, à différents types de commandes : l'une pour des armures complètes à destination de particuliers, l'autre pour la réalisation de pièces plus ordinaires, parfois produites massivement en réponse aux commandes des gouvernements, urbains, royaux et princiers. Afin de comprendre les stratégies mises en jeu au sein des ateliers pour répondre à ces commandes, la production d'un armurier, Valentin Siebenbürger, a ainsi fait l'objet d'une étude particulière. Nous avons également choisi d'étudier deux armures semi-complètes : l'armure de Sainte Suzanne (XV^e siècle) et celle de François de Montmorency (XVI^e siècle). Enfin, l'imposant lot de cuirasses du XVII^e

siècle retrouvé sur le site de Valenciennes a fait l'objet d'une étude approfondie afin d'appréhender un autre type de production « en série ».

Suite à la sélection des pièces, des prélèvements de quelques millimètres ont été réalisés sur les objets, indispensables pour étudier finement la microstructure et l'origine du métal. Cette étape a tenu compte de deux critères principaux : respecter au mieux l'intégrité des objets d'une part, et garantir la représentativité des futures analyses d'autre part.

Nous avons ensuite établi une stratégie d'étude des prélèvements effectués, permettant la caractérisation métallique et inclusionnaire du métal, multi-technique et multi-échelle (analyse macroscopique, microscopique voire nanométrique dans de rares cas). Dans le cas des armures, les inclusions non métalliques sont de faible taille ($<30\mu\text{m}$). Comme cela est mis en avant dans la littérature, ceci pose des difficultés en termes de quantification des éléments traces, indispensable à toute étude de provenance. Un des apports importants de notre travail, a été la mise au point d'une méthode de dosage des éléments traces par LA-ICP-MS des inclusions non métalliques de faible taille, qui permettait la mesure simultanée d'une dizaine d'entre eux. Les résultats obtenus ont notamment permis, après traitement multivarié, d'effectuer des premières comparaisons entre éléments d'armures puis avec les bases de données géochimiques déjà existantes (Base de données LAPA/NIMBE), afin de tester la provenance des matériaux employés. Un corpus de référence spécifique et unique aux armures italiennes a également été établi avec lequel d'autres éléments de provenance inconnue pourront être comparés à l'avenir.

Du point de vue du métal, nos résultats ont montré l'emploi d'alliages de natures variées pour réaliser les plates d'armures. Ces derniers ont été classés en plusieurs grandes catégories, en fonction de la composition de l'alliage (taux de carbone et de phosphore), de son hétérogénéité mais aussi du traitement thermique ou mécanique qui lui a été appliqué. Ainsi, la très grande majorité des échantillons (80%) présente une structure métallographique homogène du point de vue de la teneur en carbone, ce qui est une spécificité à souligner par rapport à la littérature des alliages ferreux anciens. Toutefois, nous avons pu mettre évidence que les plates d'armures utilisées n'étaient pas forcément de nature homogène, ce qui soulève un problème crucial du point de vue de la représentativité d'un seul prélèvement par plate, même si, dans le cas de pièces muséales, la multiplication des prélèvements sur un même objet est rarement possible.

Le comportement mécanique du métal a été caractérisé grâce aux mesures de microdureté effectuées. Différentes qualités de métal ont pu être mis en évidence. Les alliages de dureté faible : ($100 < \text{Hv} < 150$) sont très minoritaires dans le corpus étudié (20% des échantillons). Ils sont essentiellement composés d'aciers faiblement carburés et de quelques échantillons de fer phosphoreux. Il faut préciser que le fer de faible dureté ($\text{Hv} < 100$), par exemple employé pour la

fabrication d'autres objets médiévaux comme les clous et les rivets, est absent du corpus étudié. Les alliages de dureté moyenne : ($150 \leq H_v \leq 250$) comprennent l'essentiel des objets (67% des échantillons). Cette catégorie rassemble des alliages de diverses natures (acier, fer phosphoreux) dont la dureté est centrée autour de 200Hv et ce quel que soit le traitement thermique ou mécanique considéré. Les alliages de dureté élevée : ($H_v > 250$) sont presque exclusivement des alliages ferreux trempés et sont très minoritaires (12% des échantillons). Enfin, deux structures particulières ont été mises en évidence. Il s'agit des structures en bandes soudées d'une part, et des structures de trempe hétérogène assimilées à celles des aciers modernes « dual phase » d'autre part. Les premières consistent en un assemblage par soudure d'au moins deux matériaux de ductilité différente. Les secondes sont composées de martensite et bainite entremêlées avec des zones ferritiques. Elles pourraient résulter d'une action délibérée de l'armurier pour améliorer les capacités d'absorption et de résistance au choc des armures. Les structures en bandes soudées pourraient également être issues d'un recyclage de métal.

Ce premier bilan posé, nous nous sommes demandés si un lien pouvait exister entre le type de métal utilisé par les armuriers et le type de pièce, la richesse de son porteur ou encore son lieu de fabrication.

Sur les champs de bataille, l'armure a dû s'adapter à des bouleversements techniques et stratégiques comme l'utilisation massive du grand arc anglais au XIV^e siècle, le perfectionnement de l'arbalète et le développement des armes à feu au XV^e siècle. Nous avons pu montrer, en couplant nos résultats à une synthèse des travaux portant sur le sujet, que certains armuriers ont davantage utilisé des alliages de nature plus dure ou durcis par traitement thermique aux XV^e et XVI^e siècles et ce, quel que soit le type de défense étudié. Toutefois ces alliages se retrouvent souvent à part égales avec d'autres alliages aciérés mais de dureté moindre, ce qui prouve que l'obtention d'une grande dureté, qui passe inévitablement par la trempe de matériaux aciérés, n'était pas systématiquement recherchée par tous. Or, pour des pièces particulièrement sollicitées comme les armures, la résistance du métal tout comme sa capacité à dissiper l'énergie dû au choc, étaient deux facteurs cruciaux et complémentaires à considérer. Nous en avons conclu que les armuriers avaient peut-être été amenés à effectuer un compromis entre résistance mécanique et ductilité du métal, afin d'améliorer les propriétés défensives des armures en absorbant les chocs. Les structures en bandes soudées et les structures de trempe hétérogène assimilées à des aciers dual phase ont peut-être aussi été réalisées dans ce but. Au XVII^e siècle nous avons relevé la baisse sensible d'alliages de dureté élevée. Elle pourrait correspondre au déclin du port de l'armure complète face à la généralisation de l'emploi des armes à feu.

La qualité de l'équipement défensif est aussi une question de niveau économique et social du porteur. Nos résultats, couplés à une synthèse de la littérature, suggèrent qu'au XV^e et XVI^e siècles, les combattants les plus fortunés possédaient plutôt des armures fabriquées à partir d'un métal de meilleure résistance. Cependant, les combattants moins fortunés n'étaient pas exclusivement équipés d'un métal de qualité médiocre et, parfois, ont pu bénéficier d'équipements de dureté équivalente à celle des combattants les plus aisés. Ceci est peut-être à mettre en regard avec la prise en charge progressive des gouvernements urbains, royaux et princiers de l'équipement des gens de guerre, qui a conduit à une répartition plus homogène du matériel ainsi qu'à la diminution des écarts entre combattants de fortunes différentes.

Du point de vue de la fabrication de ces objets, cette étude avait aussi vocation à mettre en lumière des gestes techniques, voire des spécificités techniques selon les différents centres de production. Nos analyses apportent de ce point de vue un nouvel éclairage. Ainsi, elles ne mettent pas en évidence une incontestable supériorité des centres de production internationaux en termes de travail du métal. Au contraire, elles révèlent, une certaine homogénéité des savoir-faire puisque des occurrences de trempe ont été relevées sur des pièces typologiquement associées à des centres de production internationaux mais également à d'autres moins connus : la France et l'Espagne.

Des spécificités ont, en revanche, été révélées en ce qui concerne la nature du métal utilisé dans les différents centres. Les armures italiennes du corpus étudiées sont issues d'Italie du Nord et ont été produites pour la plupart sans doute à Milan ou peut être dans d'autres villes comme Brescia. Ainsi, nous avons pu montrer que la grande majorité de ces armures possédaient une signature chimique commune compatible avec l'espace lombard caractérisé par S. Leroy. De plus, nous avons révélé que le métal utilisé pour leur fabrication est exclusivement aciéré, ce qui concorde avec sa provenance puisque la Lombardie était une région réputée pour sa fabrication d'acier (R.-H. Bautier, 1960, p. 10; J.-F. Belhoste, 2001, p. 548). Les armuriers lombards ont ainsi pu directement tirer profit de cette matière première de proximité et de grande qualité ce qui a pu contribuer à leur réussite commerciale.

Les analyses effectuées sur des armures allemandes nous ont permis de définir un tout autre paysage. La grande majorité de celles-ci sont issues de la ville de Nuremberg. Les armuriers nurembergeois semblent avoir eu recours à des sources d'approvisionnements plus diversifiées que leurs concurrents italiens, ce qui témoignerait d'une stratégie de production différente. Cet argument est soutenu par la dispersion des signatures chimiques ainsi que la variété du métal utilisé comptant du fer très faiblement carburé, du fer phosphoreux, mais aussi de l'acier. Ce résultat nous a également permis de remettre en question la lecture des sources normatives qui stipulaient que les

alliages aciérés auraient été privilégiés. La confrontation avec des sources matérielles montre ainsi que la réalité est plus complexe à appréhender que le suggère ce type de source.

Nous nous sommes également intéressés à des productions moins bien étudiées jusque-là, car issus de centre armuriers moins renommés. Concernant les armures de typologie française, la provenance du métal n'a pas pu être établie du fait de l'importance du recouvrement des signatures chimiques. Cependant nous avons pu montrer que les approvisionnements en métal étaient très diversifiés puisque, à l'instar de Nuremberg, toutes les catégories de métal sont présentes. Par ailleurs, les signatures chimiques de deux plaques de broigne retrouvées sur le site de Laquenexy (Moselle) ont pu être associées à la Minette Lorraine. Ce résultat illustre l'existence d'une production d'armures à l'échelle locale dans cette région, peu visible dans les sources écrites, même si l'on sait que la ville de Metz par exemple, a compté des armuriers (J. Schneider, 1952, p. 222).

Notre travail nous a également amené à questionner le rapprochement systématique entre la typologie des pièces et un centre de production. La pratique de la copie de productions renommées est en effet attestée au Moyen Âge. On fabrique ainsi des objets dénommés « à la façon d'Italie ou d'Allemagne » (D. Robcis, 1998). Ces mentions constituent pour ces derniers une sorte de publicité (D. Robcis, 1998; P. Dillmann, L. Pérez, and C. Verna, 2011 a, p. 61). Par exemple, la défense de tête, H35, typologiquement associée aux productions italiennes illustre ce cas, car sa signature chimique se distingue clairement des autres armures italiennes. Ainsi, il pourrait s'agir d'une imitation d'armure italienne, mais fabriquée dans un autre centre armurier. De la même manière, une pièce de typologie allemande possède une signature chimique compatible avec la Lombardie, ce qui pourrait suggérer qu'elle ait été fabriquée dans cette région.

Le troisième objectif de notre thèse consistait à éclairer l'organisation des ateliers. Ainsi, l'étude des armures semi-complètes nous a permis de mettre en évidence le caractère composite de l'armure, constituée d'un ensemble de pièces fabriquées à partir d'alliages de natures variées, et dont les traitements thermiques peuvent différer. Ces variations pourraient témoigner de l'intervention de différentes mains pour réaliser l'objet, que ce soit au sein même d'un atelier ou par l'association de plusieurs ateliers. L'étude des deux paires de cuissards en apparence identiques, signées de la marque de Valentin Siebenbürger a confirmé ces résultats. Le métal est de diverses natures (alliages ferritiques et aciérés) et a parfois fait l'objet d'une trempe qui, néanmoins, ne concerne pas l'ensemble des plates d'armures. Nous avons ainsi été amenés à nous interroger sur la nature exacte de l'intervention du maître armurier qui signait les objets, et la signification de la signature d'un atelier, car en définitive, cette dernière ne se reflète pas dans le travail du métal.

Enfin les cuirasses de Valenciennes ont permis de s'interroger sur un mode de fabrication bien différent, celui de la série. La mise en évidence de différentes tailles au sein des 400 pièces

laisse supposer l'emploi de patrons et fait directement écho à une production que C. Gaier qualifie de « prêt à porter », c'est à dire de pièces élaborées en grande quantité, en plusieurs tailles et ajustables à chacun des combattants. Le nombre important de pièces dans ce lot laisse supposer l'implication de plusieurs ateliers ou de différents fournisseurs auprès desquels le fondeur Perdry, munitionnaire du roi d'Espagne, aurait pu passer commande. Cet argument est soutenu par l'existence de plusieurs sources d'approvisionnement en métal mise en évidence par les analyses.

Le dernier axe de ce travail portait sur la diffusion d'une innovation technique en Europe et son emploi pour la fabrication des armures : le procédé de réduction indirecte. Bien que plusieurs variantes de ce procédé existent, nos analyses nous ont uniquement permis de traiter de la forme « stabilisée » du procédé (de type wallon ou comtois). Ainsi le procédé de réduction directe reste majoritaire dans les armures étudiées et ce jusqu'au XVI^e siècle. Ce n'est qu'au XVII^e siècle que la tendance s'inverse. Les résultats sont en accord avec les données des autres travaux portant sur le sujet dans d'autres contextes, et confirment que l'arrivée du nouveau procédé dans une région donnée n'implique pas la disparition immédiate du procédé de réduction directe. De plus à l'heure actuelle, ils ne permettent pas de montrer que le procédé de réduction indirecte aurait été privilégié par les armuriers pour la fabrication massive d'armures à destination de l'armée.

En conclusion, ce travail souligne le potentiel de l'étude physico chimique du métal qui, intégrée à une démarche interdisciplinaire, est susceptible d'enrichir les réflexions portées à la fois sur la nature des matériaux et des gestes techniques employés, mais aussi sur la diffusion d'innovations techniques ou les modalités de production mises en œuvre pour fabriquer ces objets. A ce titre, ces derniers constituent des exemples de choix pour étudier non seulement l'évolution technique de l'armement mais aussi l'organisation des métiers du métal au Moyen Âge et au début de l'époque moderne, de l'approvisionnement en matière première jusqu'à la vente des pièces. L'étude de la matière se révèle en ce sens complémentaire des autres types de sources historiques.

Ce travail offre, enfin, différentes perspectives pour les recherches futures.

D'un point de vue méthodologique, la provenance des armures allemandes et françaises n'a pas pu être déterminée du fait de l'importance des recouvrements chimiques. Ceci tient notamment au peu d'éléments traces analysés et à l'absence d'élément chimique discriminant pour ces objets. Pour préciser l'origine des pièces, une stratégie spécifique pourrait être envisagée. Il conviendrait d'abord de caractériser la signature chimique des ensembles géochimiques de production d'où le métal utilisé pour la fabrication des armures est susceptible de provenir. Nous pensons par exemple pour le groupe Allemagne au Haut Palatinat ou encore à la Styrie. Ceci fait, il pourrait être envisagé

de mettre en évidence des éléments chimiques caractéristiques de ces régions de production, (comme c'est le cas du manganèse et du baryum pour la Lombardie) et susceptibles d'être ensuite spécifiquement dosés dans les échantillons, que ce soit par une approche basée sur la filiation minéral métallurgique, la filiation minéral scorie ou encore la comparaison de rapports isotopiques.

Nos résultats ont également soulevé une question cruciale : celle de la représentativité d'un seul prélèvement par pièce d'armure, même si, dans le cas de pièces de musées, la multiplication des prélèvements est rarement possible. Une solution consisterait à utiliser, en complément de la prise d'échantillon, des méthodes d'analyses non invasives comme la diffraction des neutrons. Cette dernière pourrait, en effet, fournir un certain nombre d'informations relatives à la microstructure du métal en différents endroits de l'objet étudié, comme sa teneur en carbone ou des gestes techniques spécifiques comme la trempe. Ceci permettrait d'estimer son hétérogénéité. En revanche ce type de méthode ne peut être utilisée in situ et nécessite le déplacement des objets jusqu'à des laboratoires d'analyse spécifiques. De plus, elle ne peut se substituer à la prise d'échantillon qui elle seule permet, à l'heure actuelle, d'étudier dans les détails la microstructure du métal et envisager une étude de provenance. Il serait ainsi possible d'envisager, sur un corpus de pièces précises comme des objets de qualité constante voire issus d'un même atelier comme celui de Valentin Siebenbürger, le repérage des différentes zones carburées voire trempées par la méthode de diffraction des neutrons. Ce premier repérage permettrait d'estimer l'hétérogénéité du métal et de sélectionner les endroits les plus pertinents pour la prise d'échantillon afin de déterminer le type de procédé de réduction utilisé, d'étudier la provenance des matériaux employés, ainsi que de préciser la structure métallographique. À terme, cela permettrait de caractériser de façon plus complète la production d'un même atelier, ou de pièces d'apparence très similaires. Notre étude a, en effet, soulevé la question de l'identification de la signature d'un atelier. Les premières hypothèses formulées sur l'atelier de Valentin Siebenbürger mériteraient ainsi d'être confirmées par l'analyse d'un nombre plus conséquent de pièces.

Ensuite, d'un point de vue historique, les réflexions développées pourraient être enrichies par une prospection plus large des collections muséologiques et archéologiques afin notamment d'avoir accès à un matériel défensif antérieur au XVI^e siècle qui reste plus faiblement représenté. À ce titre, il serait intéressant de privilégier l'étude de grands ensembles issus d'un même contexte archéologique comme les armures de Chalcis. Ce type de corpus présente, en effet, l'intérêt de compter des objets utilisés au même endroit et à la même époque (XIV^e et XV^e siècles, Chalcis) dont l'atelier de fabrication est connu pour certaines pièces grâce aux poinçons qu'elles portent (Italie du Nord, Milan).

Enfin, le travail des centres de production moins renommés peu étudiés jusqu'ici, comme le travail des armuriers français gagnerait, également à être davantage mis en lumière, pour permettre de revaloriser leur place au sein des collections.

Références bibliographiques

- AITCHISON, J.**, 1982. "The Statistical Analysis of Compositional Data", *Journal of the Royal Statistical Society*, vol. 44, p. 139–177.
- AITCHISON, J., BARCELÓ-VIDAL, C., PAWLOWSKY-GLAHN, V.**, 2002. "Some comments on compositional data analysis in archaeometry, in particular the fallacies in Tangri and Wright's dismissal of logratio analysis", *Archaeometry*, vol. 44, p. 295–304.
- AL-ABBASI, F. M., NEMES, J. A.**, 2003. "Micromechanical modeling of dual phase steels", *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 45, p. 1449–1465.
- APPADURAI, A.**, 1986. *The social life of things: commodities in cultural perspective*, (Appadurai, A., Ed.), Cambridge university press, Cambridge.
- ARNOUX, M.**, 1993. *Mineurs, ferrons et maîtres de forge : étude sur la production du fer dans la Normandie du Moyen Age, XIe- XVe siècle*, CTHS, Paris.
- ARNOUX, M.**, 2001. "Innovation technique, intervention publique et organisation du marché : aux origines du district sidérurgique de la Valteline (XIIIe-XIVe siècles)", dans *La sidérurgie alpine en Italie (XIIe-XVIIe siècle)*, Braustein, P. (ed.), Ecole Française de Rome, Rome, p. 215–251.
- ARRIBET-DEROIN, D.**, 2010. "Rythmes et pratiques de la métallurgie du fer aux XIVe et XVe siècles: les "bloomieres" de Tudeley (Kent) et de Byrkeknott (comté de Durham)", *Archéologie médiévale*, vol. 40, p. 147–168.
- BAPTISTE, N.**, 2016. "Des artisans spécialistes : l'art des armuriers", dans *Armatus corpus princes & chevaliers (1330-1530) 600 ans du duché de Savoie*, Baptiste, N. (ed.), Infolio, Gollion, p. 199–209.
- BARRALIS, J., MAEDER, G.**, 1993. *Précis de métallurgie*, 6^e édition, AFNOR/Nathan, Paris.
- BAUTIER, R.-H.**, 1960. "Notes sur le commerce du fer en Europe occidentale du XIIIe au XVIe siècle", *Revue d'Histoire de la Sidérurgie*, p. 7–35.
- BAUVAIS, S.**, 2007. *Evolution de l'organisation des activités de post-réduction 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, Belfort.

- BAUVAIS, S., FLUZIN, P.**, 2009. "Archaeological and Archeometrical Approaches of the Chaîne Opératoire in Iron and Steelmaking: Methodology for a Regional Evolution Study", dans *Techniques and People: anthropological perspectives on technology in the archaeology of the proto-historic and early historic periods in the Southern Levant*, Roux, V. & S. Rosen (eds.), De Bocard, Paris, p. 159–180.
- BAXTER, M. J., FREESTONE, I. C.**, 2006. "Log-ratio compositional data analysis in archaeometry", *Archaeometry*, vol. 48, p. 511–531.
- BAXTER, M. J.**, 2006. "A Review of Supervised and Unsupervised Pattern Recognition in Archaeometry", *Archaeometry*, vol. 48, p. 671–694.
- BECKER, J. S.**, 2007. *Inorganic mass spectrometry : principles and applications*, John Wiley & Sons, Chichester.
- BELHOSTE, J.-F.**, 2001. "Mutations techniques et filières marchandes dans la sidérurgie alpine entre le XIIIe et le XVIe siècles", dans *La sidérurgie alpine en Italie (XIIIe-XVIIe siècle)*, Braunstein, P. (ed.), Ecole Française de Rome, Rome, p. 515–624.
- BENOIT, P.**, 1998. "Au four et au moulin: innovation et conjoncture", *Actes des congrès de la Société d'archéologie médiévale*, vol. 6, p. 293–301.
- BENOIT, P.**, 1999. "Le métal en France au XVe siècle", dans *Art et société en France au XVe siècle*, Prigent, C. (ed.), Maisonneuve et Larose, Paris, p. 503–516.
- BENVENUTI, M., DINI, A., D'ORAZIO, M., CHIARANTINI, L., CORRETTI, A., COSTAGLIOLA, P.**, 2012. "The tungsten and tin signature of iron ores from Elba Island (Italy): a tool for provenance studies of iron production in the Mediterranean region", *Archaeometry*, vol. 55, p. 479–506.
- BENVENUTI, M., ORLANDO, A., BORRINI, D., CHIARANTINI, L., COSTAGLIOLA, P., MAZZOTTA, C., RIMONDI, V.**, 2016. "Experimental smelting of iron ores from Elba Island (Tuscany, Italy): Results and implications for the reconstruction of ancient metallurgical processes and iron provenance", *Journal of Archaeological Science*, vol. 70, p. 1–14.
- BERARD, E., DILLMANN, P., VEGA, E., VERNA, C., TOUREILLE, V., LEDUC, S.**, 2015. "Recherches interdisciplinaires sur l'armement médiéval : l'exemple des bombardes de Meaux", dans *Les*

Patrimoines en recherche(s) d'avenir, 24-25 septembre 2015, (à paraître).

- BERNARD, M.**, 2012. *Les "mestiers touchans habillemens de guerre" armuriers et fourbisseurs d'épées parisiens à la fin du Moyen Âge*. Thèse diplôme d'archiviste-paléographe, Ecole Nationale des Chartes.
- BERNARD, M.**, 2015. "L'organisation du travail des armuriers parisiens, entre réglementation et réalité(s) de terrain (XIIIe-XVe siècles)", *Médiévales*, vol. 69, p. 49–69.
- BERNARDI, P., VERNA, C.**, 2001. "Travail et Moyen Age : un renouveau historiographique", *Cahiers d'Histoire: revue d'histoire critique*, vol. 83, p. 27–46.
- BERNARDI, P.**, 2009. *Maître, valet et apprenti au Moyen Âge. Essai sur une production bien ordonnée.*, Méridiennes 3, Université Toulouse-Le Mirail, Toulouse.
- BESSEY, V.**, 2006. *Construire l'armée française, Tome I. Textes fondateurs des institutions militaires. De la France des premiers Valois à la fin du règne de François Ier*, (Brepols, Ed.), Centre d'études d'histoire de la Défense, Turnhout.
- BILLOT, C.**, 1988. "Métiers de la métallurgie et migrations en France à la fin du Moyen Age", dans *Hommes et travail du métal dans les villes médiévales*, Benoit P & D. Cailleaux (eds.), Association pour l'Édition et la Diffusion des Etudes Historiques, Paris, p. 227–239.
- BJÖRKENSTAM, N., FORNANDER, S.**, 1985. "Metallurgy and technology at Lapphyttan", dans *Medieval Iron in Society*, Björkenstam, N. & S. Fornander (eds.), Jernkontoret and Riksantikvarieämbetet, Stockholm, p. 184–225.
- BLAIR, C.**, 1958. *European armour circa 1066 to circa 1700*, B. T. Batsford, London.
- BLAKELOCK, E., MARTINÓN-TORRES, M., VELDHIJZEN, H. A., YOUNG, T.**, 2009. "Slag inclusions in iron objects and the quest for provenance: an experiment and a case study", *Journal of Archaeological Science*, vol. 36, p. 1745–1757.
- BOCCIA, L. G., COELHO, E. T.**, 1967. *L'arte dell'armatura in Italia*, Bramante, Milan.
- BOCCIA, L. G.**, 1982. *Le armature di S.Maria delle Grazie di curtatone di Mantova e l'armatura lombarda del '400*, Bramante, Busto Arsizio.
- BOEHEIM, W.**, 1890. *Handbuch der Waffenkunde. Das Waffenwesen in seiner historischen*

Entwicklung vom Beginn des Mittelalters bis zum Ende des 18 Jahrhunderts, Leipzig.

BOUCHOUX, G., 2005. "Spectrométrie de masse - Principe et appareillage", *Techniques de l'Ingénieur*.

BOURGEOIS, L., ALEXANDRE-BIDON, D., FELLER, L., MANE, P., VERN, C., WILMART, M., 2018. "La culture matérielle : un objet en question", dans *La culture matérielle : un objet en question*, Bourgeois, L., D. Alexandre-Bidon, L. Feller, P. Mane, C. Verna & M. Wilmart (eds.), Presses Universitaires de Caen (Publications du CRAHAM), Caen.

BRAMFITT, B. L., BENSCOTER, A. O., 2002. *Metallographer's Guide: Practice and Procedures for Irons and Steels*, ASM International.

BRAUNS, M., SCHWAB, R., GASSMANN, G., WIELAND, G., PERNICKA, E., 2013. "Provenance of Iron Age iron in southern Germany: a new approach", *Journal of Archaeological Science*, vol. 40, p. 841–849.

BRAUNSTEIN, P., 1966. "Le commerce du fer à Venise au XVe siècle", dans *Studi Veneziani*, Olschki, L. (ed.), Firenze, p. 267–302.

BRAUNSTEIN, P., 1998. "L'industrie à la fin du Moyen Age : un objet historiographique nouveau?", dans *La France n'est-elle pas douée pour l'industrie?*, Bergeron, L. & P. Bourdelais (eds.), Belin, Paris, p. 25–40.

BRAUNSTEIN, P., 2001. "L'acier de Brescia à la fin du XIVe siècle : l'apport d'une correspondance d'affaires", dans *La sidérurgie alpine en Italie (XIIe - XVIIe siècle)*, Braustein, P. (ed.), École française de Rome, Rome, p. 455–479.

BRAUNSTEIN, P., 2003. *Travail et entreprise au Moyen Âge*, De Boeck, Bruxelles.

BRAUNSTEIN, P., LANDSTEINER, E., 2011. "The production and trade of steel and steel tools in the early modern semi-peripher. A commodity chain approach to the Innerberg district (Austria) in the 16th and 17th centuries", dans *L'acier en Europe avant Bessemer*, Dillmann, P., L. Pérez & C. Verna (eds.), CNRS-Université de Toulouse-Le Mirail, Toulouse, p. 405–446.

BREWER, C. W., 1981. "Metallographic examination of medieval and post-medieval iron armour", *Historical metallurgy*, vol. 15, p. 1–8.

BUCHWALD, V. F., WIVEL, H., 1998. "Slag analysis as a method for the characterization and

- provenancing of ancient iron objects", *Materials Characterization*, vol. 40, p. 73–96.
- BUCHWALD, V. F.**, 2005. *Iron and steel in ancient times*, The Royal Danish Academy of Science and Letters, Copenhagen.
- BUCHWALD, V. F.**, 2008. *Iron, steel and cast iron before Bessemer*, The Royal Danish Academy of Sciences and Letters, Copenhagen.
- BUTTIN, C.**, 1901. "Notes sur les armures à l'épreuve", *Revue Savoisienne*, vol. 2–3, p. 26–38.
- BUTTIN, F.**, 1971. *Du Costume militaire au Moyen Âge et pendant la Renaissance*, Real Academia de Buenas Letras, Barcelona.
- CANTELAUBE, J.**, 2005. *La forge à la catalane dans les Pyrénées ariégeoises, une industrie à la montagne (XVIIe - XIXe siècle)*, CNRS-Université de Toulouse-Le Mirail, Toulouse.
- CANTELAUBE, J., CODINA, O.**, 2011. "La réduction directe et l'acier: le cas à la catalane (XVIIe-XIXe siècle)", dans *L'acier en Europe avant Bessemer*, Dillmann, P., L. Pérez & C. Verna (eds.), CNRS-Université de Toulouse-Le Mirail, Toulouse, p. 361–382.
- CARRIÈRE, C.**, 2017. *Influence de la corrosion du fer sur les processus d'altération du verre : approche analytique multi-échelle*. Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie - Paris VI.
- CEDRIC, R., MARIELLE, C.**, 2014. "Limite de détection de méthodes d'analyse et termes apparentés", *Techniques de l'ingénieur*.
- CHARLTON, M., BLAKELOCK, E., MARTINÓN-TORRES, M., YOUNG, T.**, 2012. "Investigating the production provenance of iron artifacts with multivariate methods", *Journal of Archaeological Science*, vol. 39, p. 2280–2293.
- CHARLTON, M. F.**, 2015. "The last frontier in "sourcing": the hopes, constraints and future for iron provenance research", *Journal of Archaeological Science*, vol. 56, p. 210–220.
- COGNOT, F.**, 2013. *L'armement médiéval : les armes blanches dans les collections bourguignonnes. Xe - XVe siècles*. Thèse de doctorat, Université de Paris I, Panthéon-Sorbonne.
- CONTAMINE, P.**, 1986. *La Guerre au Moyen Âge*, Presses universitaires de France, Paris.
- CONTAMINE, P.**, 1989. "Les Gens de guerre et la ville. Achats d'armures à Orléans, 1434-1438", dans *Villes, bonnes villes, cités et capitales. Mélanges offerts à Bernard Chevalier*, Bourin, M. (ed.),

Université de Tours, Tours, p. 3–11.

CONTAMINE, P., 1996. "L'armement des populations urbaines à la fin du Moyen Âge : l'exemple de Troyes (1474)", dans *La Guerre, la violence et les gens au Moyen Âge, tome II : guerre et gens Amiens, octobre 1994*, Contamine, P. & O. Gyuotjeannin (eds.), CTHS, Paris, p. 59–72.

CONTAMINE, P., 1999. "Armes et Armures", dans *Art et société en France au XVe siècle*, Prigent, C. (ed.), Maisonneuve et Larose, Paris, p. 544–553.

CONTAMINE, P., 2002. "L'homme armé à la fin du Moyen Âge : des initiatives privées aux interventions publiques", dans *L'homme armé en Europe XIVe-XVIe siècle*, Contamine, P. & J.-P. Reverseau (eds.), Cahiers d'études et de recherche du Musée de l'armée n°3. Musée de l'Armée, Paris, p. 5–16.

CONTAMINE, P., BOMPAIRE, M., LEBECQ, S., SARRAZIN, J. L., 2003. *L'économie médiévale*, 3e édition, Armand Colin, Paris.

CONTAMINE, P., 2004. *Guerre, État et Société à la fin du Moyen Âge, Etude sur les armées des rois de France 1337-1494*, EHESS, Paris.

COUSTURES, M.-P., RICO, C., BEZIAT, D., DJAOU, D., LONG, L., DOMERGUE, C., TOLLON, F., 2006. "La provenance des barres de fer romaines des Saintes-Maries-de-la-Mer (Bouches-du-Rhône)", *Gallia*, vol. 63, p. 243–261.

COUSTURES, M.-P., DIEUDONNE-GLAD, N., DILLMANN, P., BEZIAT, D., FEUGERE, M., 2014. "Tentative chemical characterization of a smelting workshop (Oulches, France) : from the ore to the finished product", dans *Early iron in Europe, Huttenberg International Conference*, Cech, B. & T. Rehren (eds.), Monographies Instrumentum, Huttenberg, p. 93–116.

COUSTURES, M. P., BÉZIAT, D., TOLLON, F., DOMERGUE, C., LONG, L., REBISCOUL, A., 2003. "The use of trace element analysis of entrapped slag inclusions to establish ore - Bar iron links: examples from two Gallo-Roman iron-making sites in France (Les Martys, Montagne noire, and les Ferrys, Loiret)", *Archaeometry*, vol. 45, p. 599–613.

CREAG, D.-C., 2005. "The characterization of artefacts of cultural heritage significance using physical techniques", *Radiation Physics and chemistry*, vol. 74, p. 426–442.

CREW, P., 1991. "The experimental production of prehistoric bar iron", *Journal of the Historical Metallurgy Society*, vol. 25, p. 21–36.

- CREW, P.**, 2000. "The influence of clay and charcoal ash on bloomery slags", dans *Il Ferro nelle Alpi, Atti del Convegno/Iron in the Alps. Proceedings of the Conference*, Tizzoni, C. C. & M. Tizzoni (eds.), Comune di Bienno, Breno, p. 38–48.
- CROUY-CHANEL, E. DE**, 2014. *Le canon jusqu'au milieu du XVIe siècle. France, Bretagne et Pays-Bas bourguignons*. Thèse de doctorat, Université de Paris I Panthéon-Sorbonne, Paris.
- DEGRYSE, P., SCHNEIDER, J., KELLENS, N., WAELENS, M., MUCHEZ, P. H.**, 2007. "Tracing the Resources of Iron Working at Ancient Sagalassos (South-West Turkey): A Combined Lead and Strontium Isotope Study on Iron Artefacts and Ores", *Archaeometry*, vol. 49, p. 75–86.
- DELPU, F.**, 2013. *Aux sources d'une armée permanente édition critique et commentaire des ordonnances militaires de Charles Le Téméraire, 1471-1476*. Thèse diplôme d'archiviste-paléographe, Ecole Nationale des Chartes.
- DELPU, F.**, 2015. "Les textes de l'ost, du milieu du XVe siècle au début du XVIe siècle", dans *D'Azincourt à Marignan chevaliers & bombardes, 1415-1515*, Bailleux, N. & J.-F. Colau (eds.), Gallimard Musée de l'armée de Paris, Paris, p. 32–39.
- DEMMIN, A.**, 1869. *Guide des amateurs d'armes et armures anciennes par ordre chronologique depuis les temps les plus reculés jusqu'à nos jours*, Renouard, Paris.
- DESAULTY, A.-M., MARIET, C., DILLMANN, P., JORON, J.-L., FLUZIN, P.**, 2008. "The study of provenance of iron objects by ICP-MS multi-elemental analysis", *Spectrochimica Acta Part B*, vol. 63, p. 1253–1262.
- DESAULTY, A.-M.**, 2008. *Apport des analyses chimiques multi technique à la compréhension du comportement des éléments traces dans les filières sidérurgiques anciennes. Application aux études de provenance et à la distinction des procédés. Le cas du Pays de Bray normand*. Thèse de doctorat, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard et Université de Besançon.
- DIEUDONNE-GLAD, N.**, 2011. "L'acier dans les limes de l'Antiquité au Moyen Âg. Persistance des techniques", dans *L'acier en Europe avant Bessemer*, Dillmann, P., L. Pérez & C. Verna (eds.), CNRS-Université de Toulouse-Le-Mirail, Toulouse, p. 175–194.
- DILLMANN, P.**, 1998. *Diffraction X, Microdiffraction X et Microfluorescence X sous Rayonnement Synchrotron et analyses comparées pour la caractérisation des inclusions. Application à l'étude*

de l'évolution historique des procédés d'élaboration des objets ferreux. Thèse de doctorat, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard et Université de Besançon.

- DILLMANN, P., L'HERITIER, M.**, 2007. "Slag inclusion analyses for studying ferrous alloys employed in French medieval buildings: supply of materials and diffusion of smelting processes", *Journal of Archaeological Science*, vol. 34, p. 1810–1823.
- DILLMANN, P., PEREZ, L., VERNA, C.**, 2011a. "Les aciers avant Bessemer", dans *L'acier en Europe avant Bessemer*, Dillmann, P., L. Pérez & C. Verna (eds.), CNRS-Université de Toulouse-Le Mirail, Toulouse, p. 6–56.
- DILLMANN, P., PEREZ, L., VERNA, C.**, 2011b. *L'acier en Europe avant Bessemer*, (Dillmann, P., L. Pérez & C. Verna, Eds.), CNRS-Université de Toulouse-Le Mirail, Toulouse.
- DILLMANN, P., SCHWAB, R., BAUVAIS, S., BRAUNS, M., DISSER, A., LEROY, S., GASSMANN, G., FLUZIN, P.**, 2017. "Circulation of iron products in the North-Alpine area during the end of the first Iron Age (6th–5thc. BC): A combination of chemical and isotopic approaches", *Journal of Archaeological Science*, vol. 87, p. 108–124.
- DILLMANN, P., L'HERITIER, M.**, 2017. "Archéométrie et histoire des techniques : les procédés direct et indirect en sidérurgie (XIVe - XVIIe siècles)", dans *L'Europe technicienne (XVe-XVIIIe siècles)*, Hilaire-Perez, L. (ed.), Presses Universitaires de Rennes, Rennes, p. 67–88.
- DISSER, A.**, 2014. *Production et circulation du fer en Lorraine (VIe s. av. J.-C. - XVe s. ap. J.-C.)*. Thèse de doctorat, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard.
- DISSER, A., DILLMANN, P., BOURGAIN, C., L'HERITIER, M., VEGA, E., BAUVAIS, S., LEROY, M.**, 2014. "Iron reinforcements in Beauvais and Metz Cathedrals: from bloomery or finery? The use of logistic regression for differentiating smelting processes", *Journal of Archaeological Science*, vol. 42, p. 315–333.
- DISSER, A., DILLMANN, P., LEROY, M., L'HERITIER, M., BAUVAIS, S., FLUZIN, P.**, 2016. "Iron supply for the building of Metz cathedral: new methodological development for provenance studies and historical considerations", *Archaeometry*, vol. 59, p. 493–510.
- DISSER, A., L'HERITIER, M., DILLMANN, P., ARLES, A.**, 2017. "Le chantier de la tour de Mutte à Metz : regards sur la production du fer en Lorraine à la fin du Moyen Âge. Fouille de données, analyses prédictives et traitement spatial des données", *Journal de la Société Française de*

Statistique, vol. 158, p. 13–39.

DONARD, A., POTTIN, A. C., POINTURIER, F., PECHEYRAN, C., 2015. "Determination of relative rare earth element distributions in very small quantities of uranium ore concentrates using femtosecond UV laser ablation - SF-ICP-MS coupling", *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, vol. 30, p. 2420–2428.

DUBOIS, H., 1976. *Les foires de Chalon et le commerce dans la vallée de la Saône à la fin du Moyen âge vers 1280 - vers 1430*, Publications de la Sorbonne- Université de Paris-I, Paris.

DUPRAS, N., 2012. *Armourers and their workshops The tools and techniques of late medieval armour production*. Thèse de doctorat, University of Leeds.

EVANS, C., 2011. "Steel in Britain before and after Benjamin Hunstman: manufacture and consumption in the eighteenth century", dans *L'acier en Europe avant Bessemer*, Dillmann, P., L. Pérez & C. Verna (eds.), CNRS-Université de Toulouse-Le Mirail, Toulouse, p. 285–298.

FAST, J. D., 1950. "Le vieillissement du fer et de l'acier", *Revue de Métallurgie*, vol. 47, p. 779–786.

FEDRIGO, A., GRAZZI, F., WILLIAMS, A., KABRA, S., ZOPPI, M., 2015. "Phase composition mapping of a 17th century Japanese helmet", *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, vol. 30, p. 707–712.

FEILLOLAY, A., RYSER, S., 1987. "Analyse élémentaire des aciers et des fontes", *Techniques de l'Ingénieur*.

FIGUERES, R., 2008. "Sur les traces de la bataille de Visby", *Questes*, vol. 14, p. 22–37.

FLUZIN, P., 1983. "Notions élémentaires de sidérurgie", dans *Métallurgies africaines. Nouvelles contributions*, Echard, N. (ed.), Musée de l'Homme, Paris, p. 13–44.

FLUZIN, P., PLOQUIN, A., SERNEELS, V., 2000. "Archéométrie des déchets de production sidérurgique. Moyens et méthodes d'identification des différents éléments de la chaîne opératoire directe", *Gallia*, vol. 57, p. 1–158.

FLUZIN, P., 2002. "Apport de l'archéométrie à la restitution de la chaîne opératoire en sidérurgie ; matériaux et procédés. Etudes métallographiques", dans *6ème cours d'archéologie d'Andorre*:

- l'obtention du fer par le procédé direct du IV^{ème} au XIX^{ème} siècle*, Govern D'Andorra, Ministeri de Cultura, Andorra la Vella, p. 388–396.
- FORSTER, L.**, 2018. *Chevaliers et hommes d'armes dans l'espace bourguignon au XVe siècle*. Thèse de doctorat, Université de Lille.
- FULFORD, M., SIM, D., DOIG, A., PAINTER, J.**, 2005. "In defence of Rome: a metallographic investigation of Roman ferrous armour from Northern Britain", *Journal of Archaeological Science*, vol. 32, p. 241–250.
- GAIER, C.**, 1973. *L'industrie et le commerce des armes dans les anciennes principautés belges du XIII^{ème} à la fin du XV^{ème} siècle*, Société d'édition "les Belles Lettres," Paris.
- GAIER, C.**, 1979. *Les armes*, Brepols. Fascicule n°34 de la collection Typologie des sources du Moyen Âge occidental, Turnhout-Belgium.
- GAIER, C.**, 1995a. *Armes et combats dans l'univers médiéval. Tome I*, De Boeck, Bruxelles.
- GAIER, C.**, 1995b. "Le commerce des armes en Europe au XVe siècle", dans *Armes et combats dans l'univers médiéval. Tome I*, Joris, A. (ed.), De Boeck, Bruxelles, p. 243–255.
- GAIER, C.**, 2002. "Les armes militaires au XIV^e siècle et au XV^e siècle", dans *L'homme armé en Europe XIV^e-XV^e siècle*, Contamine, P. & J.-P. Reverseau (eds.), Musée de l'Armée. Cahiers d'études et de recherches du Musée de l'Armée n°3, Paris, p. 23–35.
- GAIER, C.**, 2004. *Armes et combats dans l'univers médiéval. Tome II*, De Boeck, Bruxelles.
- GÁMBER, O.**, 1972. *Glossarium armorum. Arma defensiva*, Akademische Druck, Graz.
- GIRAULT, N.**, 2003. *Etude de l'armement défensif métallique à partir des fouilles archéologiques en France du nord du XIII^e au XVI^e siècles*. Mémoire de maîtrise, Université Paris I-Panthéon-Sorbonne.
- GIULIATO, G.**, 2001. "Frouard, Condé-sur-Moselle, Pompey : un réseau castral au confluent de la Meurthe et de la Moselle du XIII^e au XVII^e siècle", *Actes des congrès de la Société d'Archéologie Médiévale*, vol. 7, p. 223–231.
- GOLDSCHMIDT, V. M.**, 1937. "The principles of distribution of chemical elements in minerals and rocks. The seventh Hugo Müller, lecture delivered before the Chemical Society on March 17th

- 1937", *Journal of the Chemical Society*, p. 655–673.
- GOLL, M.**, 2013. *Iron document : Interdisciplinary studies on the technology of late medieval European plate armour production between 1350 and 1500*. Thèse de doctorat, Université de Heidelberg.
- GRAZZI, F., CIVITA, F., WILLIAMS, A.**, 2011. "Ancient and historic steel in Japan, India and Europe, a non invasive comparative study using thermal neutron diffraction", *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, vol. 400, p. 1493–1500.
- GRUMBACH, M.**, 1993. "Vieillissement des aciers", *Techniques de l'ingénieur*.
- HÄNSEL, H., GRABKE, H. J.**, 1986. "Grain boundary segregation of phosphorus and carbon in ferritic iron", *Scripta Metallurgica*, vol. 20, p. 1641–1644.
- HARDY, R.**, 2002. "L'archer anglais pendant la guerre de cent ans", dans *L'homme armé en Europe: XIVe siècle - XVIe siècle*, Contamine, P. & J.-P. Reverseau (eds.), Musée de l'Armée. Cahiers d'études et de recherches du Musée de l'Armée n°3, p. 251–264.
- HUMPHRIS, J., MARTINÓN-TORRES, M., REHREN, T., REID, A.**, 2009. "Variability in single smelting episodes – a pilot study using iron slag from Uganda", *Journal of Archaeological Science*, vol. 36, p. 359–369.
- LUNG, T., SCHMITT, J.-H.**, 2017. "Durcissement des aciers Aciers ferritiques, perlitiques, bainitiques et martensitiques", *Techniques de l'ingénieur*.
- IUPAC**, 1976. "Nomenclature, symbols units and their usage in spectrochemical analysis-II. Data interpretation", *Pure & Appl.Chem*, vol. 45, p. 99–103.
- JACQUES, P. J., FURNEMONT, Q., LANI, F., PARDOEN, T., DELANNAY, F.**, 2007. "Multiscale mechanics of TRIP-assisted multiphase steels: I. Characterization and mechanical testing", *Acta Materialia*, vol. 55, p. 3681–3693.
- JEANDEMANGE, S., CAILLAT, P., FRAUCIEL, M., PROUTEAU, R., WIETHOLD, J.**, 2011. "Une ferme seigneuriale (XIIIe-XVe S.) à Laquenexy Entre Deux Cours (Moselle)", *Revue Archéologique de l'Est*, vol. 60, p. 423–485.
- JUHIN, A.**, 2005. *Structure métallographique et comportement mécanique des tirants de fer du donjon du château de Vincennes*. Mémoire de M2, Université de Paris 6 Pierre et Marie Curie et Paris-

Sud 11.

- KOCH, J., VON BOHLEN, A., HERGENRODER, R., NIEMAX, K.,** 2004. "Particle size distributions and compositions of aerosols produced by near-IR femto- and nanosecond laser ablation of brass", *J. Anal. At. Spectrom.*, vol. 19, p. 267–272.
- KONTOGIANNIS, N. D.,** 2012. "Euripos-Negroponte-Egriboz:Material Culture and Historical Topography of Chalcis from Byzantium to the End of the Ottoman Rule", *Jahrbuch der Österreichischen Byzantinistik*, vol. 62, p. 29–56.
- KORPIUN, P., TIXADOR, A., DELASSUS, D., BOUCHAEREB, B., LARGILLIERE, J.-C., REVERSEAU, J.-P., LEDUC, A., GARÇON, A.-F., BONNET, C.,** 2010. *Dans l'atelier des Perdry maîtres fondeurs du roi d'Espagne à Valenciennes au XVIIe siècle fouilles archéologiques préventives de la rue d'En-Bas-l'Eau, Valenciennes*, (Korpiun, P., J.-P. Reverseau & J.-C. Largillière, Eds.), Service archéologique de Valenciennes, Deauville.
- L'HERITIER, M., JUHIN, A., DILLMANN, P., ARANDA, R., BENOIT, P.,** 2005. "Utilisation des alliages ferreux dans la construction monumentale du Moyen Age. État des lieux de l'avancée des études métallographiques et archéométriques.", *La Revue d'Archéométrie*, vol. 29, p. 117–132.
- L'HERITIER, M., DILLMANN, P.,** 2009. "Récupération et emploi du fer pour la construction des monuments de la période gothique", dans *Il Reimpiego In Architettura. Recupero, Trasformazione, Uso*, Bernard, J.-F., P. Bernardi, D. Esposito, P. Dillmann, L. Foulquier & R. Mancini (eds.), Ecole Française de Rome, Rome, p. 157–176.
- L'HÉRITIER, M., DILLMANN, P., AUMARD, S., FLUZIN, P.,** 2013. "Iron? Which iron? Methodologies for metallographic and slag inclusion studies applied to ferrous reinforcements from Auxerre Cathedral", dans *The world of iron*, Humphris, J. & T. Rehren (eds.), Archetype Publications, London, p. 409–420.
- L'HÉRITIER, M., GUILLOT, I., DILLMANN, P.,** 2019. "Microstructural Characterization and Mechanical Properties of Iron Reinforcements in Buildings from the Medieval and Modern Periods in France", *International Journal of Architectural Heritage*, p. 1–13.
- LACHAUD, F.,** 2002. "L'homme armé en Angleterre d'après les testaments et inventaires après décès de la première moitié du XIVe siècle", dans *L'homme armé en Europe: XIVe siècle - XVIe siècle*, Contamine, P. & J.-P. Reverseau (eds.), Musée de l'Armée. Cahiers d'études et de recherches du Musée de l'Armée n°3, p. 37–66.

- LACOMBE, P., 1868. *Les armes et les armures*, Hachette, Paris.
- LAFFITE, J.-D., 2014. "Rodemack (Moselle). Le Burg, la citadelle", *Archéologie Médiévale*, vol. 44, p. 303–304.
- LAKING, GUY, F., 1920. *A record of European armour and arms through seven centuries*, G. Bell and sons, ltd., London.
- LAVAIRE, N., 2001. *Etude des phénomènes à l'origine du vieillissement des aciers pour emballage à Ultra Bas Carbone (ULC) : Apport du Pouvoir ThermoElectrique à la caractérisation des états microstructuraux*. Thèse de doctorat, Institut des sciences appliquées de Lyon.
- LAZAR, T., MRVAR, P., LAMUT, M., FAJFAR, P., 2016. "Armour plates from Kozlov Rob-analyses of two unusual finds", *Materials and technology*, vol. 50, p. 767–773.
- LE ROUX, N., 2015. *Le crépuscule de la chevalerie noblesse et guerre au siècle de la Renaissance*, Champ Vallon, Ceyzérieu.
- LEBLANC, J.-C., 2002. *Sur l'identification de la chaîne opératoire de forgeage du fer antique, associée à l'archéométrie des battitures*. Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse.
- LEEVEY, S., 2006. "For show or safety?", *Arms & Armour*, vol. 3, p. 117–125.
- LEPROUX, G.-M., 2011. "les métiers de l'armure à Paris au XVIe siècle", dans *Sous l'égide de Mars, Armures des princes d'Europe*, Chaudun, N. (ed.), Musée de l'Armée, Paris, p. 44–61.
- LEROY, M., CASAROTTO, J.-T., MERLUZZO, P., FORRIERES, C., PLOQUIN, A., HAMON, B., 1994. "La sidérurgie ancienne en Lorraine et les conditions de l'utilisation du minerai oolithique lorrain en réduction directe. L'exemple de l'atelier de Frouard (Ve - VIe s.)", dans *La sidérurgie ancienne de l'Est de la France dans son contexte européen. Archéologie et archéométrie. Colloque de Besançon*, Mangin, M. (ed.), Les Belles Lettres, Paris, p. 34–41.
- LEROY, M., 1998. "Autour de la « minette » : la perdurance de la production de fer en bas-fourneau en Lorraine à la fin du Moyen Age", dans *L'innovation technique au Moyen Age. Actes du VIe Congrès international d'Archéologie médiévale*, Beck, P. (ed.), Errance, Paris, p. 145–150.
- LEROY, M., MERLUZZO, P., FLUZIN, P., LECLERE, D., AUBERT, M., PLOQUIN, A., 2000. "La restitution des savoir-faire pour comprendre un procédé technique : l'apport de l'expérimentation en

- archéologie du fer", dans *Arts du feu et productions artisanales. XXe Rencontres Internationales d'Archéologie et d'Histoire d'Antibes*, Pétrequin, P., P. Fluzin, J. Thiriot & P. Benoit (eds.), APDCA, Antibes, p. 37–51.
- LEROY, S.**, 2010. *Circulation au moyen âge des matériaux ferreux issus des Pyrénées ariégeoises et de la Lombardie. Apport du couplage des analyses en éléments traces et multivariées*. Thèse de doctorat, Université Technologie Belfort-Montbéliard.
- LEROY, S., SIMON, R., BERTRAND, L., WILLIAMS, A., FOY, E., DILLMANN, P.**, 2011. "First examination of slag inclusions in medieval armours by confocal SR- μ -XRF and LA-ICP-MS", *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, vol. 26, p. 1078–1087.
- LEROY, S., COHEN, S. X., VERNA, C., GRATUZE, B., TÉREYGEOL, F., FLUZIN, P., BERTRAND, L. E, DILLMANN, P.**, 2012. "The medieval iron market in Ariège (France). Multidisciplinary analytical approach and multivariate analyses", *Journal of Archaeological Science*, vol. 39, p. 1080–1093.
- LEROY, S., DILLMANN, P., DISSER, A., L'HERITIER, M., BAUVAIS, S., FLUZIN, P.**, 2014. "Provenance et circulation des alliages ferreux", dans *Circulation des matériaux et des objets dans les sociétés anciennes*, Dillmann, P. & L. Bellot-Gurlet (eds.), Editions des Archives Contemporaines, Paris, p. 79–108.
- LEROY, S., HENDRICKSON, M., BAUVAIS, S., VEGA, E., BLANCHET, T., DISSER, A., DELQUE-KOLIC, E.**, 2017. "The ties that bind: archaeometallurgical typology of architectural crampons as a method for reconstructing the iron economy of Angkor, Cambodia (tenth to thirteenth c.)", *Archaeological and Anthropological Sciences*, vol. 10, p. 2137–2157.
- LEYDI, S.**, 2003. "Les armuriers milanais dans la seconde moitié du XVIème siècle", dans *Parures triomphales : le maniérisme dans l'art de l'armure italienne*, 5 continents et Musées d'art et d'histoire de la ville de Genève, Milan et Genève, p. 25–46.
- LEYDI, S., GODOY, J.-A.**, 2003. "Parures triomphales : le maniérisme dans l'art de l'armure italienne", dans *Parures triomphales : le maniérisme dans l'art de l'armure italienne*, 5 continents et Musées d'art et d'histoire de la ville de Genève, Milan et Genève, p. 9–25.
- LHUISSIER, P., LASZCZYK, L.**, 2012. "Caractérisation des structures sandwich", *Techniques de l'ingénieur*.
- MAGNUSSON, G.**, 1985. "Lapphyttan. An example of medieval iron production", dans *Medieval Iron in*

- Society*, Björkenstam, N. & S. Fornander (eds.), Jernkontoret and Riksantikvarieämbetet, Stockholm, p. 184–225.
- MAMELI, P., MONGELLI, G., OGGIANO, G., ROVINA, D.**, 2014. "First Finding of Early Medieval Iron Slags in Sardinia (Italy): A Geochemical–Mineralogical Approach to Insights into Ore Provenance and Work Activity", *Archaeometry*, vol. 56, p. 406–430.
- MANDOSIO, J.**, 2011. "L'acier dans la minéralogie et l'alchimie médiévales", dans *L'acier en Europe avant Bessemer*, Dillmann, P., L. Pérez & C. Verna (eds.), CNRS-Université de Toulouse-Le Mirail, Toulouse, p. 95–109.
- MANGIN, M.**, 2004. *Le Fer*, (Mangin, M., Ed.), Errance, Paris.
- MANN, J. G.**, 1930. "The Sanctuary of the Madonna delle Grazie, with notes on the evolution of Italian armour during the fifteenth century", *Archaeologia*, vol. 80, p. 117–142.
- MANN, J. G.**, 1933. "Notes on the Armour worn in Spain from the tenth to the fifteenth century", *Archaeologia*, vol. 83, p. 285–305.
- MARIN, J.-Y.**, 1999. "Pour une archéologie de la guerre de cent ans", *L'Archéologue- Archéologie nouvelle*, vol. 42, p. 5.
- MARTINEAU, J., TOURNEUR, J., CORNEC, T., BARBIER, E., FAUCHERRE, N., SANZ PASCUAL, F., BOUMIER, F., LEBLANC, P., YVINEC, J.-H., SELLAMI, F.**, 2005. *Maillezais (Vendée), Abbaye Saint-Pierre : L'occupation du front ouest du Xe au XVIe siècles : Fouille programmée 2000, 2001, 2002 : rapport de fouilles* (SRA des Pays de la Loire, Ed.).
- MAUSS, M.**, 2012. *Techniques, technologie et civilisation*, (Schlanger, N., Ed.), Presse universitaires de France, Paris.
- MENANT, F.**, 1988. "La métallurgie Lombarde au Moyen Âge", dans *Hommes et travail du métal dans les villes médiévales*, Benoit, P. & D. Cailleaux (eds.), Association pour l'édition et la diffusion des études historiques, Paris, p. 127–161.
- MILISZKIEWICZ, N., WALAS, S., TOBIASZ, A.**, 2015. "Current approaches to calibration of LA-ICP-MS analysis", *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, vol. 30, p. 327–338.
- MILOT, J., POITRASSON, F., BARON, S., COUSTURES, M.-P.**, 2016. "Iron isotopes as a potential tool for ancient iron metals tracing", *Journal of Archaeological Science*, vol. 76, p. 9–20.

- MORENZONI, F.**, 2001. "Les produits sidérurgiques dans les comptes de péages de Saint-Maurice d'Agaune et de Villeneuve-Chillon (XIV^e-XV^e siècles)", dans *La sidérurgie alpine en Italie (XII^e - XVII^e siècle)*, Braustein, P. (ed.), École française de Rome, Rome, p. 481–497.
- MOUILLEBOUCHE, H.**, 2012. "Giuliano Gérard dir., Le "château de l'Avant-Garde" à Pompey. T. 1 : céramiques et verres du Moyen Âge et de la Renaissance", *Revue Archéologique de l'Est*, vol. 61, p. 408–409.
- MURRY, G.**, 1998. "Transformations dans les aciers", *Techniques de l'ingénieur*.
- OAKESHOTT, E.**, 1980. *European weapons and armour from the Renaissance to the industrial revolution*, Beinfeld publishing, North Hollywood.
- PAGÈS, G., DILLMANN, P., FLUZIN, P., LONG, L.**, 2011. "A study of the Roman iron bars of Saintes-Maries-de-la-Mer (Bouches-du-Rhône, France). A proposal for a comprehensive metallographic approach", *Journal of Archaeological Science*, vol. 38, p. 1234–1252.
- PAINSONNEAU, S.**, 2004. *Fabrication et commerce des armures l'armurerie tourangelles au XV^e siècle*, Association pour l'édition et la diffusion des études historiques, Paris.
- PESEZ, J.-M.**, 1995. "De l'archéologie et du vécu social", dans *Une école pour les sciences sociales : de la VI^e section à L'école des hautes études en sciences sociales*, Revel, J. & N. Wachtel (eds.), Cerf/ Ed. de l'Ecole des hautes études en sciences sociales, Paris.
- PESEZ, J.-M.**, 1997. *L'archéologie: mutations, missions, méthodes*, Nathan, Paris.
- PFAFFENBICHLER, M.**, 1992. *Armourers*, British Museum Press, Londres.
- PFAFFENBICHLER, M.**, 2002. "L'industrie de l'armement en Allemagne (XV^e-XVI^e siècles)", dans *L'homme armé en Europe XIV^e-XVI^e siècle*, Contamine, P. & J.-P. Reverseau (eds.), Cahiers d'études et de recherche du Musée de l'armée n°3. Musée de l'Armée, p. 265–278.
- PLEINER, R.**, 2000. *Iron in Archaeology The european bloomery smelters*, Archeologicky Ustav av Cr, Prague.
- PLEINER, R.**, 2006. *Iron in Archaeology. Early European Blacksmiths*, Archeologický ústav AV ČR, Prague.
- PRICE, B. R.**, 2000. *Techniques of Medieval Armour Reproduction*, Paladin Press, Boulder.

- PUSHKAREVA, I.**, 2009. *Évolution microstructurale d'un acier Dual Phase. Optimisation de la résistance à l'endommagement*. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine.
- PYHRR, S. W., GODOY, J.-A., LEYDI, S.**, 1998. *Heroic armor of the Italian Renaissance Filippo Negroli and his contemporaries*, (Pyhrr, S. W. & J.-A. Godoy, Eds.), Metropolitan Museum of Art, New York.
- QUERRIEN, A., BLANCHARD, J.**, 2004. "La résidence aristocratique de rurale de Montbaron : Structures et mobilier", *Archéologie médiévale*, vol. 34, p. 64–130.
- RAFFIN, A.**, 2015. *Le mobilier métallique médiéval en contexte d'habitat rural dans les Pays de la Loire (Ve - XVIe siècles)*. Mémoire de Master 2 - Recherche, Université de Nantes.
- REITZENSTEIN, ALEXANDER, F. VON**, 1959. "Die Ordnung der Nürnberger Plattner", *Waffen- und Kostümkunde*, p. 54–73.
- RENAUDEAU, O., REVERSEAU, J.-P.**, 2011. "Chefs-d'oeuvre sans signatures le décor en relief des armures françaises à la Renaissance", dans *Sous l'égide de Mars, Armures des princes d'Europe*, Chaudun, N. (ed.), Musée de l'Armée, Paris, p. 15–33.
- RENAUDEAU, O.**, 2011. "L'art des décors repoussés", dans *Sous l'égide de Mars, Armures des princes d'Europe*, Chaudun, N. (ed.), Musée de l'Armée, Paris, p. 366–369.
- RENAUDEAU, O.**, 2014. "L'armure et les armes du musée de l'Auditoire de Sainte-Suzanne", dans *Sainte-Suzanne: un territoire remarquable en Mayenne*, Davy, C. & N. Foisneau (eds.), Association 303 Arts Recherches et Créations, p. 157–165.
- RENAUDEAU, O.**, 2015. "Où l'Europe découvre que la guerre se gagne à pied : la révolution de l'infanterie", dans *D'Azincourt à Marignan chevaliers & bombardes, 1415-1515 exposition, Paris, musée de l'Armée, 7 octobre 2015-24 janvier 2016*, Bailleux, N. & J.-F. Colau (eds.), Gallimard Musée de l'armée de Paris, Paris, p. 40–47.
- REPEL, E.**, 2008. "Minorités et circulations techniques : la confection des armures à Tours (XVe-XVIe siècles)", *Documents pour l'histoire des techniques*, p. 24–31.
- REPEL, E.**, 2016. "Les armuriers à Tours de 1480 à 1520", dans *Art et société à Tours au début de la Renaissance actes du colloque "Tours 1500, art et société à Tours au début de la Renaissance"*, Boudon-Machuel, M. & P. Charron (eds.), Brepols, Turnhout, p. 185–194.

- REVERSEAU, J.-P., 2002. "Repenser l'armure", dans *L'homme armé en Europe XIVe-XVIe siècle*, Contamine, P. & J.-P. Reverseau (eds.), Cahiers d'études et de recherche du Musée de l'armée n°3. Musée de l'Armée, p. 127–139.
- REVERSEAU, J.-P., 1986. "Style et typologie des harnois ducaux selon les comptes de la fin du XIV siècle", *Publications du Centre Européen d'Etudes Bourguignonnes*, vol. 26, p. 7–13.
- REVERSEAU, J.-P., 1993. *Armes et armures des Montmorency : dossier-exposition, Paris, Musée de l'armée, Département Armes et armures, 18 juin-15 septembre 1993*, Musée de l'armée, Paris.
- REVERSEAU, J.-P., 1996. *Les armes et la vie*, (Dargaud, Ed.), Musée de l'Armée.
- REVERSEAU, J.-P., 2002. "Les sources écrites et figurées au regard de l'historien des armes anciennes", dans *L'homme armé en Europe XIVe-XVIe siècle*, Contamine, P. & J.-P. Reverseau (eds.), Cahiers d'études et de recherche du Musée de l'armée n°3. Musée de l'Armée, p. 17–22.
- REVERSEAU, J.-P., 2011. "L'armure en France au milieu du XVIe. siècle construction et décors", dans *Sous l'égide de Mars, Armures des princes d'Europe*, Chaudun, N. (ed.), Musée de l'Armée, Paris, p. 35–43.
- RIJKELIJKHUIZEN, M., VOLKEN, M., 2017. "A poor man's armour? Late-medieval leather armour from excavations in the Netherlands", dans *Leather in warfare: Attack, Defence and the Unexpected*, Mould, Q. (ed.), Royal Armouries Museum, Leeds, p. 57–77.
- ROBCIS, D., 1998. *Armes, armures et armuriers sous le principat de Jean sans Peur, 1404-1419, d'après les documents comptables*, Association pour l'Édition et la Diffusion des Etudes Historiques, Paris.
- SALVEMINI, F., GRAZZI, F., FEDRIGOL, A., WILLIAMS, A., CIVITA, F., SCHERILLO, A., VONTOBEL, P., HARTMANN, S., LEHMANN, E., ZOPPI, M., 2013. "Revealing the secrets of composite helmets of ancient Japanese tradition", *The European Physical Journal Plus*, vol. 128, p. 1–10.
- SCHNEIDER, J., 1952. "La ville de Metz aux XIIIe et XIVe siècles", *Revue belge de philologie et d'histoire*, p. 965–972.
- SCHWAB, R., HEGER, D., HÖPPNER, B., PERNICKA, E., 2006. "The provenance of iron artefacts from Manching: a multi-technique approach", *Archaeometry*, vol. 48, p. 433–452.

- SCLAFERT, T., 1926. "L'industrie du fer dans la région d'Allevard au Moyen Age", *Revue de Géographie Alpine*, vol. 14, p. 239–355.
- SERDON, V., 2005. *Armes du diable : Arcs et arbalètes au Moyen Âge*, Presses universitaires de Rennes, Rennes.
- SERNEELS, V., 1993. *Archéométrie des scories de fer. Recherches sur la sidérurgie ancienne en Suisse occidentale*, Cahiers d'Archéologie Romande, Lausanne.
- SERNEELS, V., 1998. "La chaîne opératoire de la sidérurgie ancienne", dans *Recherche sur l'économie du fer en Méditerranée nord-occidentale*, Feugère, M. & V. Serneels (eds.), Montagnac, p. 7–44.
- SERNEELS, V., 2002. "Apport des analyses chimiques à l'étude des vestiges sidérurgiques", dans *L'obtencio del ferro pel procedimento directe. Actes du 6e Congrès d'archéologie en Andorre*, Vila, A., O. Codina & J.-M. Bosch (eds.), Ministeri de Cultura, Andorre, p. 268–288.
- SERNEELS, V., 2011. "A propos de la qualité des fers produits par la méthode directe de réduction", dans *L'acier en Europe avant Bessemer*, Dillmann, P., L. Pérez & C. Verna (eds.), CNRS-Université de Toulouse-Le Mirail, Toulouse, p. 73–93.
- SMITH, R. D., BROWN, R. R., 1989. *Bombards, Mons Meg and her sisters*, Royal Armouries, Londres.
- SOSSON, J.-P., 1990. "Les métiers : norme et réalité. L'exemple des anciens Pays-Bas méridionaux aux XIVe et XVe siècles", dans *Le travail au Moyen Âge une approche interdisciplinaire actes du Colloque international de Louvain-La-Neuve, 21-23 mai 1987*, Hamesse, J. & C. Muraille-Samaran (eds.), Institut d'études médiévales, Louvain-La-Neuve, p. 440.
- SPRANDEL, R., 1968. *Das Eisengewerbe im Mittelalter*, A. Hiersemann, Stuttgart.
- STARLEY, D., 1999. "Determining the technological origins of iron and steel", *Journal of Archaeological Science*, vol. 26, p. 1127–1133.
- STEWART, J. W., CHARLES, J. A., WALLACH, E. R., 2000. "Iron–phosphorus–carbon system: Part 2 – Metallographic behaviour of Oberhoffer's reagent", *Materials Science and Technology*, vol. 16, p. 283–290.
- STEWART, J. W., CHARLES, J. A., WALLACHE, R., 2001. "Iron-Phosphorus-Carbon system part I -

- Mechanical properties of low carbon iron - phosphorus alloys", *Materials science and technology*, vol. 16, p. 275–282.
- STROMER, W. VON**, 1991. "Une clé du succès du commerce des maisons d'Allemagne du Sud : le grand commerce associé au Verlagssystem", *Revue historique*, vol. 285, p. 29–49.
- SWIETOSLAWSKI, W.**, 1998. "The development of shooting arms and defensive arms in medieval latin Europe", dans *L'innovation technique au Moyen Age. Actes du VIe Congrès de la société d'archéologie médiévale*, Dijon, Beck, P. (ed.), Errance, Paris, p. 281–282.
- TANGRI, D., WRIGHT, R.-V.-S.**, 1993. "Multivariate Analysis of Compositional data : Applied comparisons favour standard principal components analysis over Aitchison's Loglinear contrast method", *Archaeometry*, vol. 35, p. 103–112.
- TERJANIAN, P.**, 1995. "*Poliopolis*" la fabrication des armures à Strasbourg du XVIe au XVIIe siècle. Mémoire de DEA, Université de Metz.
- TERJANIAN, P.**, 1999. "Marchés et trafics d'armes à l'époque confessionnelle. Notes sur le commerce des munitions de guerre de Strasbourg, 1520-1648", *Revue d'Alsace*, vol. 125, p. 39–58.
- TERJANIAN, P.**, 2005. "The Armourers of Cologne: Organization and export markets of a foremost European armour-making center (1391-1660)", *Journal of the Armour Research Society*, vol. 1, p. 23–48.
- THORDEMAN, B.**, 2001. *Armour from the Battle of Wisby, 1361*, Chivalry Bookshelf, Stockholm.
- TOUREILLE, V.**, 2015. "D'Azincourt à Marignan", dans *D'Azincourt à Marignan chevaliers & bombardes, 1415-1515*, Bailleux, N. & J.-F. Colau (eds.), Gallimard Musée de l'armée de Paris, Paris, p. 17–29.
- TREUE, W., KELLERMANN, R., KLEMM, F., SCHNEIDER, K., STROMER, W. VON, WISSNER, A., ZIRNBAUER, H.**, 1965. *Das Hausbuch der Mendelschen Zwölfbrüderstiftung zu Nürnberg - Deutsche Handwerksbilder des 15. und 16. Jahrhunderts*, (Treue, W., Ed.), Bruckmann, München.
- TYLECOTE, F., THOMSEN, R.**, 1973. "The segregation and surface enrichment of Arsenic and Phosphorus in early iron artifacts", *Archaeometry*, vol. 15, p. 193–198.
- VAN DEN BOOGAART, K. G., TOLOSANA-DELGADO, R.**, 2013. *Analyzing Compositional Data with R*, Springer, Berlin, Heidelberg.

- VEGA, E., DILLMANN, P., FLUZIN, P., 2002. "Contribution à l'étude du fer phosphoreux en sidérurgie ancienne", *La Revue d'Archéométrie*, vol. 26, p. 197–208.
- VERCHERE, D., 2011. "Structures sandwich acier/polymère/acier", *Techniques de l'ingénieur*.
- VERNA, C., BENOIT, P., 1990. "La sidérurgie de Clairvaux au Moyen Âge (XIIe - XVe siècles)", dans *Actes du Colloque, Histoire de Clairvaux*, Bar sur Aube, p. 85–111.
- VERNA, C., 1995. *Les mines et les forges des Cisterciens en Champagne méridionale et en Bourgogne du Nord*, A.E.D.E.H.-Vulcain, Paris.
- VERNA, C., 2000. "Réduction du fer et innovation : à propos de quelques débats en histoire sociale des techniques", *Médiévales*, vol. 39, p. 79–95.
- VERNA, C., 2001a. *Le temps des moulins: Fer, technique et société dans les Pyrénées centrales, XIIIe-XVIe siècles*, Publications de la Sorbonne, Paris.
- VERNA, C., 2001b. "Forgerons de village : quelques témoignages Béarnais des XIVe et XVe siècles", dans *L'artisan au village dans l'Europe médiévale et moderne. Actes des XIXèmes journées internationales d'Histoire de l'abbaye de Flaran*, Mousnier, M. (ed.), Presse Universitaires du Mirail, Toulouse, p. 219–238.
- VERNA, C., 2017. *L'industrie au village (Arles-sur-Tech, XIVe et XVe siècles)*, Les Belles Lettres, Paris.
- VIDAL, A., 1906. *Douze comptes consulaires d'Albi du XIVe siècle*, A.Picard-E.Privat-Imprimerie Nouguiès, Paris-Toulouse-Albi.
- VIOLLET-LE-DUC, E.-E., 1854. *Dictionnaire raisonné de l'architecture française du XIe au XVe siècle*, Bance, Paris.
- VIOLLET-LE-DUC, E. E., 1873. *Dictionnaire raisonné du mobilier français de l'époque carlovingienne à la Renaissance*, Gründ et Maguet, Paris.
- WILLIAMS, A., 1991. "Slag inclusions in armour", *The Journal of the Historical Metallurgy Society*, vol. 24, p. 69–80.
- WILLIAMS, A., DE REUCK, A., 1995. *The Royal Armoury at Greenwich, 1515-1649 a history of its technology*, Trustees of the Royal Armouries, London.
- WILLIAMS, A., 2003. *The knight and the blast furnace: a history of the metallurgy of armour in Middle*

Ages and the Early Modern period, Brill, London.

WILLIAMS, A., 2012. *The Sword and the Crucible: A History of the Metallurgy of European Swords Up to the 16th Century*, Brill, Leiden- Boston-Mass.

Table des figures

FIGURE 1 - A GAUCHE BRIGANDINE, A DROITE SALADE. D'APRES (E. E. VIOLLET-LE-DUC, 1873).....	12
FIGURE 2 - ARMURE DE COMBAT DE CLAUDE DE VAUDREY, REALISEE VERS 1495, TRAVAIL MILANAIS (HOFJAGD- UND RÜSTKAMMER, VIENNE)	12
FIGURE 3 - ARMURE DE WILHELM VON ROGGENDORF. D'APRES (W. BOEHEIM, 1890)	13
FIGURE 4- PORTRAIT D'UN ARMURIER. ISSU DE « DIE HAUSBUCH DER MENDELSCHEN ZWÖLFBRÜDERSTIFUNG » MENDEL II, 29 R. (W. TREUE ET AL., 1965)	17
FIGURE 5 - DEUX EXEMPLES DE MODELISATION D'UN PHENOMENE S'EXPRIMANT DE FAÇON BIMODALE : A GAUCHE DROITE DE REGRESSION « CLASSIQUE » (FONCTION AFFINE) ; A DROITE, MODELISATION « IDEALE » DU PHENOMENE. D'APRES (A. DISSER, 2014, P. 212)	46
FIGURE 6 - EXEMPLE DE STRUCTURE DE TREMPÉ HÉTÉROGÈNE (PERLITE NODULAIRE, MARTENSITE ET BAINITE) (S. LEROY, 2010) MICROGRAPHIE OBTENUES APRES ATTAQUE AU REACTIF NITAL 3%	55
FIGURE 7 - DIAGRAMME CCT (CONTINUOUS COOLING TRANSFORMATION DIAGRAM) POUR UN ACIER A 0,4% DE CARBONE. L'ACIER A ICI ÉTÉ CHAUFFÉ À 900°C PUIS REFROIDI À DIFFÉRENTES VITESSES. UNE VITESSE TRÈS RAPIDE EST REQUISE POUR OBTENIR DE LA MARTENSITE, À UNE VITESSE PLUS MODÉRÉE PLUSIEURS PHASES PEUVENT SE FORMER À LA FOIS FERRITE, PERLITE ET MARTENSITE. À UNE VITESSE FAIBLE UNIQUEMENT DE PERLITE ET DE LA FERRITE SONT FORMÉES. DIAGRAMME ISSU DE (V. F. BUCHWALD, 2005, P. 157)	55
FIGURE 8 - EXEMPLE DE STRUCTURE DE WIDMANSTÄTTEN (A. DISSER, 2014) AVEC FERRITE ACICULAIRE. MICROGRAPHIE OBTENUE APRES ATTAQUE AU REACTIF NITAL 3%	56
FIGURE 9- LOCALISATION DES PRINCIPAUX CENTRES DE PRODUCTION ÉVOQUÉS DANS CETTE PARTIE.....	60
FIGURE 10- EXPORTATIONS MILANAISES AU XV ^e SIÈCLE. D'APRES F. MENANT (F. MENANT, 1988, P. 134)	61
FIGURE 11- RÉPARTITION DES TYPES DE MARQUES RELEVÉES POUR LES ÉLÉMENTS ALLEMANDS ET ITALIENS. GRAPHIQUE BASE SUR LES DONNÉES DE (N. DUPRAS, 2012, P. 281)	75
FIGURE 12- RÉPARTITION DES MARQUES OBSERVÉES POUR LES DÉFENSES DE JAMBE. GRAPHIQUE BASE SUR LES DONNÉES DE N. DUPRAS (N. DUPRAS, 2012, P. 281)	75
FIGURE 13 - RÉPARTITION DES MARQUES RELEVÉES SUR LES REPLIS DES DÉFENSES DE TÊTE ÉTUDIÉES. D'APRES LES DONNÉES DE (N. DUPRAS, 2012, P. 284).....	76
FIGURE 14 -TENEUR EN CARBONE SUR LE CORPUS GLOBAL. A : TENEUR MOYENNE EN CARBONE DONNÉE PAR A. WILLIAMS SUR 564 ÉCHANTILLONS. B : CLASSIFICATION DES ÉCHANTILLONS SELON LEUR TENEUR EN CARBONE. GRAPHIQUE RÉALISÉ D'APRES LES RÉSULTATS D'A. WILLIAMS.....	81
FIGURE 15 - DISTRIBUTION DES TRAITEMENTS THERMIQUES SUR L'ENSEMBLE DU CORPUS (A) ET EN FONCTION DE LA PÉRIODE D'ÉTUDE (B) D'APRES LES ÉTUDES DE A. WILLIAMS « A » AIR COOLED, H : « HARDENED », « T » « ATTEMPTED-HARDENING ».....	86
FIGURE 16 - DISTRIBUTION DE LA MICRODURETÉ VICKERS MESURÉE AVEC UNE MASSE DE 100G, EN FONCTION DU TAUX DE CARBONE ET DU TRAITEMENT THERMIQUE RELEVÉS PAR A. WILLIAMS « I » : IRON, « L » : LOW CARBON STEEL, « M » : MEDIUM CARBON STEEL. EN POINTILLE VALEURS ATTENDUES POUR DES ALLIAGES HOMOGÈNES (V. F. BUCHWALD, 2005, P. 67). « A » AIR COOLED, H : « HARDENED », « T » « ATTEMPTED-HARDENING »	87

FIGURE 17 - EVOLUTION DES PROCEDES DE TREMPES MIS EN JEU POUR LES ECHANTILLONS ETUDIES EN FONCTION DE LA PERIODE, D'APRES LES DONNEES DE A. WILLIAMS. « A » AIR COOLED, H : « HARDENED », « T » « ATTEMPTED-HARDENING »	89
FIGURE 18 - EVOLUTION DE LA TENEUR EN CARBONE (CATEGORIES I « IRON », L « LOW CARBON STEEL », M « MEDIUM CARBON STEEL) DES ECHANTILLONS ETUDIES DANS LES VILLES DE PRODUCTION ALLEMANDES POUR LES XVe ET XVIe SIECLES. D'APRES LES RESULTATS D'A. WILLIAMS.....	91
FIGURE 19 - EVOLUTION DES PROCEDES DE TREMPES MIS EN JEU POUR LES ECHANTILLONS ETUDIES DANS LES VILLES DE PRODUCTION ALLEMANDES. D'APRES LES RESULTATS D'A. WILLIAMS. « A » AIR COOLED, H : « HARDENED », « T » « ATTEMPTED- HARDENING »	91
FIGURE 20- COMPARAISON DES COMPOSITIONS EN ELEMENTS SUSCEPTIBLES D'ETRE POLLUES DANS LES CENDRES DE CHARBONS DE BOIS ET LES MINERAIS LOMBARDS. TENEURS EXPRIMEES SOIT EN %, SOIT EN PPM. ZONE HACHUREE : VARIATION DE COMPOSITION DES CHARBONS DE BOIS DE LA LITTERATURE RECENSEE PAR S. LEROY. CARRES GRIS : MINERAIS ANALYSES PAR S. LEROY. TIRE DE (S. LEROY, 2010, p. 204)	108
FIGURE 21-COMPOTEMENTS DE CERTAINS ELEMENTS CHIMIQUES PRESENTS DANS LES MINERAIS DE FER LORS DE LA REDUCTION PAR LA FILIERE DIRECTE D'APRES (A. DISSER, 2014, p. 198)	109
FIGURE 22- LOCALISATION DES MINES DE FER ET DES SITES ARCHEOLOGIQUES ECHANTILLONNES POUR CARACTERISER LA SIGNATURE CHIMIQUE DE LA LOMBARDIE D'APRES (S. LEROY, 2010, p. 173)	110
FIGURE 23- TYPE D'ECHANTILLON RETENUS DANS LE CAS DE LA LOMBARDIE D'APRES (S. LEROY, 2010, p. 224)	110
FIGURE 24- CAH EFFECTUEE SUR LES DONNEES DE L'ACP EN PRENANT 90% DE LA VARIANCE TOTALE. INDIVIDUS SURLIGNES EN ORANGE CORRESPONDENT AUX AGRAFES ETUDIEES D'APRES (A. DISSER, 2014, p. 442).....	114
FIGURE 25- REPRESENTATION SYNTHETIQUE DES RESULTATS DE LA REGRESSION LOGISTIQUE : CONFRONTATION DE L'ENSEMBLE MINETTE (ROUGE) AU RESTE DU CORPUS DE REFERENCE (BLEU). LES BARRES VERTICALES REPRESENTENT LE PLACEMENT DES AGRAFES PAR RAPPORT AU MODELE. D'APRES (A. DISSER, 2014, p. 443).....	115
FIGURE 26- RESULTATS DE LA CAH EFFECTUEE SUR LES DONNEES DE L'ACP. EN ORANGE FONCE INCLUSIONS RELATIVES AUX AGRAFES. D'APRES (A. DISSER, 2014, p. 446).....	116
FIGURE 27- AFD REALISEE SUR LES LOG-RATIO DES DONNEES DE L'ARIEGE, LE DAUPHINE, LA LOMBARDIE ET LA MONTAGNE NOIRE ET DES FERS DU PALAIS DES PAPES D'AVIGNON. D'APRES (S. LEROY, 2010)	117
FIGURE 28 - PROJECTIONS SUR L'AXE DISCRIMINANT LD1 DES DONNEES DE L'ARIEGE ET DE CELLES DE L'ECHANTILLON Ec2. D'APRES (S. LEROY, 2010)	118
FIGURE 29- ABAQUE DE COMPATIBILITE POUR L'ESPACE ARIEGEOIS. D'APRES (S. LEROY, 2010).....	118
FIGURE 30- ABAQUE DE COMPATIBILITE POUR LA LOMBARDIE. D'APRES (S. LEROY, 2010).....	119
FIGURE 31 - VISUALISATION DES TROIS PREMIERES COMPOSANTES DE L'ACP REALISEE SUR LES DONNEES DE L'ESPACE LOMBARD ET L'ENSEMBLE MINETTE DEFINIS PAR S. LEROY ET A. DISSER. LE SYMBOLE « NQ » (« NON QUANTIFIE ») EST ATTRIBUE AUX INDIVIDUS QUI PRESENTENT AU MOINS UNE VALEUR EN DESSOUS DES LIMITES DE DETECTION POUR LES VARIABLES SELECTIONNEES	122
FIGURE 32 - VISUALISATION DES TROIS PREMIERES COMPOSANTES DE L'ACP REDUITE REALISEE SUR LES DONNEES DE L'ESPACE LOMBARD ET L'ENSEMBLE MINETTE DEFINIS PAR S. LEROY ET A. DISSER. LE SIGLE « NQ » (« NON QUANTIFIE ») EST ATTRIBUE AUX INDIVIDUS QUI PRESENTENT AU MOINS UNE VALEUR EN DESSOUS DES LIMITES DE DETECTION POUR LES VARIABLES SELECTIONNEES	124

FIGURE 33 - AFD REALISEE SUR LES DONNEES DE L'ESPACE LOMBARDE (EN GRIS) ET L'ENSEMBLE MINETTE (EN ROUGE) DEFINIS PAR S. LEROY ET A. DISSER.	125
FIGURE 34 - PROPORTION DE PIECES ISSUES DE CONTEXTES ARCHEOLOGIQUES PAR RAPPORT AUX OBJETS DE MUSEES	134
FIGURE 35 -EXEMPLE DE POSITIONNEMENT D'UN PRELEVEMENT EFFECTUE SUR UNE SALADE DU MUSEE DE L'ARMEE. A DROITE, PRELEVEMENT RESULTANT (CLICHE E. BERARD)	136
FIGURE 36 - REALISATION D'UN PRELEVEMENT PAR LE RESTAURATEUR JOSE FERREIRA (MUSEE DE L'ARMEE) (CLICHE E. BERARD)..	137
FIGURE 37- PLAQUES DE BROIGNE OU D'ARMURES ISSUES DU SITE DE MONTBARON. (CLICHE E. BERARD).....	140
FIGURE 38 - ARMURE DE SAINTE SUZANNE (CLICHE E. BERARD)	149
FIGURE 39 - LIEU DE FABRICATION SUPPOSES DES PIECES D'ARMURES ARTICULES DU XVI ^E SIECLE	151
FIGURE 40 - HARNOIS ET BARDE DE CHEVAL DE L'ARMURE G40 (MUSEE DE L'ARMEE) (CLICHE E. BERARD)	156
FIGURE 41 - ARMURE DE FRANÇOIS DE MONTMORENCY (CLICHE E. BERARD)	158
FIGURE 42 -TYPOLOGIES IDENTIFIEES DANS LE CAS DES PLASTRONS. (CLICHE E. BERARD)	162
FIGURE 43- TYPOLOGIES IDENTIFIEES DANS LE CAS DES DOSSIERES (CLICHE E. VEGA)	163
FIGURE 44 - POSITION DES GRANDEURS RELEVES SUR LES PLASTRONS EN HAUT, EN BAS SUR LES DOSSIERES	164
FIGURE 45 -RESULTATS DE L'ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES EFFECTUEE SUR LES DONNEES DES PLASTRONS. AXES PC1/PC2	165
FIGURE 46 - CLASSIFICATION ASCENDANTE HIERARCHIQUE EFFECTUEE SUR LES DONNEES DE L'ACP POUR LES PLASTRONS	165
FIGURE 47 - « A » TAILLES DEFINIES POUR LES PLASTRONS SELON LE DEMI-TOUR DE TAILLE. « B » REPARTITION DES TYPOLOGIES DE PLASTRONS POUR CHAQUE TAILLE	166
FIGURE 48 - RESULTATS DE L'ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES EFFECTUEE SUR LES DONNEES LES DOSSIERES. AXES PC1/PC2	166
FIGURE 49 - CLASSIFICATION ASCENDANTE HIERARCHIQUE EFFECTUEES SUR LES DONNEES DE L'ACP POUR LES DOSSIERES	167
FIGURE 50 - « A » TAILLES DEFINIES POUR LES DOSSIERES SELON LE DEMI-TOUR DE TAILLE. « B » REPARTITION DES TYPOLOGIES DE DOSSIERES POUR CHAQUE TAILLE	167
FIGURE 51-TYPES D'ELEMENTS D'ARMURES ETUDIES.....	169
FIGURE 52 - DISTRIBUTION DE LA DATATION DES PIECES PAR SIECLE ET DE LEUR LIEU DE FABRICATION SUPPOSE.....	169
FIGURE 53 - DEMARCHE ANALYTIQUE.....	173
FIGURE 54 -EXEMPLE D'ANALYSE METALLOGRAPHIQUE APRES ATTAQUE AU REACTIF NITAL 3% SUR L'ECHANTILLON 34820434. ON DISTINGUE NETTEMENT DIFFERENTES ZONES CARBUREES	176
FIGURE 55 - EXEMPLE D'ANALYSE METALLOGRAPHIQUE APRES ATTAQUE AU REACTIF OBERHOFFER SUR L'ECHANTILLON 34820434 LA MICROGRAPHIE 1 MET EN EVIDENCE DES « STRUCTURES FANTOMES » TEMOINS DE LA PRESENCE DE PHOSPHORE EN SOLUTION SOLIDE. LES LIGNES BLANCHES SUR LA MICROGRAPHIE 2 POURRAIENT CORRESPONDRE A DES LIGNES DE SOUDURE	177
FIGURE 56 - EXEMPLE DE DEFINITION DES DIFFERENTES ZONES CARBUREES DE L'ECHANTILLON 34820434 A L'AIDE DU LOGICIEL ILLUSTRATOR	179
FIGURE 57 - EXEMPLE DE PROFILS REALISES SUR L'ECHANTILLON G436_ECH2	181
FIGURE 58 - EXEMPLE DE LIGNE DE PROFIL REALISE SUR L'ECHANTILLON 3_COLLETIN, OBSERVE EN ELECTRON RETRODIFFUSE. EN ROUGE REPERAGE DES POINTES EFFECTUES	182

FIGURE 59 - EXEMPLE DE DETECTION D'INCLUSION. A GAUCHE IMAGE EN ELECTRON RETRODIFFUSEE. A DROITE RESULTAT DE L'ANALYSE D'IMAGE POUR LA DETECTION DES INCLUSIONS (LES MESURES VONT ETRE MENEES UNIQUEMENT SUR LES PIXELS ROUGES).....	184
FIGURE 60 - ILLUSTRATION DE LA DIFFERENCE D'INTERACTION AVEC LA MATIERE POUR LES DEUX LASERS. A GAUCHE ABLATION EFFECTUEE AU CEB AVEC UN LASER NANOSECONDE SUR UNE INCLUSION, A DROITE A L'IPREM AVEC UN LASER FEMTOSECONDE. ON PEUT OBSERVER UNE ABLATION A 2 LOBES DANS LE CAS DE L'IPREM REPRESENTANT UN DEFECT D'HOMOGENEITE DU FAISCEAU UV AU MOMENT DES ANALYSES (CECI N'AFECTANT QUE LA RESOLUTION SPATIALE)	189
FIGURE 61 - EXEMPLE DE PROFIL OBTENU POUR UNE INCLUSION DONNEE DE TAILLE INFERIEURE A 30µm AU CEB.....	191
FIGURE 62 - COMPARAISON DES MESURES PAR LA-ICP-MS EFFECTUEES AU CEB ET A L'IPREM SUR DES INCLUSIONS NON METALLIQUES. LES POINTS NOIRS CORRESPONDENT AUX MESURES REALISEES AVEC LE MEME ETALON INTERNE (AL27). LES POINTS ROUGES CORRESPONDENT AUX MESURES REALISEES AVEC UN ETALON INTERNE DIFFERENT (AL27 A L'IPREM ET SI28 AU CEB). LA PLAGE GRISEE CORRESPOND A PLUS OU MOINS 5 % D'ERREUR RELATIVE. « SI » : STANDARD INTERNE.....	196
FIGURE 63- « A » EXEMPLE DE STRUCTURE HOMOGENE, (ECHANTILLON G42_ECH2), « B » EXEMPLE DE STRUCTURE HETEROGENE (ECHANTILLON 9_DOSSIERE). MICROGRAPHIES OBSERVEES APRES ATTAQUE AU REACTIF NITAL 3%	201
FIGURE 64 - « A » DISTRIBUTION DE LA TENEUR MOYENNE EN CARBONE PONDEREE PAR LA SURFACE CALCULEE SUR L'ENSEMBLE DES ECHANTILLONS, « B » ECART-TYPE CALCULE SUR CETTE TENEUR MOYENNE	201
FIGURE 65 - EXEMPLE DE STRUCTURE EN BANDE ASSOCIANT UNE BANDE DE FERRITIQUE A UNE BANDE D'ACIER MOYENNEMENT CARBURE (ECHANTILLON G93-2OU3_ECH2). MICROGRAPHIE OBSERVEE APRES ATTAQUE AU REACTIF NITAL (3%)	203
FIGURE 66 - « A » MICROGRAPHIE APRES ATTAQUE AU REACTIF NITAL 3% DE L'ECHANTILLON 8_DOSSIERE DE L'ARMURE DE FRANÇOIS DE MONTMORENCY, ILLUSTRANT LA CATEGORIE DE TAILLE DE GRAIN FAIBLE (<50µm). « B » MICROGRAPHIE APRES ATTAQUE AU REACTIF NITAL 3% DE L'ECHANTILLON LAM46521 ILLUSTRANT LA CATEGORIE DE TAILLE DE GRAIN MOYENNE COMPRISE ENTRE [50-200µm]. « C » MICROGRAPHIE APRES ATTAQUE AU REACTIF NITAL 3% DE L'ECHANTILLON LAQ_348214425 ILLUSTRANT LA CATEGORIE DE TAILLE DE GRAIN ELEVEE SUPERIEURE A 200µm.....	204
FIGURE 67 - DISTRIBUTION DES CATEGORIES DE TAILLES DE GRAIN DEFINIES.....	205
FIGURE 68- EXEMPLE D'INCLUSION SUR L'ECHANTILLON RX14_EN_ECH2.....	205
FIGURE 69- PROPETE INCLUSIONNAIRE (%) CALCULEE POUR L'ENSEMBLE DES ECHANTILLONS DU CORPUS.	206
FIGURE 70 - « A » : EXEMPLE D'INCLUSION D'APPARENCE MONOPHASEE. « B » : EXEMPLE D'INCLUSION POLYPHASEE CONSTITUEE D'UNE MATRICE SILICATEE ET DE WÜSTITE.....	206
FIGURE 71 - EXEMPLE DE STRUCTURES FANTOMES MISES EN EVIDENCE SUR L'ECHANTILLON 430AG444 A L'AIDE DU REACTIF OBERHOFFER.....	207
FIGURE 72 - DISTRIBUTION DE LA TENEUR EN PHOSPHORE POUR LES FERS PHOSPHOREUX (ECHANTILLONS OU DES STRUCTURES FANTOMES OU DES INCLUSIONS FORTEMENT CHARGES EN PHOSPHORE ONT ETE RELEVES)	208
FIGURE 73 - STRUCTURE EN BANDE ASSOCIANT UNE BANDE DE FER PHOSPHOREUX A UNE BANDE ACIEREE (ECHANTILLON H26). MICROGRAPHIE OBSERVEE APRES ATTAQUE AU REACTIF OBERHOFFER.....	209
FIGURE 74 - « A » : STRUCTURE ECROUIE D'UN METAL FERRITIQUE (MICROGRAPHIE DE L'ECHANTILLON 771 OBTENUE APRES ATTAQUE NITAL 3%), « B » STRUCTURE ECROUIE D'UN METAL ACIERE (%C>0,6) (MICROGRAPHIE DE L'ECHANTILLON STS_10 OBTENUE APRES ATTAQUE NITAL 3%).....	210

FIGURE 75 - DISTRIBUTION DE LA TENEUR EN CARBONE PONDEREE PAR LA SURFACE DES ECHANTILLONS PRESENTANT UNE STRUCTURE ECRUIE	211
FIGURE 76 - « A » EXEMPLE DE PERLITE LAMELLAIRE (MICROGRAPHIE DE L'ECHANTILLON 9_DOSSIERE DE L'ARMURE DE FRANÇOIS DE MONTMORENCY APRES ATTAQUE AU REACTIF NITAL 3%), « B » EXEMPLE DE PERLITE EN COURS DE GLOBULISATION (MICROGRAPHIE DE L'ECHANTILLON G436_ECH3 APRES ATTAQUE AU REACTIF NITAL 3%), « C » : EXEMPLE DE PERLITE GLOBULAIRE (MICROGRAPHIE DE L'ECHANTILLON G436_ECH3 APRES ATTAQUE AU REACTIF NITAL 3%)	212
FIGURE 77 - DETAIL DE LA MICROSTRUCTURE DE L'ECHANTILLON 951180-1.....	213
FIGURE 78 - « A » MICROGRAPHIE DE L'ECHANTILLON G436_ECH2 APRES ATTAQUE AU REACTIF NITAL 3%. « B » DETAIL DE LA MICROSTRUCTURE DE L'ECHANTILLON G436_ECH2 PRESENTANT UNE STRUCTURE DE TREMPER HOMOGENE (MARTENSITE ET BAINITE). « C » MICROGRAPHIE DE L'ECHANTILLON G436_ECH1 APRES ATTAQUE AU REACTIF NITAL 3%. « D » DETAIL DE LA MICROSTRUCTURE DE L'ECHANTILLON G436_ECH1, PRESENTANT DES PHASES TYPQUES DE TREMPER (MARTENSITE ET BAINITE) DANS UNE MATRICE DE FERRITE. « E » MICROGRAPHIE DE L'ECHANTILLON LAM46491_1 APRES ATTAQUE AU REACTIF NITAL 3%. « F » DETAIL DE LA MICROSTRUCTURE DE L'ECHANTILLON LAM46491_1 PRESENTANT DIFFERENTES STRUCTURES : MARTENSITE, BAINITE ET PERLITE NODULAIRE. : « G » MICROGRAPHIE DE L'ECHANTILLON 895413_1 APRES ATTAQUE AU REACTIF NITAL 3%. « H » DETAIL DE LA MICROSTRUCTURE DE L'ECHANTILLON 895413_1 PRESENTANT DIFFERENTES STRUCTURES : MARTENSITE, BAINITE ET PERLITE NODULAIRE.....	215
FIGURE 79 - « A » : MICROGRAPHIE DE L'ECHANTILLON K229A APRES ATTAQUE AU REACTIF NITAL 3%. « B » DETAIL DE LA STRUCTURE.	216
FIGURE 80 - « A » MICROGRAPHIE DE L'ECHANTILLON STS_6 APRES ATTAQUE AU REACTIF NITAL 3% METTANT EN EVIDENCE UN GRADIENT DE TENEUR EN CARBONE QUI S'ETEND SUR L'ENSEMBLE DE LA SURFACE DE L'ECHANTILLON. « B » DETAIL.	217
FIGURE 81 - MICROGRAPHIE DE L'ECHANTILLON HPO717 APRES ATTAQUE AU REACTIF NITAL 3% PRESENTANT UNE STRUCTURE DE WIDMANSTÄTTEN	217
FIGURE 82- TRAITEMENTS THERMIQUES OU MECANQUES APPLIQUES SUR LES ECHANTILLONS. CATEGORIE « A » ECHANTILLONS QUI N'ONT PAS REÇU DE TRAITEMENT PARTICULIER, CATEGORIE « T » ECHANTILLONS TREMPES. « E » : STRUCTURES ECRUIES, « CP » CHAUFFE ET MAINTIEN EN TEMPERATURE PROLONGEE. « GRAD » : POSSIBLE CEMENTATION.....	220
FIGURE 83 - PROFIL DE MICRODURETE OBSERVE SUR UNE COUPE TRANSVERSALE DE L'ECHANTILLON G93_2_OU_3_ECH2. MICROGRAPHIE OBSERVEE APRES ATTAQUE AU REACTIF NITAL 3%.....	220
FIGURE 84- « A » : DISTRIBUTION DE LA DURETE MOYENNE SUR L'ENSEMBLE DES ECHANTILLONS DU CORPUS. EN ROUGE POINTILLE VALEUR MOYENNE. « B » : ÉCART-TYPE DE DURETE	221
FIGURE 85 - DISTRIBUTION DE L'ÉCART-TYPE DE DURETE, DETAILS	222
FIGURE 86 -TAUX MOYEN DE CARBONE PONDERE PAR LA SURFACE EN FONCTION DE LA DURETE MOYENNE. LES TRAITES EN POINTILLES MATERIALISENT L'INTERVALLE DES VALEURS ATTENDUES DEFINI PAR V. F. BUCHWALD POUR DES STRUCTURES A L'EQUILIBRE (V. F. BUCHWALD, 2005, P.67).....	223
FIGURE 87 -TAUX MOYEN DE CARBONE PONDERE PAR LA SURFACE EN FONCTION DE LA DURETE MOYENNE POUR CHAQUE CATEGORIE DE TRAITEMENT THERMIQUE OU MECANIQUE DEFINIE. CATEGORIE « T » ECHANTILLONS TREMPES. CATEGORIE « FP » : FER PHOSPHOREUX « E » POUR STRUCTURES ECRUIES, « CP » POUR CHAUFFE ET MAINTIEN PROLONGE EN TEMPERATURE. LES TRAITES EN POINTILLES MATERIALISENT L'INTERVALLE DES VALEURS ATTENDUES DEFINI PAR V. F. BUCHWALD POUR DES STRUCTURES A L'EQUILIBRE (V. F. BUCHWALD, 2005, P.67).....	225

FIGURE 88 - INFLUENCE DE LA TAILLE DE GRAIN SUR LA DURETE DU METAL DES ECHANTILLONS DES CATEGORIES CP ET A.....	226
FIGURE 89 - DISTRIBUTION DE LA DURETE MOYENNE POUR LES ECHANTILLONS A FAIBLE TAUX DE CARBONE (%C* < 0,1%MASS)	227
FIGURE 90 - MICROSTRUCTURE DE L'ECHANTILLON STS_7	229
FIGURE 91 - « A » IMAGE HAUTE RESOLUTION OBTENUE A L'AIDE D'UN MICROSCOPE ELECTRONIQUE A TRANSMISSION, « B » IMAGE FILTREE.....	230
FIGURE 92 - DISTRIBUTION DE LA TENEUR MOYENNE EN CARBONE DES ECHANTILLONS PONDEREE PAR LA SURFACE POUR LES SITES DE MAILLEZAIS, LAQUENEXY ET MONTBARON	232
FIGURE 93- STRUCTURE EN BANDE ASSOCIANT UNE BANDE DE FERRITIQUE A UNE BANDE D'ACIER MOYENNEMENT CARBURE (ECHANTILLON LAQ_34820_434).	234
FIGURE 94 - MICROGRAPHIE OBSERVEE APRES ATTAQUE AU REACTIF NITAL 3%. ECHANTILLON N°1 Z8B3-LAM46518	235
FIGURE 95 - DISTRIBUTION DE LA PROPRETE INCLUSIONNAIRE (%) POUR LES ECHANTILLONS DE MAILLEZAIS, LAQUENEXY ET MONTBARON. EN ROUGE VALEUR MOYENNE	235
FIGURE 96 - DISTRIBUTION DE LA DURETE MOYENNE SUR LES ECHANTILLONS DES SITES DE MAILLEZAIS, LAQUENEXY ET MONTBARON.	236
FIGURE 97 - TAUX MOYEN DE CARBONE PONDERE PAR LA SURFACE EN FONCTION DE LA MICRODURETE. « T » ECHANTILLONS TREMPES, « E » : STRUCTURES ECROUIES, « FP » FER PHOSPHOREUX (%MASSP > 0,1 DANS LE METAL). « CP » : CHAUFFE ET MAINTIEN EN TEMPERATURE PROLONGE. « A » AUCUNE SPECIFICITE RELEVÉE. LES TRAITS EN POINTILLES MATERIALISENT L'ETENDUE DES VALEURS DE TENEUR EN CARBONE POSSIBLE POUR LES ECHANTILLONS TREMPES.	237
FIGURE 98 - DISTRIBUTION DE LA TENEUR EN CARBONE DES ECHANTILLONS ISSUS DES PIECES D'ARMURES ARTICULEES EN FONCTION DE LA PROVENANCE SUPPOSEE DES OBJETS ; « T » ECHANTILLONS TREMPES. « E » : STRUCTURES ECROUIES, CATEGORIE « FP » FER PHOSPHOREUX (%MASSP > 0,1 DANS LE METAL), « CP » : CHAUFFE ET MAINTIEN PROLONGE EN TEMPERATURE. « A » AUCUNE SPECIFICITE RELEVÉE. EN NOIR POINTILLE : VALEUR MOYENNE DE DURETE. EN BLEU POINTILLE ETENDUE POSSIBLE DE LA TENEUR EN CARBONE POUR LES ECHANTILLONS TREMPES.....	239
FIGURE 99 - HISTOGRAMME DES STRUCTURES EN BANDES OBSERVEES EN FONCTION DU LIEU DE FABRICATION SUPPOSE DES PIECES	239
FIGURE 100 - DISTRIBUTION DE LA TENEUR EN CARBONE DES ECHANTILLONS ISSUS DES PIECES D'ARMURES ARTICULEES SUPPOSEES DE FABRICATION ALLEMANDE EN FONCTION DE LA DURETE MOYENNE « T » ECHANTILLONS TREMPES. « E » : STRUCTURES ECROUIES, CATEGORIE « FP » FER PHOSPHOREUX (%MASSP > 0,1 DANS LE METAL), « CP » : CHAUFFE ET MAINTIEN PROLONGE EN TEMPERATURE. « A » AUCUNE SPECIFICITE RELEVÉE. EN NOIR POINTILLE : VALEUR MOYENNE DE DURETE. EN BLEU POINTILLE ETENDUE POSSIBLE DE LA TENEUR EN CARBONE POUR LES ECHANTILLONS TREMPES	240
FIGURE 101 - DISTRIBUTION DE LA TENEUR EN CARBONE DES ECHANTILLONS ISSUS DES PIECES D'ARMURES ARTICULEES EN FONCTION DE LA DURETE MOYENNE; « T » ECHANTILLONS TREMPES. « E » : STRUCTURES ECROUIES, CATEGORIE « FP » FER PHOSPHOREUX (%MASSP > 0,1 DANS LE METAL), « CP » : CHAUFFE ET MAINTIEN PROLONGE EN TEMPERATURE. « A » AUCUNE SPECIFICITE RELEVÉE. EN NOIR POINTILLE : VALEUR MOYENNE DE DURETE. EN BLEU POINTILLE ETENDUE POSSIBLE DE LA TENEUR EN CARBONE POUR LES ECHANTILLONS TREMPES	243
FIGURE 102 - HISTOGRAMME DES STRUCTURES EN BANDES OBSERVEES EN FONCTION DU TYPE DE PIECE	243
FIGURE 103 - MICROGRAPHIES DE LA CERVELIERE DE L'ARMURE DE SAINTE SUZANNE (ECHANTILLON STS_1) OBSERVEE APRES ATTAQUE AU REACTIF NITAL 3%. MICROGRAPHIE DE LA CERVELIERE DE L'ARMURE DE SAINTE SUZANNE (ECHANTILLON STS_9)	

OBSERVEE APRES ATTAQUE AU REACTIF OBERHOFFER. EN ROUGE PROFIL DE MICRODURETE (A GAUCHE MASSE=200G, A DROITE MASSE =20G).....	245
FIGURE 104 - MICROGRAPHIES DE LA CUBITIERE (ECHANTILLON STS_2), DE L'EPAULIERE DROITE (ECHANTILLON STS_7), MICROGRAPHIE DE L'ARRIERE BRAS (ECHANTILLON STS_8) DE L'ARMURE DE SAINTE SUZANNE OBSERVEES APRES ATTAQUE AU REACTIF NITAL 3%. EN ROUGE PROFIL DE MICRODURETE (MASSE =200G)	245
FIGURE 105 - MICROGRAPHIES DE LA DOSSIERE (ECHANTILLON STS_4), DE L'AUTRE EXTREMITÉ DE LA DOSSIERE (ECHANTILLON STS_6), ET DU CENTRE DE LA DOSSIERE (ECHANTILLON STS_11) DE L'ARMURE DE SAINTE SUZANNE OBSERVEES APRES ATTAQUE AU REACTIF NITAL 3%. EN ROUGE PROFIL DE MICRODURETE (MASSE =200G).....	246
FIGURE 106 - MICROGRAPHIES DU PLASTRON (ECHANTILLON STS_3), DE L'EPAULIERE GAUCHE (ECHANTILLON STS_5), MICROGRAPHIE D'UNE LAME DE BRACONNIERE (ECHANTILLON STS_10) DE L'ARMURE DE SAINTE SUZANNE OBSERVEES APRES ATTAQUE AU REACTIF NITAL 3%. EN ROUGE PROFIL DE MICRODURETE (MASSE =200G)	247
FIGURE 107 - MICROGRAPHIES D'UN ECHANTILLON ISSU DE L'ARMET DE L'ARMURE DE FRANÇOIS DE MONTMORENCY (ECH 1 : 1_CASQUE), D'UN ECHANTILLON ISSU DE D'UNE LAME DU COLLETIN (ECH 15 : 15_COLLETIN), DE DEUX ECHANTILLONS ISSUS D'UNE AUTRE LAME DU COLLETIN (ECH4A ET ECH4B : 4_COLLETIN_A ET 4_COLLETIN_B) D'UNE AUTRE LAME DU COLLETIN (ECH 3 : 3_COLLETIN) OBSERVEES APRES ATTAQUE AU REACTIF NITAL 3%. EN ROUGE PROFIL DE MICRODURETE (MASSE =200G)	249
FIGURE 108- MICROGRAPHIE D'UN ECHANTILLON ISSU DE L'EPAULIERE GAUCHE (ECH 10 : 10_EPAULIERE), MICROGRAPHIE D'UN ECHANTILLON ISSU DE L'ARRIERE-BRAS GAUCHE (ECH 11 : 11_EPAULIERE), MICROGRAPHIE D'UN AUTRE ECHANTILLON ISSU DE DU CANON D'AVANT-BRAS GAUCHE (ECH 12 : 12_CUBITIERE), MICROGRAPHIE D'UN ECHANTILLON ISSU DU GANTELET GAUCHE (ECH2 : 2_GANTELET) OBSERVEES APRES ATTAQUE AU REACTIF NITAL 3%. EN ROUGE PROFIL DE MICRODURETE (MASSE =200G)	250
FIGURE 109 - MICROGRAPHIES D'UN ECHANTILLON ISSU DE LA DOSSIERE DE L'ARMURE DE FRANÇOIS DE MONTMORENCY (ECH8 : 8_DOSSIERE), D'UN AUTRE ECHANTILLON ISSU DE LA DOSSIERE (ECH9 : 9_DOSSIERE), OBSERVEES APRES ATTAQUE AU REACTIF NITAL 3%. EN ROUGE PROFIL DE MICRODURETE (MASSE =200G).....	250
FIGURE 110 - MICROGRAPHIES DES ECHANTILLONS ISSUS DES TASSETTES GAUCHE (ECH 5 : 5_TASSETTE), (ECH6 : 6_TASSETTE), (ECH7, 7_TASSETTE) ET DROITE (ECH13 : 13_TASSETTE), (ECH14 : 14_TASSETTE) DE L'ARMURE DE FRANÇOIS DE MONTMORENCY OBSERVEES APRES ATTAQUE AU REACTIF NITAL 3%. EN ROUGE PROFIL DE MICRODURETE (MASSE =200G).....	251
FIGURE 111 - MICROGRAPHIES DES ECHANTILLONS G435-D1 ET G435-D2 DU CUISSARD DROIT ISSU DE L'ATELIER DE VALENTIN SIEBENBÜRGER, OBSERVEES APRES ATTAQUE AU REACTIF NITAL 3%	252
FIGURE 112 - MICROGRAPHIES DES ECHANTILLONS G435_ECH1, G435_ECH2, G435_G3, G435_G4, ET G435_G5 DU CUISSARD GAUCHE DE LA PAIRE G435 ISSU DE L'ATELIER DE VALENTIN SIEBENBÜRGER, OBSERVEES APRES ATTAQUE AU REACTIF NITAL 3%	253
FIGURE 113 - MICROGRAPHIES DES ECHANTILLONS G436_D1, G436_D2, G436_D3, G436_D4, ET G436_D5 DU CUISSARD DROIT DE LA PAIRE G436 ISSU DE L'ATELIER DE VALENTIN SIEBENBÜRGER, OBSERVEES APRES ATTAQUE AU REACTIF NITAL 3%	254
FIGURE 114 -MICROGRAPHIES DES ECHANTILLONS G436_ECH1, G436_ECH2, G436_ECH3, G436_G4, G436_G5 ET G436_G6 DU CUISSARD GAUCHE DE LA PAIRE G436 ISSU DE L'ATELIER DE VALENTIN SIEBENBÜRGER, OBSERVEES APRES ATTAQUE AU REACTIF NITAL 3%.....	255

FIGURE 115 - « A » DISTRIBUTION DE LA DURETE MOYENNE POUR LES ECHANTILLONS DES CUISSARDS G436 ET G435, EN ROUGE POINTILLE VALEUR MOYENNE. « B » DISTRIBUTION DE LA PROPRETE INCLUSIONNAIRE POUR LES CUISSARDS G436 ET G435	255
FIGURE 116 - « A » DISTRIBUTION DE LA TENEUR MOYENNE EN CARBONE PONDERE PAR LA SURFACE DES ECHANTILLONS DES ARMURES DE VALENCIENNES	258
FIGURE 117 - MICROGRAPHIES DES ECHANTILLONS 3-4 REVELANT UNE STRUCTURE EN BANDE.	258
FIGURE 118 -DISTRIBUTION DE LA PROPRETE INCLUSIONNAIRE (%) POUR LES ECHANTILLONS DE VALENCIENNES. EN ROUGE VALEUR MOYENNE	259
FIGURE 119 - DISTRIBUTION DE LA DURETE MOYENNE SUR LES ECHANTILLONS DES SITES DE VALENCIENNES. CATEGORIE « FP » FER PHOSPHOREUX. « A » POUR AUCUNE SPECIFICITE RELEVÉE. EN POINTILLE VALEUR MOYENNE	259
FIGURE 120 - RESULTAT DU TRAITEMENT MULTIVARIE SUR L'ECHANTILLON H26 EFFECTUE SUR LES DONNEES TRANSFORMEES EN LOG RATIO DES ELEMENTS MAJEURS. « A » DENDROGRAMME 4 GROUPES ONT ETE SELECTIONNES. « B » VISUALISATION DES 4 GROUPES SUR LA PCA. LA FAMILLE 2 SE DISTINGUE CHIMIQUEMENT DE LA FAMILLE 1. LES FAMILLES 3 ET 4 SONT ASSOCIEES A DES AJOUTS. « C » REPARTITION DES FAMILLES D'INCLUSIONS SUR L'ECHANTILLON.	265
FIGURE 121 - BIVARIES Mn/P POUR LES ECHANTILLONS DES GROUPES « ALLEMAGNE », « ITALIE » ET « FRANCE ». CHAQUE POINT REPRESENTE LA TENEUR MOYENNE PONDEREE PAR LA SURFACE DE CHAQUE ECHANTILLON.....	271
FIGURE 122 - BIVARIES Mn/P POUR LES ECHANTILLONS DU GROUPE « ALLEMAGNE ». CHAQUE POINT REPRESENTE LA TENEUR MOYENNE PONDEREE PAR LA SURFACE DE CHAQUE ECHANTILLON	272
FIGURE 123 - SYNTHESE DES RESULTATS DE L'ACP REALISEE SUR LES DONNEES DES ELEMENTS D'ARMURES SUPPOSES DE FABRICATION ALLEMANDE, ITALIENNE ET FRANÇAISE. « A » AXES PC1 ET PC2, « B » AXES PC1 ET PC3, « C » AXES PC1 ET PC4. CHAQUE POINT REPRESENTE UNE INCLUSION ANALYSEE.	274
FIGURE 124 - SYNTHESE DES RESULTATS DE L'ACP REALISEE SUR LES DONNEES DES ELEMENTS D'ARMURES SUPPOSES DE FACTURE ITALIENNE. « A » AXES PC1 ET PC2, « B » AXES PC1 ET PC3. CHAQUE POINT REPRESENTE UNE INCLUSION ANALYSEE.	275
FIGURE 125 - VISUALISATION DES PROJECTIONS DE L'ACP REALISEES SUR LES DONNEES DES ELEMENTS D'ARMURE SUPPOSES DE FABRICATION ITALIENNE SUR LES COMPOSANTES PC1ET PC2. CHAQUE POINT REPRESENTE UNE INCLUSION ANALYSEE.....	277
FIGURE 126-ACP REALISEE SUR LES DONNEES DES ELEMENTS D'ARMURE SUPPOSES DE PROVENANCE ALLEMANDE ET POUR LESQUELS PLUSIEURS PRELEVEMENTS ONT ETE REALISES. « A » AXES PC1 ET PC2, « B » AXES PC1 ET PC3. CHAQUE POINT REPRESENTE UNE INCLUSION ANALYSEE.	279
FIGURE 127 - VISUALISATION DES PROJECTIONS DE L'ACP REALISEES SUR LES DONNEES DES ELEMENTS D'ARMURE SUPPOSES DE PROVENANCE ALLEMANDE SUR LES COMPOSANTES PC1ET PC2. CHAQUE POINT REPRESENTE UNE INCLUSION ANALYSEE.....	283
FIGURE 128 -PROJECTION DES FAMILLES D'INCLUSIONS SUR LES ECHANTILLONS G436_ECH1 ET G436_ECH2 APRES ATTAQUE AU REACTIF NITAL 3%.....	283
FIGURE 129 - VISUALISATION DES PROJECTIONS DE L'ACP REALISEES SUR LES DONNEES DES ELEMENTS D'ARMURES SUPPOSES DE PROVENANCE ALLEMANDE EN FONCTION DES VILLES DE FABRICATION SUR LES COMPOSANTES PC1/PC2 « A » ET PC1/PC3 « B ». CHAQUE POINT REPRESENTE UNE INCLUSION ANALYSEE	284
FIGURE 130 - VISUALISATION DES PROJECTIONS DE L'ACP REALISEES SUR LES DONNEES DES ELEMENTS D'ARMURE SUPPOSES DE PROVENANCE ALLEMANDE EN FONCTION DE LA PRESENCE OU L'ABSENCE DE POINÇON SUR LES COMPOSANTES PC1/PC2 « A » ET PC1/PC3 « B ». CHAQUE POINT REPRESENTE UNE INCLUSION ANALYSEE.....	285

FIGURE 131 - SYNTHÈSE DES RESULTATS DE L'ACP REALISEE SUR L'ENSEMBLE DES ELEMENTS D'ARMURES SUPPOSES DE PROVENANCE FRANÇAISE. « A » AXES PC1 ET « B » PC2, AXES PC1 ET PC3.....	286
FIGURE 132 - SYNTHÈSE DES RESULTATS DE L'ACP REALISEE SUR LES DONNEES DES ELEMENTS D'ARMURES SUPPOSES DE PROVENANCES ALLEMANDES ET ITALIENNES SUR LES COMPOSANTES PC1/PC2	287
FIGURE 133 - SYNTHÈSE DES RESULTATS DE L'ACP REALISEE SUR LES DONNEES DES ELEMENTS D'ARMURES SUPPOSES DE PROVENANCES ALLEMANDES ET ITALIENNES SUR LES COMPOSANTES PC1/PC3	288
FIGURE 134 - SYNTHÈSE DES RESULTATS DE L'ACP REALISEE SUR LES DONNEES DES ELEMENTS D'ARMURES SUPPOSES DE PROVENANCES ALLEMANDES ET ITALIENNES SUR LES COMPOSANTES PC1/PC4	288
FIGURE 135 - SYNTHÈSE DES RESULTATS DE L'ACP REALISEE SUR LES DONNEES DES ELEMENTS D'ARMURES SUPPOSES DE PROVENANCES ALLEMANDES FRANÇAISES ET ITALIENNES SUR LES COMPOSANTES PC1/PC2	289
FIGURE 136 - SYNTHÈSE DES RESULTATS DE L'ACP REALISEE SUR LES DONNEES DES ELEMENTS D'ARMURES SUPPOSES DE PROVENANCES ALLEMANDES FRANÇAISES ET ITALIENNES SUR LES COMPOSANTES PC1/PC3	289
FIGURE 137 - SYNTHÈSE DES RESULTATS DE L'ACP REALISEE SUR LES DONNEES DES ELEMENTS D'ARMURES SUPPOSES DE PROVENANCES ALLEMANDES FRANÇAISES ET ITALIENNES SUR LES COMPOSANTES PC1/PC4	290
FIGURE 138 - SYNTHÈSE DES RESULTATS DE L'ACP REALISEE SUR LES DONNEES DES ELEMENTS D'ARMURES SUPPOSES DE PROVENANCES FRANÇAISES ET CELLES APPARTENANT AU GROUPE « ITALIE_GROUPE1 » SUR LES COMPOSANTES PC1/PC2	290
FIGURE 139 - SYNTHÈSE DES RESULTATS DE L'ACP REALISEE SUR LES DONNEES DES ELEMENTS D'ARMURES SUPPOSES DE PROVENANCES FRANÇAISES ET CELLES APPARTENANT AU GROUPE « ITALIE_GROUPE1 » SUR LES COMPOSANTES PC1/PC3	291
FIGURE 140 - SYNTHÈSE DES RESULTATS DE L'ACP REALISEE SUR LES DONNEES DES ELEMENTS D'ARMURES SUPPOSES DE PROVENANCES FRANÇAISES ET CELLES APPARTENANT AU GROUPE « ITALIE_GROUPE1 » SUR LES COMPOSANTES PC1/PC4	291
FIGURE 141 - SYNTHÈSE DES RESULTATS DE L'ACP REALISEE SUR LES DONNEES DES ELEMENTS D'ARMURES SUPPOSES DE PROVENANCES FRANÇAISES ET CELLES APPARTENANT AU GROUPE ALLEMAGNE_GROUPE1 SUR LES COMPOSANTES PC1/PC2.....	292
FIGURE 142 - SYNTHÈSE DES RESULTATS DE L'ACP REALISEE SUR LES DONNEES DES ELEMENTS D'ARMURES SUPPOSES DE PROVENANCES FRANÇAISES ET CELLES APPARTENANT AU GROUPE ALLEMAGNE_GROUPE1 SUR LES COMPOSANTES PC1/PC3.....	292
FIGURE 143 - SYNTHÈSE DES RESULTATS DE L'ACP REALISEE SUR LES DONNEES DES ELEMENTS D'ARMURES SUPPOSES DE PROVENANCES FRANÇAISES ET CELLES APPARTENANT AU GROUPE ALLEMAGNE_GROUPE1 SUR LES COMPOSANTES PC1/PC4.....	293
FIGURE 144 - VISUALISATION DES PROJECTIONS DES ECHANTILLONS G27618_ECH1 ET G27618_ECH2 SUR LES COMPOSANTES PC1 ET PC2 DE L'ACP EFFECTUEE SUR LES DONNEES DES ELEMENTS D'ARMURES SUPPOSES DE PROVENANCES ALLEMANDES ET ITALIENNES.....	294
FIGURE 145 - RESULTATS DE L'ACP EFFECTUEE SUR LES ELEMENTS D'ARMURES SUPPOSES DE PROVENANCE ITALIENNES, ALLEMANDE ET ESPAGNOLE (HPO618). AXES PC1 ET PC2.....	294
FIGURE 146 - RESULTATS DE L'ACP EFFECTUEE SUR LES ELEMENTS D'ARMURES SUPPOSES DE PROVENANCE ITALIENNES, ALLEMANDE ET ESPAGNOLE (HPO618). AXES PC1 ET PC3.....	295
FIGURE 147 - DISTRIBUTION DES TENEURS MOYENNES PONDEREES PAR LA SURFACE EN MANGANESE ET EN PHOSPHORE POUR LES ARMURES ITALIENNES SELON LES GROUPES ETABLIS.	297
FIGURE 148 - SYNTHÈSE DES RESULTATS DE L'ACP REALISEE SUR LES DONNEES DE L'ESPACE LOMBARDE DEFINI PAR (S. LEROY, 2010) ET SUR LES ECHANTILLONS D'ARMURES SUPPOSEES D'ORIGINE ITALIENNE. AXES PC1 ET PC2	298

FIGURE 149 - SYNTHÈSE DES RESULTATS DE L'ACP REALISEE SUR LES DONNEES DE L'ESPACE LOMBARD DEFINI PAR (S. LEROY, 2010) ET SUR LES ECHANTILLONS D'ARMURES SUPPOSEES D'ORIGINE ITALIENNE. AXES PC1 ET PC3	299
FIGURE 150 - SYNTHÈSE DES RESULTATS DE L'ACP REALISEE SUR LES DONNEES DE L'ESPACE LOMBARD DEFINI PAR (S. LEROY, 2010) ET SUR LES ECHANTILLONS D'ARMURES SUPPOSEES D'ORIGINE ITALIENNE. AXES PC1 ET PC4.....	299
FIGURE 151 - « A » SYNTHÈSE DES RESULTATS DE L'AFD COMPARANT LES DONNEES DU GROUPE « ITALIE_GROUPE1 » A CELLES DE L'ESPACE LOMBARD DEFINI PAR (S. LEROY, 2010), « B » SYNTHÈSE DES RESULTATS DE L'AFD COMPARANT LES DONNEES DE L'ECHANTILLON 9301895-2 A CELLES DE L'ESPACE LOMBARD. « C » SYNTHÈSE DES RESULTATS DE L'AFD COMPARANT LES DONNEES DE L'ECHANTILLON 951183 A CELLES DE L'ESPACE LOMBARD. « D » SYNTHÈSE DES RESULTATS DE L'AFD COMPARANT LES DONNEES DE L'ECHANTILLON H35 A CELLES DE L'ESPACE LOMBARD.	300
FIGURE 152 - DISTRIBUTION DE LA TENEUR MOYENNE PONDEREE PAR LA SURFACE EN PHOSPHORE DANS LES ECHANTILLONS D'ARMURES ETUDIES. ECHANTILLONS APPARTENANT AU GROUPE « ITALIE_GROUPE1 » EXCLUS	302
FIGURE 153 - SYNTHÈSE DES RESULTATS DE L'ACP REALISEE SUR LES DONNEES DE L'ESPACE MINETTE DEFINI PAR A. DISSER ET SUR LES ECHANTILLONS 348.214.425 34818.411.1 ET 34820.434.1. « A » AXES PC1/PC2 ET « B » AXES PC1/PC3.....	303
FIGURE 154 - SYNTHÈSE DES RESULTATS DE L'ACP REALISEE SUR LES DONNEES DE L'ESPACE MINETTE DEFINI PAR A. DISSER ET SUR L'ECHANTILLON 34820 434 1. « A » AXES PC1/PC2 ET « B » AXES PC1/PC3	304
FIGURE 155 - SYNTHÈSE DES RESULTATS DE L'ACP REALISEE SUR LES DONNEES DE L'ESPACE MINETTE DEFINI PAR A. DISSER ET SUR L'ECHANTILLON 348 214 425	305
FIGURE 156 - RESULTAT DU TRAITEMENT MULTIVARIE SUR L'ECHANTILLON STS6. « A » DENDROGRAMME 3 GROUPES ONT ETE SELECTIONNES. « B » VISUALISATION DES 3 GROUPES SUR LA PCA. LES FAMILLES 2 ET 3 SE DISTINGUENT CHIMIQUEMENT ET SPATIALEMENT DE LA FAMILLE 1. « C » REPARTITION DES FAMILLES D'INCLUSIONS SUR L'ECHANTILLON.....	308
FIGURE 157 - RESULTAT DU TRAITEMENT MULTIVARIE SUR L'ECHANTILLON STS9. « A » DENDROGRAMME 3 GROUPES ONT ETE SELECTIONNES. « B » VISUALISATION DES 3 GROUPES SUR LA PCA. LES FAMILLES 1 ET 3 PRESENTES MAJORITAIREMENT DANS LES ZONES RICHES EN PHOSPHORE SE DISTINGUENT CHIMIQUEMENT ET SPATIALEMENT DE LA FAMILLE 2. « C » REPARTITION DES FAMILLES D'INCLUSIONS SUR L'ECHANTILLON.....	308
FIGURE 158 - DISTRIBUTION DES TENEURS MOYENNES PONDEREES PAR LA SURFACE EN MANGANESE ET EN PHOSPHORE POUR LES ELEMENTS DE L'ARMURE DE SAINTE SUZANNE	309
FIGURE 159 - SYNTHÈSE DES RESULTATS DE L'ACP REALISEE SUR LES DONNEES TRANSFORMEES EN LOG RATIO DES ELEMENTS TRACES DES ECHANTILLONS DE L'ARMURE DE SAINTE SUZANNE. « A » AXES PC1 ET PC2, « B » AXES PC1 ET PC3	310
FIGURE 160 - ACP REALISEE SUR LES DONNEES TRANSFORMEES EN LOG RATIO DES ELEMENTS TRACES DES ELEMENTS D'ARMURE DE SAINTE SUZANNE ET SUR CELLE DU GROUPE « ITALIE_GROUPE1 ». « A » AXES PC1 ET PC2, « B » AXES PC1 ET PC3	311
FIGURE 161- RESULTAT DU TRAITEMENT MULTIVARIE SUR L'ECHANTILLON 13. « A » DENDROGRAMME 4 GROUPES ONT ETE SELECTIONNES. « B » VISUALISATION DES 4 GROUPES SUR LA PCA. LES FAMILLES 1 ET 2 SE DISTINGUENT CHIMIQUEMENT ET SPATIALEMENT. LES FAMILLES 3 ET 4 DE TAILLE PLUS FAIBLE ET PLUS DISPERSEES ONT ETE ELIMINEES. « C » REPARTITION DES FAMILLES D'INCLUSIONS SUR L'ECHANTILLON.....	313
FIGURE 162 - DISTRIBUTION DES TENEURS MOYENNES PONDEREES PAR LA SURFACE EN MANGANESE ET EN PHOSPHORE POUR LES ELEMENTS DE L'ARMURE DE FRANÇOIS DE MONTMORENCY	314
FIGURE 163 - SYNTHÈSE DES RESULTATS DE L'ACP REALISEE SUR LES DONNEES TRANSFORMEES EN LOG RATIO DES ELEMENTS TRACES DES ECHANTILLONS DE L'ARMURE DE FRANÇOIS DE MONTMORENCY.....	316

FIGURE 164 - SYNTHESE DES RESULTATS DE L'ACP REALISEE SUR LES DONNEES TRANSFORMEES EN LOG RATIO DES ELEMENTS TRACES DES ECHANTILLONS DE L'ARMURE DE FRANÇOIS DE MONTMORENCY ET SUR CELLES DES ARMURES DU GROUPE « ITALIE_GROUPE1 ». « A » AXES PC1 ET PC2, « B » AXES PC1 ET PC3	317
FIGURE 165 - PROCEDE DE REDUCTION DETERMINE POUR L'ENSEMBLE DES ECHANTILLONS DU CORPUS. « DIRECT » PROCEDE DIRECT, « INDIRECT » PROCEDE INDIRECT, « IND » PROCEDE INDETERMINE, « PM », PRESENCE DES DEUX PROCEDES AU SEIN DE L'ECHANTILLON DANS DES FAMILLES D'INCLUSIONS DIFFERENTES.....	321
FIGURE 166 - OCCURRENCES DES DEUX PROCEDES EN FONCTION DU TAUX DE CARBONE. « FP » FER PHOSPHOREUX (%MASSP>0,1 DANS LE METAL).....	322
FIGURE 167 - DISTRIBUTION DES PROCEDES DE REDUCTION DIRECTE ET INDIRECTE EN FONCTION DU SIECLE CONSIDERE	323
FIGURE 168 - PROCEDE DE REDUCTION : RESULTATS GENERAUX SUR LES PIECES ALLEMANDES. CHAQUE POINT REPRESENTA UN ECHANTILLON D'ARMURE ETUDIE. LES MARGES D'ERREURS ASSOCIEES AUX DATATIONS DES PIECES ONT ETE AJOUTEES. LES ECHANTILLONS ACCOLES VERTICALEMENT FONT PARTIE DE LA MEME PIECE	324
FIGURE 169 - PROCEDE DE REDUCTION : RESULTATS GENERAUX SUR LES PIECES ISSUES DE NUREMBERG. CHAQUE POINT REPRESENTA UN ELEMENT D'ARMURE ETUDIE. LES MARGES D'ERREURS ASSOCIEES AUX DATATIONS DES PIECES ONT ETE AJOUTEES. UN LABEL « MARQUE » A ETE AJOUTE POUR LES ELEMENTS PORTEURS D'UNE MARQUE DE LA VILLE OU DE L'ARMURIER.....	325
FIGURE 170- PROCEDE DE REDUCTION : RESULTATS GENERAUX SUR LES PIECES ITALIENNES. CHAQUE POINT REPRESENTA UN ECHANTILLON D'ARMURE ETUDIE. LES MARGES D'ERREURS ASSOCIEES AUX DATATIONS DES PIECES ONT ETE AJOUTEES. LES ECHANTILLONS ACCOLES VERTICALEMENT SONT ISSUS DE LA MEME PIECE	326
FIGURE 171- PROCEDE DE REDUCTION : RESULTATS GENERAUX SUR LES PIECES FRANÇAISES. CHAQUE POINT REPRESENTA UN ECHANTILLON D'ARMURE ETUDIE. LES MARGES D'ERREURS ASSOCIEES AUX DATATIONS DES PIECES ONT ETE AJOUTEES. LES ECHANTILLONS ACCOLES VERTICALEMENT SONT ISSUS DE LA MEME PIECE	327
FIGURE 172 - PART D'ECHANTILLONS OCCUPEE PAR CHACUNE DES CATEGORIES DEFINIES. LES ALLIAGES TREMPES ONT ETE EXCLUS DE CE CLASSEMENT PUISQUE LEUR TENEUR EN CARBONE N'A PAS ETE ESTIMEE	330
FIGURE 173 - MICROGRAPHIE DE L'ECHANTILLON G436_ECH1 APRES ATTAQUE AU REACTIF NITAL 3%.....	334
FIGURE 174 - SCHEMA DU DIAGRAMME Fe-C ILLUSTRANT LE DOMAINE BIPHASE DE L'AUSTENITE ET DE LA FERRITE UTILISE POUR FORMER LES ACIER DUAL PHASE, D'APRES (I. PUSHKAREVA, 2009).....	334
FIGURE 175- DISTRIBUTION DE LA DURETE MOYENNE POUR CHACUNE DES CATEGORIES DEFINIES EN FONCTION DE LA NATURE DU METAL. EN GRISE, INTERVALLE DES VALEURS ATTENDUES DEFINI PAR V. F. BUCHWALD POUR DES STRUCTURES A L'EQUILIBRE (V. F. BUCHWALD, 2005, P.67).....	335
FIGURE 176 - DISTRIBUTION DE LA PROPRETE INCLUSIONNAIRE EN FONCTION DE LA NATURE DU METAL. LES VALEURS MOYENNES SONT REPRESENTEES PAR LES LOSANGES BLEUS	338
FIGURE 177 - DISTRIBUTION DE LA DURETE MOYENNE EN FONCTION DES TRAITEMENTS THERMIQUES ET MECANQUES ASSOCIES. « T » ECHANTILLONS TREMPES. ; « T » ECHANTILLONS TREMPES. « E » : STRUCTURES ECROUIES, CATEGORIE « FP » FER PHOSPHOREUX (%MASSP>0,1 DANS LE METAL), « CP » : CHAUFFE ET MAINTIEN PROLONGE EN TEMPERATURE. « A » AUCUNE SPECIFICITE RELEVÉE.....	340
FIGURE 178 - REPRESENTATION SCHEMATIQUE DE STRUCTURES SANDWICH « A » ASSYMETRIQUE ET « B » SYMETRIQUE	342

FIGURE 179 - DISTRIBUTION DE LA DURETE MOYENNE POUR CHACUNE DES CATEGORIES DEFINIES. LES VALEURS MOYENNES POUR CHAQUE CATEGORIE SONT REPRESENTEES PAR DES LOSANGES BLEUS. EN GRISE, INTERVALLE DES VALEURS ATTENDUES DEFINI PAR V. F. BUCHWALD POUR DES STRUCTURES A L'EQUILIBRE (V. F. BUCHWALD, 2005, P.67).	344
FIGURE 180 - DISTRIBUTION DE LA DURETE MOYENNE POUR CHACUNE DES CATEGORIES DEFINIES PAR A. WILLIAMS. LES VALEURS MOYENNES POUR CHAQUE CATEGORIE SONT REPRESENTEES PAR DES LOSANGES BLEUS. EN GRISE, INTERVALLE DES VALEURS ATTENDUES DEFINI PAR V. F. BUCHWALD POUR DES STRUCTURES A L'EQUILIBRE (V. F. BUCHWALD, 2005, P.67).	345
FIGURE 181 - DISTRIBUTION DE CHAQUE CATEGORIE DE METAL RENCONTREES DANS LES EPEES RECENSEES PAR A. WILLIAMS DU XIE SIECLE JUSQU'AU XVIIIE SIECLE	346
FIGURE 182 - « A » NATURE DES ALLIAGES OBSERVEE DANS LES BOMBARDES DU XV ^E SIECLE, « B » NATURE DES ALLIAGES RELEVÉE DANS CETTE ETUDE	348
FIGURE 183 - « A » NATURE DES ALLIAGES OBSERVEE DANS LES CLOUS ET RIVETS DU SITE DE VESTBY MARK, « B » NATURE DES ALLIAGES RELEVÉE DANS CETTE ETUDE.....	349
FIGURE 184 - « A » : DURETE MOYENNE POUR LES ALLIAGES TRES FAIBLEMENT CARBURES (%C<0,1) DANS LES CLOUS ET RIVETS DU SITE DE VESTBY MARK « B » : DURETE MOYENNE POUR LES ALLIAGES TRES FAIBLEMENT CARBURES (%C<0,1) DANS CETTE ETUDE.	350
FIGURE 185 - NOMBRE D'ECHANTILLONS CONSIDERES POUR CHAQUE TYPE DE DEFENSE POUR NOS DONNEES ET CELLES DE LA LITTERATURE.....	352
FIGURE 186 - EVOLUTION DE LA DURETE DU METAL POUR CHAQUE TYPE DE DEFENSE ENTRE LE XIIIIE SIECLE ET LE XVIIIE SIECLE EN PRENANT EN COMPTE NOS DONNEES ET CELLES DE LA LITTERATURE	353
FIGURE 187 - NATURE DU METAL UTILISE POUR CHAQUE TYPE DE DEFENSE ENTRE LE XIIIIE SIECLE ET LE XVIIIE SIECLE EN PRENANT EN COMPTE NOS DONNEES ET CELLES DE LA LITTERATURE	353
FIGURE 188 - EVOLUTION DE LA DURETE DU METAL POUR LES ARMURES DE LA CATEGORIE 1 ET 2.....	356
FIGURE 189 - PARTS DE CHACUNE DES CATEGORIES DEFINIES EN FONCTION DU SIECLE ET DU LIEU SUPPOSE DE FABRICATION DES PIECES	359
FIGURE 190 - EVOLUTION DE LA DURETE DU METAL EN FONCTION DU LIEU SUPPOSE DE FABRICATION DES PIECES	359
FIGURE 191 - « A » NATURE DU METAL RENCONTRE DANS LES ARMURES NUREMBERGEOISES. « B » DURETE DU METAL.....	360
FIGURE 192 - EVOLUTION DE LA NATURE DU METAL EMPLOYEE DANS LES ARMURES NUREMBERGEOISES MARQUEES	370
FIGURE 193 - NATURE ET DURETE DU METAL POUR LES PIECES DE HARNOIS ARTICULE RETROUVEES AU CHATEAU DE L'AVANT GARDE DE POMPEY	372
FIGURE 194 - SYNTHESE DES RESULTATS ISSUS DE L'ANALYSE DES ELEMENTS DE L'ARMURE DE SAINTE SUZANNE.....	375
FIGURE 195 - SYNTHESE DES RESULTATS ISSUS DE L'ANALYSE DES ELEMENTS DE L'ARMURE DE FRANÇOIS DE MONTMORENCY.....	378
FIGURE 196 - SYNTHESE DES RESULTATS ISSUS DE L'ANALYSE DES ELEMENTS DE L'ARMURE G40	380
FIGURE 197 - SYNTHESE DES RESULTATS ISSUS DE L'ANALYSE DE LA PAIRE DE CUISSARD G435	383
FIGURE 198 - SYNTHESE DES RESULTATS ISSUS DE L'ANALYSE DE LA PAIRE DE CUISSARD G436	384
FIGURE 199 - NATURE DU METAL SELON LES TAILLES POUR LES PLASTRONS ET LES TYPES DEFINIES POUR LES PLASTRONS ET DOSSIERS	387
FIGURE 200 - DURETE DU METAL SELON LES TAILLES POUR LES PLASTRONS ET LES TYPES DEFINIES POUR LES PLASTRONS ET DOSSIERS	387

FIGURE 201 - CATEGORIES DE METAL RECENSEES DANS CHACUNE DES FILIERES DE REDUCTION	390
FIGURE 202 - OCCURRENCES DU PROCEDE DE REDUCTION DIRECTE ET INDIRECTE POUR LES ECHANTILLONS SUPPOSES D'ORIGINE ALLEMANDE, FRANÇAISE ET ITALIENNE DE NOTRE CORPUS	392
FIGURE 203 - OCCURRENCES DU PROCEDE DE REDUCTION DIRECTE ET INDIRECTE EN FONCTION DE LA RICHESSE DU PORTEUR DE L'ARMURE.....	394

Table des tableaux

TABEAU 1 - REPRESENTATION SCHEMATIQUE DES DONNEES TRANSFORMEES PAR LOG-RATIO	43
TABEAU 2 - CLASSIFICATION DES CENTRES ARMURIERS EUROPEENS AU XV ^E SIECLE PAR C. GAIER (C. GAIER, 1995 B, P. 244).....	59
TABEAU 3 - REPARTITION DES DIFFERENTS ELEMENTS ETUDIES PAR N. DUPRAS (N. DUPRAS, 2012).....	74
TABEAU 4 - RESUME DES PRINCIPALES OBSERVATIONS METALLOGRAPHIQUES EFFECTUEES PAR N. GIRAULT. D'APRES (N. GIRAULT, 2003)	82
TABEAU 5 - CARACTERISTIQUES DES DIFFERENTS ELEMENTS DE L'ARMURE AVANT. D'APRÈS LES RÉSULTATS DONNÉS PAR A. WILLIAMS (A. WILLIAMS, 2003, P. 62), « A » AIR COOLED, H : « HARDENED », « T » « ATTEMPTED-HARDENING » (A. WILLIAMS, 2003, P. 81-87).....	93
TABEAU 6 - DEFENSES DE TETE DATEES DU XIII ^E SIECLE ET XIV ^E SIECLE.....	138
TABEAU 7 - PLAQUES DE BROIGNES ET DE BRIGANDINES (XIII ^E SIECLE-XV ^E SIECLE). OBSERVATIONS REALISEES PAR A. QUERRIEN ET J. BLANCHARD, (A. QUERRIEN AND J. BLANCHARD, 2004, P. 115), M. LINLAUD, ET S. JEANDEMANGE (S. JEANDEMANGE ET AL., 2011)	142
TABEAU 8 - ELEMENTS D'AMURES ARTICULEES DU XV ^E SIECLE	145
TABEAU 9 - PRELEVEMENTS SUR L'ARMURE DE SAINTE SUZANNE	148
TABEAU 10 - ELEMENTS D'ARMURES ARTICULEES DU XVI ^E SIECLE, DETAILS.....	152
TABEAU 11 - ELEMENTS DE L'ARMURE G40, DETAILS DES PRELEVEMENTS	156
TABEAU 12 - PRELEVEMENTS SUR L'ARMURE DE FRANÇOIS DE MONTMORENCY	159
TABEAU 13 - PIECES D'ARMURES ARTICULEES DU XVII ^E SIECLE	160
TABEAU 14 - TYPOLOGIES DEGAGEES DANS LE CAS DES PLASTRONS.....	162
TABEAU 15 - TYPOLOGIES DEGAGEES DANS LE CAS DES DOSSIERES.....	163
TABEAU 16 - ORDRE DE GRANDEUR DES LIMITES DE DETECTION ET DE L'ERREUR TYPE POUR LES ELEMENTS MESURES.....	182
TABEAU 17 - PARAMETRES OPTIMISES POUR L'ICP-MS ET LE LASER	190
TABEAU 18 - LIMITE DE DETECTION, STABILITE ET REPRODUCTIBILITE DES MESURES.....	193
TABEAU 19 - CLASSEMENT DES TRAITEMENTS THERMIQUES ET MECANIQUES.....	219
TABEAU 20 - TENEURS MESUREES PAR EPMA DANS LES ECHANTILLONS A BASSE TENEUR EN CARBONE (%C* < 0,1) ET EN PHOSPHORE (%MASSP < 0,1). « NQ » : NON QUANTIFIE.	228
TABEAU 21 - PRINCIPAUX RESULTATS POUR LES ECHANTILLONS DE PLAQUES D'ARMURES.....	233
TABEAU 22 - PRINCIPAUX RESULTATS SUR LA NATURE DU METAL POUR LES ECHANTILLONS DES ARMURES DE VALENCIENNES	257
TABEAU 23 - ELEMENTS D'ARMURES APPARTENANT AU GROUPE « ITALIE » CONSIDERES DANS LA SUITE.....	267
TABEAU 24 -ELEMENTS D'ARMURES APPARTENANT AU GROUPE « ALLEMAGNE » CONSIDERES DANS LA SUITE.....	268
TABEAU 25 - ELEMENTS D'ARMURES APPARTENANT AU GROUPE « FRANCE » CONSIDERES DANS LA SUITE	269
TABEAU 26 - ELEMENT DE L'ARMURE DE SAINTE SUZANNE ETUDIES DANS CETTE PARTIE	306
TABEAU 27 – ELEMENTS DE D'ARMURE DE FRANÇOIS DE MONTMORENCY ETUDIES DANS CETTE PARTIE.....	312
TABEAU 28 - TRAITEMENTS THERMIQUES ET MECANIQUES RELEVES SUR LES ECHANTILLONS	333
TABEAU 29 - DETAILS DES ECHANTILLONS G436_ech1 ET G40-1.....	333

TABLEAU 30 - SYNTHÈSE DES RESULTATS SUR L'ORIGINE ET LA NATURE DU METAL DES ARMURES SUPPOSEES DE FABRICATION ITALIENNE OU CELLES COMPATIBLES AVEC LA SIGNATURE CHIMIQUE DES ARMURES ITALIE_GROUPE1. ENTRE PARENTHESES, NOMBRE D'ECHANTILLONS.	362
TABLEAU 31 - SYNTHÈSE DES RESULTATS SUR L'ORIGINE ET LA NATURE DU METAL DES ARMURES SUPPOSEES DE FABRICATION ALLEMANDE.....	365
TABLEAU 32 - SYNTHÈSE DES RESULTATS SUR L'ORIGINE ET LA NATURE DU METAL DES ARMURES SUPPOSEES DE FACTURE NUREMBERGEOISE.	368
TABLEAU 33 - SYNTHÈSE DES RESULTATS SUR L'ORIGINE ET LA NATURE DU METAL DES ARMURES SUPPOSEES DE FABRICATION FRANÇAISE	371

Résumé

Ce projet s'intéresse à un objet particulier : l'armure. Celle-ci, dont la fonction première était de protéger le combattant, s'est adaptée entre le XIII^e et le XVII^e siècle aux bouleversements qu'ont connu les pratiques de guerre et l'organisation des armées dans cette période. L'armure pouvait aussi avoir une autre fonction, celle de distinguer socialement son porteur. Ainsi, à la fin du Moyen Âge l'armure est à la fois un objet de grande consommation et d'usage courant mais également un produit de luxe. Sa fabrication, dominée par différents centres de productions internationaux comme les villes Milan et Nuremberg, demandait un savoir-faire spécifique pour travailler et mettre en forme le métal.

Dans le but d'éclairer d'une part les techniques et savoir-faire anciens, d'autre part la circulation et les échanges dans l'espace européen, ce projet aborde l'étude de l'armure par sa matérialité, en mettant en œuvre une approche archéométallurgique. Un corpus spécifique, de plus d'une centaine d'objets, caractéristique de l'évolution de l'équipement défensif des combattants mais également des grands centres de production européens a ainsi été constitué. L'analyse du métal a permis de déterminer la nature des matériaux employés ainsi que les techniques de fabrication de ces objets. L'étude des inclusions non métalliques a quant à elle permis de discuter de l'origine géographique du métal utilisé pour la fabrication des pièces.

De façon générale, les résultats ont montré l'emploi d'alliages de natures variées, parfois très hétérogènes pour réaliser les plates d'armures. Néanmoins en moyenne le métal employé possède une dureté proche de celle d'un acier homogène à 0,4-0,5% de carbone. Les alliages trempés de dureté élevée demeurent très minoritaires dans le corpus étudié. Des spécificités ont néanmoins été relevées, comme l'utilisation d'un matériau spécifique, associant plusieurs feuilles de métal aux propriétés différentes qui pouvait offrir à l'armure de meilleures propriétés défensives. Les informations acquises ont également permis d'étudier les pratiques mises en œuvre par les armuriers que ce soit pour la fabrication d'une armure complète, la production massive de pièces en « série », ou issues d'un même atelier. Les résultats relatifs à la nature et au travail du métal nous ont ainsi amené à questionner le rôle du maître armurier qui signait les objets et la signification de cette signature pour un atelier.

Abstract

The project focuses on a specific object: armor. Between the 13th and early 17th centuries, war practices have undergone major changes, both on the technological level, as well as the organizational one. Accordingly, defensive arms were adapted to the new needs in order to protect their owners. Armor was also in some cases a mark of social distinction. Thus, at the end of the Middle Ages, armor was both an object for everyday military use, massively produced, and a luxury attire. Its fabrication was dominated by several prestigious European centers of production like Milan and Nuremberg and required specific technical skills to shape the metal.

In order to shed light on some of the techniques and ancient skills, along with the circulation and exchanges in the European space, this project addresses the study of armor through its materiality, by implementing an archeometallurgical approach. A specific corpus of over a hundred artefacts was collected, characteristic of the evolution of the defensive equipment of the fighters but also of the great European centers of production. Physicochemical analysis of the metal can decipher its nature and reveal the technical skills of the craftsmen. Non metallic phases analysis has allowed to test hypotheses on the provenance of the materials employed.

Overall, the results showed the use of alloys of varying nature, sometimes highly heterogeneous, to realize the plates of armor. However, on average the metal employed has a hardness close to a homogeneous steel with 0.4-0.5% carbon. Hardened alloys of high hardness remain very minor in the studied corpus. Specificities were nevertheless noted, such as the use of a specific material, combining several sheets of metal with different properties that could offer better defensive properties. The information acquired also allowed to study the workshop practices implemented by the armorers, whether for the manufacture of a complete set of armor, the mass production of "serial" pieces, or those originating from the same workshop. The results relating to the nature and hammering of the metal have led us to question the exact nature of the intervention of the master armorer who signed the artefact and the significance of the signature of a workshop.



UNIVERSITE DE CERGY-PONTOISE
ECOLE DOCTORALE DROIT ET SCIENCES HUMAINES

THESE DE DOCTORAT

HISTOIRE / ARCHEOMATERIAUX

présentée en vue de l'obtention du grade de
DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE CERGY-PONTOISE

par

Emilie Bérard

L'armure du XIII^e au XVII^e siècle en Europe : une approche matérielle

Production, nature et circulation du métal

(Volume 2 : Annexes)

Soutenue le 29 Juin 2019 devant un jury composé de :

Luc Bourgeois	Université de Caen Normandie	Rapporteur
Ivan Guillot	Université Paris-Est Créteil	Rapporteur
Olivier Renaudeau	Musée de l'Armée	Examineur
Vincent Serneels	Université de Fribourg	Président
Philippe Dillmann	LAPA-IRAMAT CNRS/CEA	Directeur de thèse
Valérie Toureille	Université de Cergy Pontoise	Directrice de thèse
Catherine Verna	Université Paris 8 Vincennes-Saint-Denis	Directrice de thèse

Table des Matières

<i>Annexe 1 - Comparaison des signatures chimiques des éléments d'armures issus de centres allemands ou italiens : détails</i>	<i>9</i>
<i>Annexe 2 - Comparaison de la signature chimique de l'armure de Sainte Suzanne et de l'espace lombard</i>	<i>12</i>
<i>Annexe 3 - Comparaison de la signature chimique de l'armure de François de Montmorency et de l'espace lombard</i>	<i>17</i>
<i>Annexe 4 – Compatibilité avec l'espace lombard, comparaison du rapport Eu/Sm</i>	<i>21</i>
<i>Annexe 5 – Structures en bandes, détails du traitement statistique</i>	<i>25</i>
<i>Annexe 6 – Résumé des analyses effectuées pour chaque échantillon</i>	<i>38</i>
Résumé des analyses menées sur l'échantillon RX1408 S	39
Résumé des analyses menées sur l'échantillon RX1408 I	42
Résumé des analyses menées sur l'échantillon RX14 4	45
Résumé des analyses menées sur l'échantillon RX 612	48
Résumé des analyses menées sur l'échantillon RX14 EN_1	51
Résumé des analyses menées sur l'échantillon RX14 EN_2	54
Résumé des analyses menées sur l'échantillon 430AG442-LAM46482	57
Résumé des analyses menées sur l'échantillon 430AG443-LAM46483	60
Résumé des analyses menées sur l'échantillon 430AG441-LAM46481	63
Résumé des analyses menées sur l'échantillon 430AG484-LAM746490	66
Résumé des analyses menées sur l'échantillon 430AG440-LAM46480	69
Résumé des analyses menées sur l'échantillon 430AG444-LAM46484	72
Résumé des analyses menées sur l'échantillon 430AG423_LAM46478	75
Résumé des analyses menées sur l'échantillon 430AG424-LAM46479	78
Résumé des analyses menées sur l'échantillon 430AG452-LAM46485	81
Résumé des analyses menées sur l'échantillon 430AG455-LAM46488	84
Résumé des analyses menées sur l'échantillon 430AG478-LAM46489	87
Résumé des analyses menées sur l'échantillon LAM45665_b	90
Résumé des analyses menées sur l'échantillon LAM45665_a	93
Résumé des analyses menées sur l'échantillon W2333	96

Résumé des analyses menées sur l'échantillon Berlin	99
Résumé des analyses menées sur l'échantillon 348 214 425	102
Résumé des analyses menées sur l'échantillon 34818 411 1	105
Résumé des analyses menées sur l'échantillon 34825 Objet 6 2	108
Résumé des analyses menées sur l'échantillon 34820 434 1	111
Résumé des analyses menées sur l'échantillon GNM1312	115
Résumé des analyses menées sur l'échantillon 1120	118
Résumé des analyses menées sur l'échantillon GNM1359 b	121
Résumé des analyses menées sur l'échantillon GNM1359 a	124
Résumé des analyses menées sur l'échantillon H1G935.B	127
Résumé des analyses menées sur l'échantillon H1G935	130
Résumé des analyses menées sur l'échantillon 1_casque	133
Résumé des analyses menées sur l'échantillon 2_gantelet	137
Résumé des analyses menées sur l'échantillon 3_colletin	140
Résumé des analyses menées sur l'échantillon 4_colletin_a	143
Résumé des analyses menées sur l'échantillon 4_colletin_b	146
Résumé des analyses menées sur l'échantillon 5_taslette	149
Résumé des analyses menées sur l'échantillon 6_taslette	152
Résumé des analyses menées sur l'échantillon 7_taslette	155
Résumé des analyses menées sur l'échantillon 8_dossiere	158
Résumé des analyses menées sur l'échantillon 9_dossiere	161
Résumé des analyses menées sur l'échantillon 10_epauliere	164
Résumé des analyses menées sur l'échantillon 11_epauliere	167
Résumé des analyses menées sur l'échantillon 12_cubitiera	170
Résumé des analyses menées sur l'échantillon 13_taslette	173
Résumé des analyses menées sur l'échantillon 14_taslette	176
Résumé des analyses menées sur l'échantillon 15_colletin	179
Résumé des analyses menées sur l'échantillon G93-2-ou3-ech1	182
Résumé des analyses menées sur l'échantillon G93-2-ou3_ech2	185
Résumé des analyses menées sur l'échantillon G27618_ech1	188
Résumé des analyses menées sur l'échantillon G27618_ech2	191
Résumé des analyses menées sur l'échantillon G42_ech1	194
Résumé des analyses menées sur l'échantillon G42_ech2	197
Résumé des analyses menées sur l'échantillon G40-1	200
Résumé des analyses menées sur l'échantillon G40-2	203
Résumé des analyses menées sur l'échantillon G40-3	206

Résumé des analyses menées sur l'échantillon G40-4.....	209
Résumé des analyses menées sur l'échantillon G70-1.....	212
Résumé des analyses menées sur l'échantillon G70-2.....	215
Résumé des analyses menées sur l'échantillon H35.....	218
Résumé des analyses menées sur l'échantillon HPO2608_1	221
Résumé des analyses menées sur l'échantillon HPO2608_2	224
Résumé des analyses menées sur l'échantillon H3_1.....	227
Résumé des analyses menées sur l'échantillon H3_2.....	230
Résumé des analyses menées sur l'échantillon H3_3.....	233
Résumé des analyses menées sur l'échantillon H26.....	236
Résumé des analyses menées sur l'échantillon 20036	239
Résumé des analyses menées sur l'échantillon H43.1.....	242
Résumé des analyses menées sur l'échantillon H6.....	245
Résumé des analyses menées sur l'échantillon HPO 618.1	248
Résumé des analyses menées sur l'échantillon HPO668	251
Résumé des analyses menées sur l'échantillon HPO717	254
Résumé des analyses menées sur l'échantillon HPO618.2_1	257
Résumé des analyses menées sur l'échantillon HPO618.2_2	260
Résumé des analyses menées sur l'échantillon HPO618	263
Résumé des analyses menées sur l'échantillon 11423	266
Résumé des analyses menées sur l'échantillon G204_ech1	269
Résumé des analyses menées sur l'échantillon G204_ech2	272
Résumé des analyses menées sur l'échantillon SN	275
Résumé des analyses menées sur l'échantillon G143_ech1	278
Résumé des analyses menées sur l'échantillon G143_ech2	281
Résumé des analyses menées sur l'échantillon G93-1.....	284
Résumé des analyses menées sur l'échantillon G435_ech1	287
Résumé des analyses menées sur l'échantillon G435_ech2	290
Résumé des analyses menées sur l'échantillon G435_G3	293
Résumé des analyses menées sur l'échantillon G435_G4	296
Résumé des analyses menées sur l'échantillon G435_G5	299
Résumé des analyses menées sur l'échantillon G436_ech1	302
Résumé des analyses menées sur l'échantillon G436_ech2	305
Résumé des analyses menées sur l'échantillon G436_ech3	308
Résumé des analyses menées sur l'échantillon G436_G4	311
Résumé des analyses menées sur l'échantillon G436_G5	314

Résumé des analyses menées sur l'échantillon G436_G6	317
Résumé des analyses menées sur l'échantillon G435_D1	320
Résumé des analyses menées sur l'échantillon G435_D2	323
Résumé des analyses menées sur l'échantillon G436_D1	326
Résumé des analyses menées sur l'échantillon G436_D2	329
Résumé des analyses menées sur l'échantillon G436_D3	332
Résumé des analyses menées sur l'échantillon G436_D4	335
Résumé des analyses menées sur l'échantillon G436_D5	338
Résumé des analyses menées sur l'échantillon 9301912_1_ech1	341
Résumé des analyses menées sur l'échantillon 9301912_1_ech2	344
Résumé des analyses menées sur l'échantillon 9301895-2	347
Résumé des analyses menées sur l'échantillon 930.1.912.2_T	350
Résumé des analyses menées sur l'échantillon 895 423	353
Résumé des analyses menées sur l'échantillon 930 1 892 _T.....	356
Résumé des analyses menées sur l'échantillon 930 1 895 _T.....	359
Résumé des analyses menées sur l'échantillon 930 1 904 _T.....	362
Résumé des analyses menées sur l'échantillon SNI40 1	365
Résumé des analyses menées sur l'échantillon SNI40 3	369
Résumé des analyses menées sur l'échantillon SNI40 2	372
Résumé des analyses menées sur l'échantillon 40/ S.INV_4	375
Résumé des analyses menées sur l'échantillon SNI39	378
Résumé des analyses menées sur l'échantillon 895415	381
Résumé des analyses menées sur l'échantillon 930_1_911	384
Résumé des analyses menées sur l'échantillon 895_414	387
Résumé des analyses menées sur l'échantillon 930.1.891	390
Résumé des analyses menées sur l'échantillon 895.4.1.3_1	393
Résumé des analyses menées sur l'échantillon 895.4.1.3_2	396
Résumé des analyses menées sur l'échantillon 930.1.898	399
Résumé des analyses menées sur l'échantillon 06100607 1	403
Résumé des analyses menées sur l'échantillon 06100607 2.1	406
Résumé des analyses menées sur l'échantillon 06100607 2.2	409
Résumé des analyses menées sur l'échantillon 06100607 3	412
Résumé des analyses menées sur l'échantillon 6100607 4	415
Résumé des analyses menées sur l'échantillon 061006605 1	418
Résumé des analyses menées sur l'échantillon 061006605 2	421
Résumé des analyses menées sur l'échantillon 061006605 3	424

Résumé des analyses menées sur l'échantillon 061006605 4	427
Résumé des analyses menées sur l'échantillon 951183	430
Résumé des analyses menées sur l'échantillon 951180.1	433
Résumé des analyses menées sur l'échantillon 951182	436
Résumé des analyses menées sur l'échantillon 951192.1	439
Résumé des analyses menées sur l'échantillon 951192.2	442
Résumé des analyses menées sur l'échantillon STS_1.....	445
Résumé des analyses menées sur l'échantillon STS_2.....	448
Résumé des analyses menées sur l'échantillon STS_3.....	451
Résumé des analyses menées sur l'échantillon STS_4.....	454
Résumé des analyses menées sur l'échantillon STS_5.....	457
Résumé des analyses menées sur l'échantillon STS_6.....	460
Résumé des analyses menées sur l'échantillon STS_7.....	463
Résumé des analyses menées sur l'échantillon STS_8.....	466
Résumé des analyses menées sur l'échantillon STS_9.....	469
Résumé des analyses menées sur l'échantillon STS_10.....	472
Résumé des analyses menées sur l'échantillon STS_11.....	475
Résumé des analyses menées sur l'échantillon LAM46492	478
Résumé des analyses menées sur l'échantillon LAM46491_1	481
Résumé des analyses menées sur l'échantillon LAM46491_2	484
Résumé des analyses menées sur l'échantillon n°1 Z8B3-LAM46518	487
Résumé des analyses menées sur l'échantillon n°2 Z8 fossé-LAM46519_1	490
Résumé des analyses menées sur l'échantillon n°2 Z8 fossé-LAM46519_2	493
Résumé des analyses menées sur l'échantillon N°3 Z8B4 LAM46520_2	496
Résumé des analyses menées sur l'échantillon n°4 Z8B4-LAM46521	499
Résumé des analyses menées sur l'échantillon n°5 Z8 fossé-LAM46523	503
Résumé des analyses menées sur l'échantillon n°9 Z8B-LAM46525	506
Résumé des analyses menées sur l'échantillon MR 87.....	509
Résumé des analyses menées sur l'échantillon K243	512
Résumé des analyses menées sur l'échantillon 771	515
Résumé des analyses menées sur l'échantillon K241	518
Résumé des analyses menées sur l'échantillon H83.....	521
Résumé des analyses menées sur l'échantillon 1341a	524
Résumé des analyses menées sur l'échantillon K221	527
Résumé des analyses menées sur l'échantillon K229a	530
Résumé des analyses menées sur l'échantillon K124	533

Résumé des analyses menées sur l'échantillon K31	536
Résumé des analyses menées sur l'échantillon 1002-1-9.....	539
Résumé des analyses menées sur l'échantillon 1002-4-21.....	542
Résumé des analyses menées sur l'échantillon 1002-5-16.....	545
Résumé des analyses menées sur l'échantillon 1002-2-18.....	548
Résumé des analyses menées sur l'échantillon 1002-14-20.....	551
Résumé des analyses menées sur l'échantillon 1002-18-25.....	554
Résumé des analyses menées sur l'échantillon 1002-3-22.....	557
Résumé des analyses menées sur l'échantillon 1002-4-20.....	560
Résumé des analyses menées sur l'échantillon 1002-7-13.....	563
Résumé des analyses menées sur l'échantillon 1002-2-21.....	566
Résumé des analyses menées sur l'échantillon 1002-6-22.....	569
Résumé des analyses menées sur l'échantillon 1002-10-14.....	572
Résumé des analyses menées sur l'échantillon "3-4"	575
Résumé des analyses menées sur l'échantillon 1002-3-1.....	578
Résumé des analyses menées sur l'échantillon 1002-2-6.....	581
Résumé des analyses menées sur l'échantillon 1002-2-16.....	584
Résumé des analyses menées sur l'échantillon 1002-3-20.....	587
Résumé des analyses menées sur l'échantillon A1654	590
Résumé des analyses menées sur l'échantillon W.C A.152	593
Résumé des analyses menées sur l'échantillon A 208	596
Résumé des analyses menées sur l'échantillon W.C A.73	599
Résumé des analyses menées sur l'échantillon W.C A.215	602
Résumé des analyses menées sur l'échantillon W.C A.153	605
Résumé des analyses menées sur l'échantillon W.C A.245	608
Résumé des analyses menées sur l'échantillon W.C A.250	611
Résumé des analyses menées sur l'échantillon A228	614
Résumé des analyses menées sur l'échantillon W.C A.148	617
Résumé des analyses menées sur l'échantillon W.C A.143A	620
Résumé des analyses menées sur l'échantillon W.C A.143B	623
Résumé des analyses menées sur l'échantillon W.C A.235	626
Résumé des analyses menées sur l'échantillon W.C A.144	629
Résumé des analyses menées sur l'échantillon W.C.A.65	632
Résumé des analyses menées sur l'échantillon W.C.A.297	635
Résumé des analyses menées sur l'échantillon W.C A.180	638
Résumé des analyses menées sur l'échantillon W.C.A.237	641

Résumé des analyses menées sur l'échantillon E	644
Résumé des analyses menées sur l'échantillon H.....	647

Annexe 1 - Comparaison des signatures chimiques des éléments d'armures issus de centres allemands ou italiens : détails

La figure 1 met en évidence les positions des armures supposées de fabrication italienne qui n'appartiennent pas au groupe « Italie_groupe1 » sur l'ACP effectuée dans le Chapitre 4. Les échantillons WCA180 et 930.1.895-2 sont exclus du nuage de point « Italie_groupe1 » et « Allemagne_groupe1 » sur les axes PC1 et PC3. Les inclusions des échantillons 951183 et H35 se confondent avec l'espace Allemagne_Groupe1 quel que soit les axes sélectionnés.

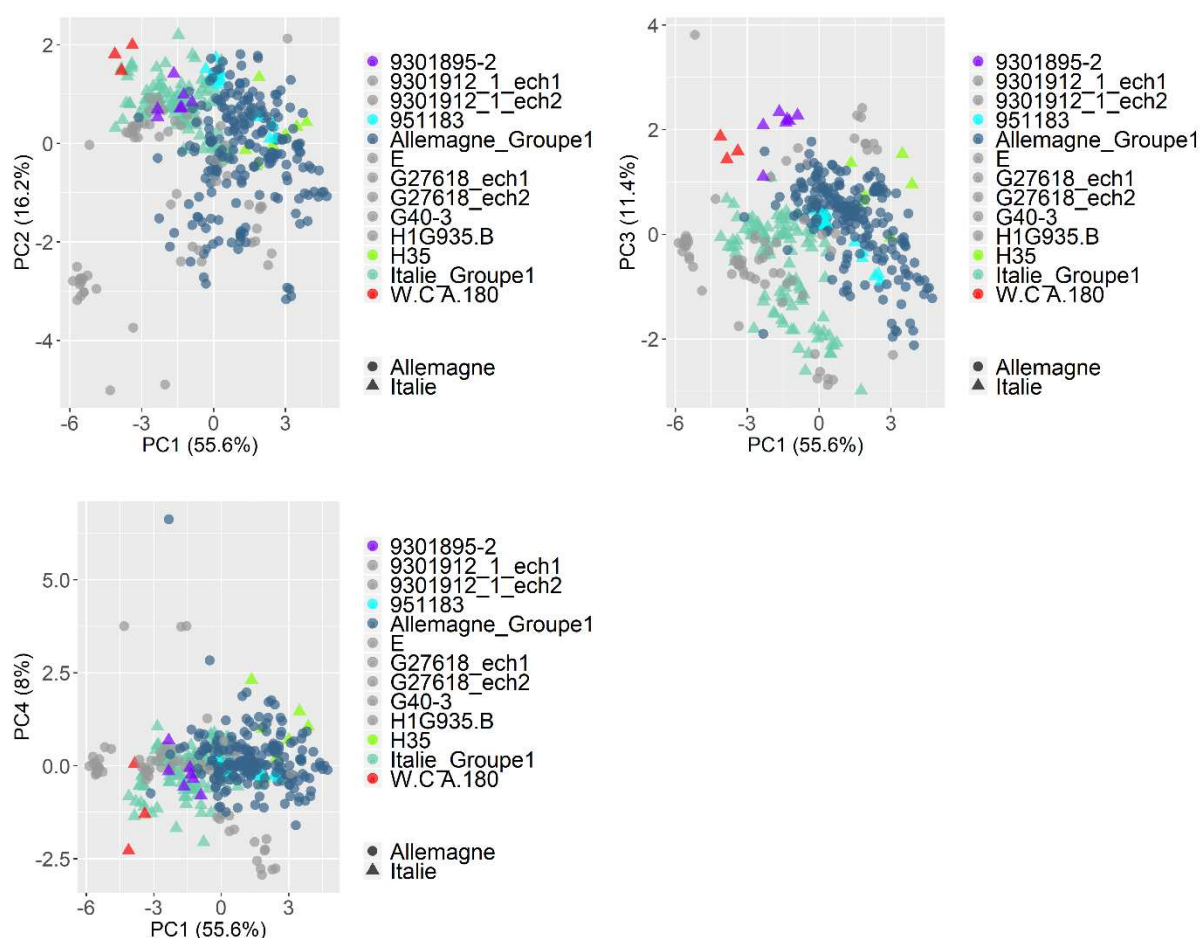


Figure 1 - Visualisation des projections des échantillons WCA180, 930.1.895-2, 951183 et H35 sur l'ACP réalisée sur les données des éléments d'armures supposés de provenance allemandes et italiennes sur les composantes PC1/PC2, PC1/PC3 et PC1/PC4

Annexe 1 - Comparaison des signatures chimiques des éléments d'armures issus de centres allemands ou italiens : détails

Les figure 2 et figure 3 présentent les projections des armures de fabrication allemande n'appartenant pas au groupe « Allemagne_Groupe1 ». Les échantillons 9301912_1_ech1 et 9301912_1_ech2 sont les plus éloignés des deux groupes principaux. L'échantillon G40-3 est quant à lui clairement isolé sur les représentations PC1/PC3 et surtout PC1/PC4. Les échantillons G27618_ech1 et G27618_ech2 se confondent avec l'espace « Italie_Groupe1 » quel que soit les axes considérés. L'échantillon H1G935B s'avère être plus proche du groupe « Italie_Groupe1 » mais s'en éloigne légèrement sur les représentations PC1/PC3 et PC1/PC4.

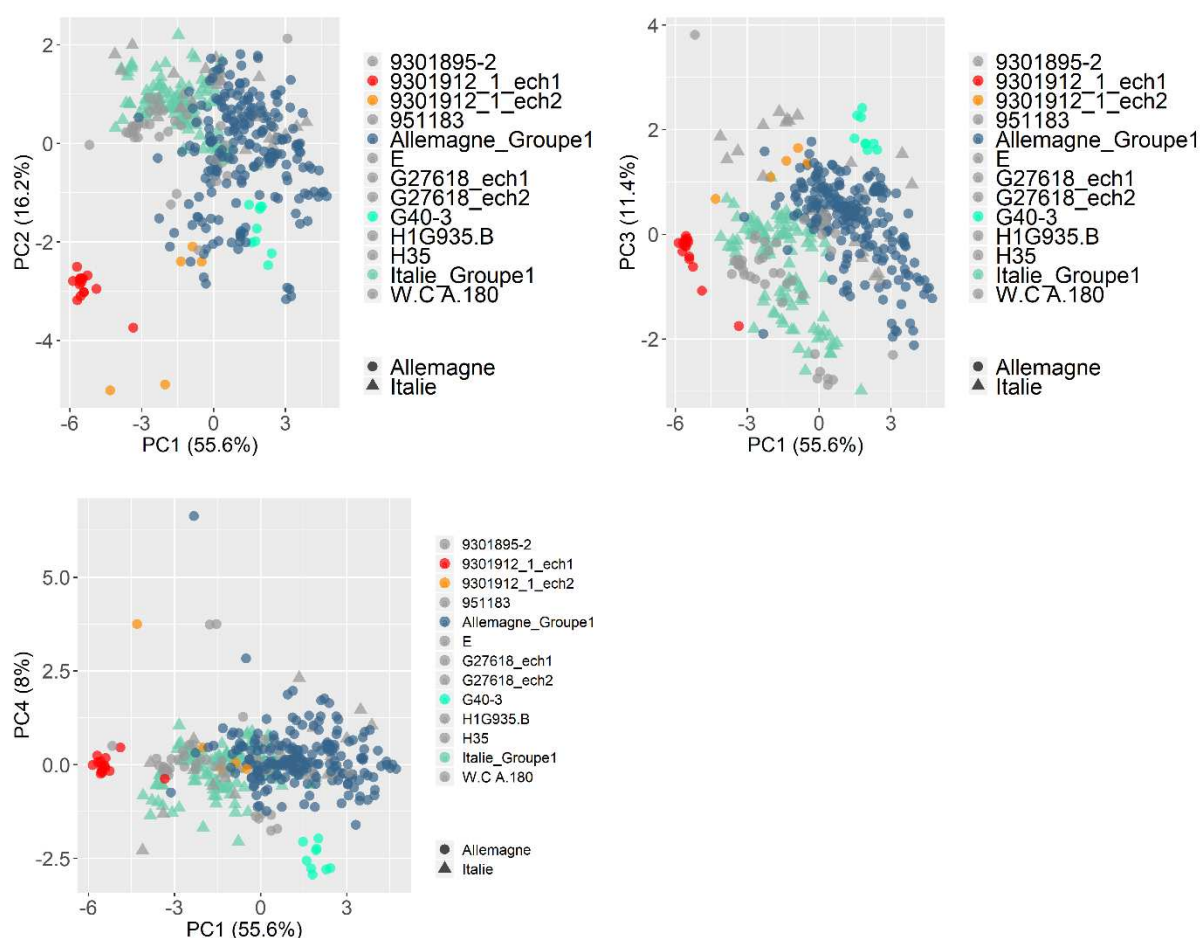


Figure 2 - Visualisation des projections des échantillons 9301912_1_ech1, 9301912_1_ech2 et G40-3 sur l'ACP réalisée sur les données des éléments d'armure supposés de provenance allemandes et italiennes sur les composantes PC1/PC2, PC1/PC3 et PC1/PC4

Annexe 1 - Comparaison des signatures chimiques des éléments d'armures issus de centres allemands ou italiens : détails

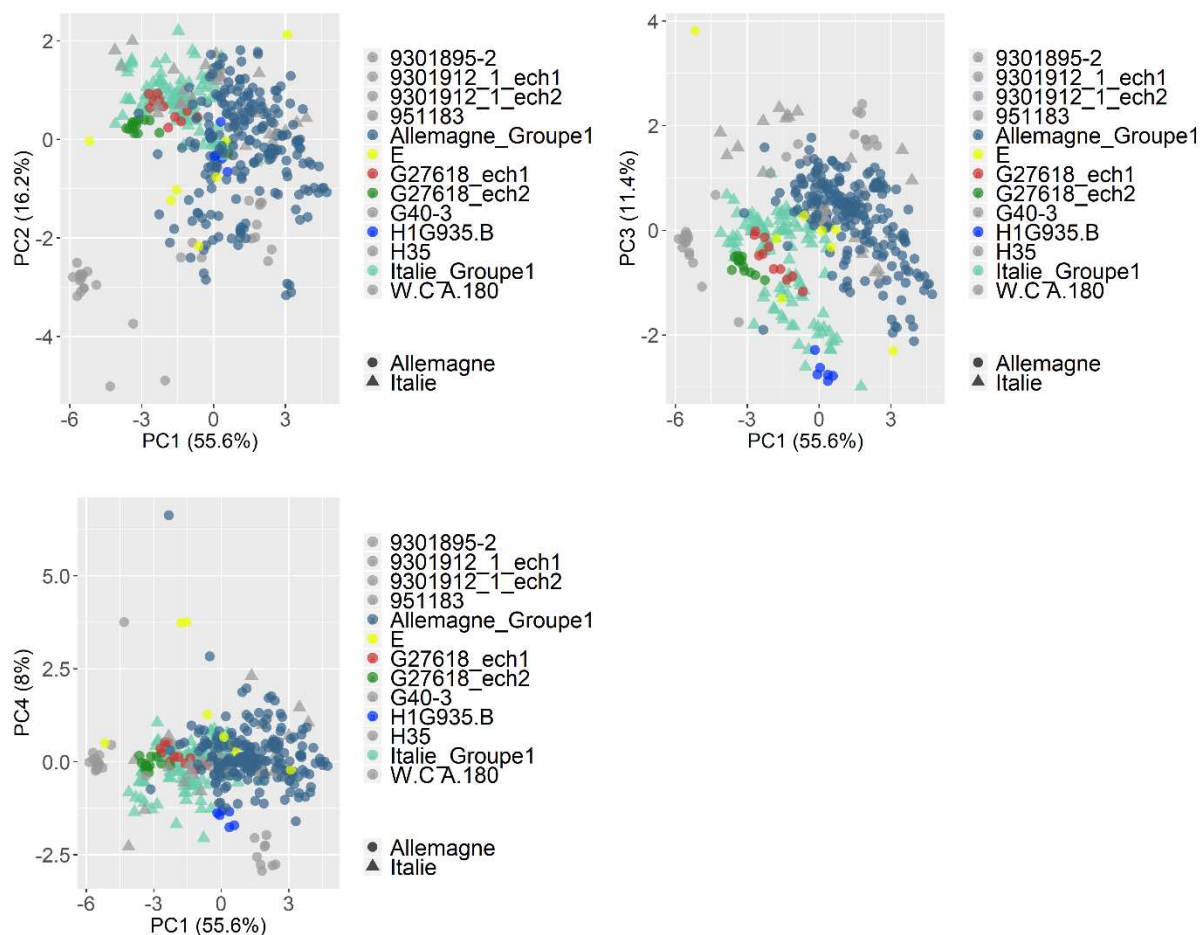
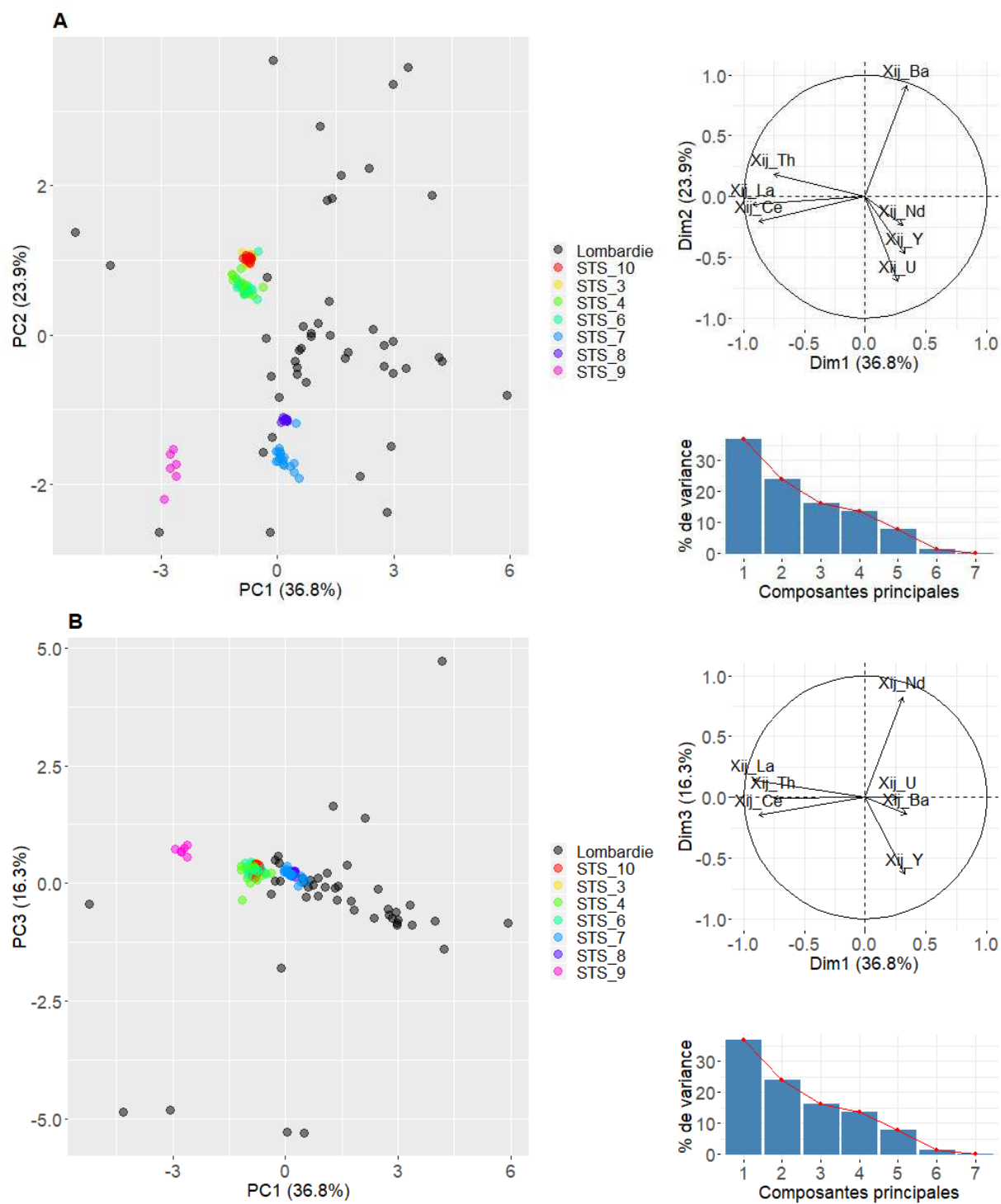


Figure 3 - Visualisation des projections des échantillons G27618_ech1, G27618_ech2 et H1G935.B sur l'ACP réalisées sur les données des éléments d'armure supposés de provenance allemandes et italiennes sur les composantes PC1/PC2, PC1/PC3 et PC1/PC4

Annexe 2 - Comparaison de la signature chimique de l'armure de Sainte Suzanne et de l'espace lombard

La figure 4 présente les résultats de l'ACP réalisée sur les données de l'armure de Sainte Suzanne et sur celles de l'espace lombard (S. Leroy, 2010). Nous présentons uniquement les composantes qui permettent une différenciation des nuages de points c'est à dire les quatre premières. Du fait de la dispersion très importante des projections de la Lombardie l'ensemble des éléments de l'armure se retrouvent compris dans l'espace. Seule la cervelière pourrait être isolée sur les représentations PC1/PC3 et PC1/PC4.

Annexe 2 - Comparaison de la signature chimique de l'armure de Sainte Suzanne et de l'espace lombard



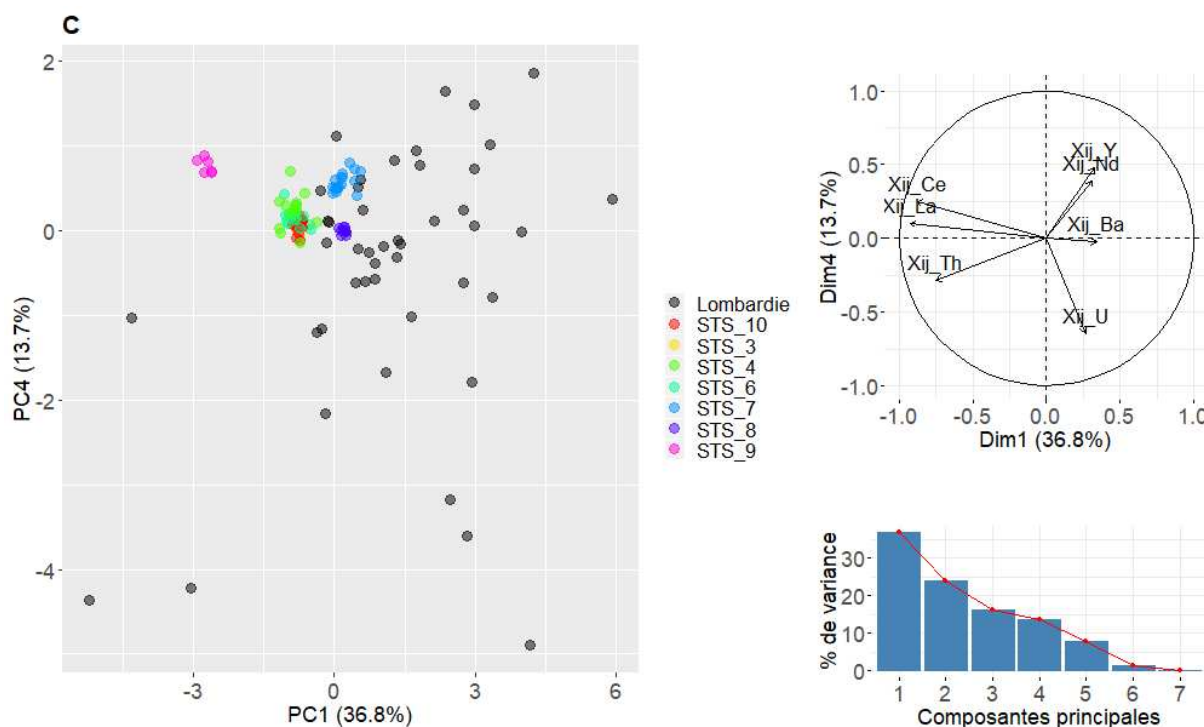
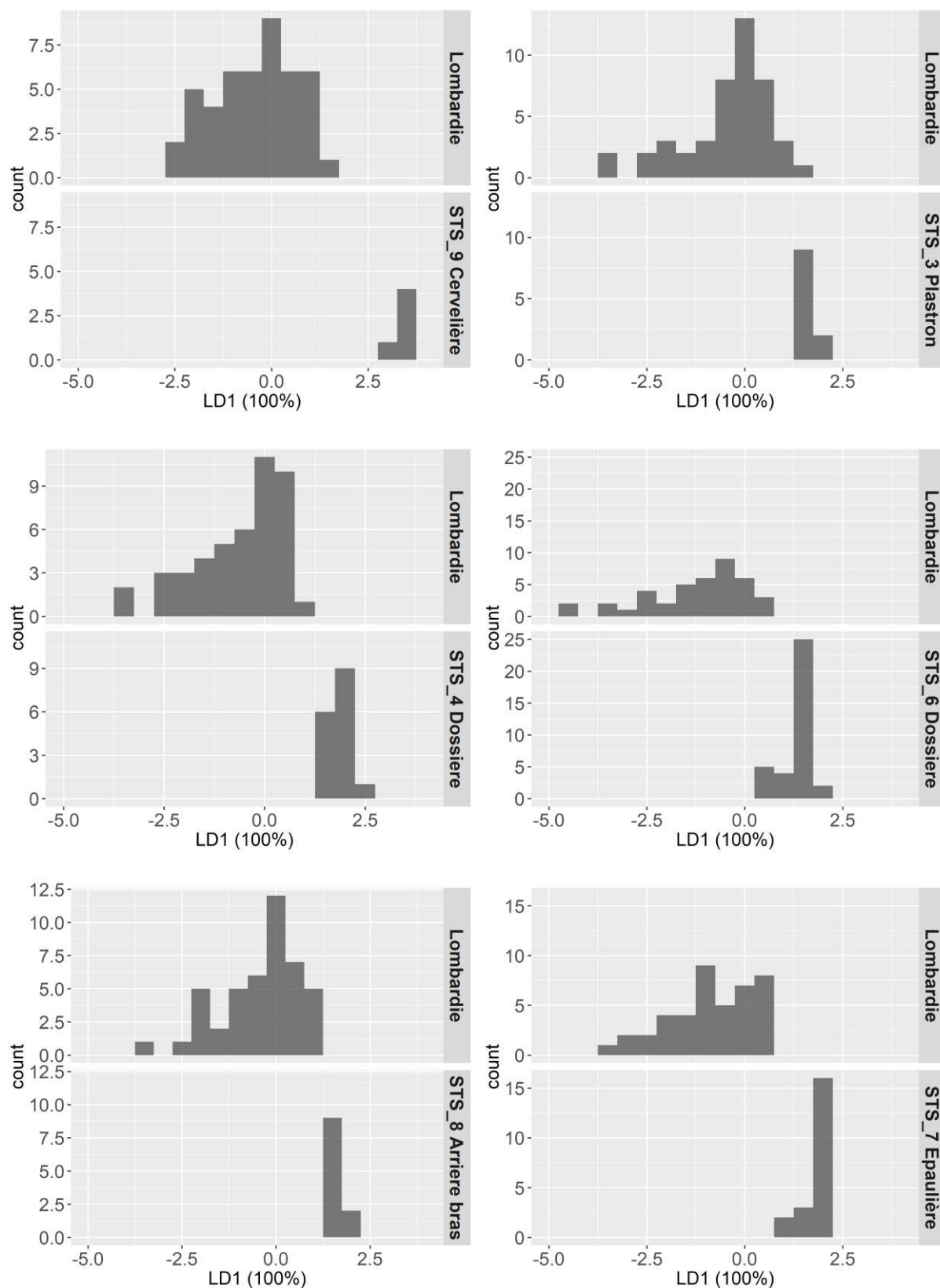


Figure 4 – Synthèse des résultats de l'ACP réalisée sur les données des éléments d'armure de Sainte Suzanne et sur celles de l'espace lombard. « A » axes PC1 et PC2, « B » axes PC1 et PC3, « C » axes PC1 et PC4

L'AFD a été utilisée sur ces mêmes données pour déterminer s'il était possible de séparer les différents éléments de l'armure de la Lombardie en les comparant un à un avec cette espace (voir figure 5). L'échantillon STS_9 relatif à la cervelière est une fois encore isolé. Sa compatibilité chimique avec l'espace lombard peut donc être rejetée. Ceci est également corroboré par les faibles taux de manganèse et de baryum mesurés dans ses inclusions.

Les échantillons du plastron (STS_3), de la braconnière (STS_10) et de la dossière (STS_6) se recouvrent en partie avec l'espace lombard sur l'axe LD1 ce qui confirme leur compatibilité avec ce dernier. En revanche, les autres échantillons STS_4 (Dossière) STS_8 (Arrière bras) et STS_7 (Epaulière) peuvent être isolés de l'ensemble sidérurgique même s'ils en demeurent plus proche que la cervelière. L'analyse factorielle discriminante est cependant par nature très excluante dans le cadre de la validation d'une hypothèse de provenance. Par conséquent compte tenu des résultats donnés conjointement par l'ACP et l'AFD, la compatibilité chimique de ces éléments avec l'espace a été jugée comme probable.

Annexe 2 - Comparaison de la signature chimique de l'armure de Sainte Suzanne et de l'espace lombard



Annexe 2 - Comparaison de la signature chimique de l'armure de Sainte Suzanne et de l'espace lombard

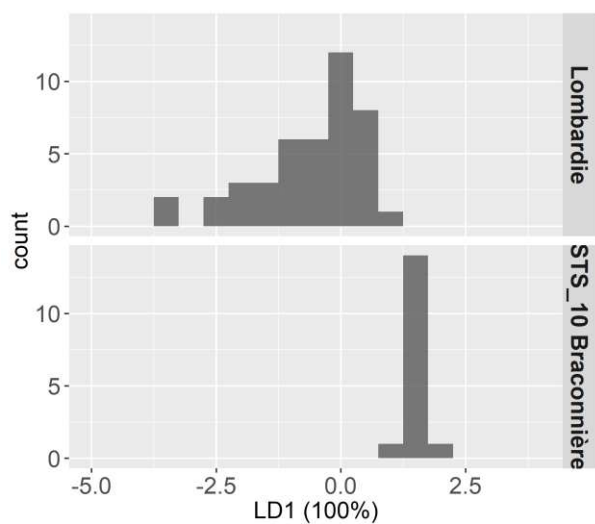
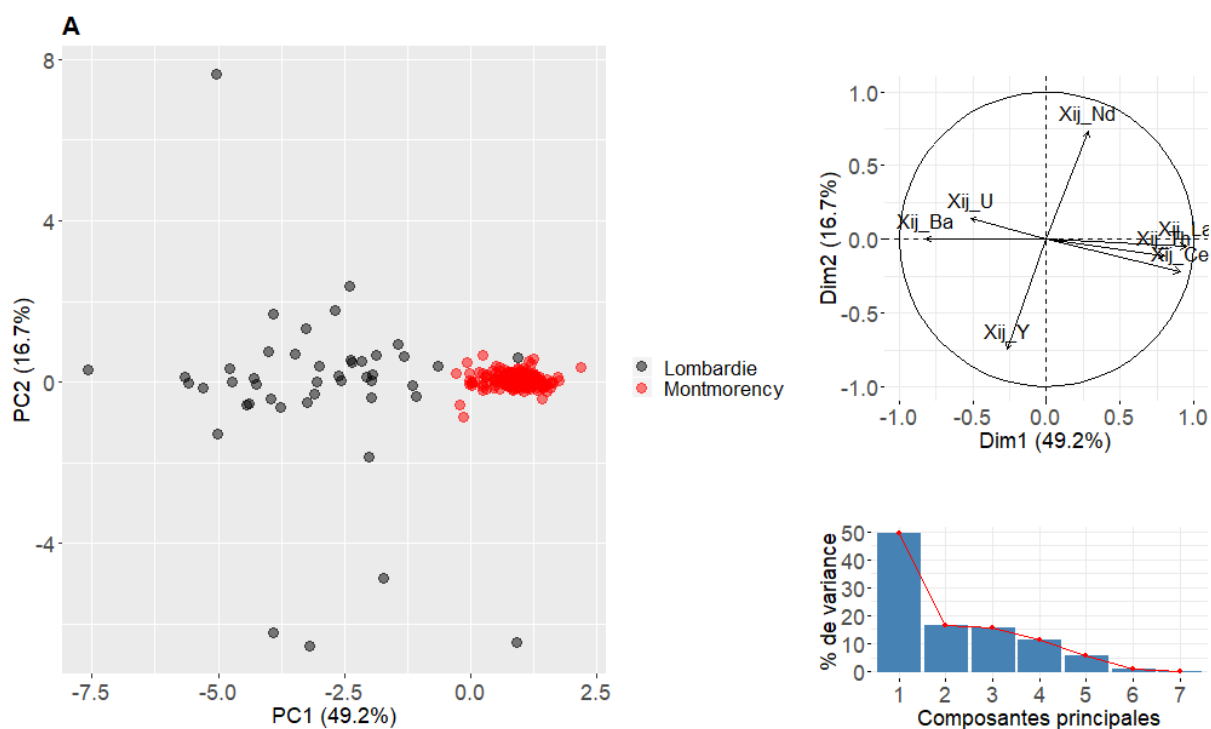


Figure 5 – Synthèse des résultats de l'analyse factorielle discriminante réalisée sur les données de l'armure de Sainte Suzanne et sur celles de l'espace lombard

Annexe 3 - Comparaison de la signature chimique de l'armure de François de Montmorency et de l'espace lombard

Les comparaisons des signatures chimiques de l'armure de François de Montmorency avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010) sont présentées sur les figures suivantes. Malgré la dispersion de l'espace lombard, l'ACP a tendance à séparer les deux nuages de point notamment sur la représentation PC1/PC3.



Annexe 3 - Comparaison de la signature chimique de l'armure de François de Montmorency et de l'espace lombard

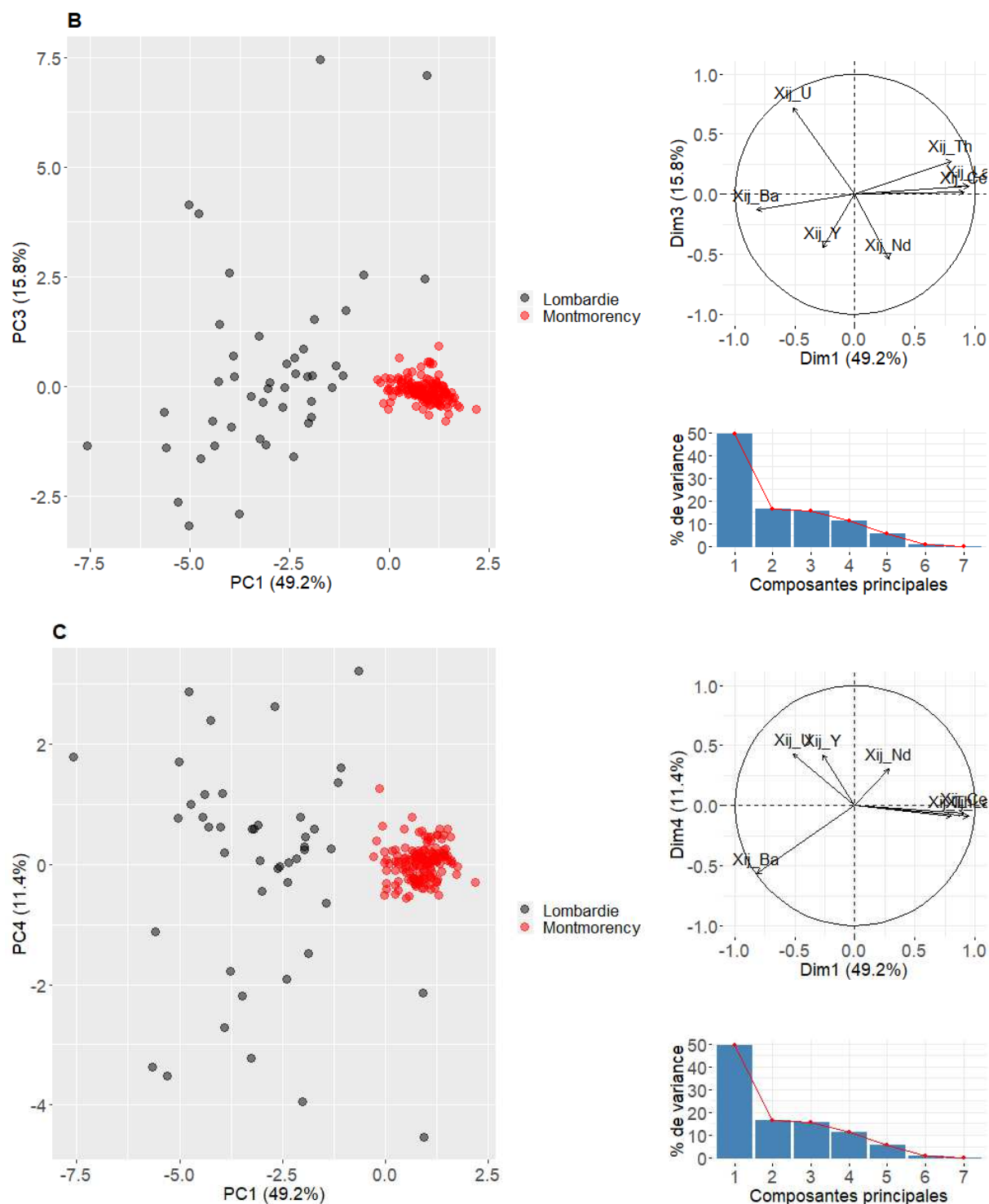
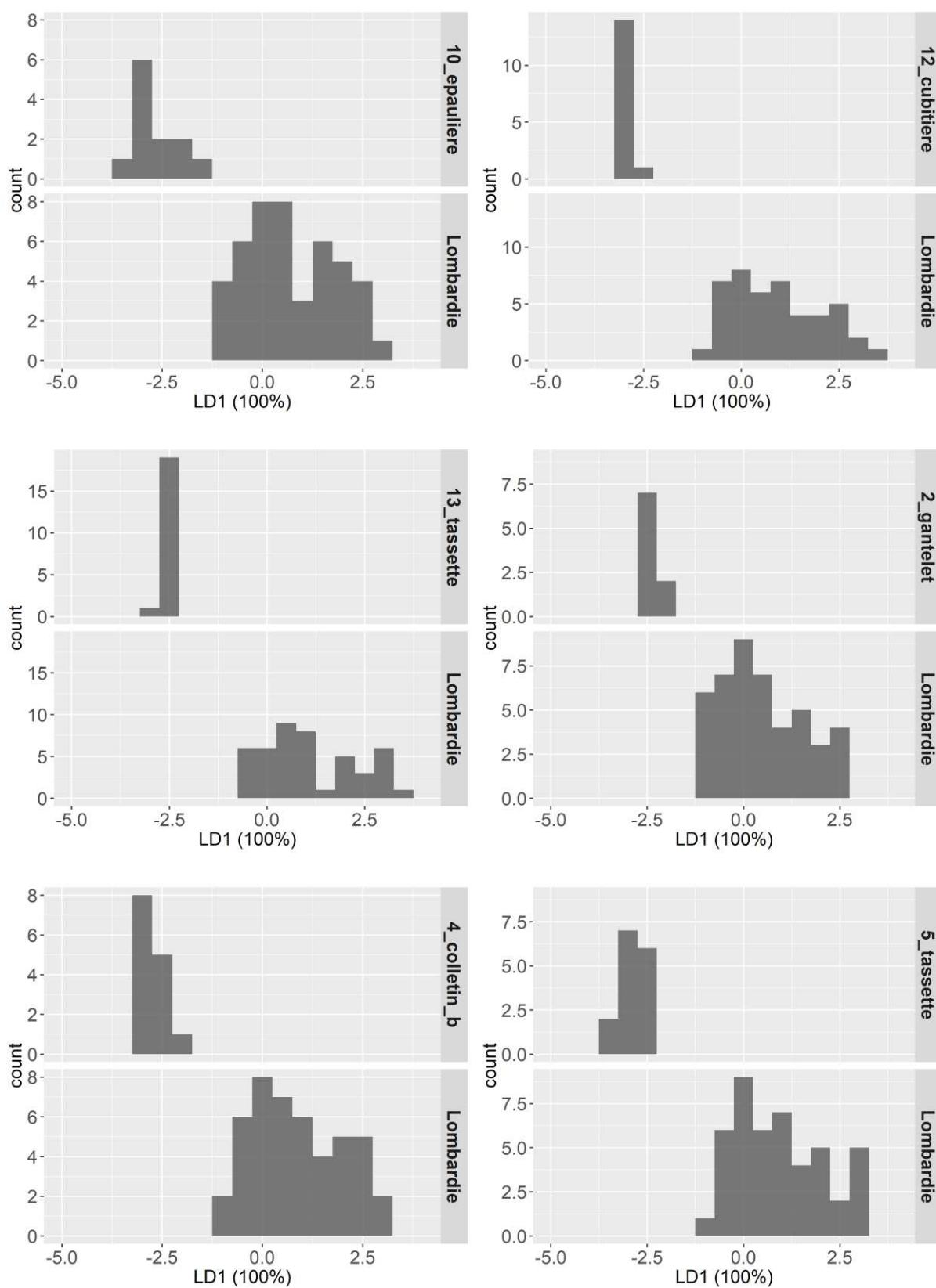


Figure 6- Synthèse des résultats de l'ACP réalisée sur les données de l'espace lombard et sur celles l'armure de François de Montmorency, « A » axes PC1 et PC2, « B » axes PC1 et PC3, « C » axes PC1 et PC4

L'AFD a ensuite été utilisée. Elle sépare l'espace lombard de tous les éléments d'armures sur lesquels l'analyse était envisageable, sur l'axe LD1 (voir figure 7). Par conséquent la compatibilité chimique avec cet espace sidérurgique semble peu probable.

Annexe 3 - Comparaison de la signature chimique de l'armure de François de Montmorency et de l'espace lombard



Annexe 3 - Comparaison de la signature chimique de l'armure de François de Montmorency et de l'espace lombard

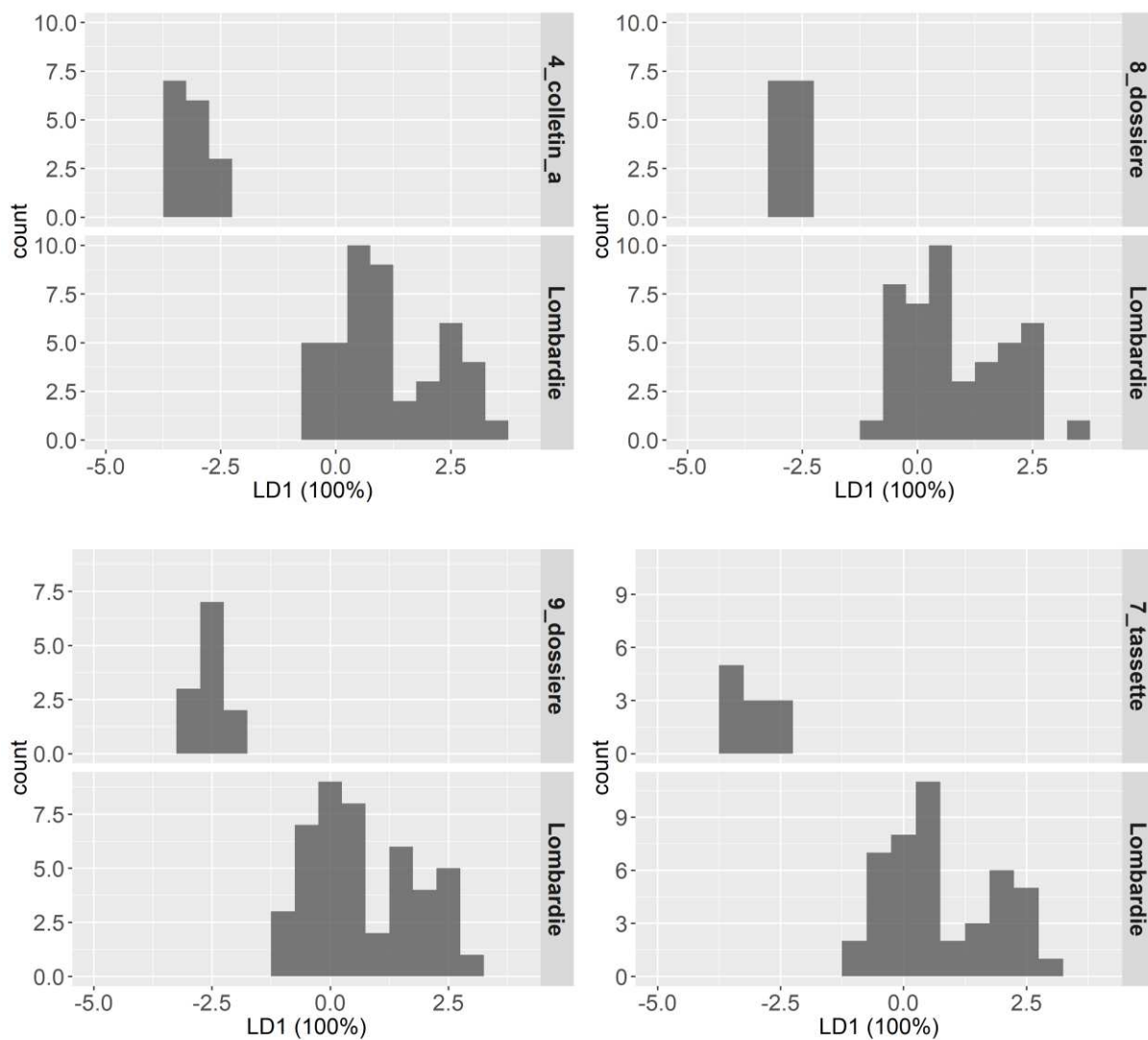


Figure 7-Synthèse des résultats de l'AFD réalisée sur les données de l'espace lombard et sur celles de l'armure de François de Montmorency

Annexe 4 – Compatibilité avec l'espace lombard, comparaison du rapport Eu/Sm

L'euporium présente souvent une anomalie positive ou négative (appauvrissement ou enrichissement par rapport aux terres rares voisins comme le Sm) dans les minerais du fait d'une différence de degré d'oxydation dans certaines conditions. Ce phénomène apparaît fortement lié aux processus de formation des roches (A. M. Desaulty, 2008). Ainsi le rapport Eu/Sm est intéressant à considérer puisqu'il permet de rendre compte de cette anomalie, et de distinguer des signatures chimiques distinctes.

Dans le cas de l'espace lombard le rapport Eu/Sm est dispersé comme l'illustre la figure 8 qui compare la distribution de son rapport avec celui de la Minette Lorraine. Son pouvoir discriminant est donc limité. De plus l'Eu était régulièrement en dessous des limites de détection dans les analyses effectuées sur les échantillons d'armures, ce qui n'a pas permis de le prendre en compte dans l'analyse multivariée. Nous nous sommes cependant assuré qu'aucun échantillon d'armure considéré comme compatible avec l'espace lombard suite à l'analyse multivariée, ne possédait un rapport Eu/Sm incompatible avec ce dernier dans les inclusions où l'Eu et le Sm avaient été dosés (voir figure 9, figure 10 et figure 11).

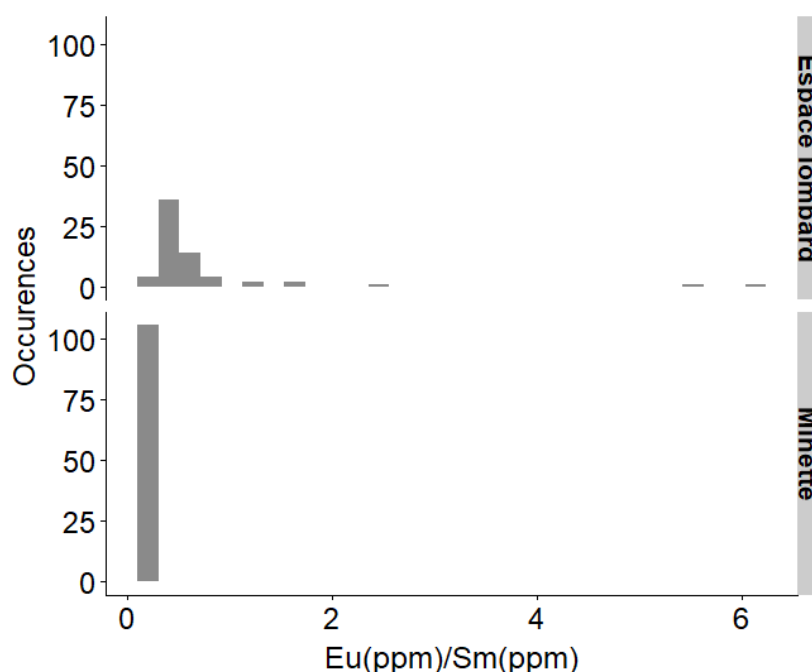


Figure 8-Comparaison des rapports Eu/Sm pour l'espace lombard et l'espace Minette

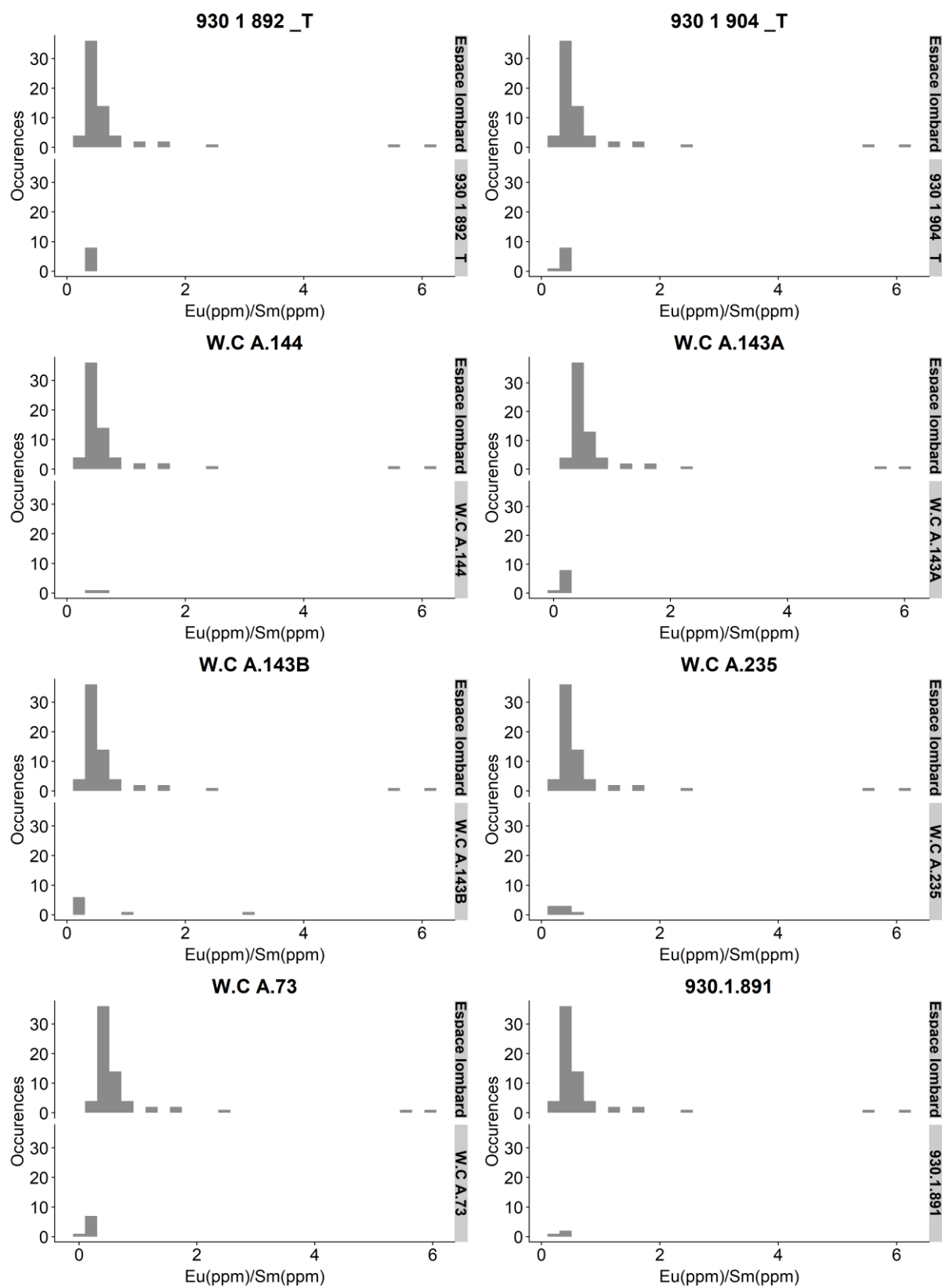


Figure 9 – Comparaisons des rapports Eu/Sm de l'espace lombard avec ceux des armures Italie_Group1

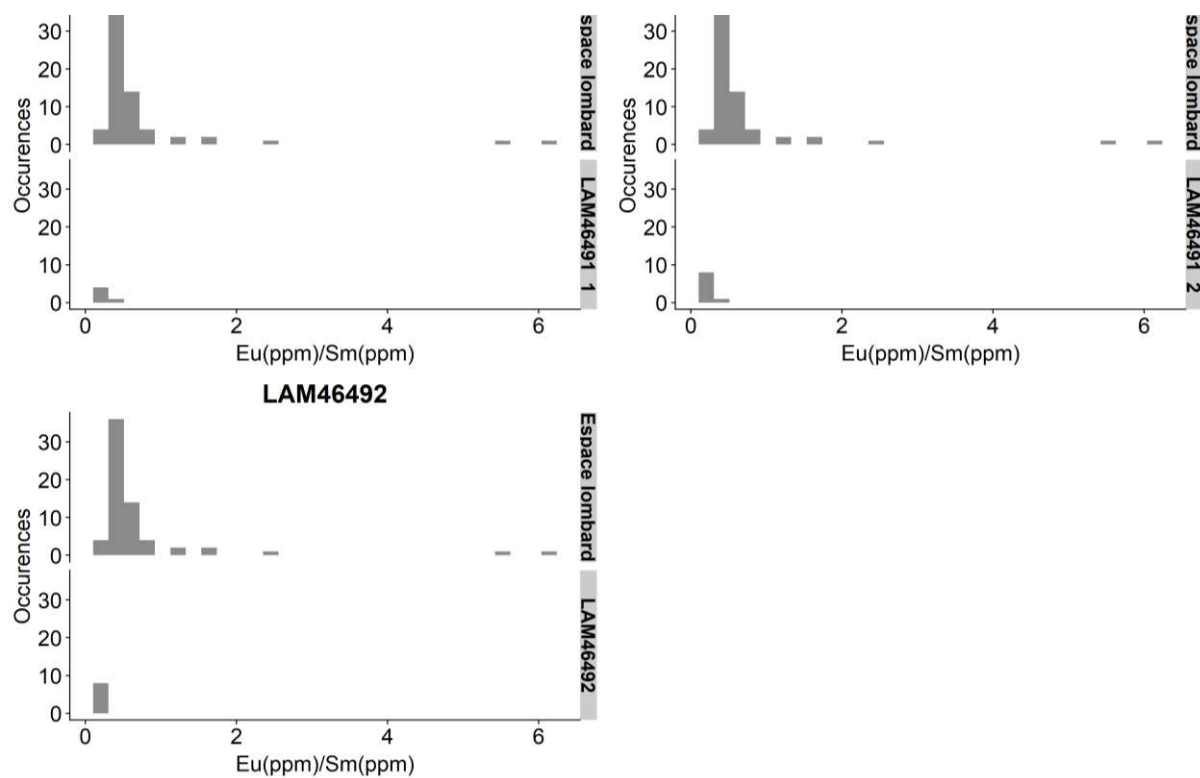


Figure 10- Comparaisons des rapports Eu/Sm de l'espace lombard avec ceux des armures Italie_Groupe1 (suite)

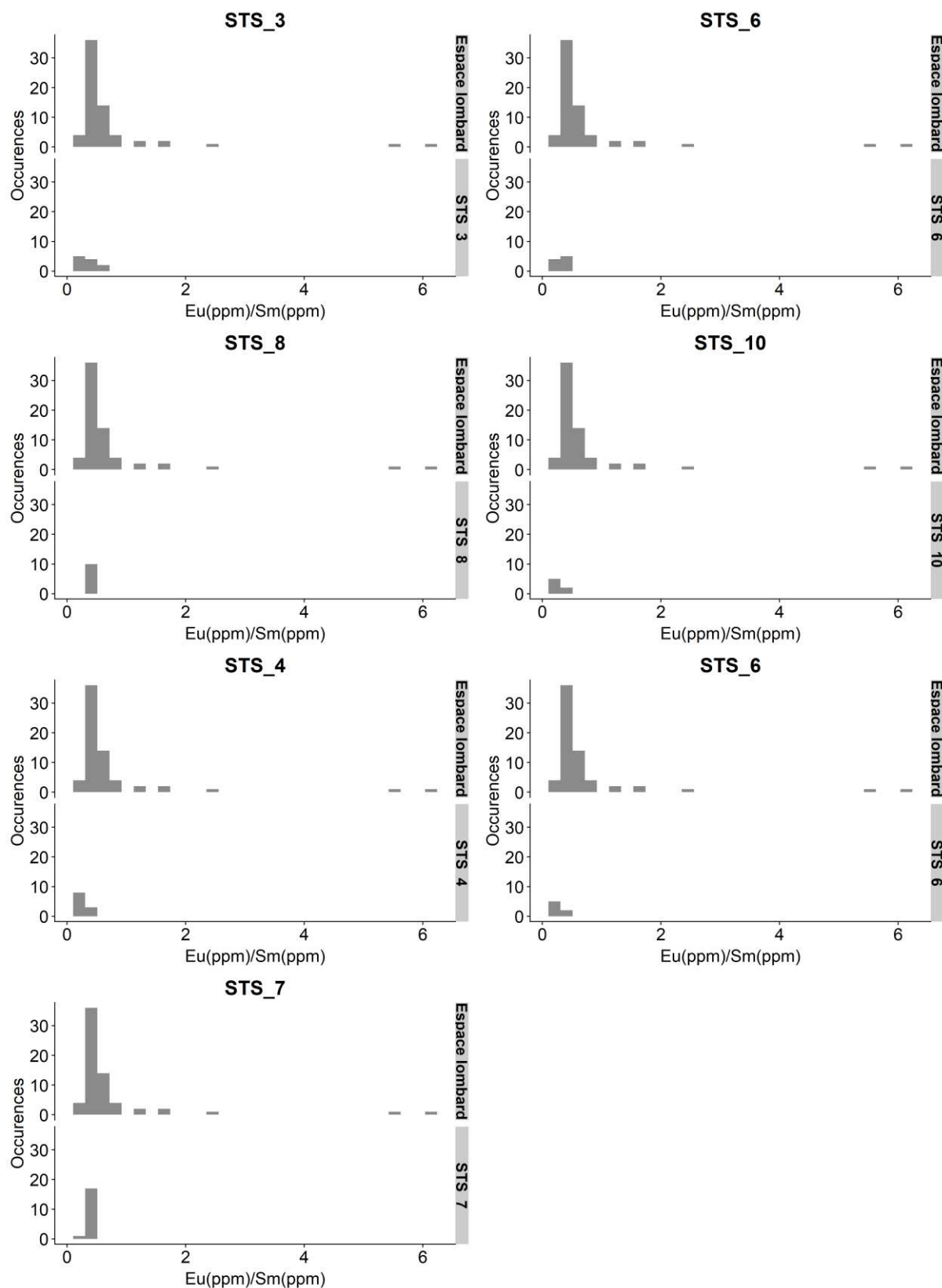


Figure 11- Comparaisons des rapports Eu/Sm de l'espace lombard avec ceux des éléments d'armures de Sainte Suzanne

Annexe 5 – Structures en bandes, détails du traitement statistique

Sur la vingtaine de Structures en bandes mise en évidence, pour cinq échantillons les tris inclusionnaires effectués suggèrent que les fournitures de métal employées étaient distinctes au sein des deux matériaux assemblés. Cette annexe présente un résumé des résultats du traitement multivarié sur les données des éléments majeurs, identifiant les différentes familles pour ces échantillons en particulier. Pour rappel une classification ascendante hiérarchique est d’abord effectuée sur les données des éléments majeurs (composés non réduits). Puis une Analyse en Composantes Principales (ACP) est réalisée. Les points sont alors colorés selon le groupe d’appartenance des inclusions défini par la classification. La cohérence des groupes définis est ensuite vérifiée par l’analyse des bivariés correspondants.

• H26

Quatre familles ont été définies (voir Figure 12 et Figure 13). Les familles 1 et 2 ont des signatures chimiques distinctes. La classe 2 est située dans la partie correspondant au fer phosphoreux, la 1 dans l'acier faiblement carburé. Les deux autres familles, de taille beaucoup plus réduite, ne présentent pas des rapports élémentaires homogènes. La classe 3 est dispersée selon le potassium et la 4 selon le calcium. Elles n'ont donc pas été conservées.

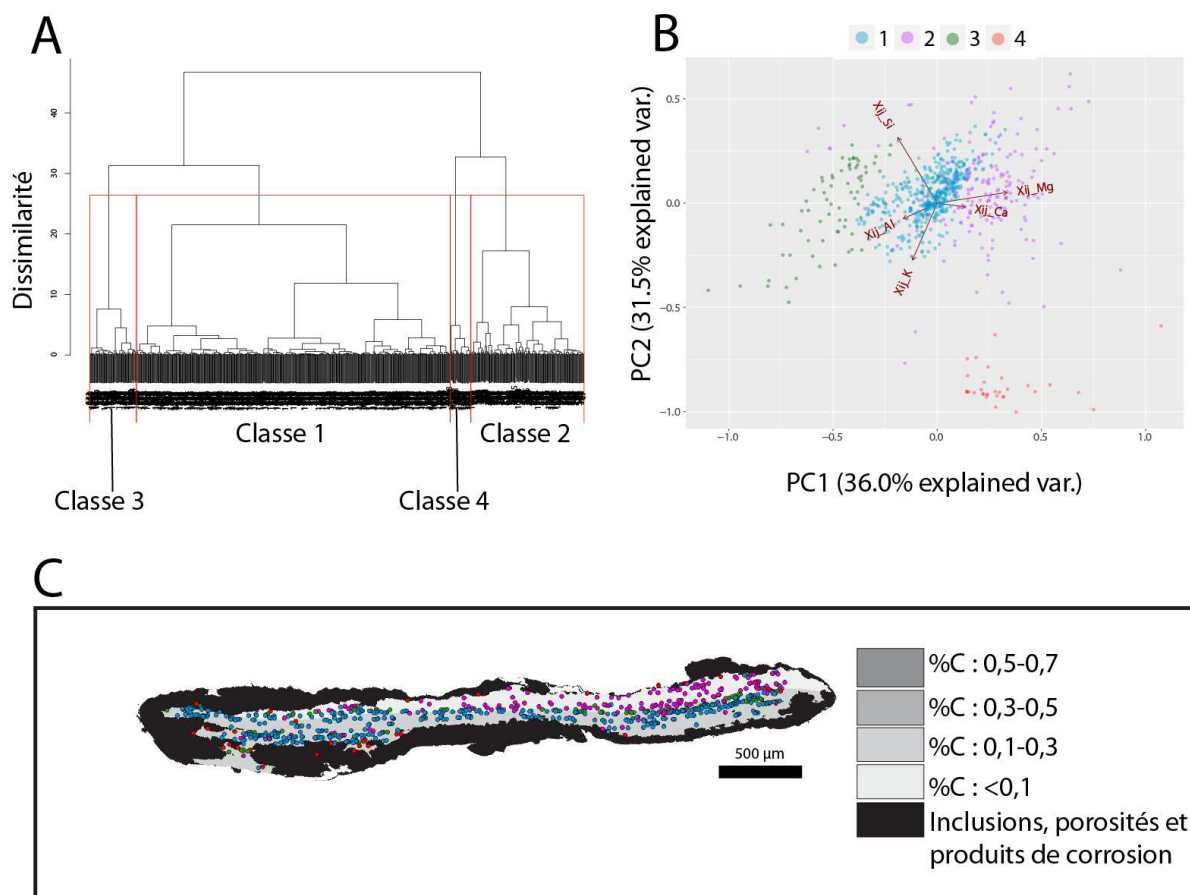


Figure 12 - Résultat du traitement multivarié sur l'échantillon H26. « A » Dendrogramme 4 groupes ont été sélectionnés. « B » Visualisation des 4 groupes sur la PCA. « C » Répartition des familles d'inclusions sur l'échantillon

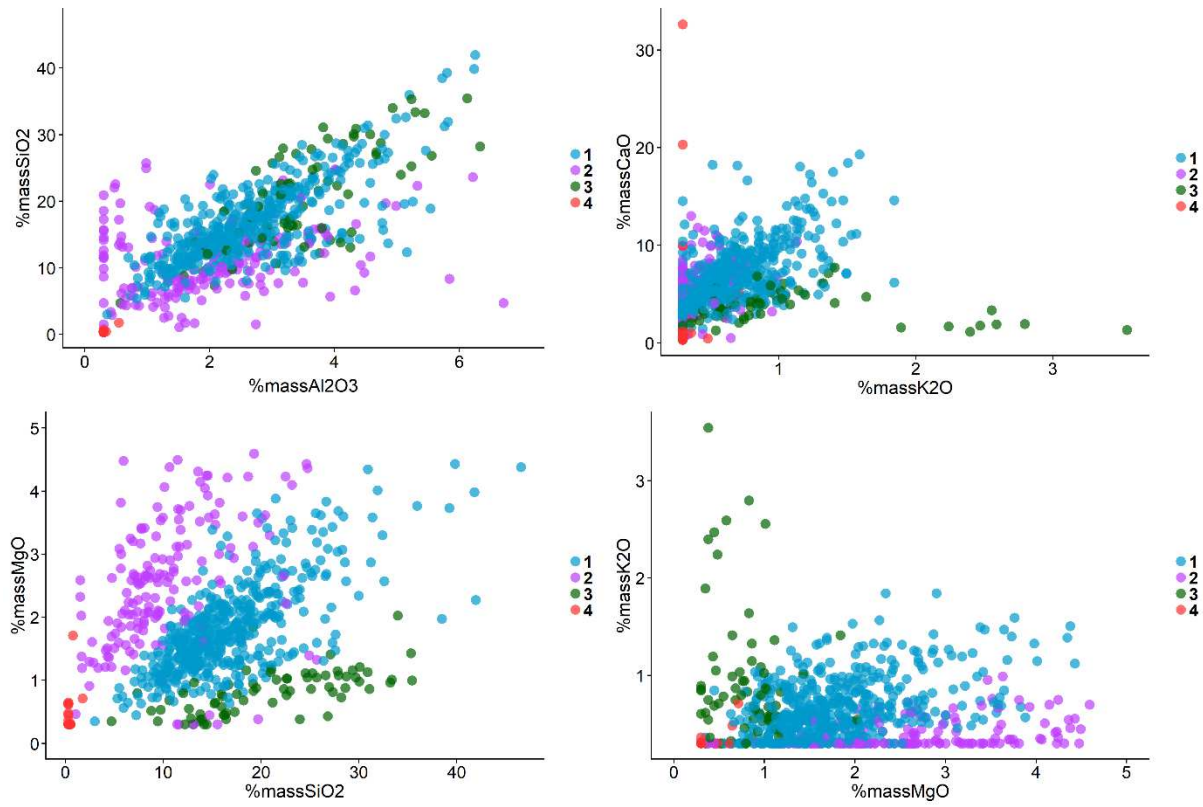
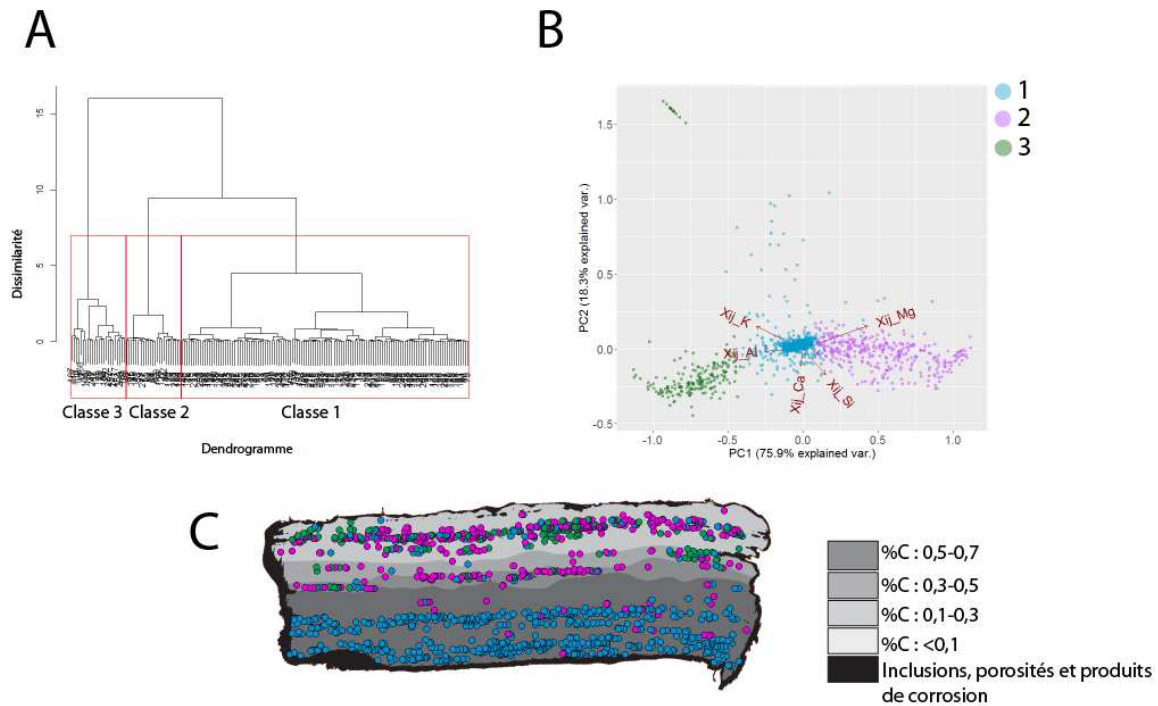


Figure 13 – Bivariés pour l'échantillon H26

• STS_6

Trois familles ont été définies. La classe 1 est presque essentiellement contenue dans la partie aciérée, les classes 2, 3 dans la partie ferritique. L'ensemble des rapports élémentaires de la classe 1 sont constants, en revanche une partie des inclusions de la classe 3 présente un rapport $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ signe d'un enrichissement en aluminium.



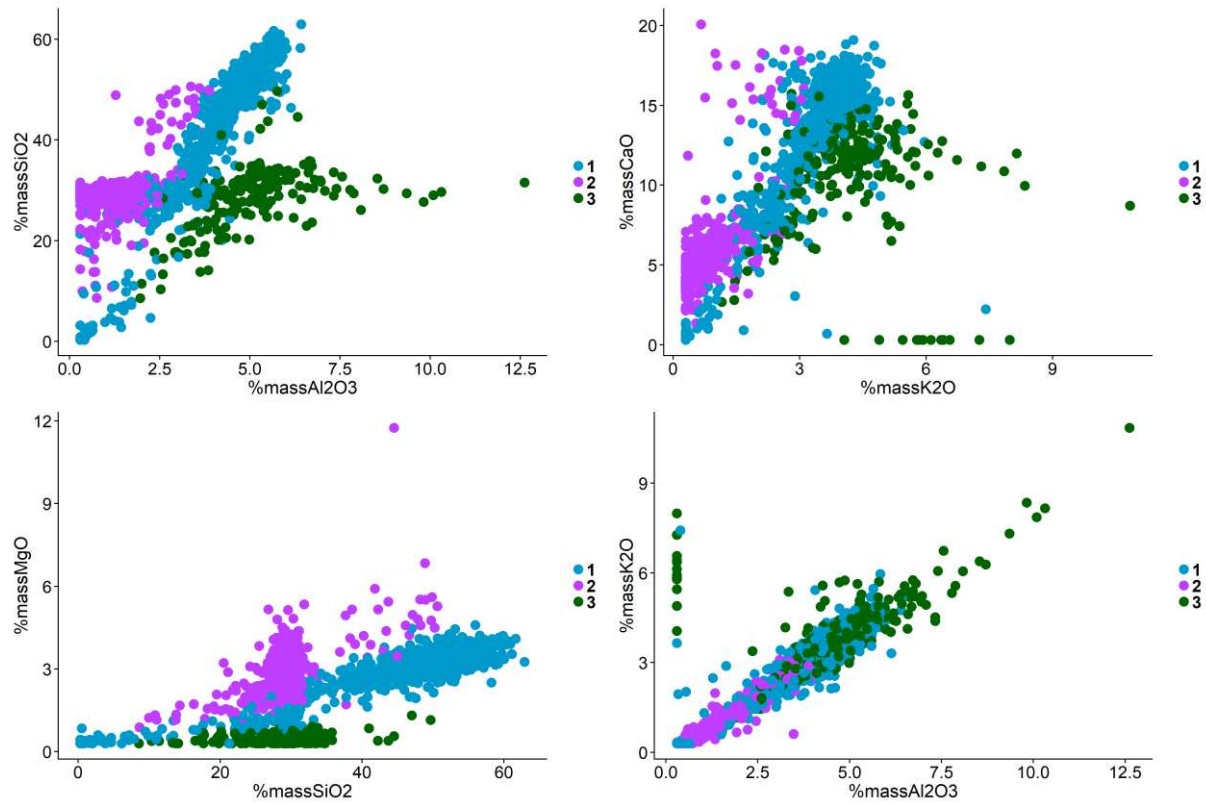


Figure 15-Bivariés pour l'échantillon STS_6

• STS_9

Trois classes ont été définies ici. Les familles 1 et 3 présentes majoritairement dans les zones riches en phosphore se distinguent chimiquement et spatialement de la famille 2.

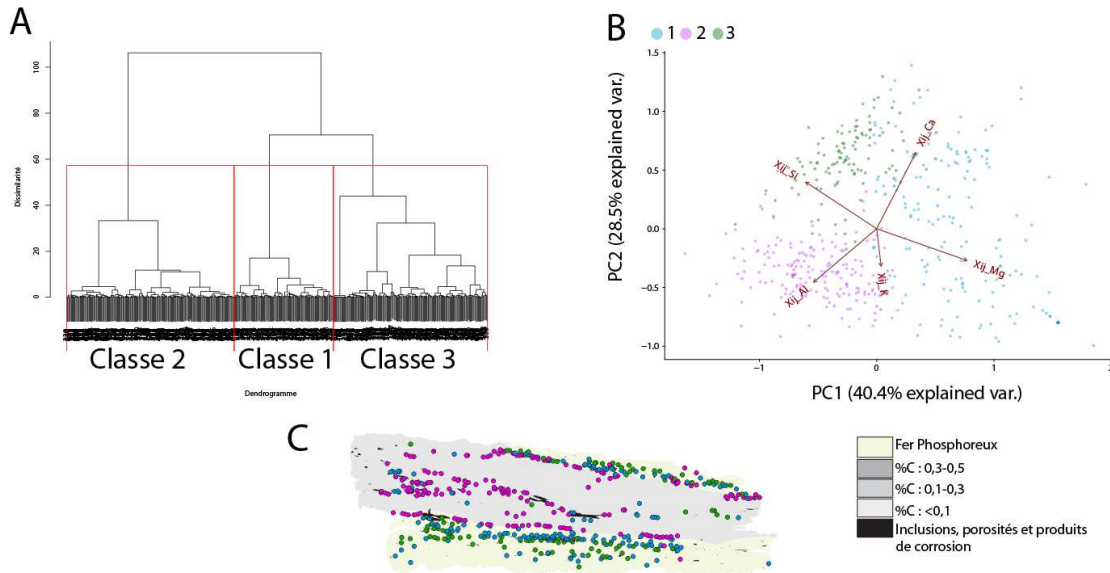


Figure 16 : Résultat du traitement multivarié sur l'échantillon STS9. « A » Dendrogramme 3 groupes ont été sélectionnés. « B » Visualisation des 3 groupes sur la PCA. « C » Répartition des familles d'inclusions sur l'échantillon

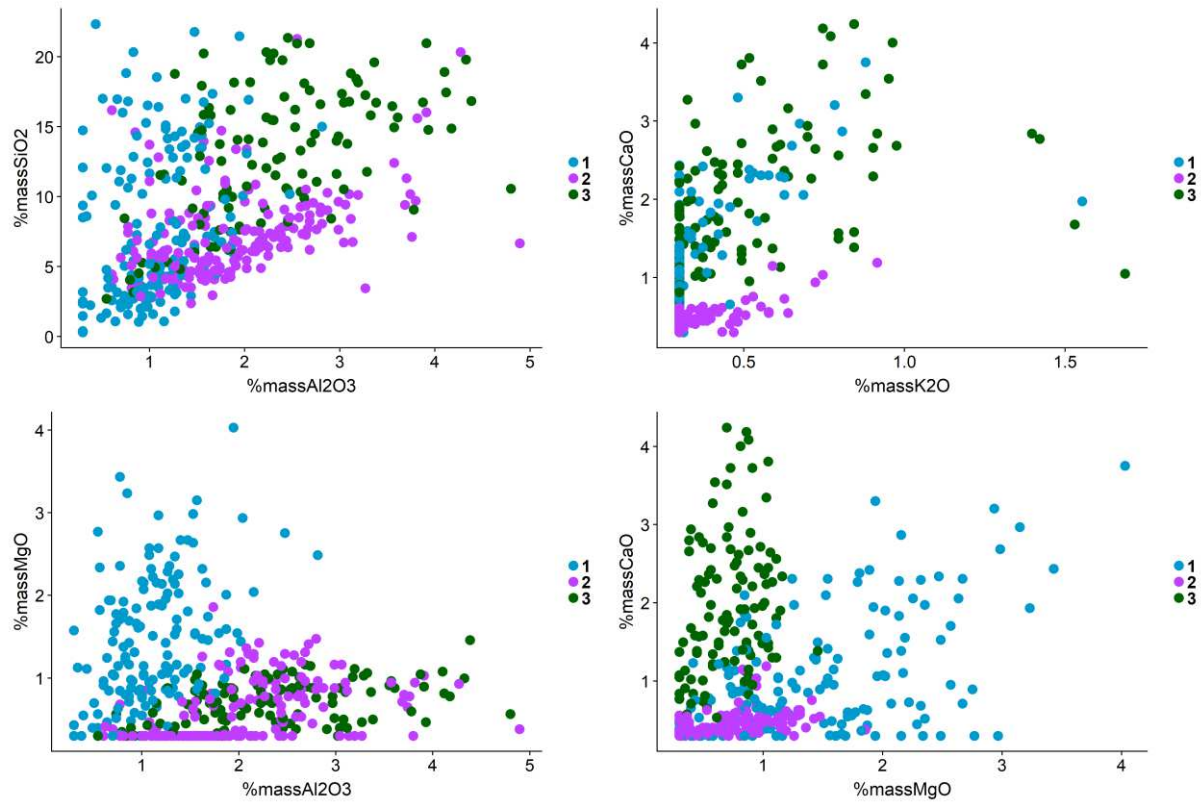


Figure 17-Bivariés pour l'échantillon STS_9

• 34820 434 1

Six groupes ont été définies. Les familles d'inclusions 4 et 5 présentent les rapports les plus constants (voir Figure 19). Les autres classes beaucoup plus dispersées n'ont pas été conservées. La famille 4 est majoritairement présente dans la partie phosphoreuse de l'échantillon, la 4 dans la partie aciérée.

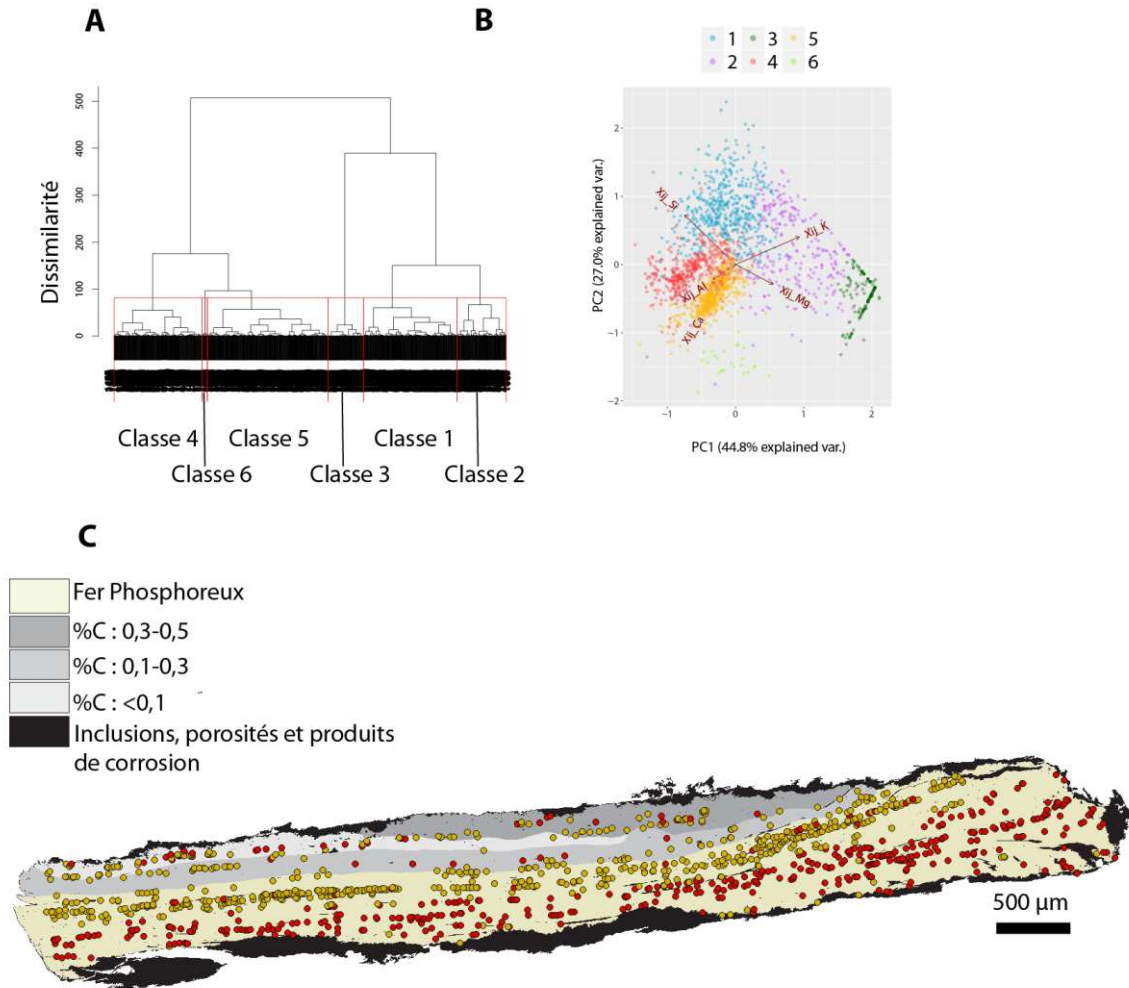


Figure 18 - Résultat du traitement multivarié sur l'échantillon 34820 434 1 effectué sur les données transformées en log ratio des éléments majeurs. « A » Dendrogramme 6 groupes ont été sélectionnés. « B » Visualisation des 6 groupes sur la PCA. « C » Répartition des familles d'inclusions sélectionnées sur l'échantillon.

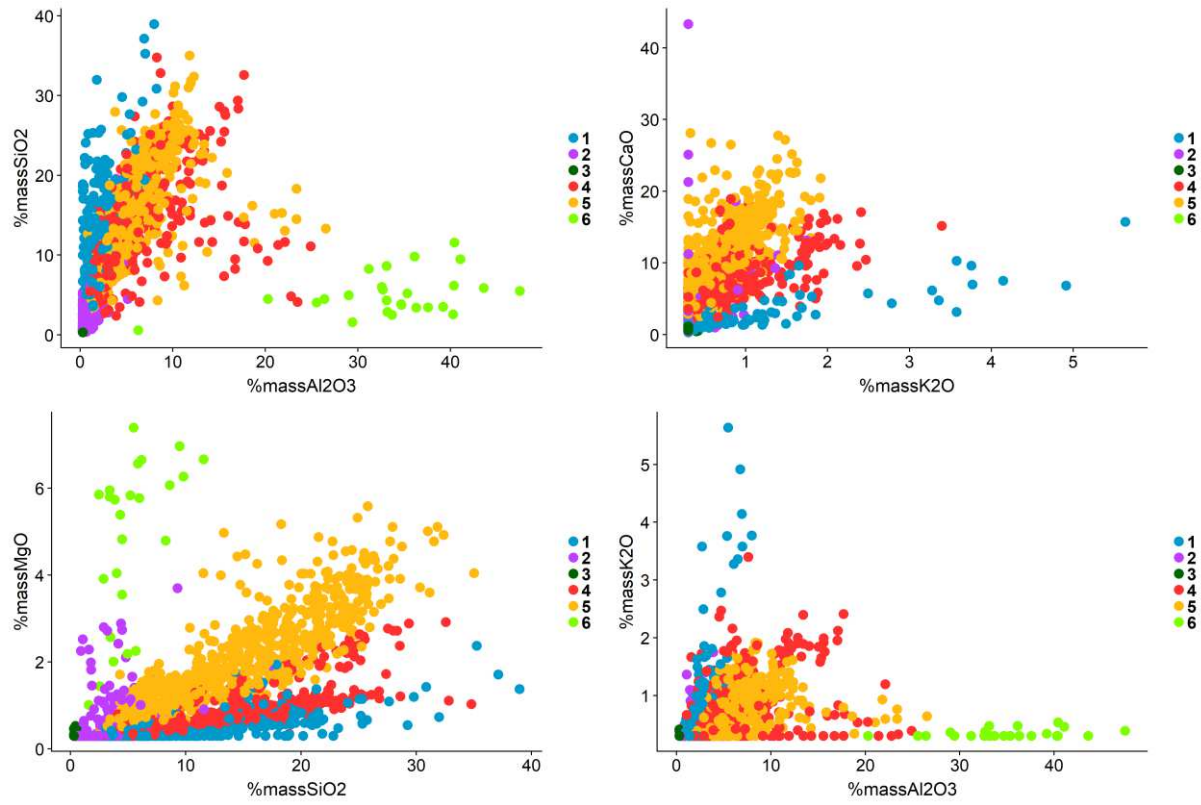


Figure 19 -Bivariés correspondants pour l'échantillon 34820 434 1

- **K229a**

Cet échantillon a été étudié en coupe transversale mais aussi en coupe latérale du fait du faible nombre d'inclusions présent en coupe transversale. Trois groupes ont été définis (voir Figure 20, Figure 21). La classe 2 (rose) est majoritairement présente dans la partie la plus carburée, tandis que la classe 3 (verte) est située dans la partie ferritique. Les résultats obtenus sur l'échantillon étudié en coupe latérale confirment ces résultats (voir Figure 22 et Figure 23).

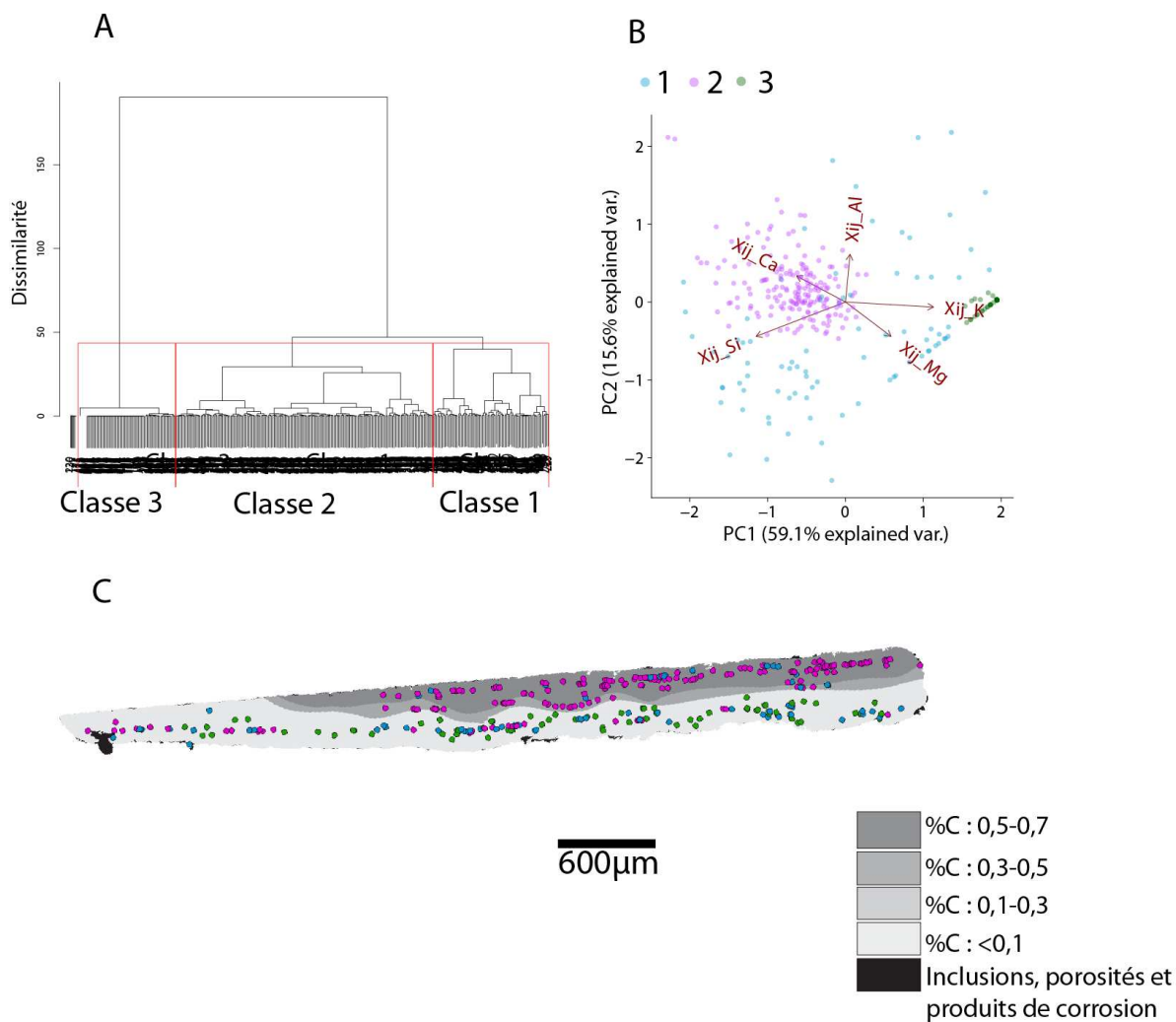


Figure 20- Résultat du traitement multivarié sur l'échantillon K229a (vue en coupe transversale) effectué sur les données transformées en log ratio des éléments majeurs. « A » Dendrogramme 3 groupes ont été sélectionnés. « B » Visualisation des 3 groupes sur la PCA. « C » Répartition des familles d'inclusions sélectionnées sur l'échantillon.

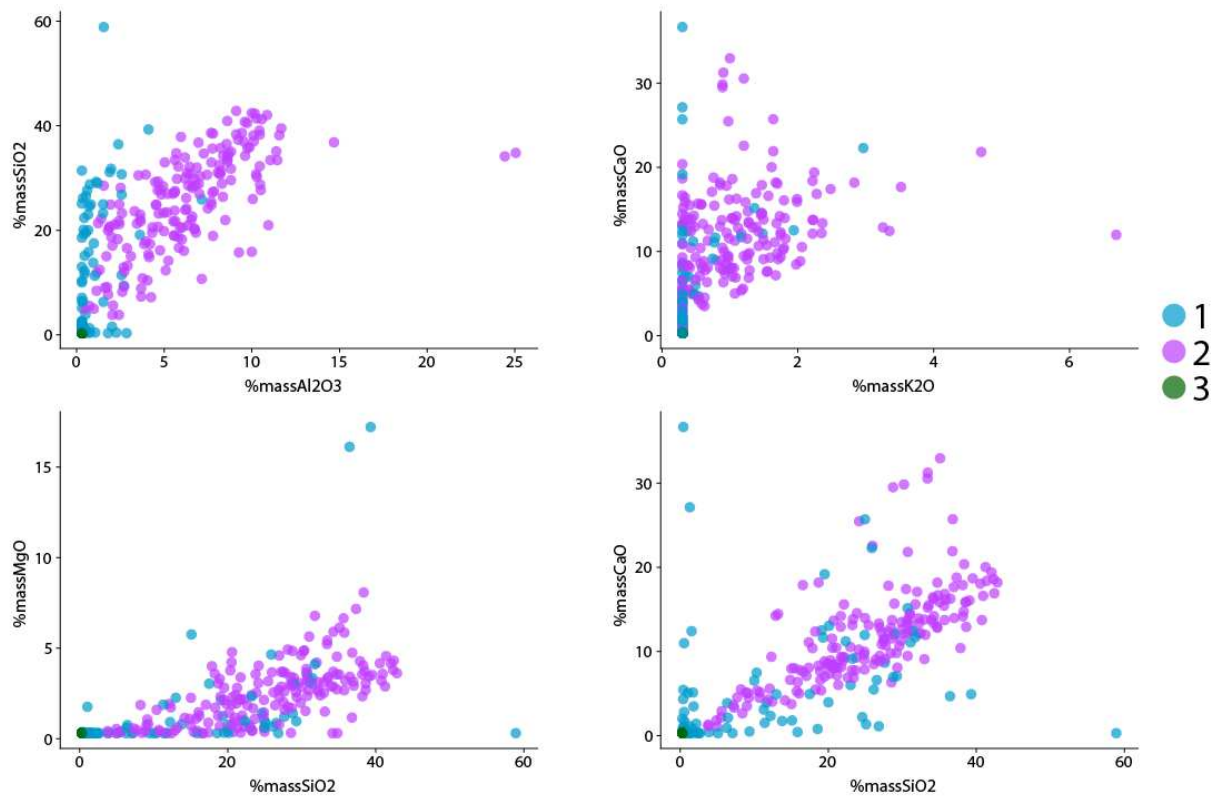


Figure 21- Bivariés pour l'échantillon K229a (échantillon étudié en coupe transversale)

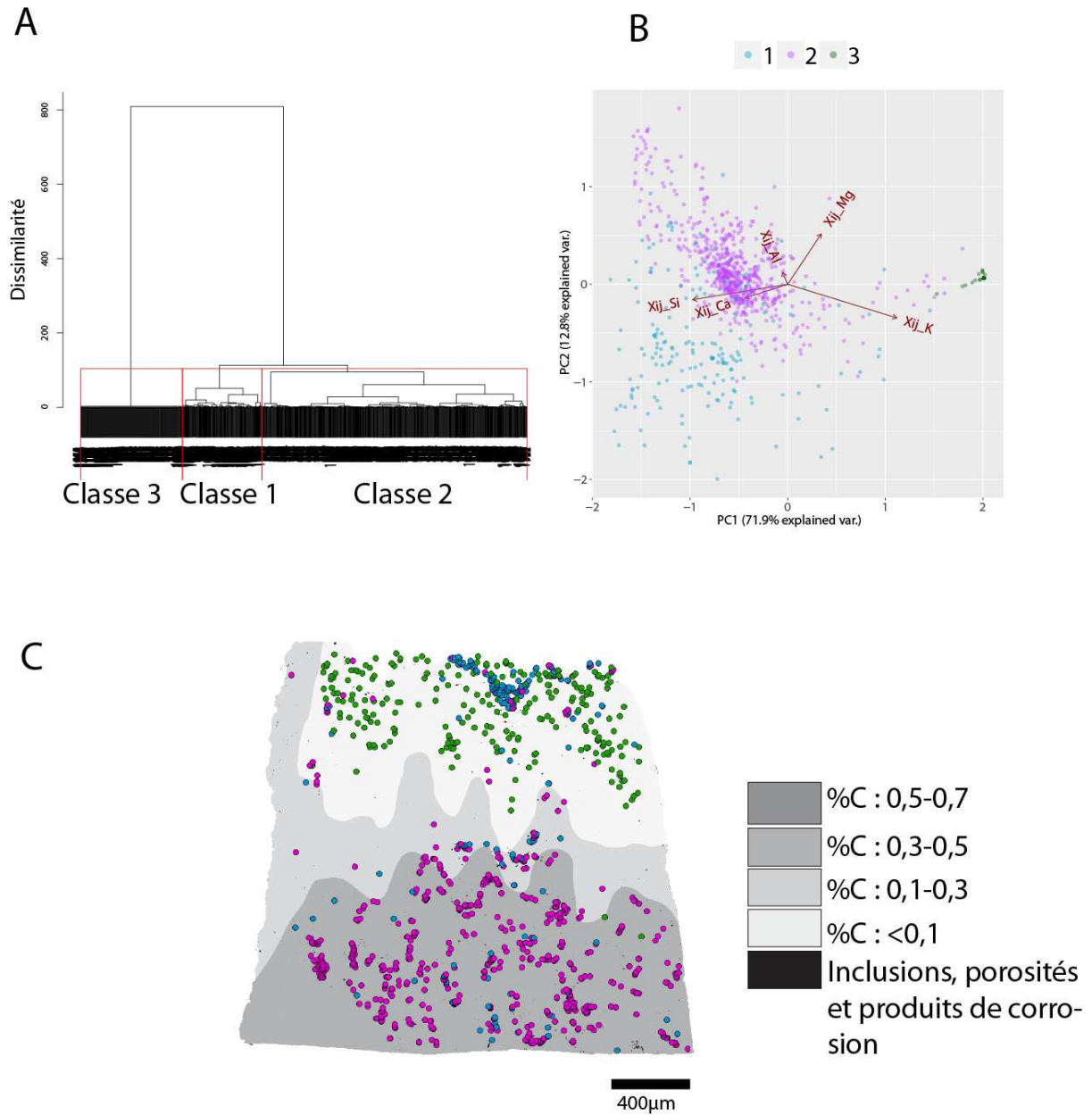


Figure 22-Résultat du traitement multivarié sur l'échantillon K229a (vue en coupe latérale) effectué sur les données transformées en log ratio des éléments majeurs. « A » Dendrogramme 3 groupes ont été sélectionnés. « B » Visualisation des 3 groupes sur la PCA. « C » Répartition des familles d'inclusions sélectionnées sur l'échantillon

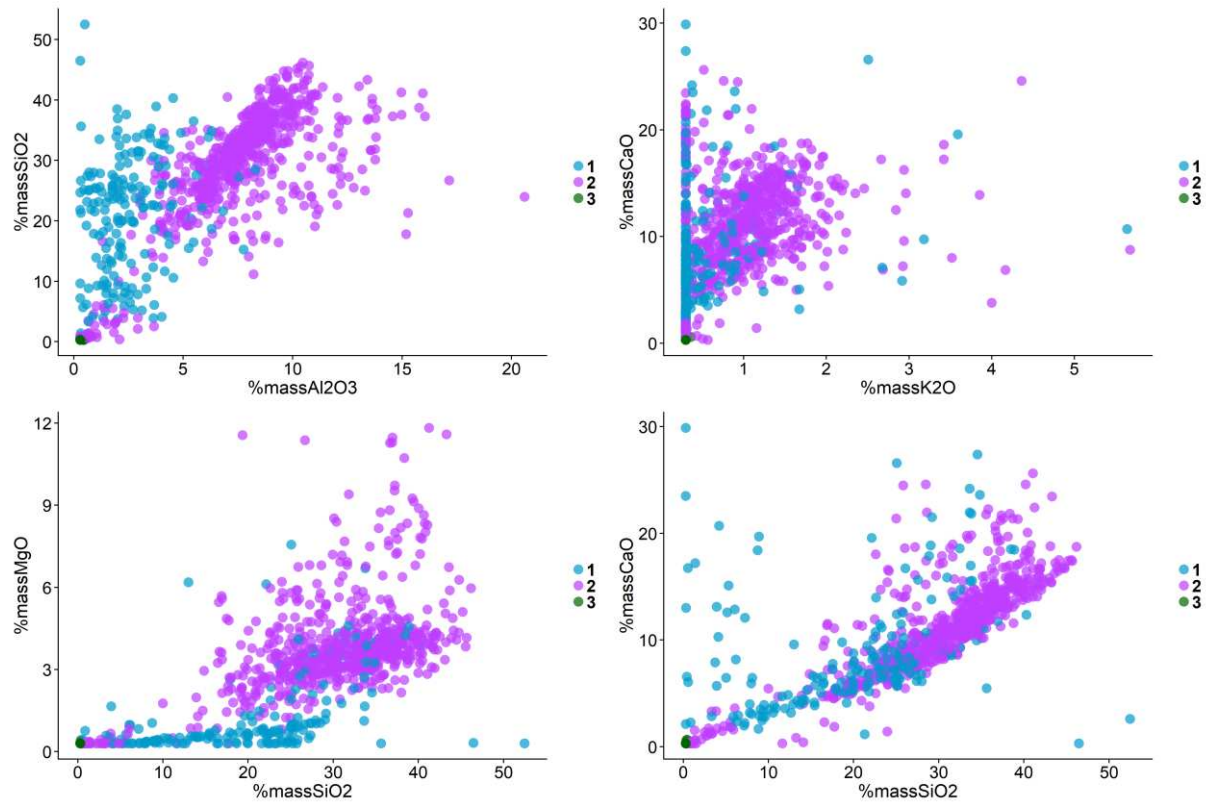


Figure 23- Bivariés pour l'échantillon K229a (échantillon étudié en coupe latérale)

Annexe 6 – Résumé des analyses effectuées pour chaque échantillon

Les synthèses des résultats obtenus pour chaque échantillon sont organisées en différentes parties :

- Une partie « *Informations générales* » qui comprend les informations relatives à l'identification de l'objet étudié (Numéro, groupe d'appartenance, brève description de l'objet, datation, lieu de fabrication supposé et références bibliographiques auxquelles se rapporter)
- Une partie « *Repérage du prélèvement* » qui présente une photographie générale de la pièce étudiée, la localisation du prélèvement effectué ainsi qu'une vue de l'échantillon.
- Une partie « *Principales caractéristiques du métal* » synthétisant les principaux résultats relatifs à l'étude du métal. Ils sont principalement déduits des observations métallographiques.
- Une partie « *Analyses métallographiques* » présentant une vue de l'échantillon appelée « mosaïque » après attaque au réactif Nital 3% (réactif qui permet de mettre en évidence la microstructure), le tracé des différentes zones de métal plus ou moins carburées déduites de l'observation des analyses métallographiques, et quelques métallographies illustrant les caractéristiques générales de la microstructure.
- Une partie « *Principaux résultats des analyses inclusionnaires* » Elle comprend une synthèse du tri inclusionnaire (nombre de classes définies et classes retenues), l'identification du procédé de réduction, et le rapprochement éventuel à un groupe de provenance ou à un ensemble géochimique de production (Espace lombard ou Minette Lorraine).

Résumé des analyses menées sur l'échantillon RX1408 S

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : Brigan_maillezaïs

Numéro de l'élément d'armure : Brigan_maillezaïs

Lieu de conservation :

Lieu de découverte : Abbaye de Maillezais (Maillezais)

Description : Fragments de plaques de brigandines retrouvées sur le parvis de l'abbaye de Maillezais (Mayenne) et datés du 3ème quart du XIVe siècle (J. Martineau et al., 2005). Chevauchement de plusieurs plaques - au moins deux - elles sont légèrement cintrées, on observe des traces de cuir perminéralisé et des traces de tissus à la surface d'une des plaques (M.Linlaud)

Datation : 3ème quart du XIVe siècle (Contexte de découverte archéologique (stratigraphie))

Lieu de fabrication supposé :

Région : Indéterminée

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Plaque de brigandine

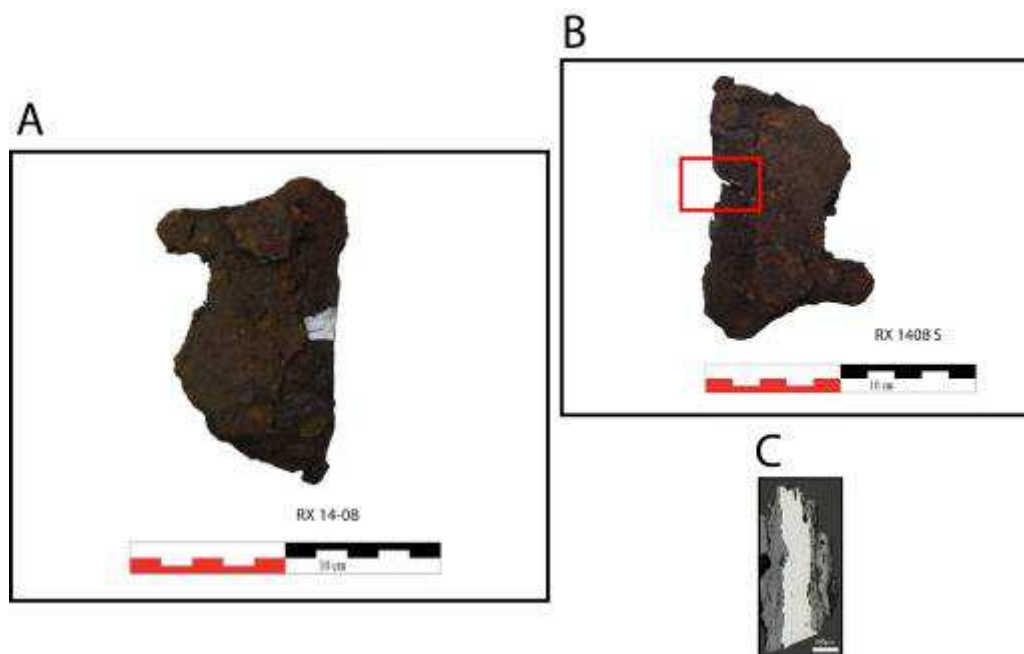
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique : (J. Martineau et al., 2005)

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Le prélèvement a été opéré sur un bord de la plaque

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[50-200]	Non résolue	Non	Oui	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
1,3	0,06	0,00	172 ($\sigma=11$)	0,10	Non

Commentaires :

Cet échantillon présente une structure ferritique. Des structures fantômes ont été mises en évidence sur une partie de l'échantillon où les grains sont de plus grande taille. Elles témoignent de la présence de phosphore en solution solide. Les grains sont parfois fortement écrouis selon la direction de martelage ce qui prouve que le métal n'a pas subi de recuit à l'issue de la réalisation de la plaque.

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon

(après attaque au Nital 3%)

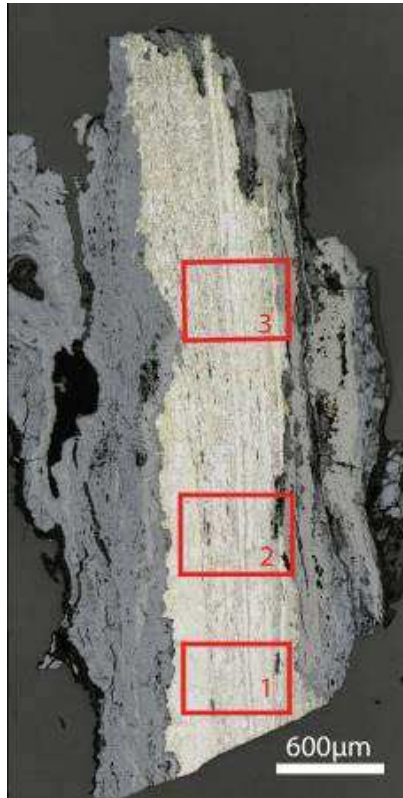
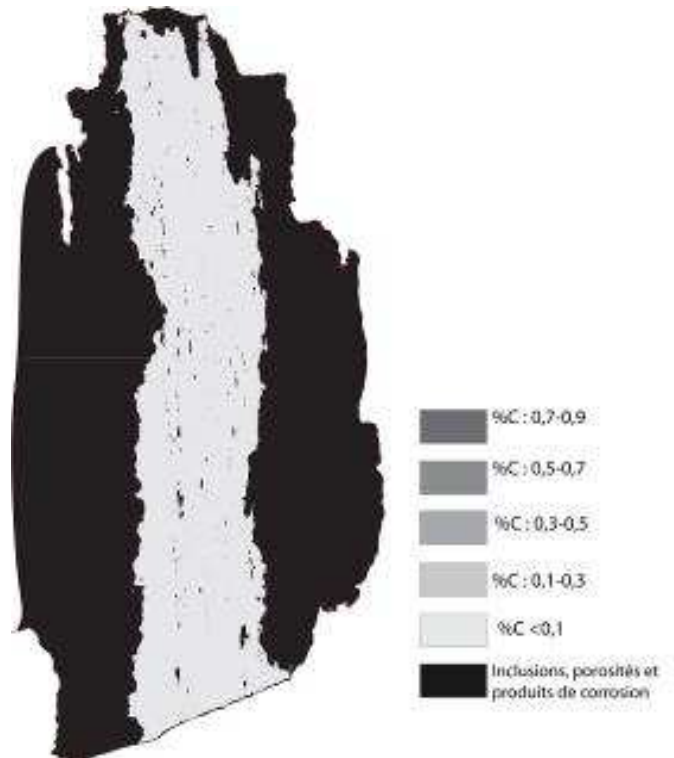


Schéma correspondant



Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



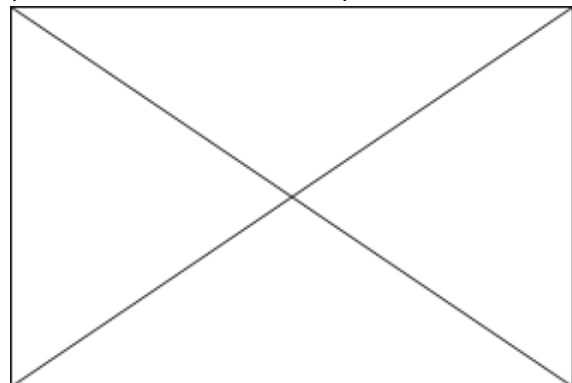
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
Non défini	Non défini

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Non défini	Non défini
Abaque	Non défini	
PROCEDE	Non défini	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon RX1408 I

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : Brigan_maillezais

Numéro de l'élément d'armure : Brigan_maillezais

Lieu de conservation :

Lieu de découverte : Abbaye de Maillezais (Maillezais)

Description : Fragments de plaques de brigandines retrouvées sur le parvis de l'abbaye de Maillezais (Mayenne) et datés du 3ème quart du XIVe siècle (J. Martineau et al., 2005). Chevauchement de plusieurs plaques - au moins deux - elles sont légèrement cintrées, on observe des traces de cuir perminéralisé et des traces de tissus à la surface d'une des plaques (M. Linlaud)

Datation : 3ème quart du XIVe siècle (Contexte de découverte archéologique (stratigraphie))

Lieu de fabrication supposé :

Région : Indéterminée

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Plaque de brigandine

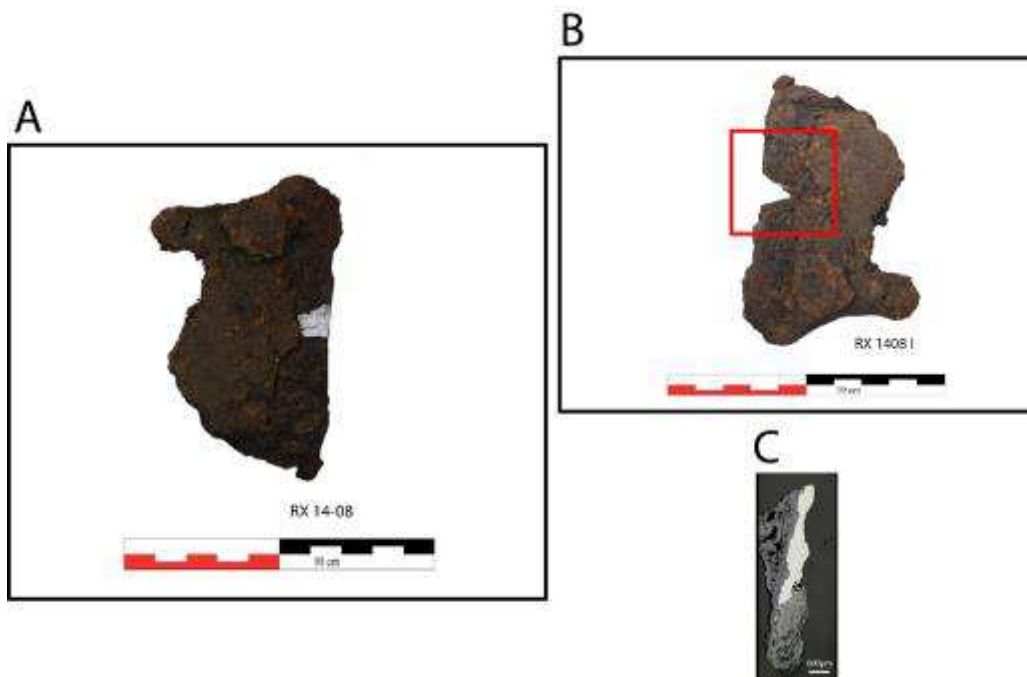
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique : (J. Martineau et al., 2005)

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Le prélèvement a été opéré sur un bord de la plaque

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[50-200]	Globulaire	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
0,2	0,06	0,00	155 ($\sigma=12$)	<0,1	Non

Commentaires :

Cet échantillon présente une structure ferrito-perlitique à bas taux de carbone. La forme de la perlite, globulaire, révèle qu'un recuit a été opéré. Toutefois l'échantillon est fortement corrodé, ainsi il est possible qu'une partie de l'information relative à la nature du métal ait été perdue.

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

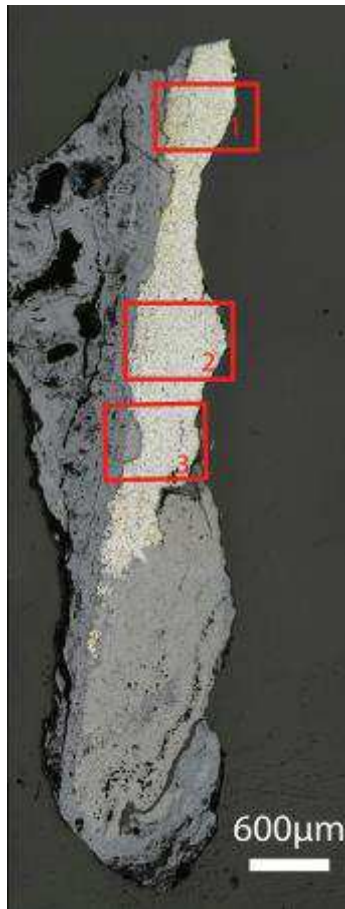
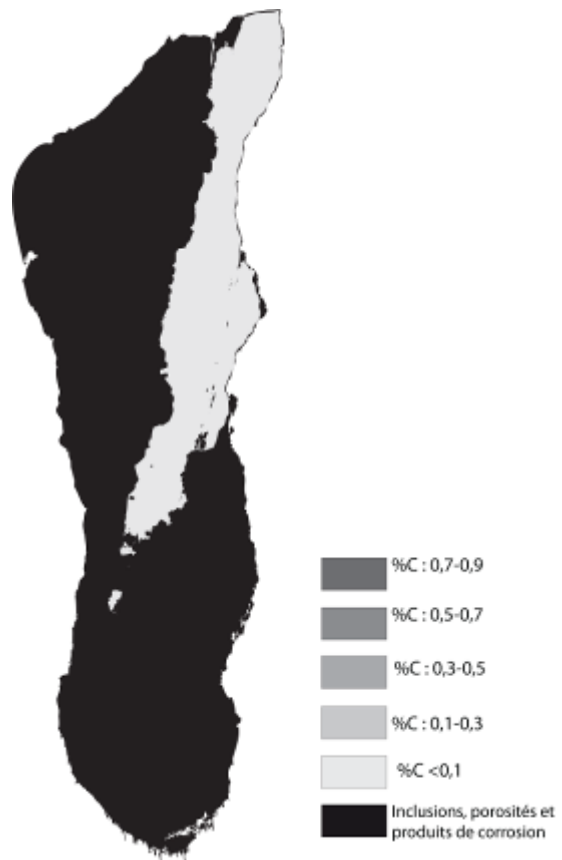
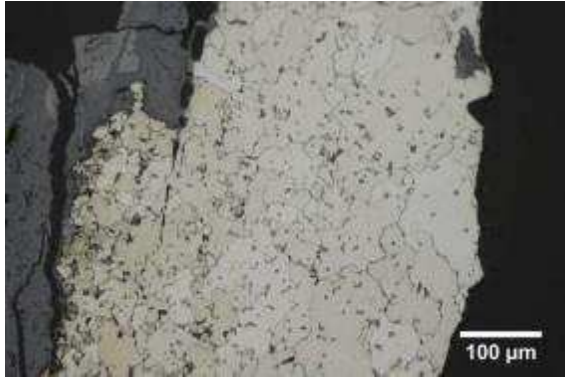


Schéma correspondant



Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



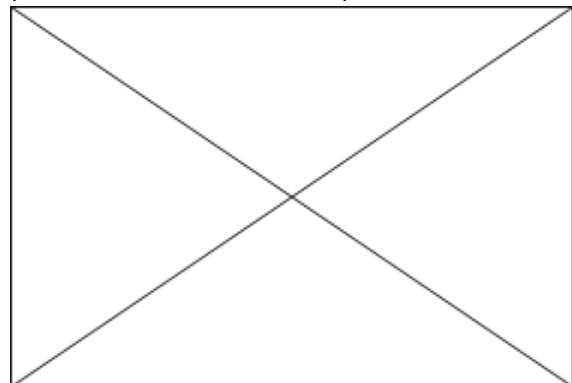
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
2	1

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Direct	<0,01
Abaque	Direct	
PROCEDE	Direct	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon RX14 4

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : Brigan_maillezaïs

Numéro de l'élément d'armure : Brigan_maillezaïs

Lieu de conservation :

Lieu de découverte : Abbaye de Maillezaïs (Maillezaïs)

Description : Fragments de plaques de brigandines retrouvées sur le parvis de l'abbaye de Maillezaïs (Mayenne) et datés du 3ème quart du XIVe siècle (J. Martineau et al., 2005). Chevauchement de plusieurs plaques légèrement cintrées. La radiographie révèle quatre perforations munies de rivets en forme de fleur et en alliage cuivreux, certainement deux sur chaque plaque (M. Linlaud)

Datation : 3ème quart du XIVe siècle (Contexte de découverte archéologique (stratigraphie))

Lieu de fabrication supposé :

Région : Indéterminée

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Plaque de brigandine

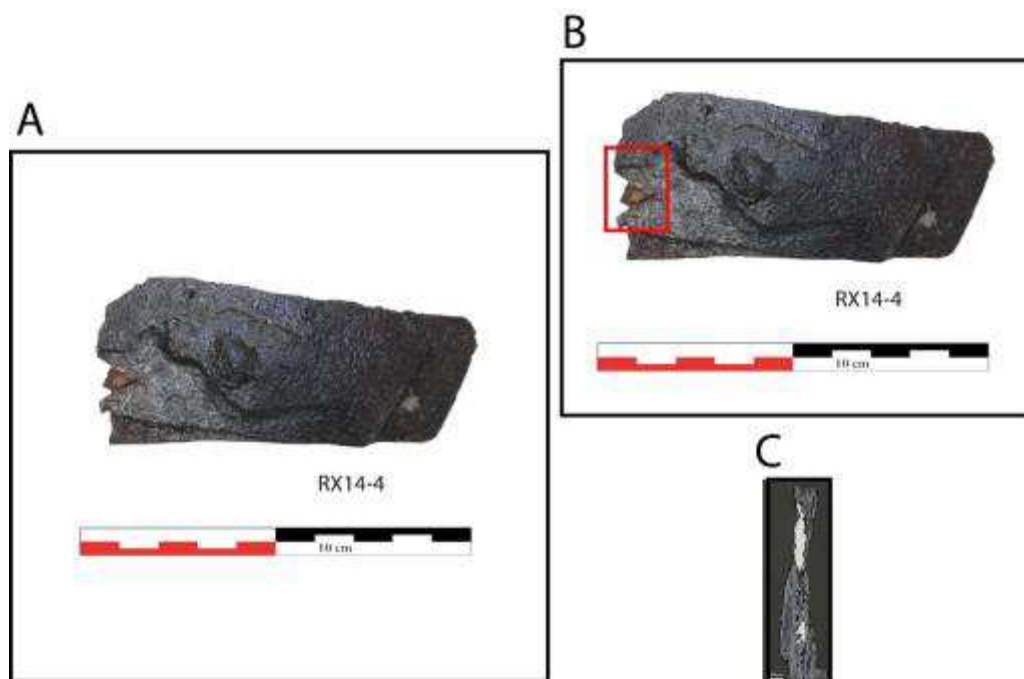
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique : (J. Martineau et al., 2005)

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Le prélèvement a été opéré sur un bord de la plaque

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[50-200]	Non résolue	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
1,0	0,06	0,00	150 ($\sigma=6$)	<0,1	Non

Commentaires :

Cet échantillon présente la structure d'un acier très faiblement carburé. L'échantillon est fortement corrodé, ainsi il est possible qu'une partie de l'information relative à la nature du métal ait été perdue.

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

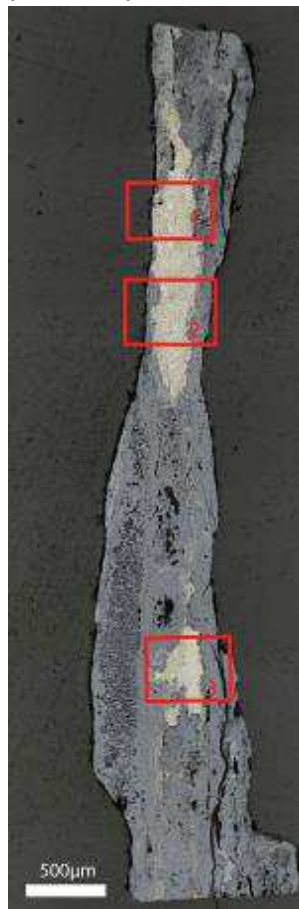
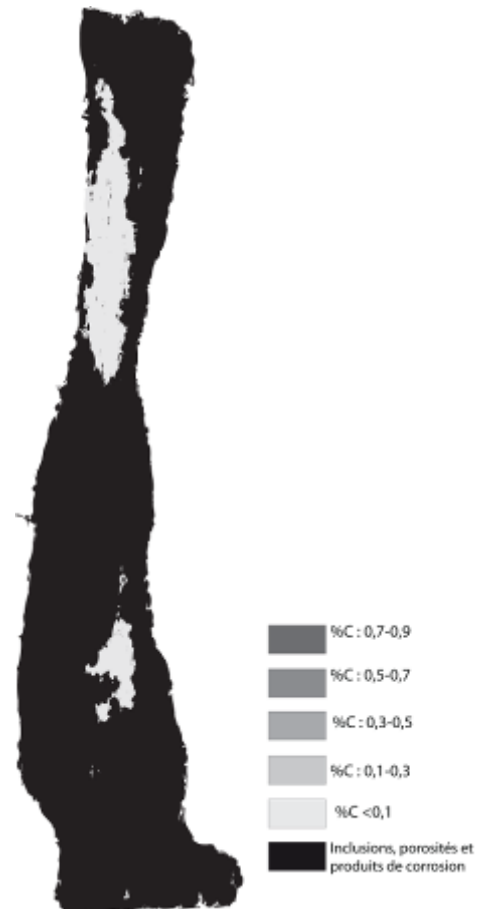


Schéma correspondant



Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



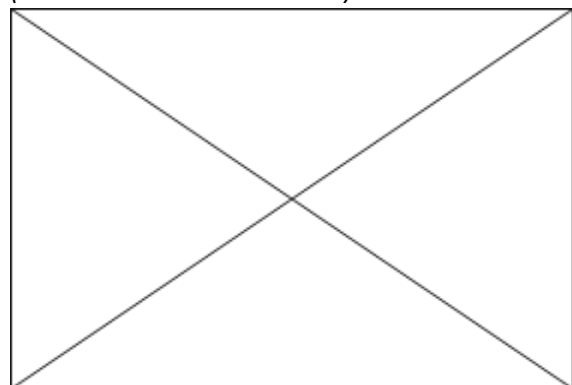
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
4	2

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Direct	<0,01
Abaque	Direct	
PROCEDE	Direct	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon RX 612

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : Brigan_maillezais

Numéro de l'élément d'armure : Brigan_maillezais

Lieu de conservation :

Lieu de découverte : Abbaye de Maillezais (Maillezais)

Description : Fragments de plaques de brigandines retrouvées sur le parvis de l'abbaye de Maillezais (Mayenne) et datés du 3ème quart du XIVe siècle (J. Martineau et al., 2005). Chevauchement de trois plaques de brigandines au moins deux sont complètes. On observe deux rangs de trois rivets en fleur et alliage cuivreux (M. Linlaud)

Datation : 3ème quart du XIVe siècle (Contexte de découverte archéologique (stratigraphie))

Lieu de fabrication supposé :

Région : Indéterminée

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Plaque de brigandine

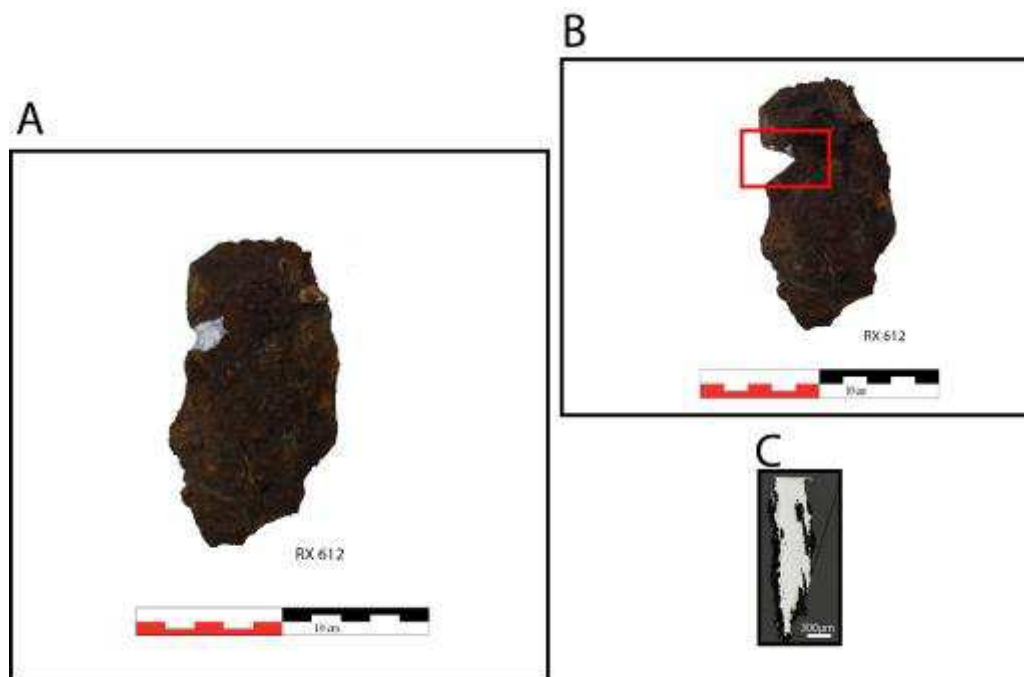
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique : (J. Martineau et al., 2005)

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Le prélèvement a été opéré sur un bord de la plaque

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[<50]	Globulaire	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
1,9	0,14	0,07	180 ($\sigma=12$)	Non dosé	Non

Commentaires :

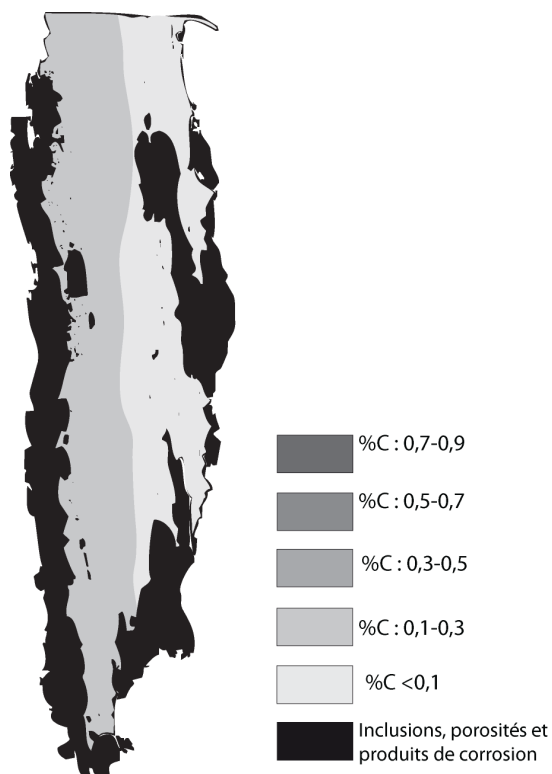
Cet échantillon présente la structure d'un acier faiblement carburé, légèrement hétérogène en teneur en carbone. Les attaques chimiques (Nital et Oberhoffer) semblent mettre en évidence deux bandes de métal de teneur en carbone et de taille de grain différentes. La forme de la perlite, globulaire, témoigne qu'un recuit a été opéré sur le métal.

Analyses métallographiques

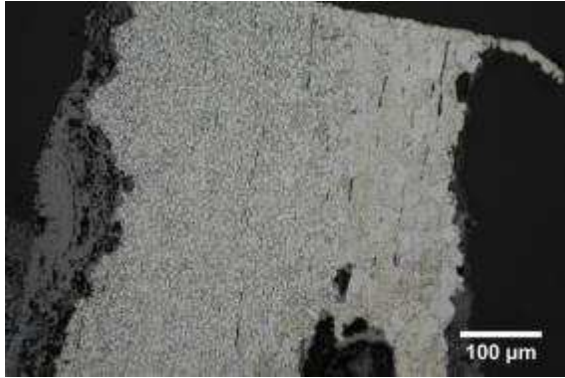
Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)



Schéma correspondant



Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



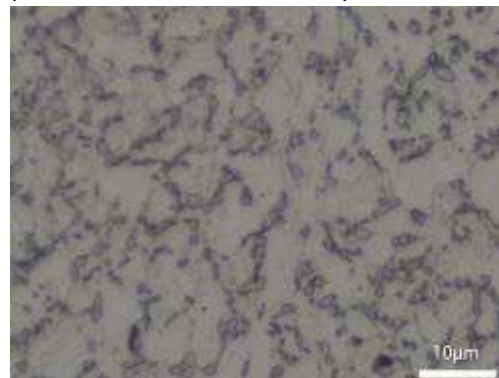
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
Non défini	Non défini

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Non défini	Non défini
Abaque	Non défini	
PROCEDE	Non défini	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Dissier, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon RX14 EN_1

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : Brigan_maillezais

Numéro de l'élément d'armure : Brigan_maillezais

Lieu de conservation :

Lieu de découverte : Abbaye de Maillezais (Maillezais)

Description : Fragments de plaques de brigandines retrouvées sur le parvis de l'abbaye de Maillezais (Mayenne) et datés du 3ème quart du XIVe siècle (J. Martineau et al., 2005). Chevauchement de plusieurs plaques. (M. Linlaud)

Datation : 3ème quart du XIVe siècle (Contexte de découverte archéologique (stratigraphie))

Lieu de fabrication supposé :

Région : Indéterminée

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Plaque de brigandine

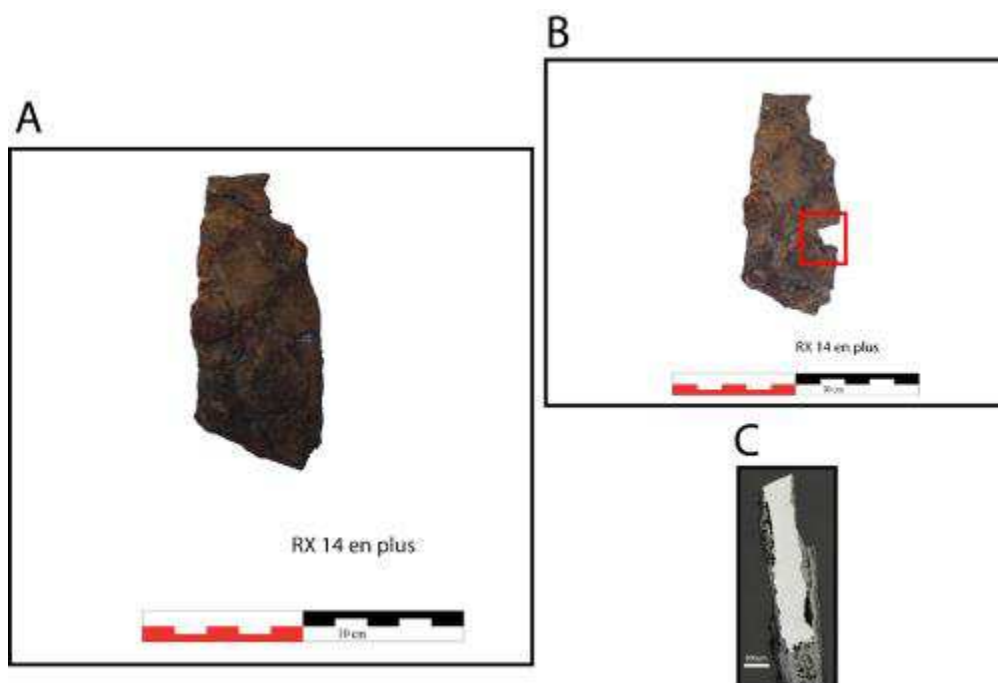
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique : (J. Martineau et al., 2005)

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Le prélèvement a été opéré sur un bord de la plaque

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[50-200]	Globulaire	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
0,4	0,10	0,06	166 ($\sigma = 12$)	Non dosé	Non

Commentaires :

Cet échantillon présente la structure d'un acier faiblement carburé, légèrement hétérogène en teneur en carbone. La forme de la perlite, globulaire, témoigne qu'un recuit a été opéré sur le métal.

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

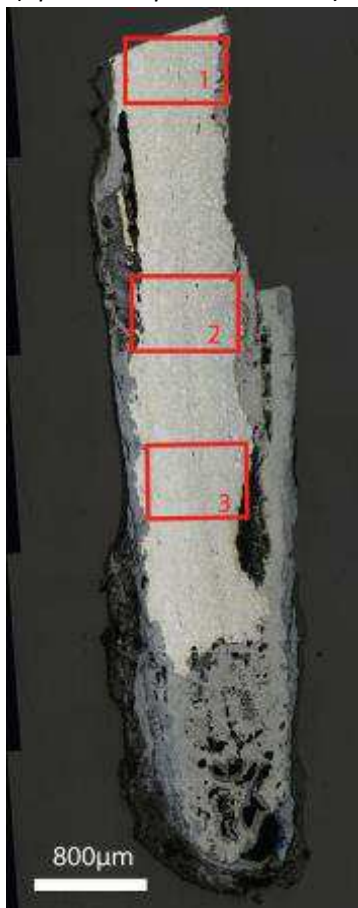
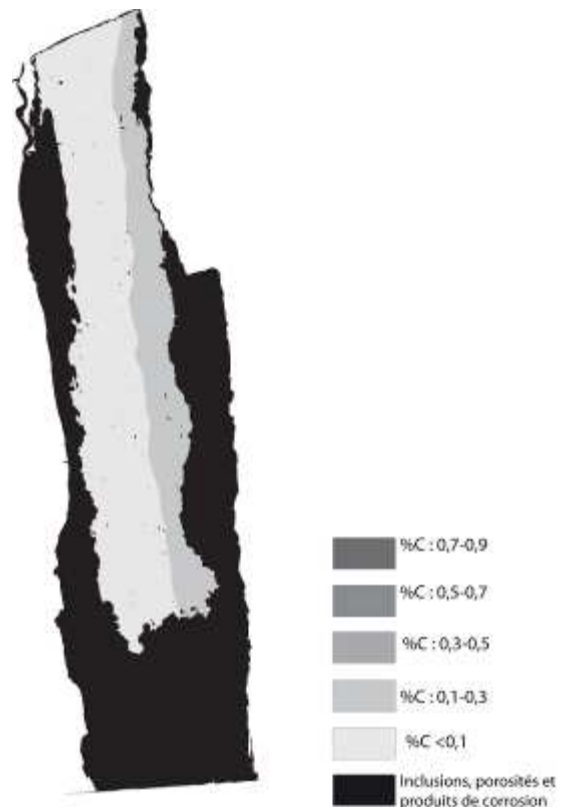


Schéma correspondant



Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



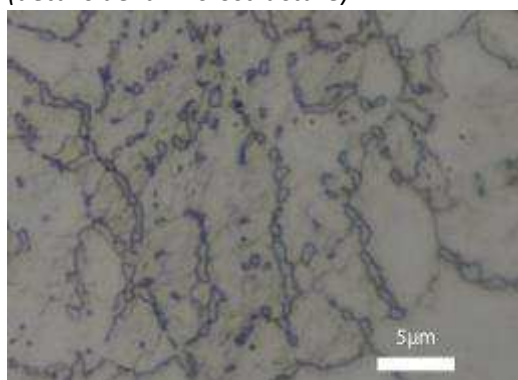
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
3	3

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Direct	<0,01
Abaque	Direct	
PROCEDE	Direct	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon RX14 EN_2

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : Brigan_maillezais

Numéro de l'élément d'armure : Brigan_maillezais

Lieu de conservation :

Lieu de découverte : Abbaye de Maillezais (Maillezais)

Description : Fragments de plaques de brigandines retrouvées sur le parvis de l'abbaye de Maillezais (Mayenne) et datés du 3ème quart du XIVe siècle (J. Martineau et al., 2005). Chevauchement de plusieurs plaques. (M. Linlaud)

Datation : 3ème quart du XIVe siècle (Contexte de découverte archéologique (stratigraphie))

Lieu de fabrication supposé :

Région : Indéterminée

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Plaque de brigandine

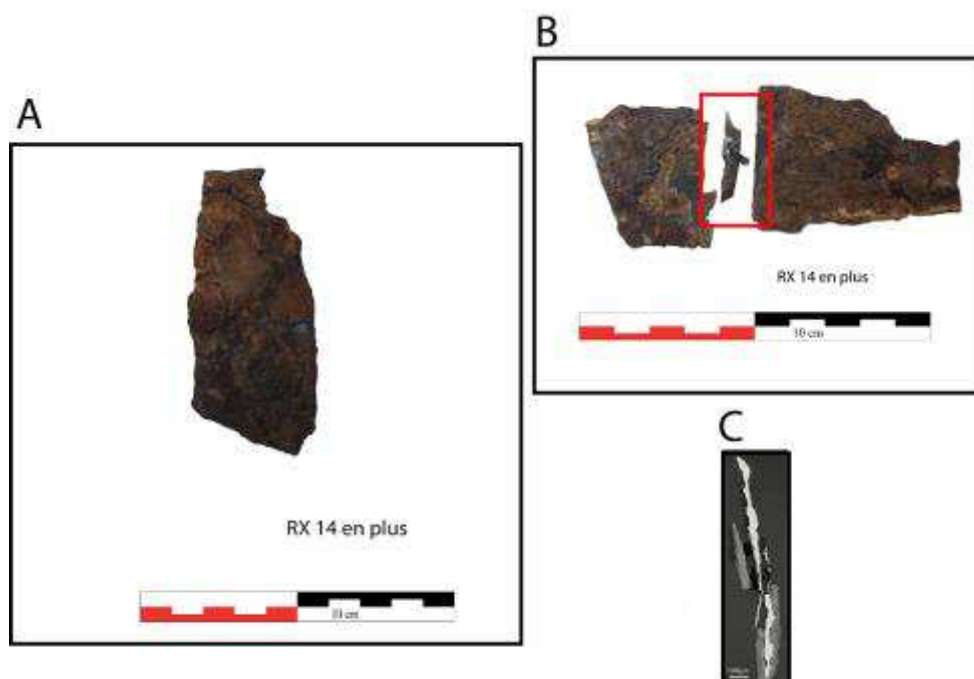
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique : (J. Martineau et al., 2005)

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Le prélèvement a été opéré en coupe sur la même plaque que l'échantillon RX14 EN_1

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[50-200]	Globulaire	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
0,8	0,06	0,00	158 ($\sigma=8$)	<0,1	Non

Commentaires :

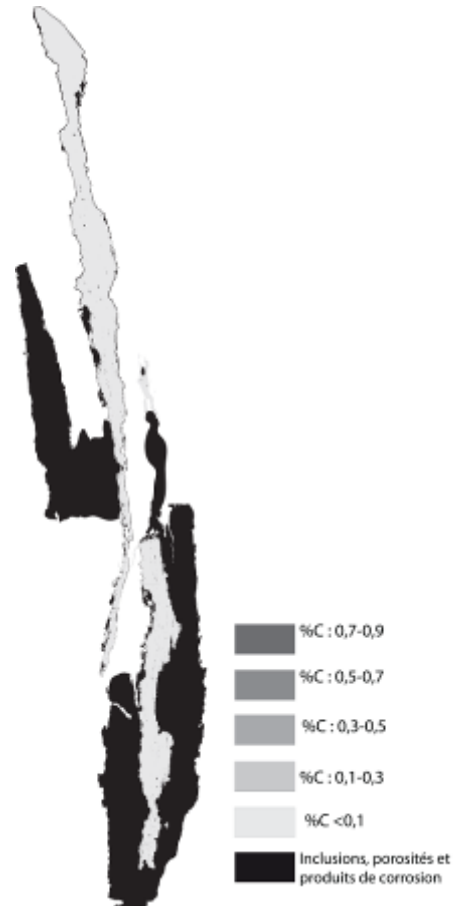
Cet échantillon présente la structure d'un acier très faiblement carburé (<0,1%). La forme de la perlite, globulaire, témoigne qu'un recuit à été opéré sur le métal.

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)



Schéma correspondant



Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
Non défini	Non défini

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Non défini	Non défini
Abaque	Non défini	
PROCEDE	Non défini	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon 430AG442-LAM46482

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : 430AG442-LAM46482

Numéro de l'élément d'armure : 430AG442-LAM46482

Lieu de conservation :

Lieu de découverte : Château de l'avant-garde de Pompey (Pompey)

Description : Ce fragment a été identifié par M. Linlaud et O. Renaudeau comme une partie supérieure de gantelet. Il pourrait aussi d'agir d'un haut de cuissarde. Il pourrait appartenir à la même armure que le fragment 430AG440.

Datation : première moitié du XVI^e siècle (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Indéterminée

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Gantelet

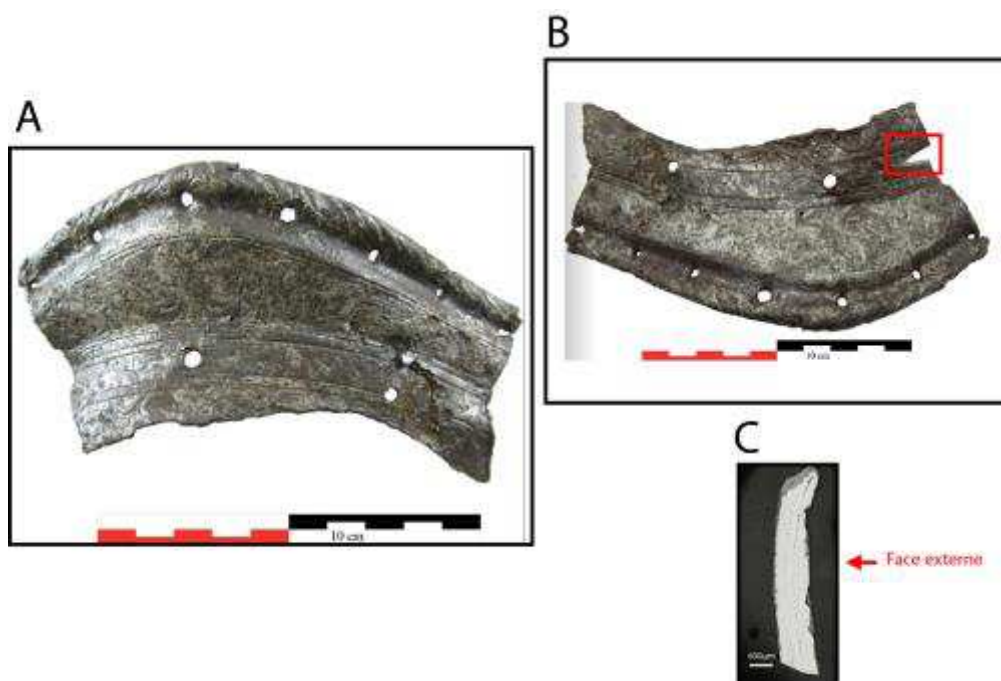
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique :

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé sur un bord de l'élément.

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[50-200]	Non résolue	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
1,6	0,11	0,07	186 ($\sigma=23$)	Non dosé	Non

Commentaires :

Cet échantillon présente la structure d'un acier faiblement carburé et légèrement hétérogène en teneur en carbone, présentant une bande centrale légèrement plus carburée (autour de 0,2%mass)

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

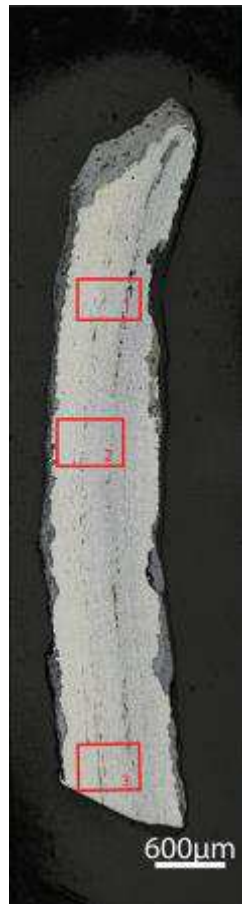


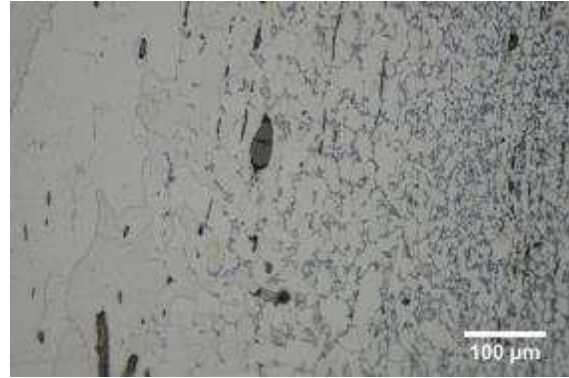
Schéma correspondant



Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



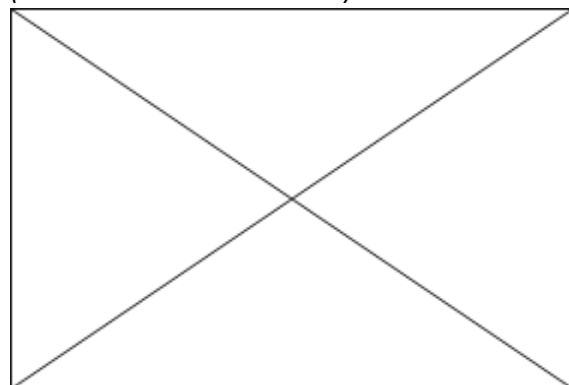
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
3	1

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Indirect	0,95
Abaque	Indirect	
PROCEDE	Indirect	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon 430AG443-LAM46483

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : Harnois_pompey

Numéro de l'élément d'armure : 430AG443-LAM46483

Lieu de conservation :

Lieu de découverte : Château de l'avant-garde de Pompey (Pompey)

Description : Ce fragment pourrait être issu de la même armure que l'échantillon 430AG440 (identifications réalisées par M. Linlaud et O. Renaudeau)

Datation : première moitié du XVI^e siècle (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : France ou Italie

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Pièce de harnois articulé

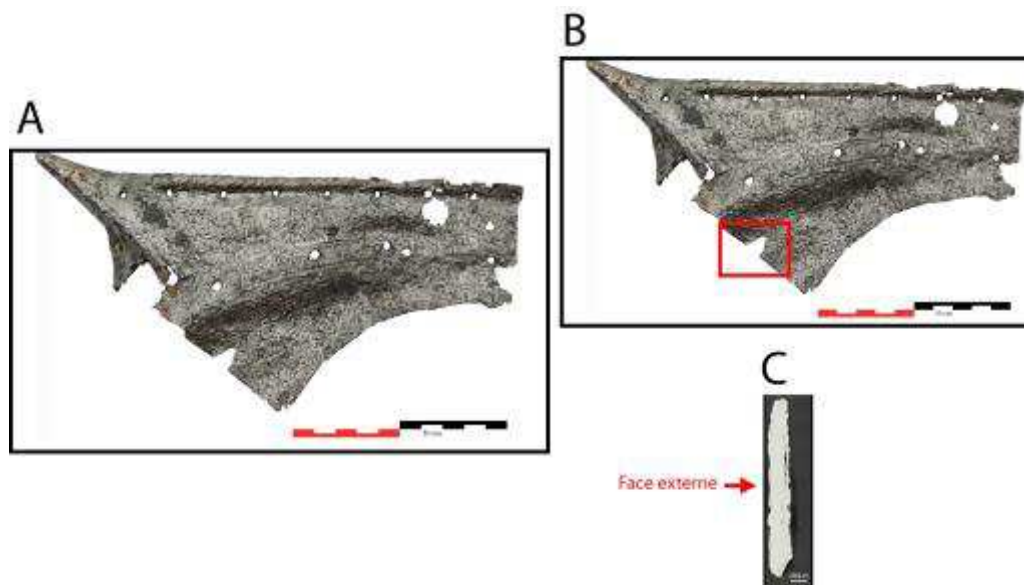
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique :

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé sur un bord de l'élément.

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[50-200]	Lamellaire	Non	Non	Oui	Oui

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
3,2	0,21	0,15	183 ($\sigma=23$)	Non dosé	Non

Commentaires :

Cet échantillon est un acier moyennement carburé hétérogène en teneur en carbone. Un léger gradient de teneur en carbone est visible. Il court de 0,5 à moins de 0,1%mass.

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

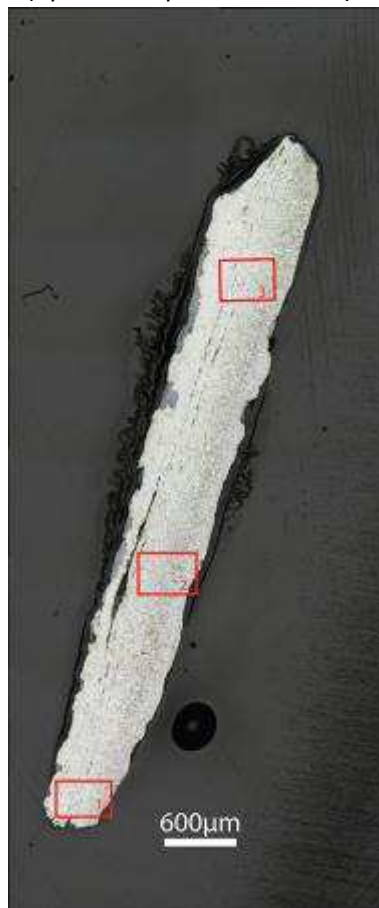
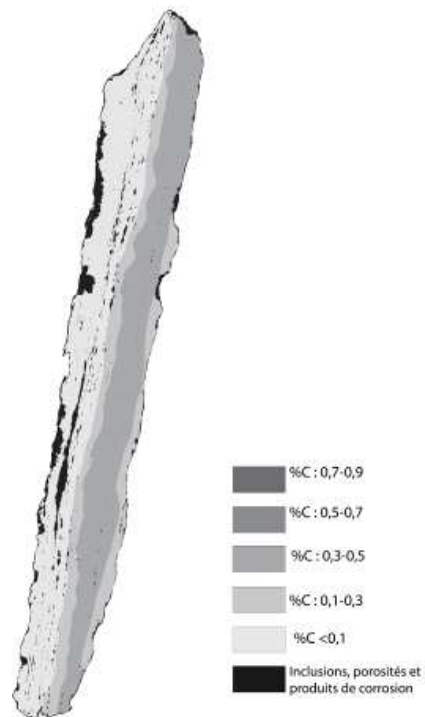
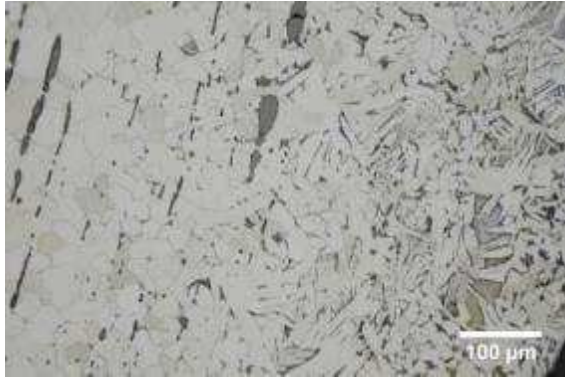


Schéma correspondant



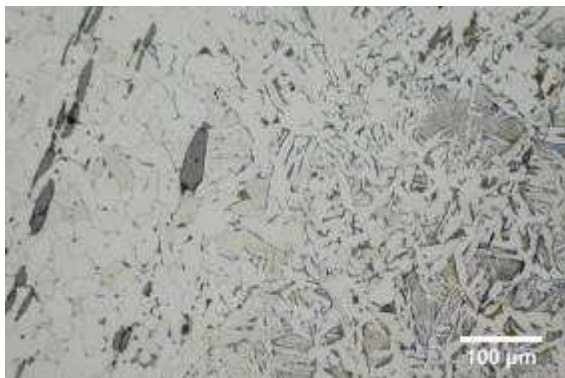
Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



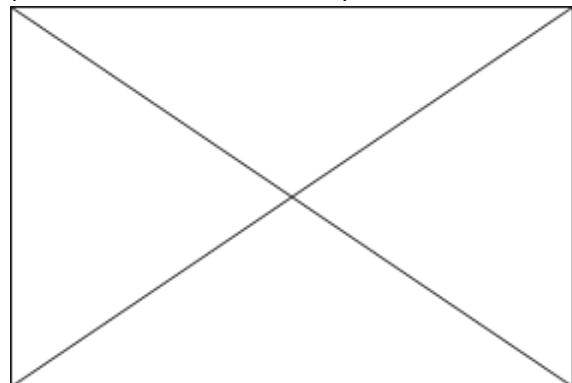
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
6	5

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Indirect	0,95
Abaque	Indirect	
PROCEDE	Indirect	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Dissier, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon 430AG441-LAM46481

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : Harnois_pompey

Numéro de l'élément d'armure : 430AG441-LAM46481

Lieu de conservation :

Lieu de découverte : Château de l'avant-garde de Pompey (Pompey)

Description : Ce fragment, fortement altéré, pourrait être associé au fragment 430AG440 (identifications réalisées par M. Linlaud et O. Renaudeau).

Datation : première moitié du XVI^e siècle (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : France ou Italie

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Pièce de harnois articulé

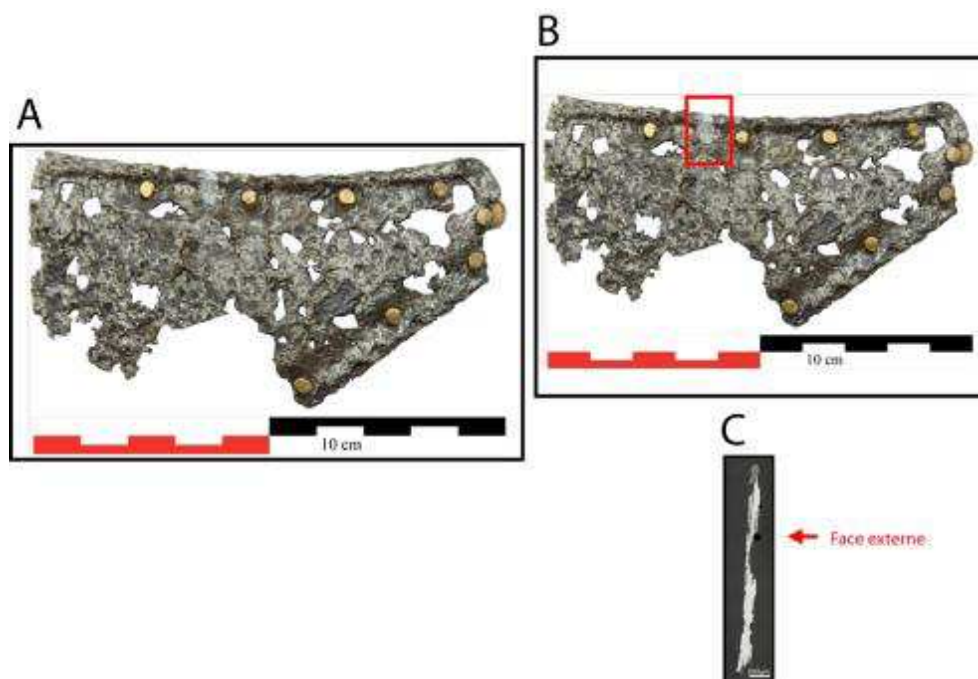
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique :

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé sur un bord de l'élément.

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[<50]	Non résolue	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
1,2	0,20	0,00	168 ($\sigma=13$)	Non dosé	Non

Commentaires :

Cet échantillon présente la structure d'un acier moyennement carburé homogène en teneur en carbone.

Analyses métallographiques

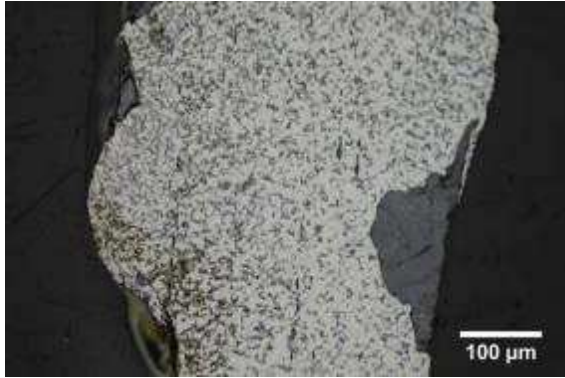
Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)



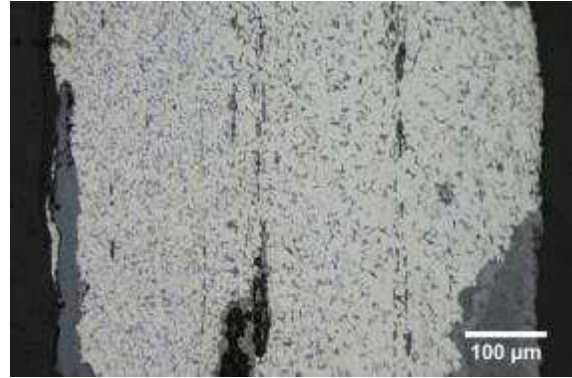
Schéma correspondant



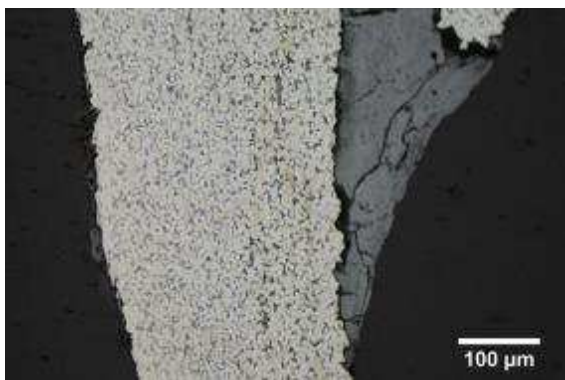
Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



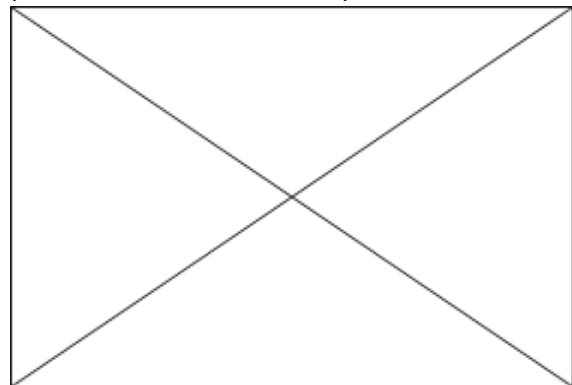
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
5	5

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Indirect	0,92
Abaque	Indirect	
PROCEDE	Indirect	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Dissier, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon 430AG484-LAM746490

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : Harnois_pompey

Numéro de l'élément d'armure : 430AG484-LAM746490

Lieu de conservation :

Lieu de découverte : Château de l'avant-garde de Pompey (Pompey)

Description : Ce fragment pourrait être issu de la même armure que l'échantillon 430AG440. En effet il est porteur de décors similaires (identifications réalisées par M. Linlaud et O. Renaudeau)

Datation : première moitié du XVI^e siècle (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : France ou Italie

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Pièce de harnois articulé

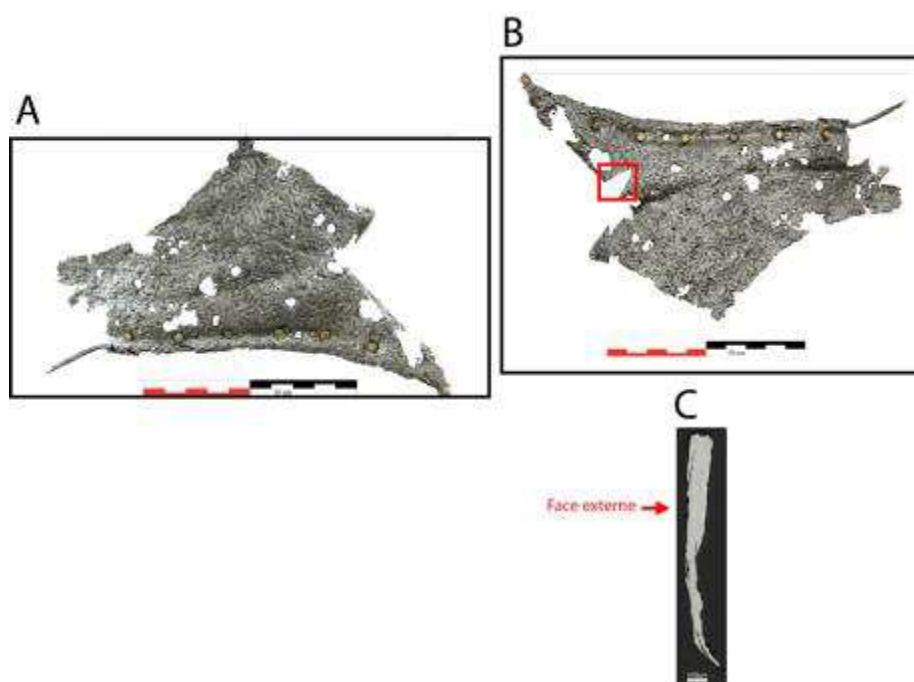
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique :

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé sur un bord du fragment

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[50-200]	Lamellaire	Non	Non	Non	Oui

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
2,6	0,24	0,17	149 ($\sigma=20$)	Non dosé	Non

Commentaires :

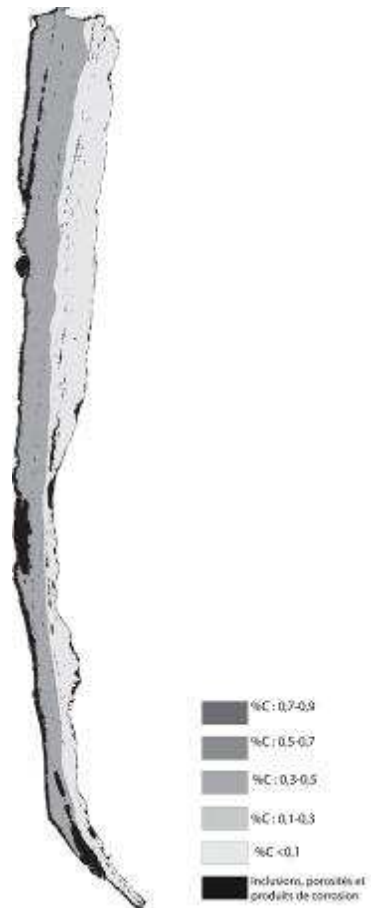
Cet échantillon est un acier moyennement carburé hétérogène en teneur en carbone. La ferrite est aciculaire par endroit (structures de Widmanstätten).

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)



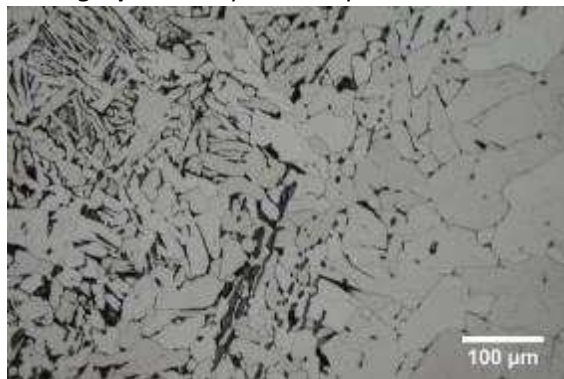
Schéma correspondant



Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



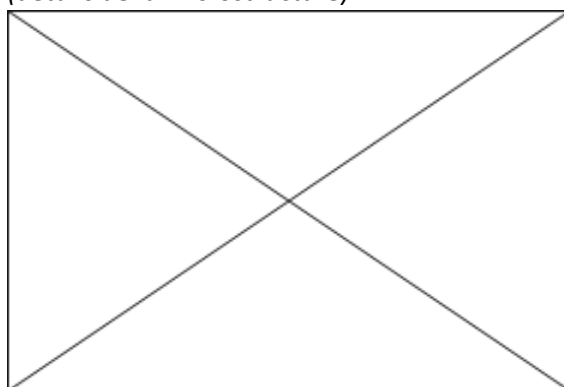
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
4	1,2,4

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Indéterminé	$p(\text{classe 1})=0,97$ $p(\text{classe 2})=0,95$ $p(\text{classe 4})<0,01$
Abaque	Indéterminé	
PROCEDE	Indéterminé	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon 430AG440-LAM46480

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : Harnois_pompey

Numéro de l'élément d'armure : 430AG440-LAM46480

Lieu de conservation :

Lieu de découverte : Château de l'avant-garde de Pompey (Pompey)

Description : Ce fragment a été identifié par M. Linlaud et O. Renaudeau comme une pièce de harnois articulé à décorations de frises de rinceaux associées à des rivets en laiton. Ces décorations se retrouvent sur certaines armures françaises et italiennes du XVI^e siècle (Voir armure dite de Galiot de Genouillac ou l'armure complète G552 (Musée de l'Armée, Paris)). Des traces de dorure et de brasure sont encore visibles par endroit (identifications réalisées par M. Linlaud et O. Renaudeau)

Datation : première moitié du XVI^e siècle (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : France ou Italie

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Pièce de harnois articulé

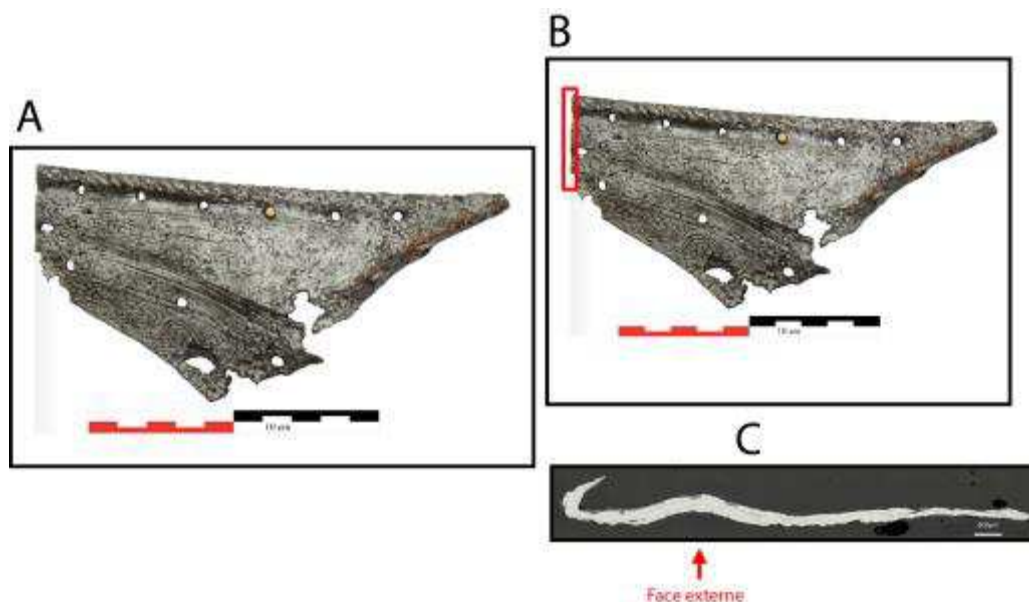
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique :

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé sur un bord de l'élément dans la longueur

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[50-200]	Lamellaire et globulaire	Non	Non	Non	Oui

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
3,8	0,21	0,15	193 ($\sigma=17$)	Non dosé	Non

Commentaires :

Cet échantillon présente la structure d'un acier moyennement carburé hétérogène en teneur en carbone.

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon

(après attaque au Nital 3%)



Schéma correspondant



Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



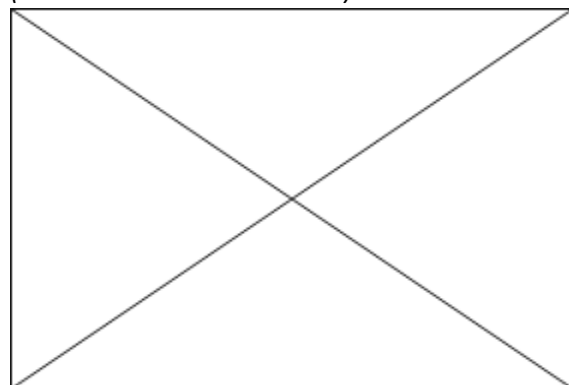
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
3	1

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Indirect	0,95
Abaque	Indirect	
PROCEDE	Indirect	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon 430AG444-LAM46484

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : Gorgerin_pompey

Numéro de l'élément d'armure : 430AG444-LAM46484

Lieu de conservation :

Lieu de découverte : Château de l'avant-garde de Pompey (Pompey)

Description : Gorgerin qui pourrait venir en complément d'une brigandine. Partie avant (frontale) ou arrière (protégeant le départ du cou et de la nuque) (identifications réalisées par M. Linlaud et O. Renaudeau). Il pourrait être rapproché du fragment 430AG440.

Datation : XVI^e siècle (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Indéterminée

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Gorgerin

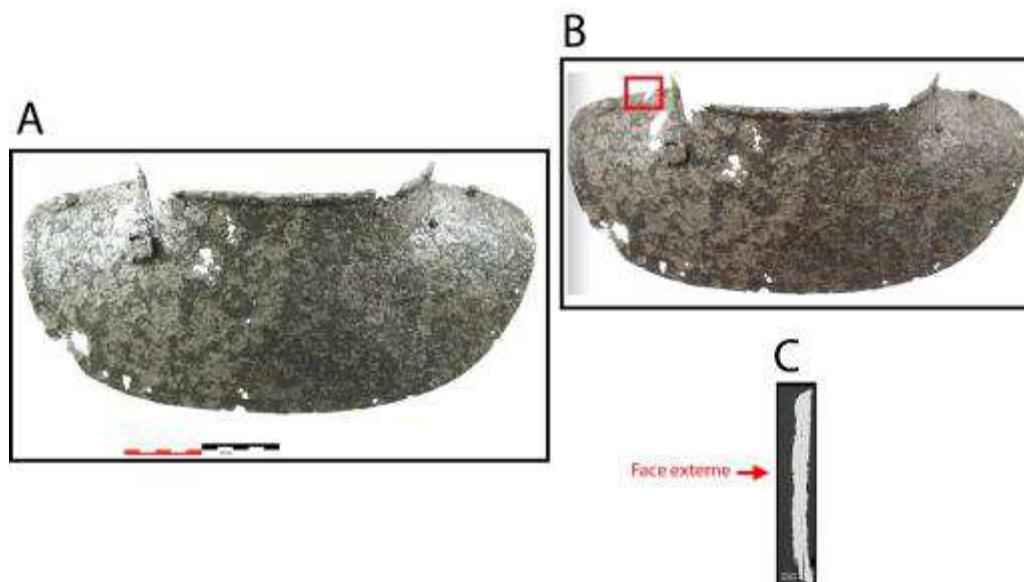
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique :

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé sur le bord gauche du gorgerin.

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[50-200]	Non résolue	Non	Oui	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
2,1	0,06	0,00	213 ($\sigma=23$)	0,4	Non

Commentaires :

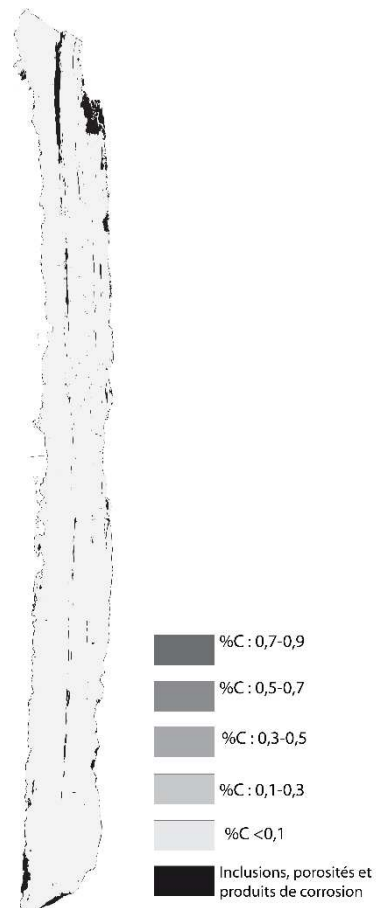
Cet échantillon est très faiblement carburé et possède une taille de grain variable. La présence de phosphore a été mise en évidence après attaque au réactif Oberhoffer. Elle a été quantifiée en moyenne à hauteur de 0,4%mass dans le métal.

Analyses métallographiques

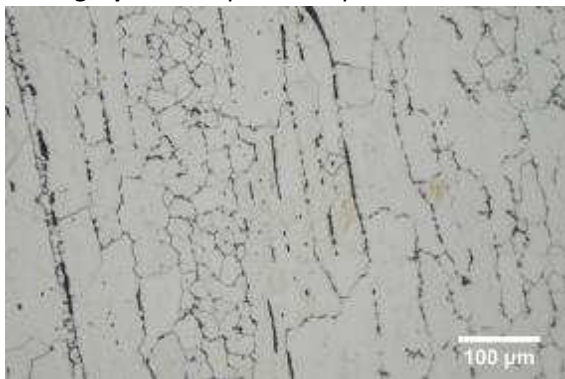
Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)



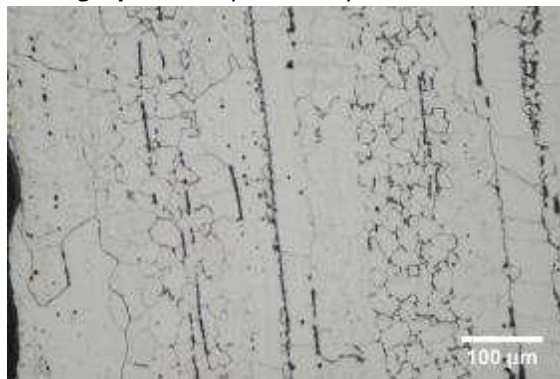
Schéma correspondant



Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



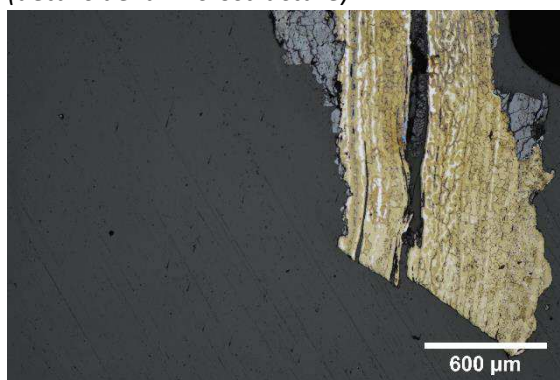
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 4 : Après attaque à l'Oberhoffer (détails de la microstructure)



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
3	3

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Indirect	0,98
Abaque	Indirect	
PROCEDE	Indirect	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Dissier, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon 430AG423_LAM46478

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : Protege_joue_pompey

Numéro de l'élément d'armure : Protege_joue_pompey

Lieu de conservation :

Lieu de découverte : Château de l'avant-garde de Pompey (Pompey)

Description : Ce fragment a été identifié par M. Linlaud et O. Renaudeau comme un possible protège joue (paragnatide ?)

Datation : XVIe-XVIIe siècles (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Indéterminée

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Protège joue (paragnatide)

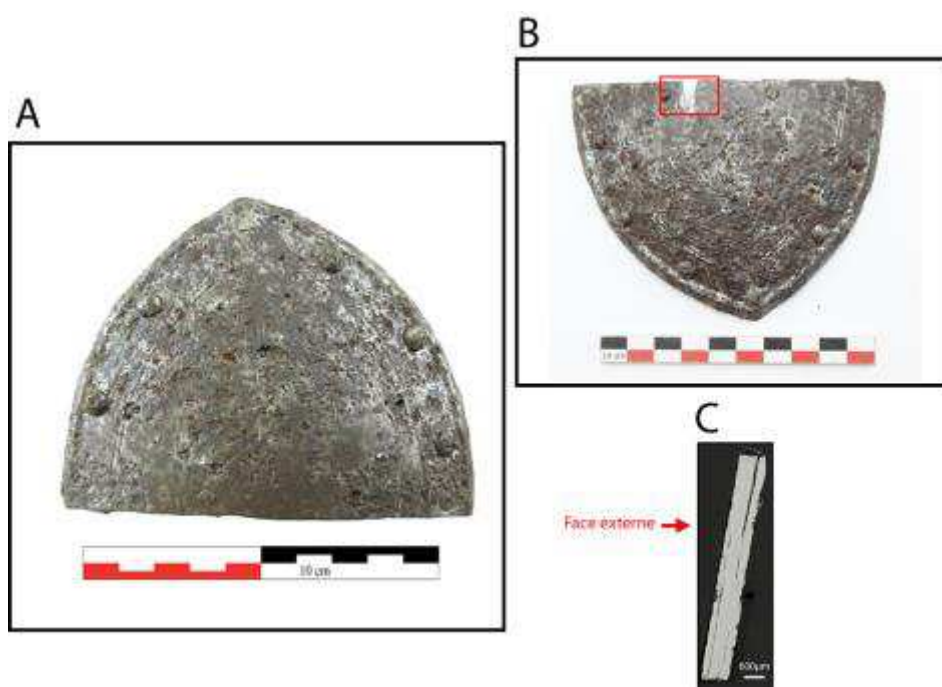
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique :

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé sur un bord de l'élément.

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[50-200]	Non résolue	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
6,7	0,06	0,00	160 ($\sigma=5$)	0,10	Non

Commentaires :

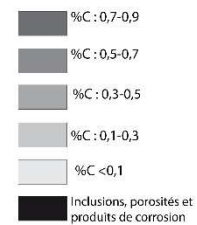
Cet échantillon présente une structure ferritique. La présence de phosphore a été mise en évidence dans la matrice métallique à hauteur de 0,1%mass.

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)



Schéma correspondant



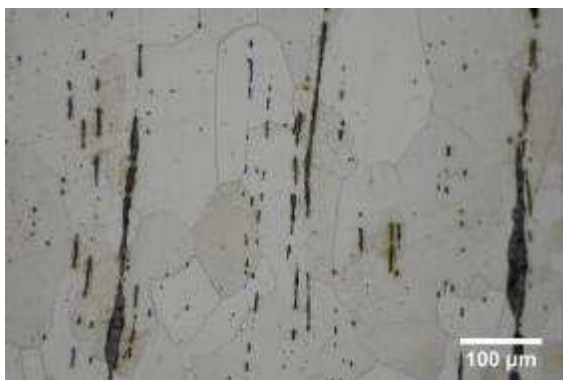
Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



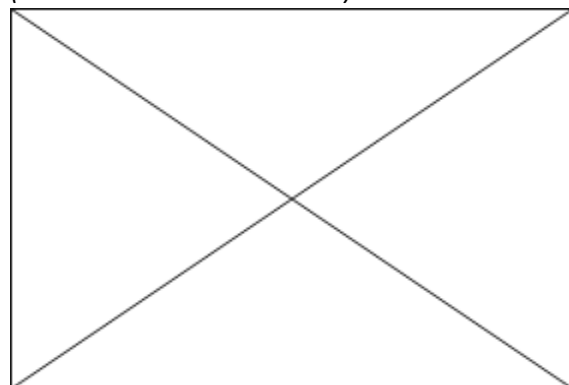
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
5	1,2

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Indirect	>0,99
Abaque	Indirect	
PROCEDE	Indirect	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Dissier, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon 430AG424-LAM46479

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : 430AG424-LAM46479

Numéro de l'élément d'armure : 430AG424-LAM46479

Lieu de conservation :

Lieu de découverte : Château de l'avant-garde de Pompey (Pompey)

Description : Ce fragment a été identifié par M. Linlaud et O. Renaudeau comme un possible protège joue (partie haute d'une paragnatide protégeant l'oreille et se fixant au casque). Le percement de l'alvéole en forme de cœur pouvait permettre de faciliter la perception auditive.

Datation : fin XVIe début du XVIIe siècle (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Indéterminée

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Protège joue (paragnatide)

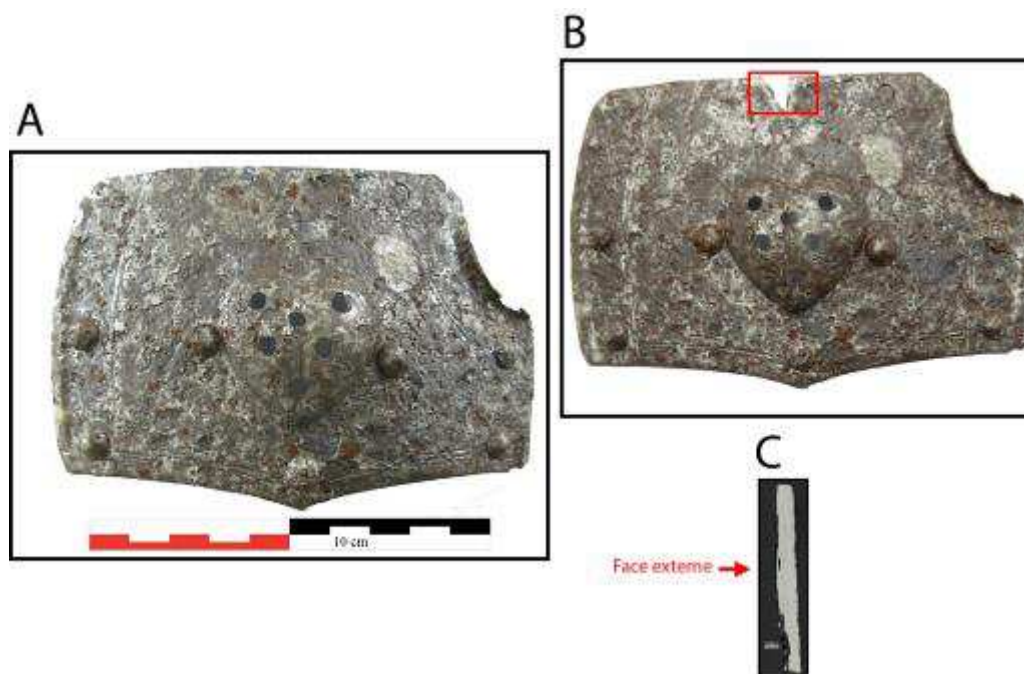
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique :

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé sur un bord de l'élément.

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[50-200]	Non résolue	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
3,0	0,12	0,07	147 ($\sigma=19$)	Non dosé	Non

Commentaires :

Cet échantillon présente la structure d'un acier faiblement carburé faiblement hétérogène en teneur en carbone, qui présente une bande centrale légèrement plus carburée (autour de 0,2%mass) avec une taille de grain plus faible ($<50\mu\text{m}$).

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

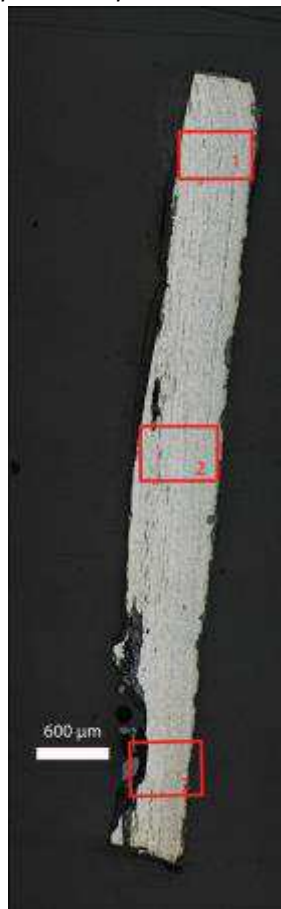
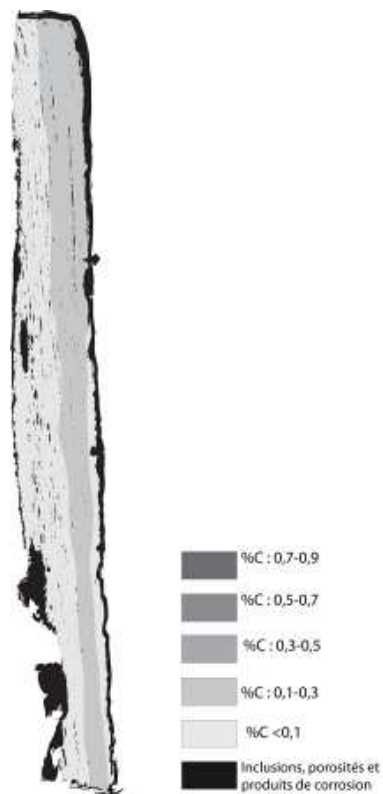
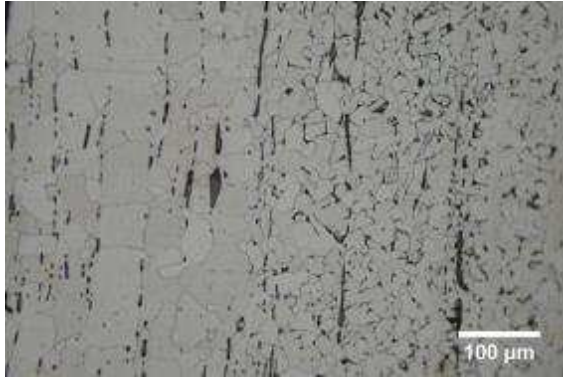


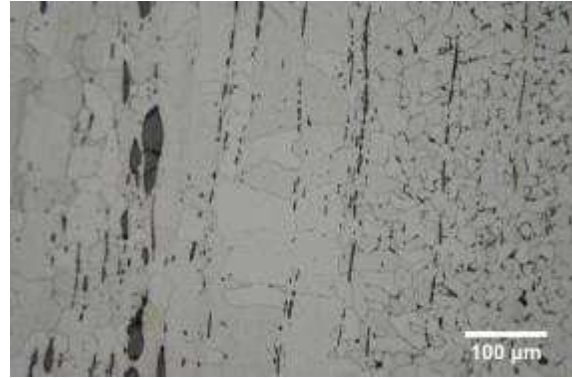
Schéma correspondant



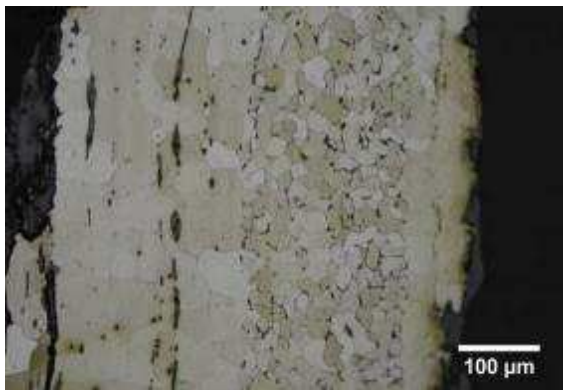
Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



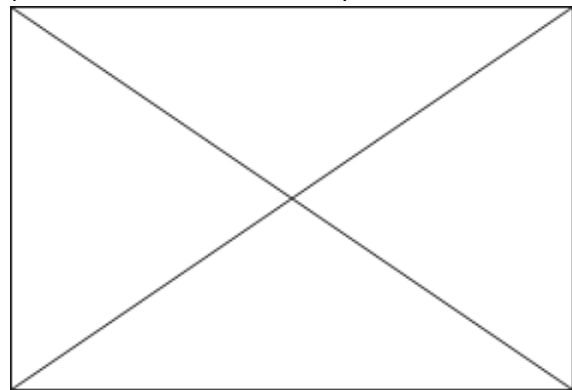
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3% (détails de la microstructure)



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
4	2,3

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Indirect	>0,99
Abaque	Indirect	
PROCEDE	Indirect	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Dissier, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon 430AG452-LAM46485

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : 430AG452-LAM46485

Numéro de l'élément d'armure : 430AG452-LAM46485

Lieu de conservation :

Lieu de découverte : Château de l'avant-garde de Pompey (Pompey)

Description : Fragment de nature précise indéterminée. Les trous de fixation, sa courbure et son allure générale rappellent les plaques de broigne de Montbaron et de Laquenexy.

Datation : Indéterminée

Lieu de fabrication supposé :

Région : Indéterminée

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Indéterminé

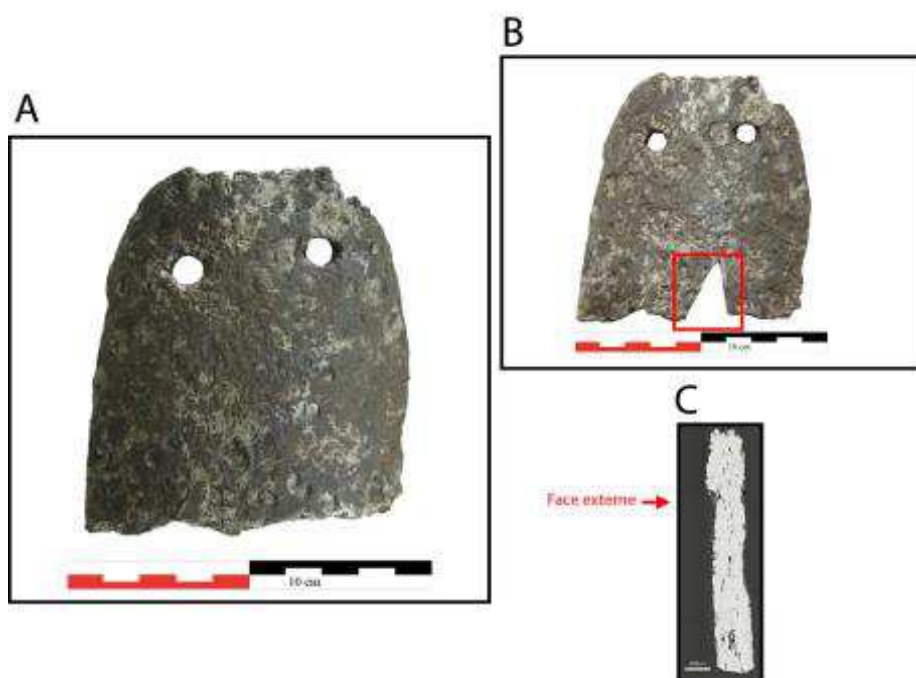
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique :

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé sur un bord de l'élément.

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[50-200]	Non résolue	Non	Non	Non	Oui

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
4,0	0,15	0,15	150 ($\sigma=21$)	Non dosé	Non

Commentaires :

Cet échantillon présente la structure d'un acier moyennement carburé hétérogène en teneur en carbone. La ferrite est aciculaire par endroit (structures de Widmanstätten). Les inclusions sont nombreuses et parfois faiblement déformées ce qui témoigne d'une opération d'épuration moins poussée que sur la moyenne des autres échantillons étudiés.

Analyses métallographiques

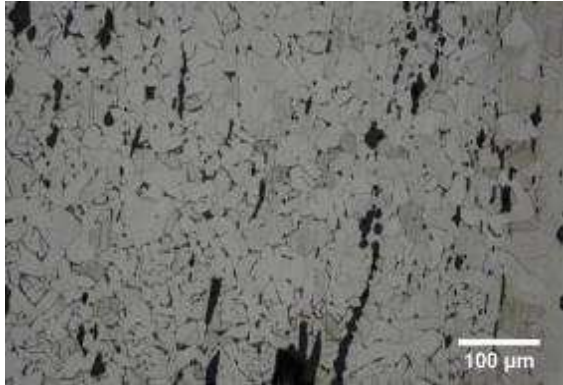
Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)



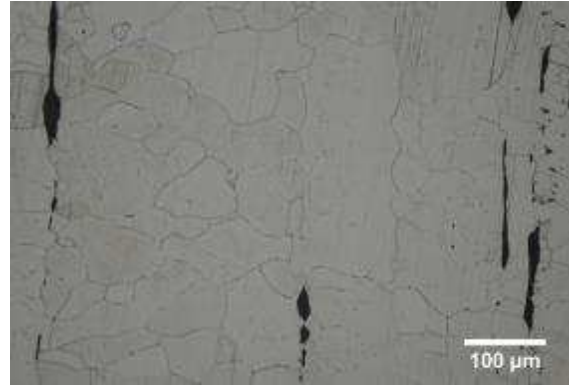
Schéma correspondant



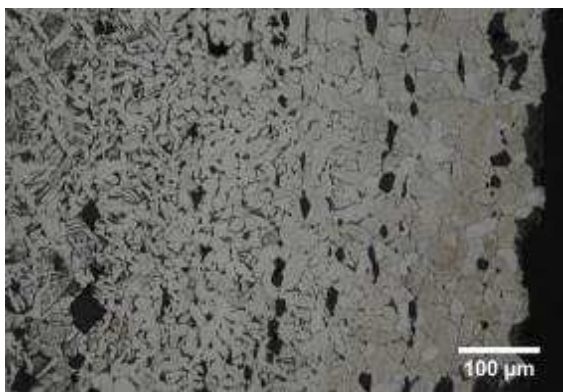
Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



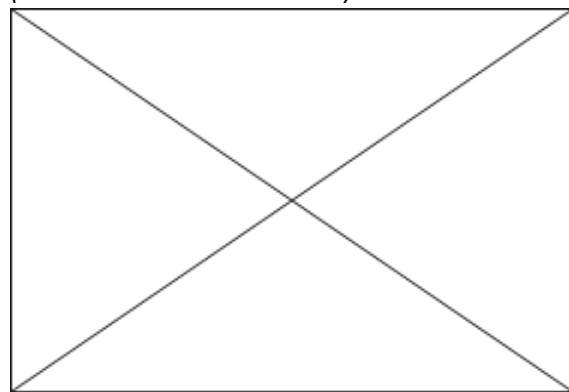
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
4	1,2

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Direct	<0,01
Abaque	Direct	
PROCEDE	Direct	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon 430AG455-LAM46488

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : 430AG455-LAM46488

Numéro de l'élément d'armure : 430AG455-LAM46488

Lieu de conservation :

Lieu de découverte : Château de l'avant-garde de Pompey (Pompey)

Description : Fragment de nature précise indéterminée. Sa forme et sa courbure pourraient le rapprocher des fragments de plaques de broigne de Montbaron et de Laquenexy. Aucun trou de fixation n'a été mis en évidence.

Datation : Indéterminée

Lieu de fabrication supposé :

Région : Indéterminée

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Indéterminé

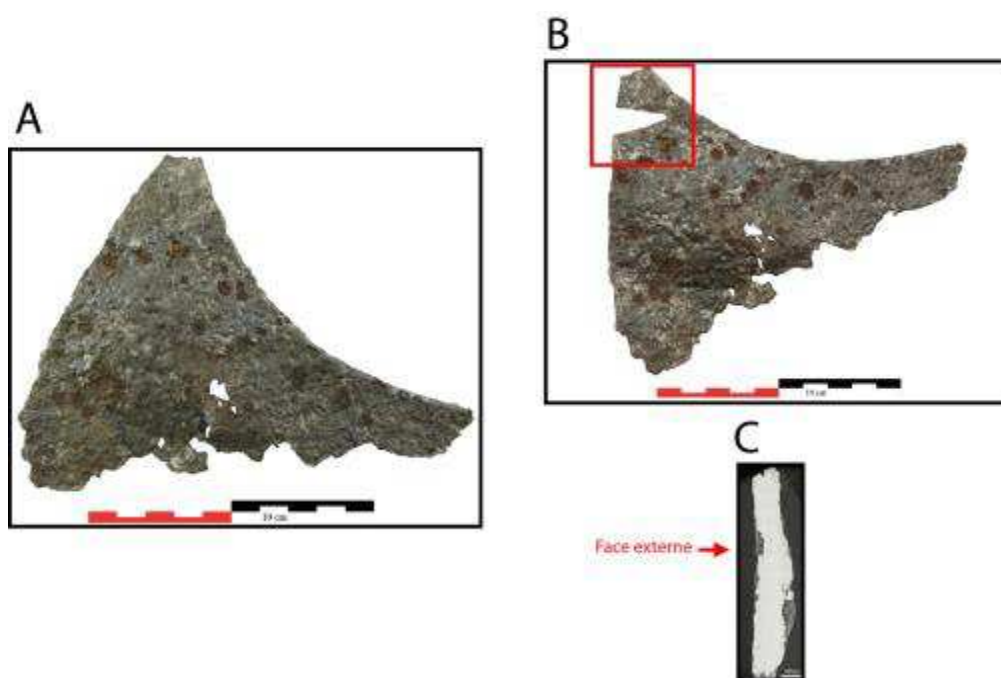
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique :

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé sur un bord de l'élément.

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (µm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[50-200]	Lamellaire et globulaire	Non	Oui	Non	Oui

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
1,5	0,34	0,09	189 (σ= 25)	Non dosé	Non

Commentaires :

Cet échantillon présente la structure d'un acier moyennement carburé. La présence de phosphore a été mise en évidence après attaque au réactif Oberhoffer sur les parties du métal moins carburées.

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

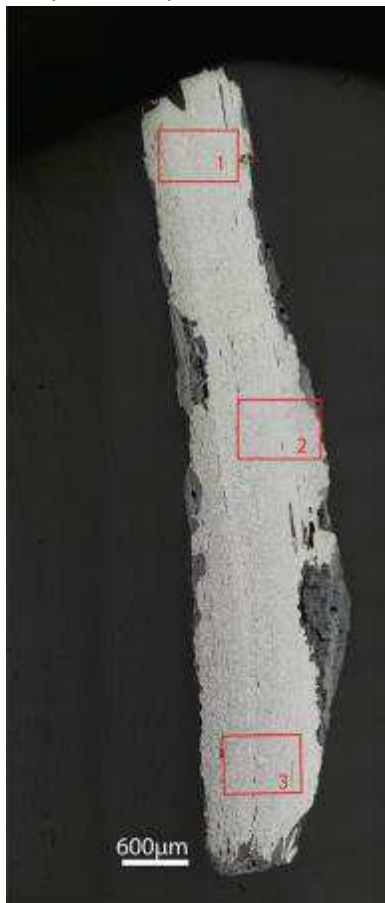
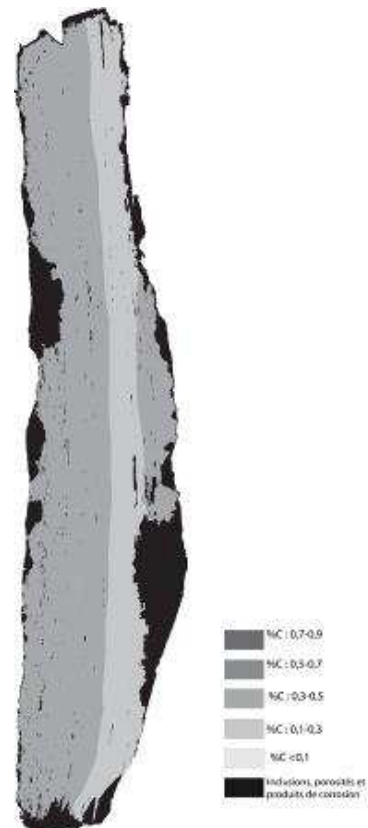
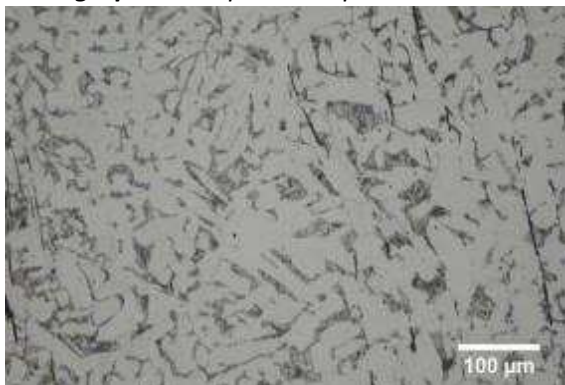


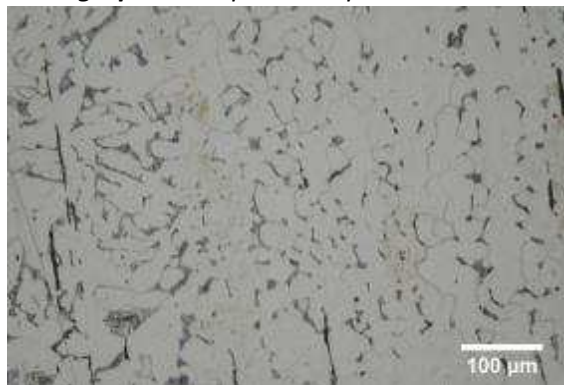
Schéma correspondant



Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



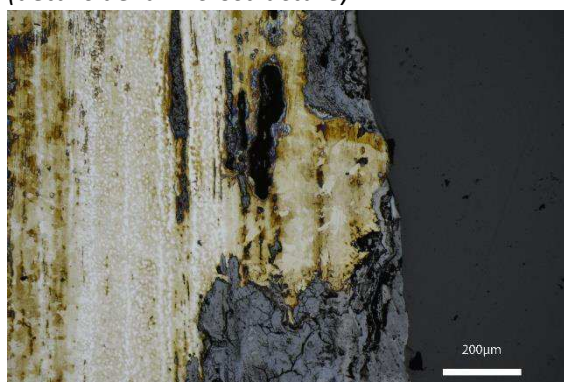
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 4 : Après attaque à l'Oberhoffer (détails de la microstructure)



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
5	4,5

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Indirect	>0,99
Abaque	Indirect	
PROCEDE	Indirect	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Dissier, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon 430AG478-LAM46489

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : 430AG478-LAM46489

Numéro de l'élément d'armure : 430AG478-LAM46489

Lieu de conservation :

Lieu de découverte : Château de l'avant-garde de Pompey (Pompey)

Description : Fragment de nature précise indéterminée.

Datation : Indéterminée

Lieu de fabrication supposé :

Région : Indéterminée

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Indéterminé

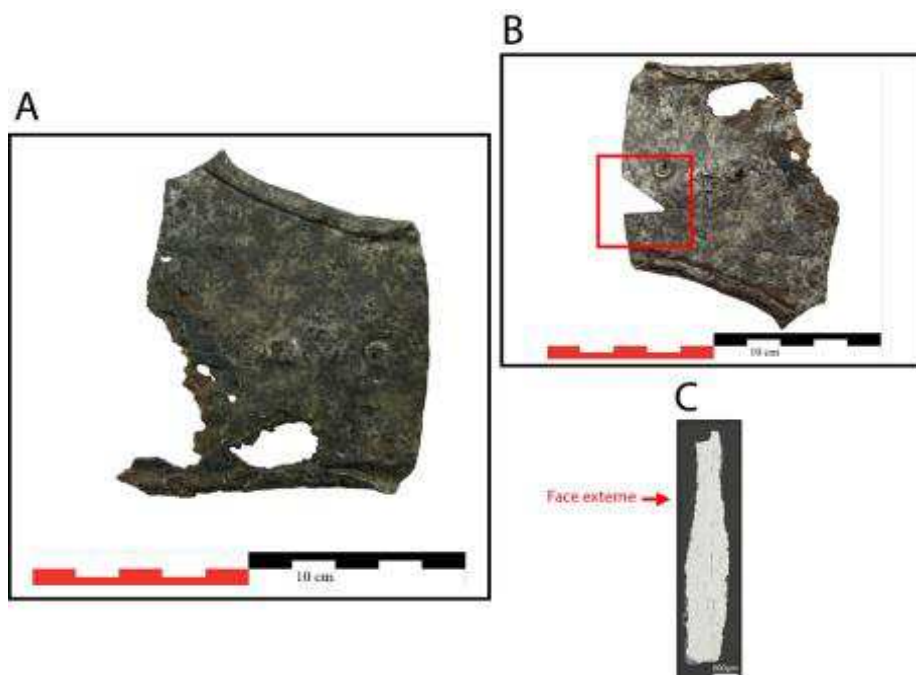
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique :

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé sur un bord de l'élément.

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[50-200]	Non résolue	Non	Oui	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
2,1	0,06	0,00	208 ($\sigma = 26$)	0,10	Non

Commentaires :

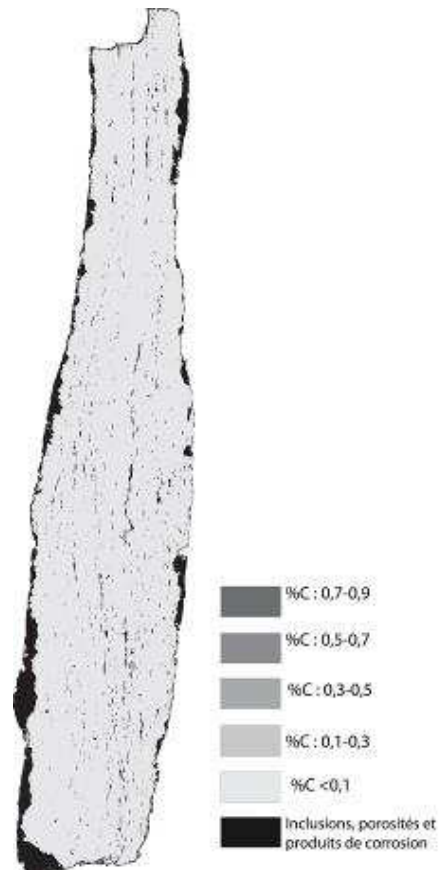
Cet échantillon présente une structure ferritique. La présence de phosphore a été mise en évidence par endroit dans la matrice métallique suite à l'attaque Oberhoffer effectuée. Cette dernière a également révélée des bandes plus claires qui pourraient être associées à des lignes de soudure.

Analyses métallographiques

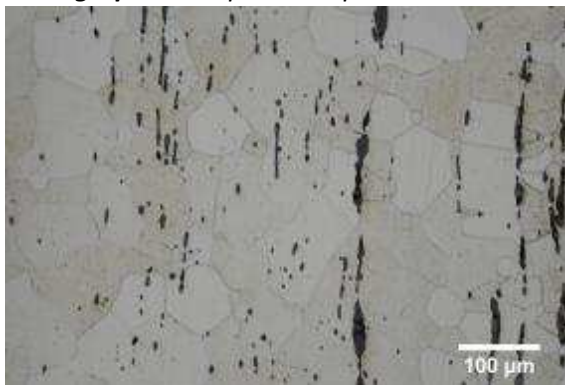
Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)



Schéma correspondant



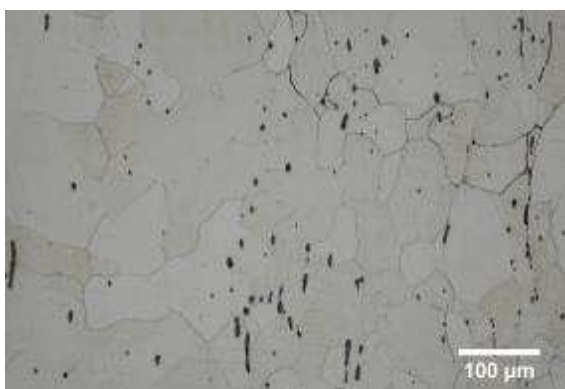
Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 4 : Après attaque à l'Oberhoffer (détails de la microstructure)



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
5	2

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Indirect	>0,99
Abaque	Indirect	
PROCEDE	Indirect	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Dissier, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon LAM45665_b

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : Brassard_LAM45665

Numéro de l'élément d'armure : Brassard_LAM45665

Lieu de conservation :

Lieu de découverte : Château de Rodemack (Rodemack)

Description : Plaque d'armure identifiée comme un brassard d'avant-bras daté du XVe ou du XVIe siècle d'après J.D Laffite (J. D. Laffite et al., 2012). Elle a été découverte au pied d'une tour de l'entrée basse du château de Rodemack (Moselle).

Datation : fin du XVe ou XVIe siècle (Contexte de découverte archéologique (stratigraphie))

Lieu de fabrication supposé :

Région : Indéterminée

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Brassard

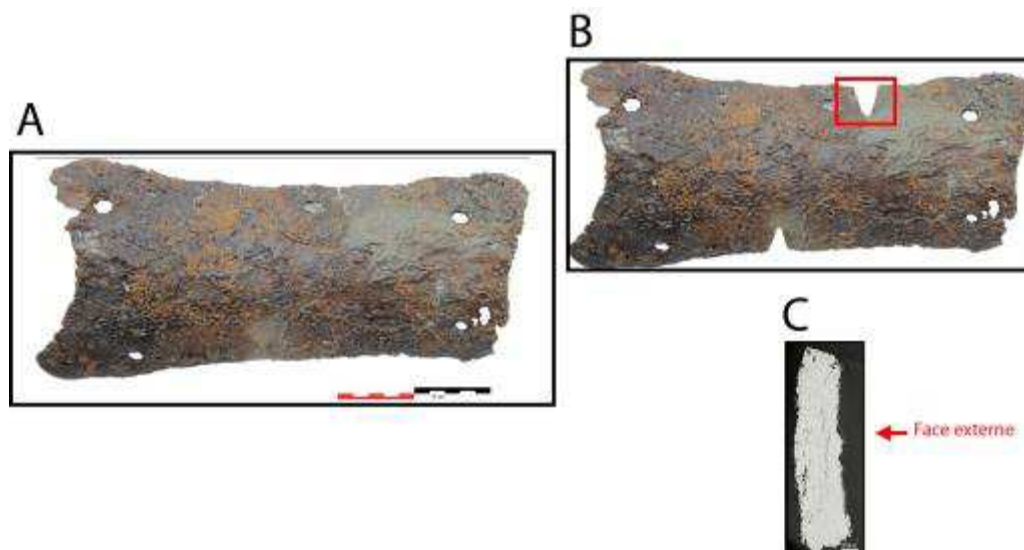
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique : (J. D. Laffite et al., 2012)

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Le prélèvement a été opéré sur un bord de la plaque

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[50-200]	Globulaire	Non	Oui	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
4,3	0,10	0,06	144 ($\sigma = 22$)	Non dosé	Non

Commentaires :

Cet échantillon est un acier faiblement carburé hétérogène en teneur en carbone. Des structures fantômes ont été mises en évidence, témoignant de la présence de phosphore en solution solide dans le métal.

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

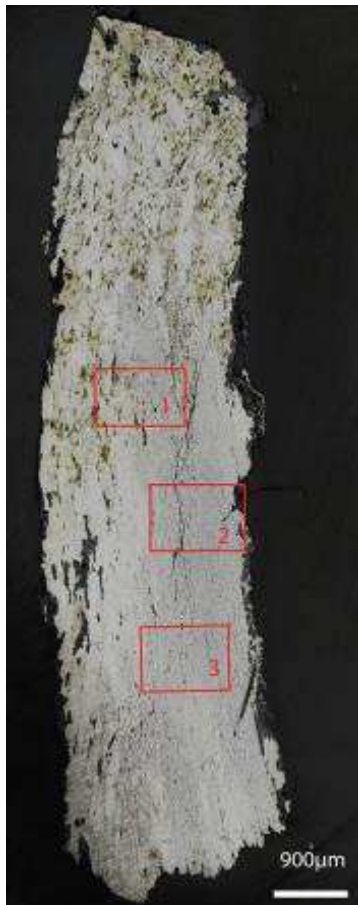
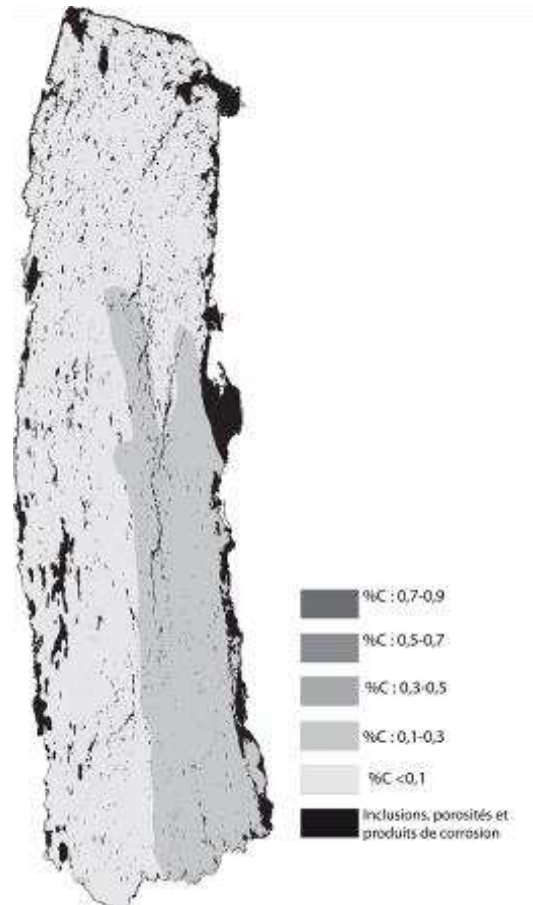


Schéma correspondant



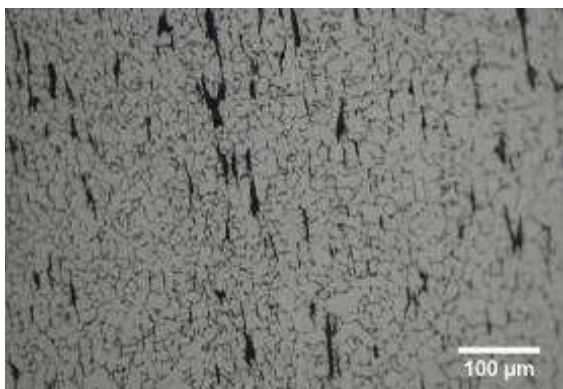
Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



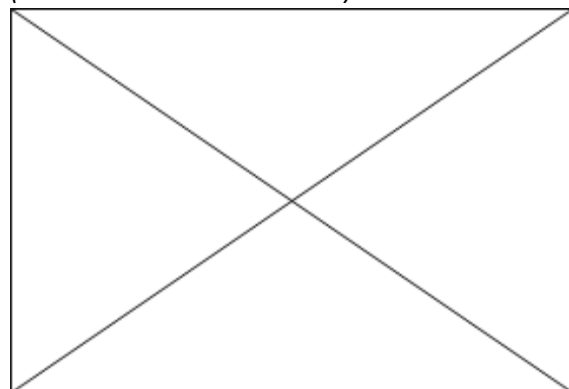
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
5	2

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Indirect	>0,99
Abaque	Indirect	
PROCEDE	Indirect	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon LAM45665_a

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : Brassard_LAM45665

Numéro de l'élément d'armure : Brassard_LAM45665

Lieu de conservation :

Lieu de découverte : Château de Rodemack (Rodemack)

Description : Plaque d'armure identifiée comme un brassard d'avant-bras daté du XVe ou du XVIe siècle d'après J.D Laffite (J. D. Laffite et al., 2012). Elle a été découverte au pied d'une tour de l'entrée basse du château de Rodemack (Moselle).

Datation : fin du XVe ou XVIe siècle (Contexte de découverte archéologique (stratigraphie))

Lieu de fabrication supposé :

Région : Indéterminée

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Brassard

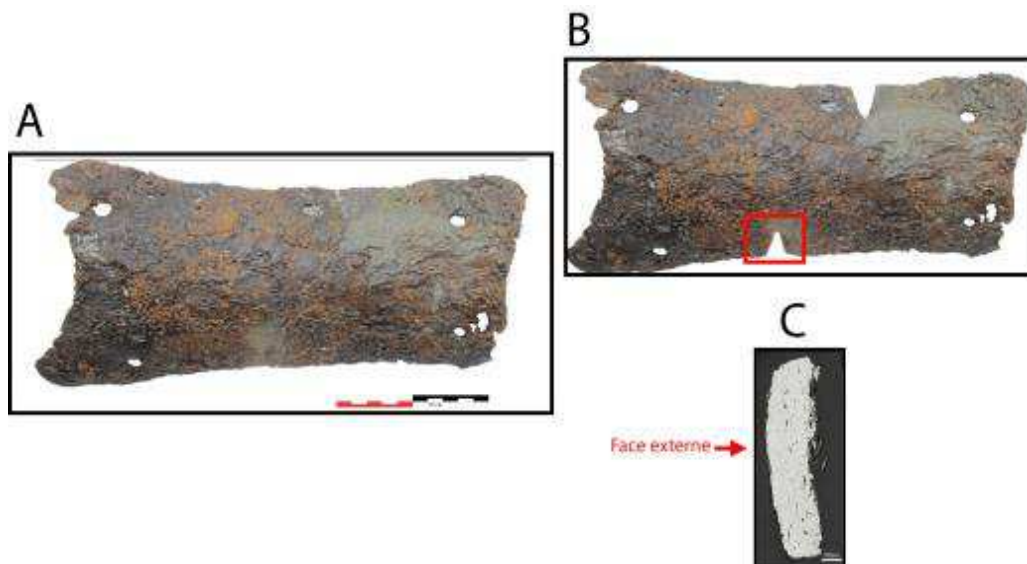
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique : (J. D. Laffite et al., 2012)

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Le prélèvement a été opéré sur un bord de la plaque

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (µm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[50-200]	Non résolue	Non	Oui	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
4,3	0,06	0,00	134 (σ= 13)	Non dosé	Non

Commentaires :

Des structures fantômes on été révélées après attaque au réactif Nital (voir micrographie1), ce qui témoigne de la présence de phosphore dans le métal.

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

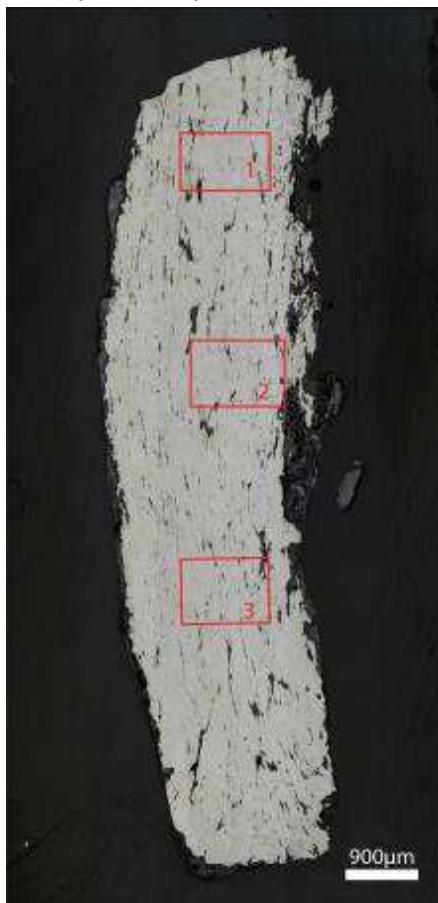
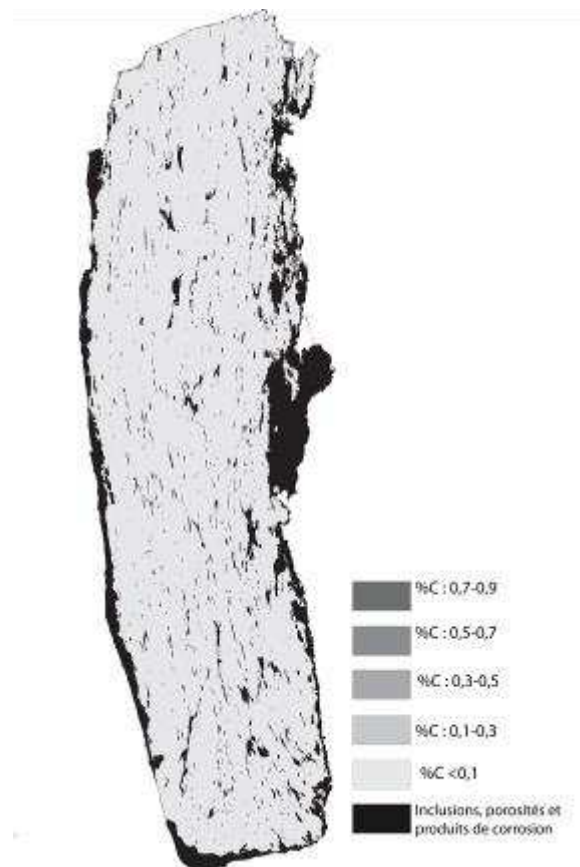
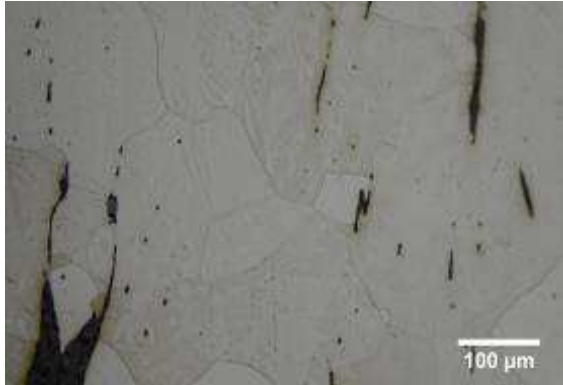


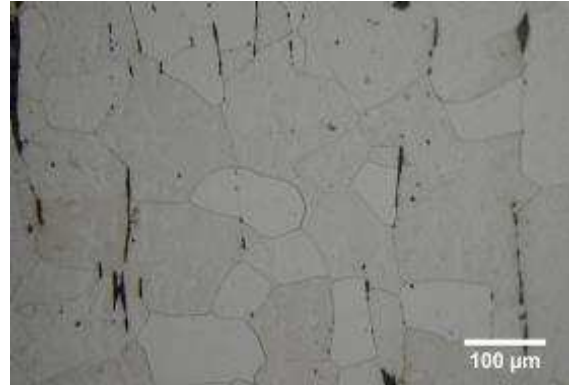
Schéma correspondant



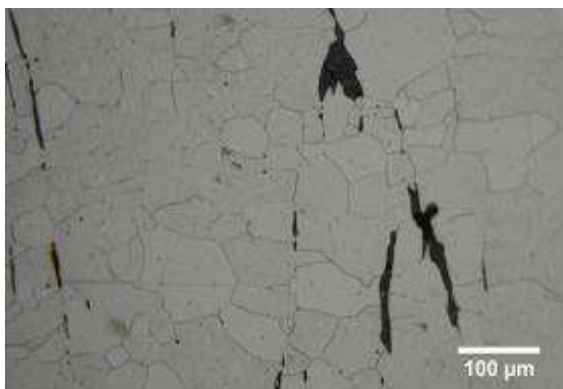
Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



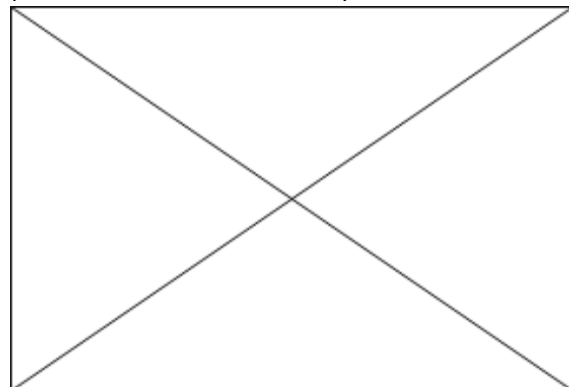
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
6	2,6

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Indirect	>0,99
Abaque	Indirect	
PROCEDE	Indirect	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon W2333

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : W2333

Numéro de l'élément d'armure : W2333

Lieu de conservation : Deutsches Historisches Museum (Berlin)

Lieu de découverte :

Description : Une armure de cavalier probablement réalisée à Brunswick vers 1530 (A.Williams, 2003, p. 834).

Datation : 1530 (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Allemagne

Ville : Brunswick

Élément de l'armure étudié : Indéterminé

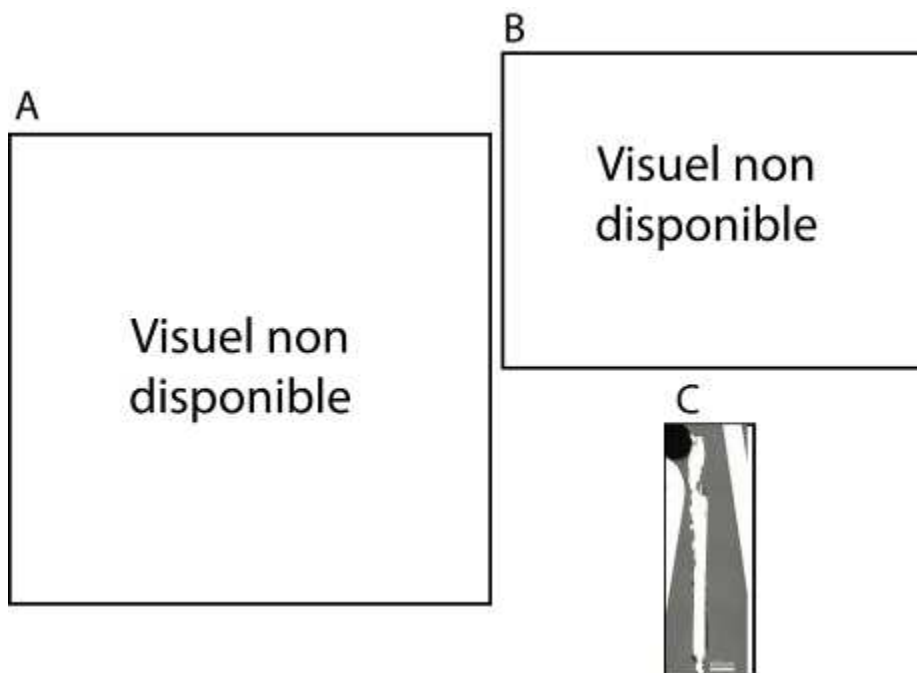
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique : (A.Williams, 2003)

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé par Alan Williams.

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[<50]	Non résolue	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
0,4	0,12	0,07	221 ($\sigma=12$)	Non dosé	Non

Commentaires :

Cet échantillon présente la structure d'un acier hétérogène en teneur en carbone, faiblement carburé (%C* < 0,2)

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

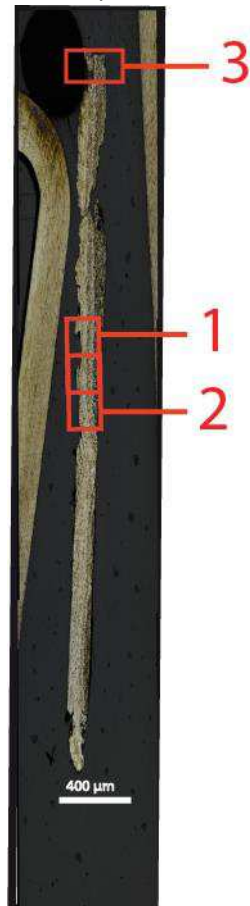
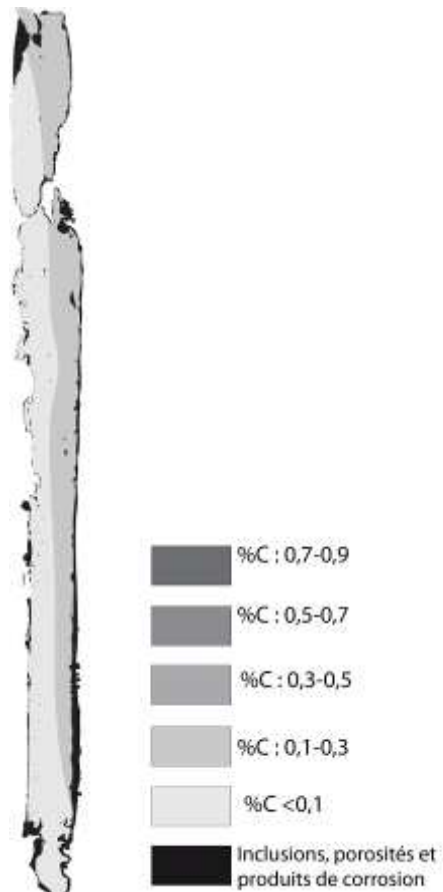
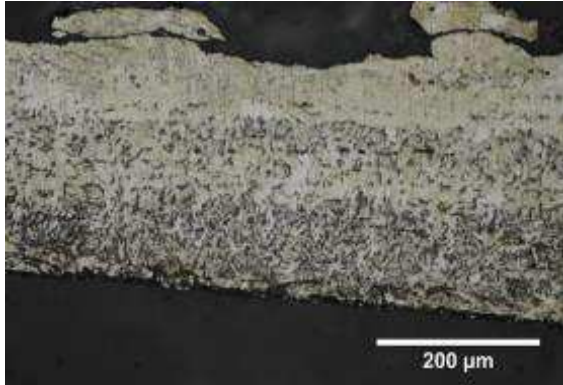


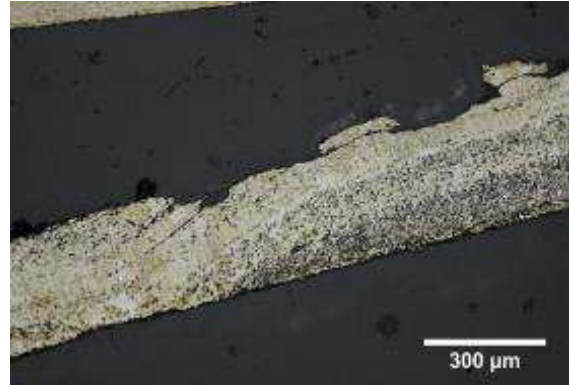
Schéma correspondant



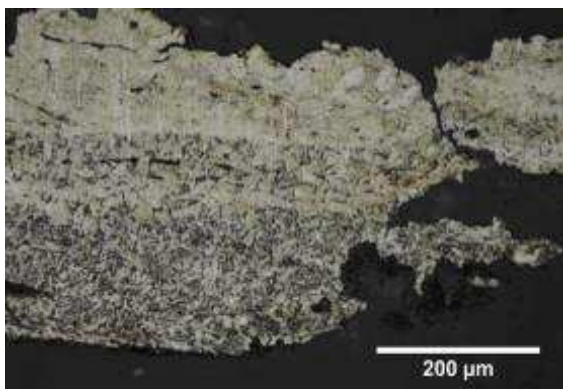
Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



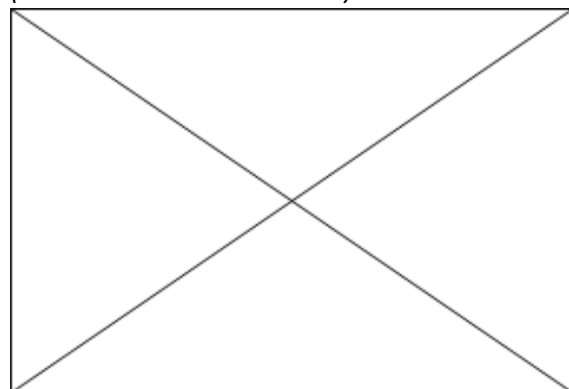
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
2	1

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Indirect	>0,99
Abaque	Indirect	
PROCEDE	Indirect	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon Berlin

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : Berlin

Numéro de l'élément d'armure : Berlin

Lieu de conservation : Deutsches Historisches Museum (Berlin)

Lieu de découverte :

Description : "A cuirassier's armour bearing a Nürnberg mark and a bullet "proof" mark on the breast"(A.Williams, 2003, p.673)

Datation : 1630 (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Allemagne

Ville : Nuremberg

Élément de l'armure étudié : Plastron

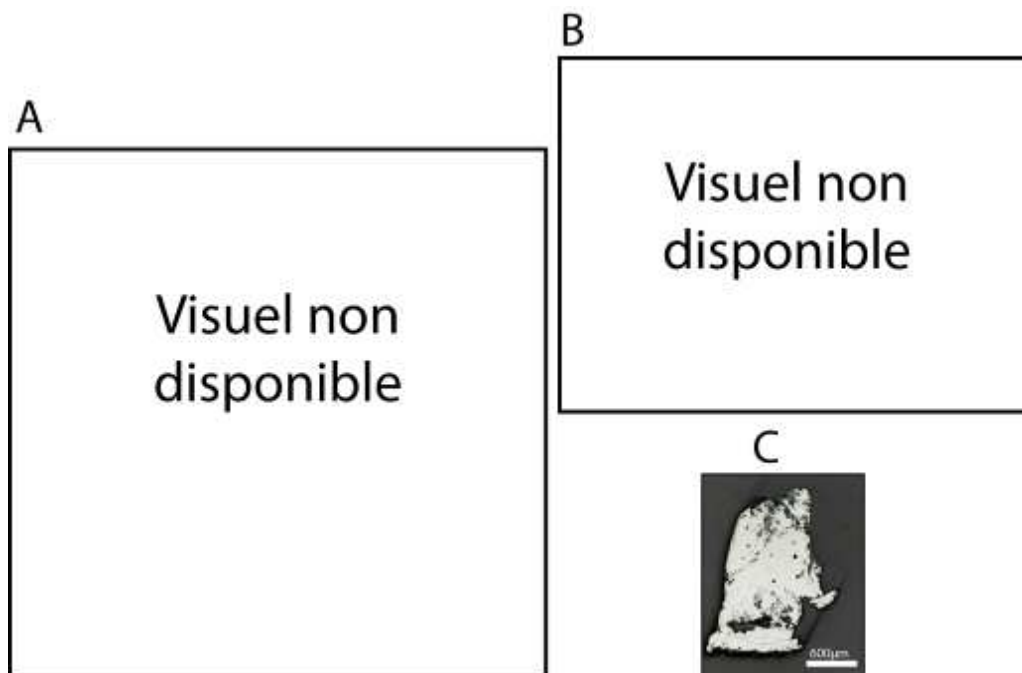
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Oui

Détails de la (ou des) marque(s) : marque de la ville de Nuremberg

Référence bibliographique : (A.Williams, 2003)

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé par Alan Williams sur le plastron d'armure.

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[50-200]	Non résolue	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
9,4	0,06	0,00	244 ($\sigma=30$)	0,10	Non

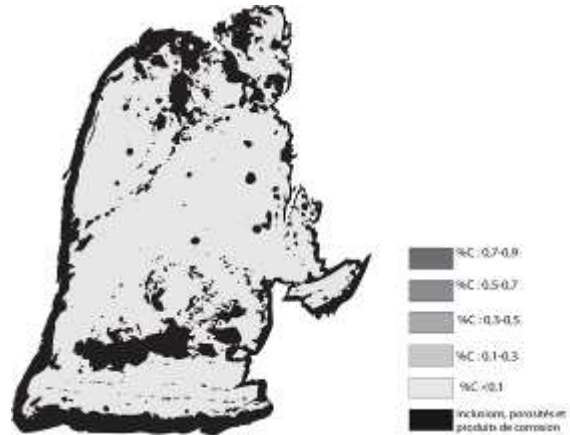
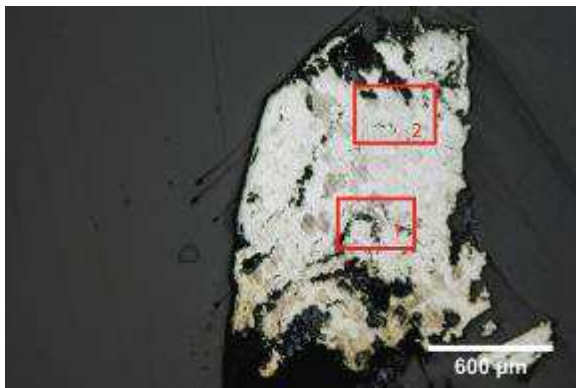
Commentaires :

Cet échantillon présente une structure entièrement ferritique.

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

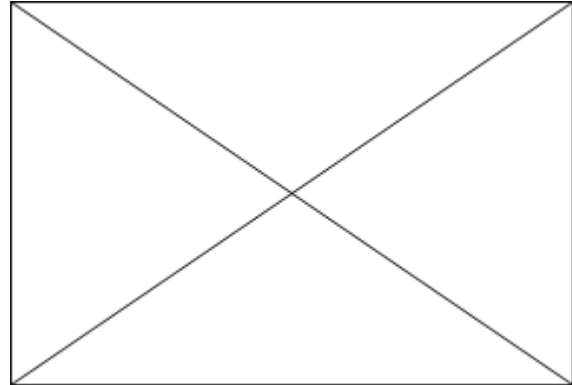
Schéma correspondant



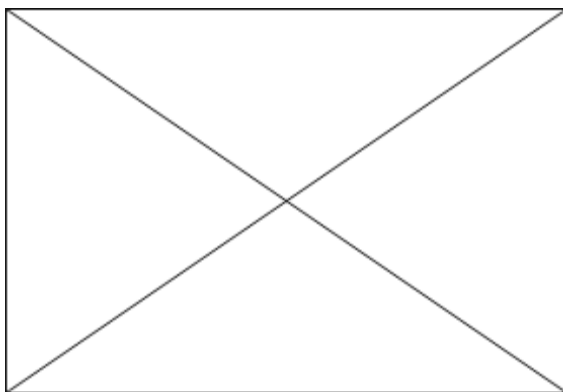
Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



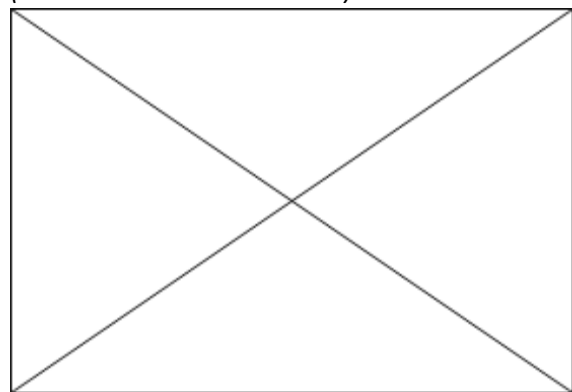
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3% (détails de la microstructure)



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
5	3

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Indirect	0,73
Abaque	Indéterminé	
PROCEDE	Indirect	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon 348 214 425

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : Broigne_Laq

Numéro de l'élément d'armure : Broigne_Laq

Lieu de conservation :

Lieu de découverte : Ferme seigneuriale de Laquenexy (Laquenexy)

Description : Pièce rectangulaire de section courbe, s'épaississant légèrement d'une extrémité à l'autre, percée de quatre petits trous et d'un gros trou central (S. Jeandemange et al., 2011). Elle a été retrouvée sur la ferme seigneuriale de Laquenexy occupée entre le XIIIe et le XVe siècles. Ces plaques, d'abord associées au domaine agricole sans que leur fonction exacte ait pu être identifiée (S. Jeandemange et al., 2011), ont récemment fait l'objet d'une nouvelle interprétation par Aurelie Raffin (A. Raffin, 2015). En effet leurs morphologies, très proches de celles du site de Montbaron, les associeraient directement à la catégorie des plaques de broigne.

Datation : XIIIe-XVe siècles (Contexte de découverte archéologique (stratigraphie))

Lieu de fabrication supposé :

Région : Indéterminée

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Plaque de broigne

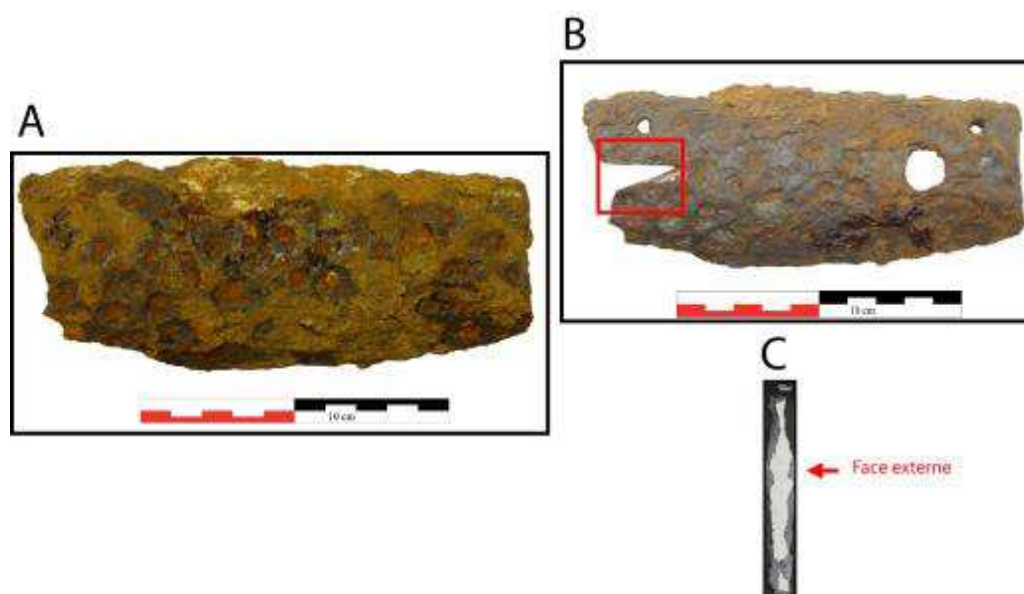
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique : (S. Jeandemange et al., 2011)

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Le prélèvement a été opéré sur un bord de la plaque

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[>200]	Non résolue	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
0,2	0,06	0,01	175 ($\sigma=10$)	0,3	Non

Commentaires :

Cet échantillon possède une structure ferritique à large grains (>200 μm). Aucune structure fantôme n'avait pu être décelée par attaque chimique, toutefois les dosages effectués par EPMA ont attesté la présence de phosphore à hauteur de 0,3%mass en moyenne dans le métal.

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon

(après attaque au Nital 3%)

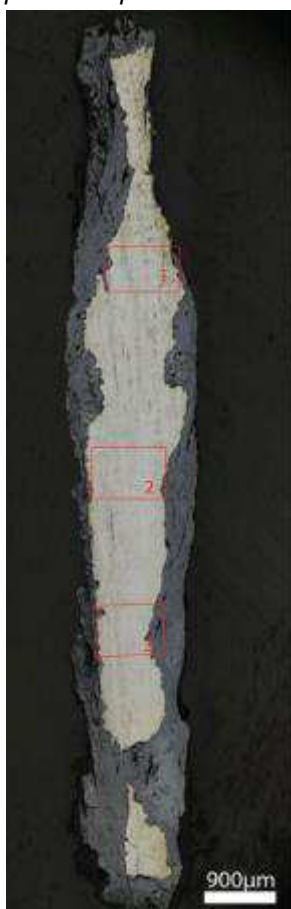
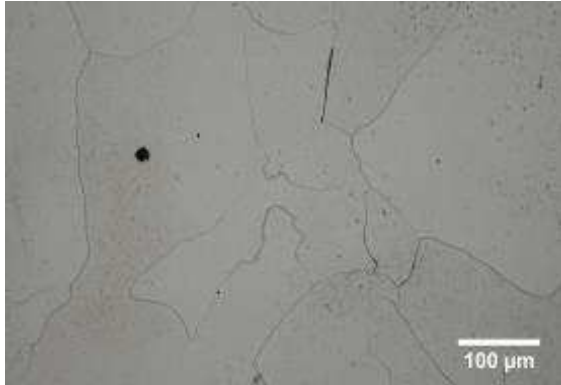


Schéma correspondant



Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



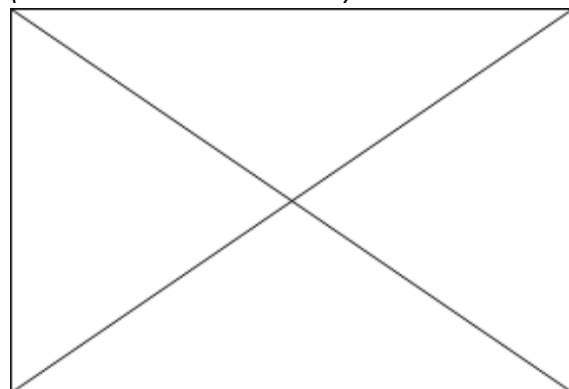
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
4	3

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Direct	<0,01
Abaque	Direct	
PROCEDE	Direct	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Oui

Résumé des analyses menées sur l'échantillon 34818 411 1

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : Broigne_Laq

Numéro de l'élément d'armure : Broigne_Laq

Lieu de conservation :

Lieu de découverte : Ferme seigneuriale de Laquenexy (Laquenexy)

Description : Fragment de plaque en fer incurvé et muni de deux trous perforés (S. Jeandemange et al., 2011). Elle a été retrouvée sur la ferme seigneuriale de Laquenexy occupée entre le XIIIe et le XVe siècle. Ces plaques, d'abord associées au domaine agricole sans que leur fonction exacte ait pu être identifiée (S. Jeandemange et al., 2011), ont récemment fait l'objet d'une nouvelle interprétation par Aurelie Raffin (A. Raffin, 2015). En effet leurs morphologies, très proches de celles du site de Montbaron, les associeraient directement à la catégorie des plaques de broigne.

Datation : XIIIe-XVe siècles (Contexte de découverte archéologique (stratigraphie))

Lieu de fabrication supposé :

Région : Indéterminée

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Plaque de broigne

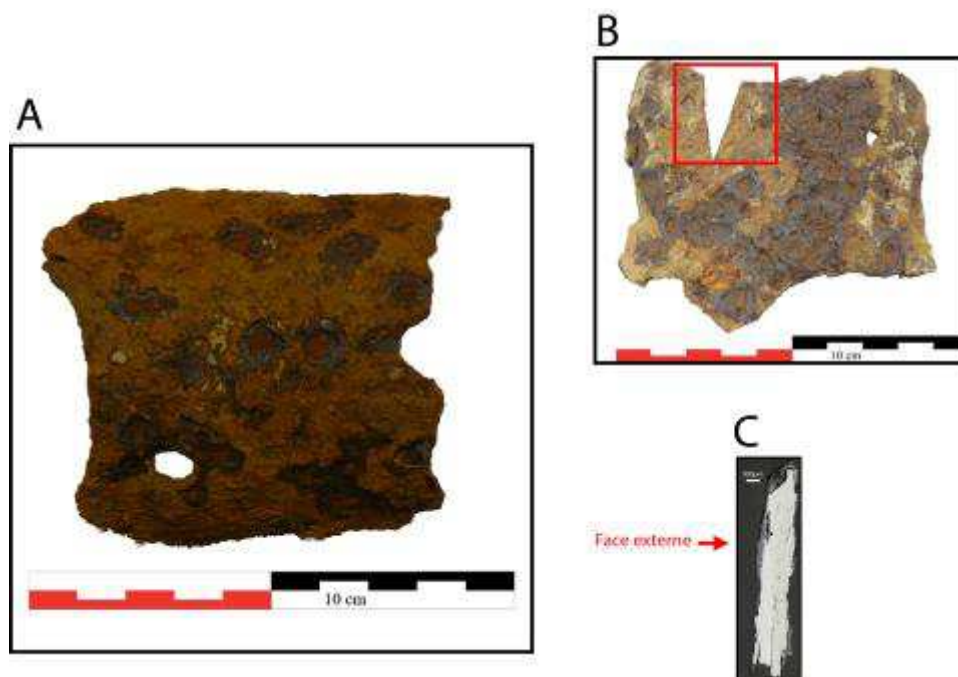
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique : (S. Jeandemange et al., 2011)

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Le prélèvement a été opéré sur un bord de la plaque

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[50-200]	Non résolue	Non	Oui	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
1,4	0,06	0,03	183 ($\sigma=16$)	0,5	Non

Commentaires :

Cet échantillon possède une structure ferritique légèrement hétérogène en teneur en carbone. Des structures fantômes ont été mises en évidence après attaque chimique (voir micrographie 1). La présence de phosphore a été confirmée par les dosages effectués par EPMA à hauteur de 0,5%mass en moyenne.

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon

(après attaque au Nital 3%)

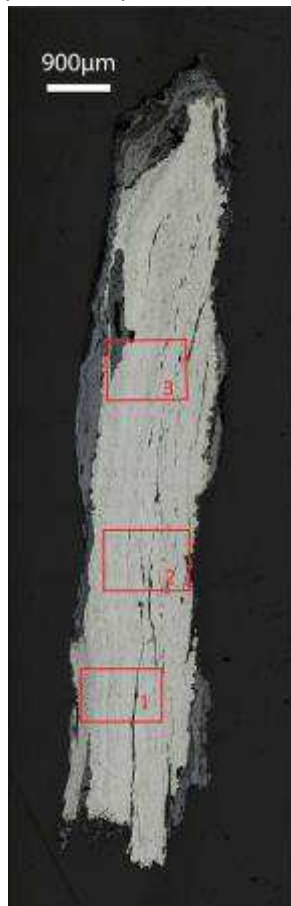
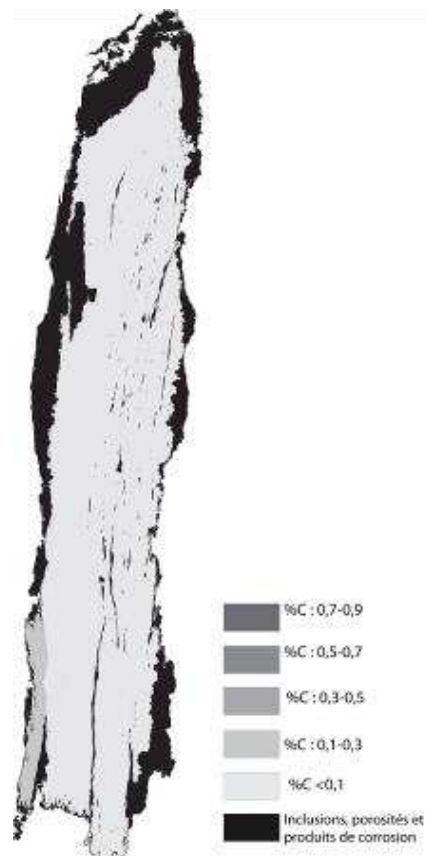
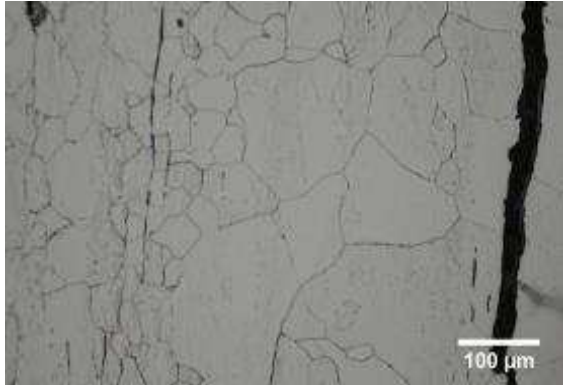


Schéma correspondant



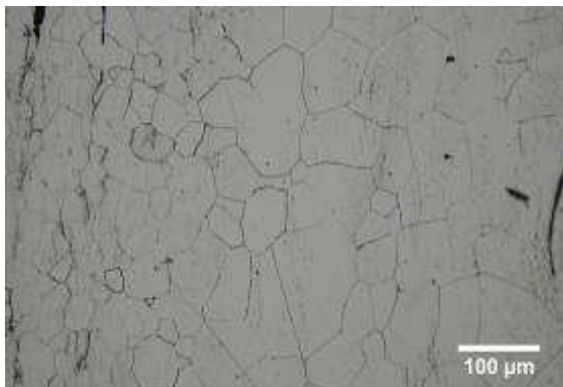
Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



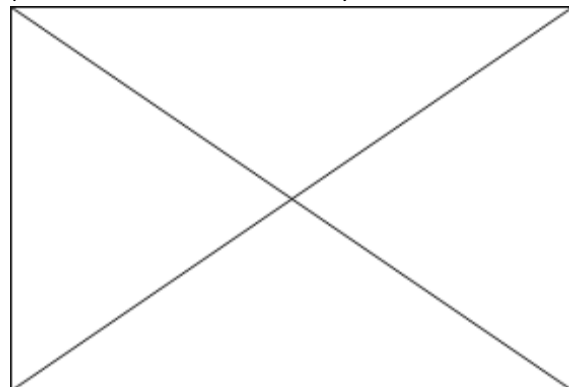
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3% (détails de la microstructure)



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
4	2

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Direct	<0,01
Abaque	Direct	
PROCEDE	Direct	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Dissier, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon 34825 Objet 6 2

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : Broigne_Laq

Numéro de l'élément d'armure : Broigne_Laq

Lieu de conservation :

Lieu de découverte : Ferme seigneuriale de Laquenexy (Laquenexy)

Description : Fragment de plaque en fer plate et munie de deux trous perforés (S. Jeandemange et al., 2011). Elle a été retrouvée sur la ferme seigneuriale de Laquenexy occupée entre le XIIIe et le XVe siècles. Ces plaques, d'abord associées au domaine agricole sans que leur fonction exacte ait pu être identifiée (S. Jeandemange et al., 2011), ont récemment fait l'objet d'une nouvelle interprétation par Aurelie Raffin (A. Raffin, 2015). En effet leurs morphologies, très proches de celles du site de Montbaron, les associeraient directement à la catégorie des plaques de broigne.

Datation : XIIIe-XVe siècles (Contexte de découverte archéologique (stratigraphie))

Lieu de fabrication supposé :

Région : Indéterminée

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Plaque de broigne

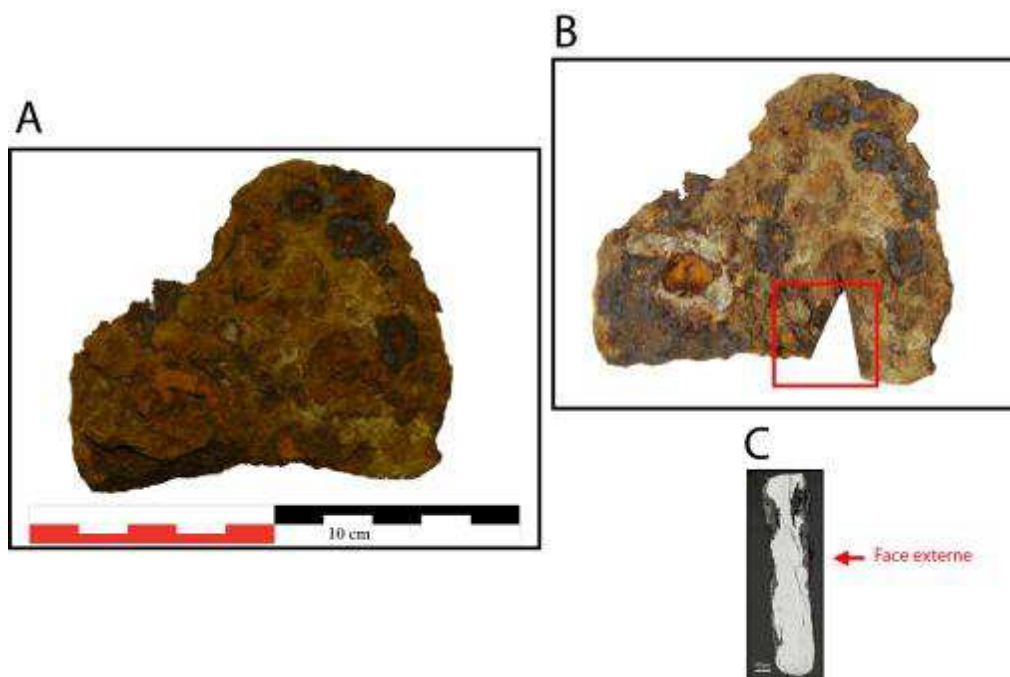
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique : (S. Jeandemange et al., 2011)

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Le prélèvement a été opéré sur un bord de la plaque

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[50-200]	Lamellaire	Non	Non	Non	Oui

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
3,5	0,10	0,07	143 ($\sigma = 24$)	Non dosé	Non

Commentaires :

Cet échantillon présente la structure d'un acier faiblement carburé, hétérogène en teneur en carbone. Les inclusions sont parfois larges et faiblement déformées ce qui témoigne d'une épuration peu poussée du métal par rapport aux autres échantillons du corpus. La présence phosphore dans le métal en quantité significative ($>0,1\%$ mass) semble peu probable compte tenu de l'absence de structures fantômes et de la faible concentration en phosphore mesurée au sein des inclusions.

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

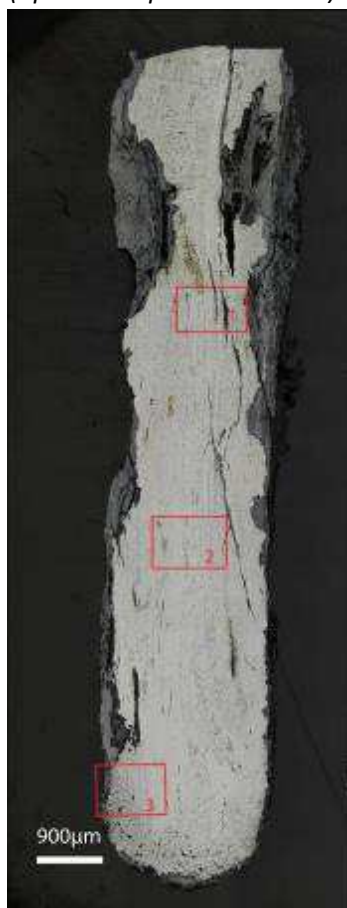
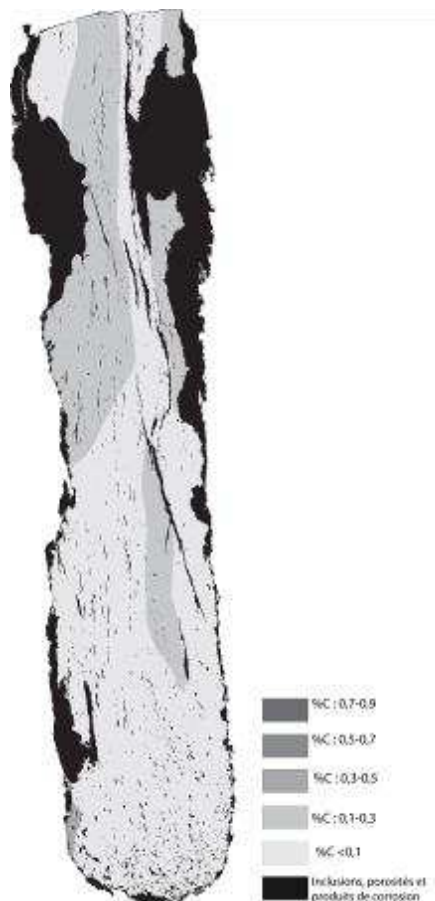


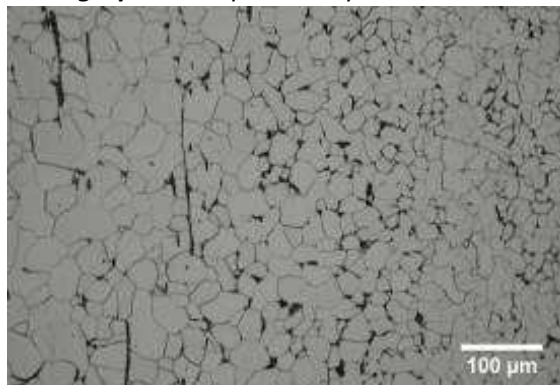
Schéma correspondant



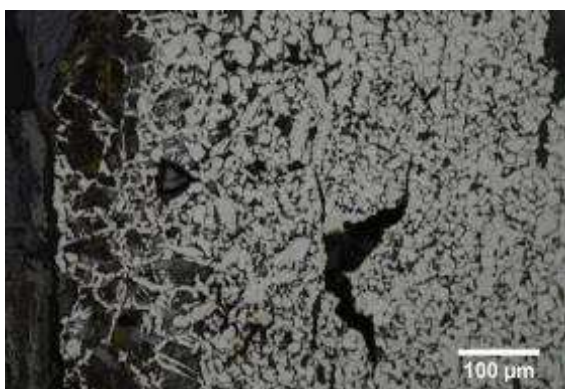
Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



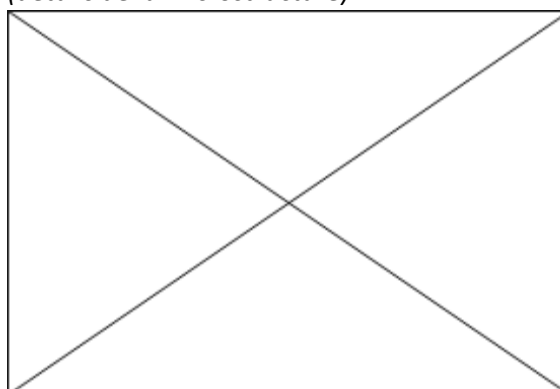
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
5	3

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Indirect	0,96
Abaque	Indéterminé	
PROCEDE	Indirect	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon 34820 434 1

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : Broigne_Laq

Numéro de l'élément d'armure : Broigne_Laq

Lieu de conservation :

Lieu de découverte : Ferme seigneuriale de Laquenexy (Laquenexy)

Description : Fragment de plaque en fer incurvé et muni de deux trous perforés (S. Jeandemange et al., 2011). Elle a été retrouvée sur la ferme seigneuriale de Laquenexy occupée entre le XIII^e et le XV^e siècles. Ces plaques, d'abord associées au domaine agricole sans que leur fonction exacte ait pu être identifiée (S. Jeandemange et al., 2011), ont récemment fait l'objet d'une nouvelle interprétation par Aurelie Raffin (A. Raffin, 2015). En effet leurs morphologies, très proches de celles du site de Montbaron, les associeraient directement à la catégorie des plaques de broigne.

Datation : XIII^e-XV^e siècles (Contexte de découverte archéologique (stratigraphie))

Lieu de fabrication supposé :

Région : Indéterminée

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Plaque de broigne

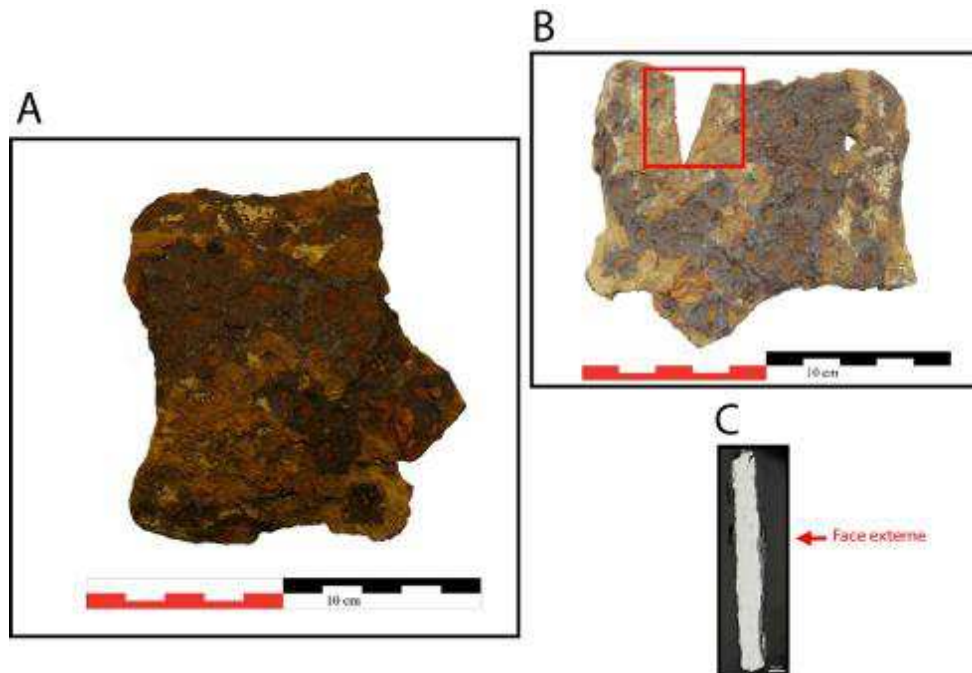
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique : (S. Jeandemange et al., 2011)

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Le prélèvement a été opéré sur un bord de la plaque

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[50-200]	Lamellaire	Non	Oui	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
1,1	0,11	0,11	165 ($\sigma=30$)	Non dosé	Oui

Commentaires :

Cet échantillon présente la structure d'un acier faiblement carburé hétérogène en teneur en carbone. Des structures fantômes ont été mises en évidence après attaque au réactif Oberhoffer sur une moitié de l'échantillon. Deux bandes principales peuvent être définies. La première est constituée d'un métal hétérogène en teneur en carbone faiblement carburé, la seconde d'un fer phosphoreux avec une taille de grains plus large. Plusieurs bandes claires ont également été mises en évidence après attaque au réactif Oberhoffer. Elles pourraient témoigner de lignes de soudure entre les deux parties.

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

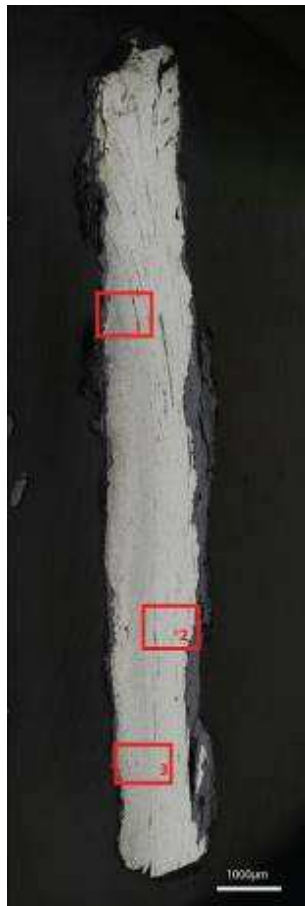
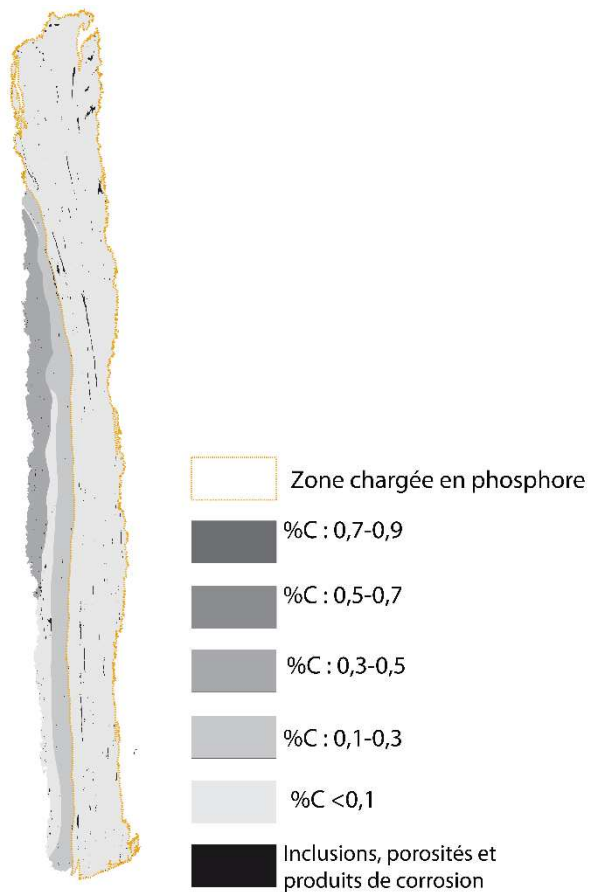
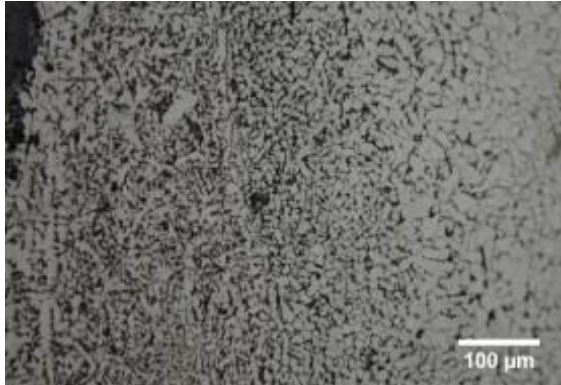


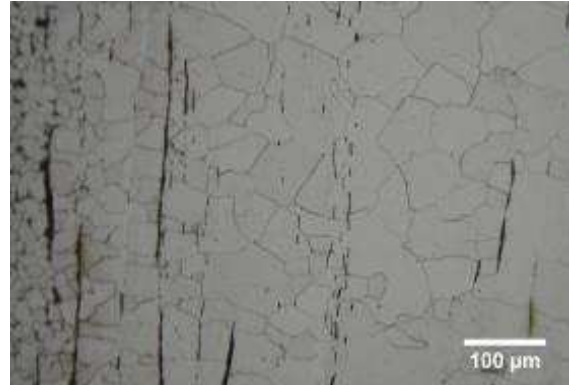
Schéma correspondant



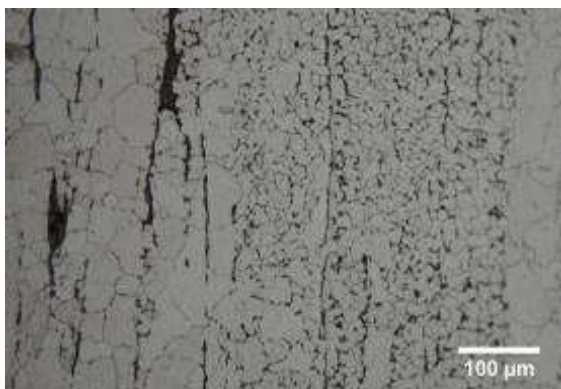
Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 4 : Après attaque à l'Oberhoffer (détails de la microstructure)



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
6	4,5

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Direct	<0,01
Abaque	Direct	
PROCEDE	Direct	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Oui

Résumé des analyses menées sur l'échantillon GNM1312

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : GNM1312

Numéro de l'élément d'armure : GNM1312

Lieu de conservation : German National Museum (Nuremberg)

Lieu de découverte :

Description : Armure de tournois fabriquée par l'armurier Nurembergeois Valentin Siebenbürger. Un échantillon issu de l'épaulière droite a été prélevé par Alan Williams (A.Williams, 2008, p.679)

Datation : 1500 (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Allemagne

Ville : Nuremberg

Élément de l'armure étudié : Epaulière

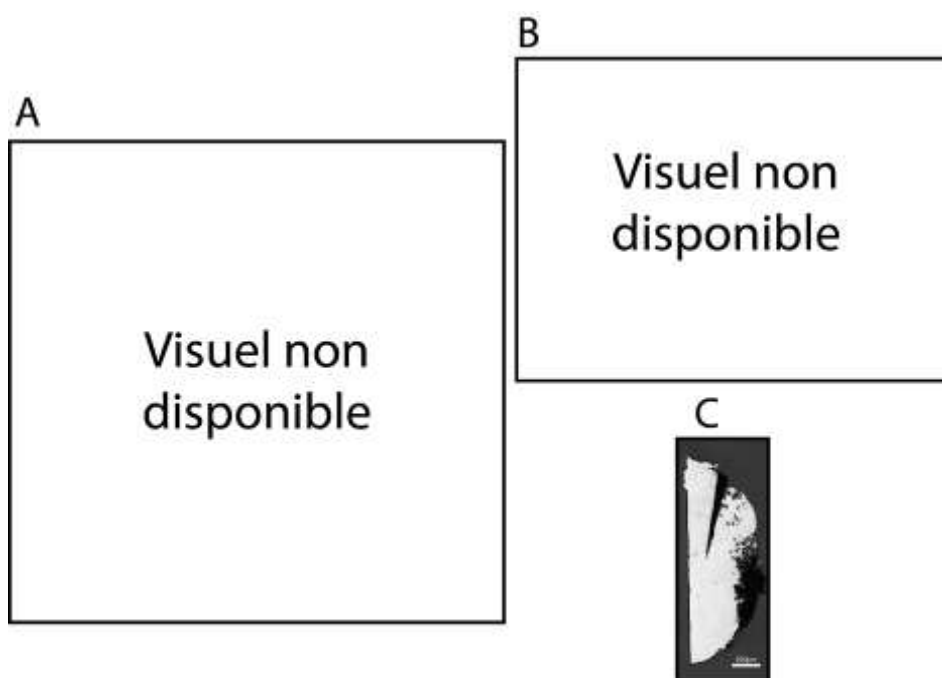
Armurier ou atelier associé : Valentin Siebenbürger

Présence de marque(s) : Oui

Détails de la (ou des) marque(s) : marque de Valentin Siebenbürger

Référence bibliographique : (A.Williams, 2003)

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » repérage du prélèvement, « C » vue de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon issu de l'épaulière droite a été prélevé par Alan Williams

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[<50]	Non résolue	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
1,3	0,40	0,00	214 ($\sigma=41$)	Non dosé	Non

Commentaires :

Cet échantillon présente la structure d'un acier moyennement carburé, très homogène sur l'ensemble de sa surface.

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

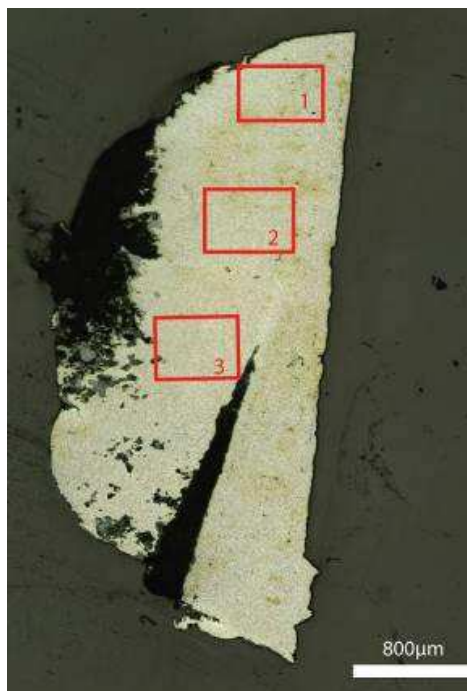
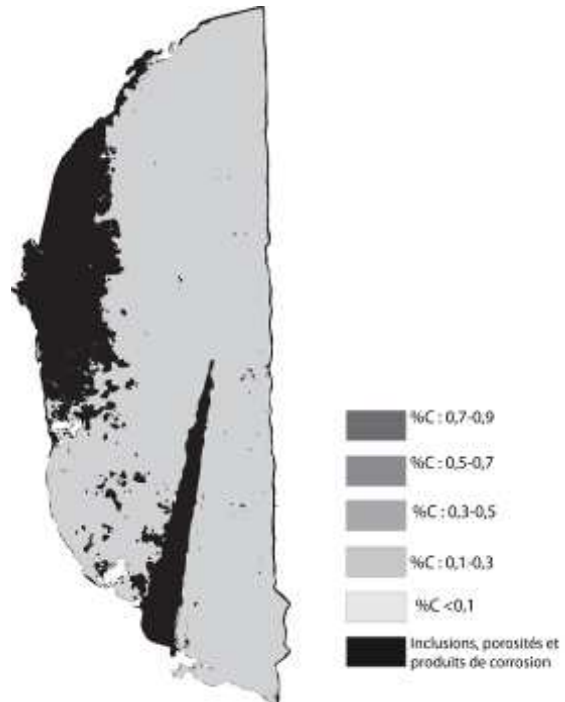
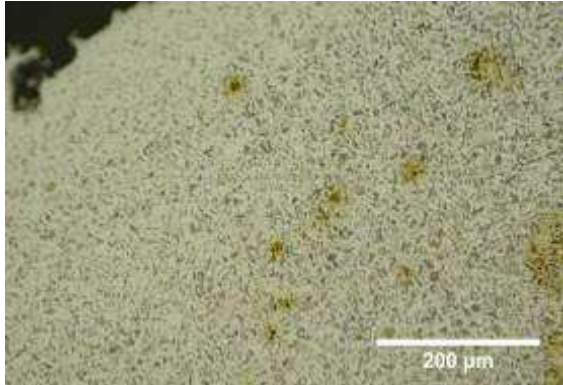


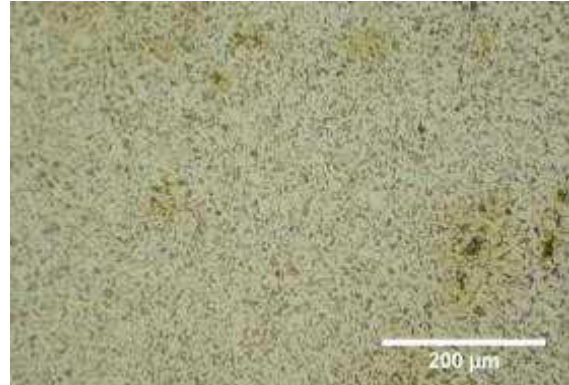
Schéma correspondant



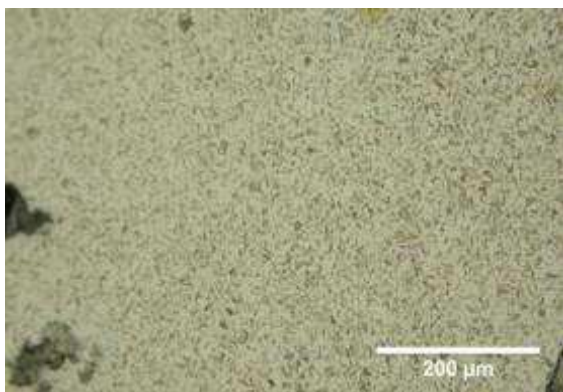
Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



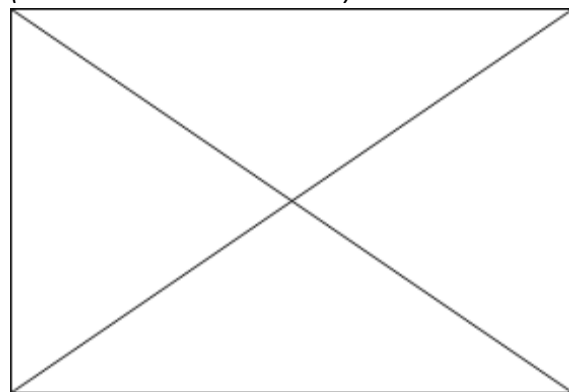
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
4	2,3

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Direct	<0,01
Abaque	Direct	
PROCEDE	Direct	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Oui	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon 1120

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : 1120

Numéro de l'élément d'armure : 1120

Lieu de conservation : German National Museum (Nuremberg)

Lieu de découverte :

Description : "An infantry armour of common form (breast-, back-, and tassets) but (unusually) it bears a date which is 1546." (A. Williams, 2003, p. 632)

Datation : 1546 (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Allemagne

Ville : Nuremberg

Élément de l'armure étudié : Plastron

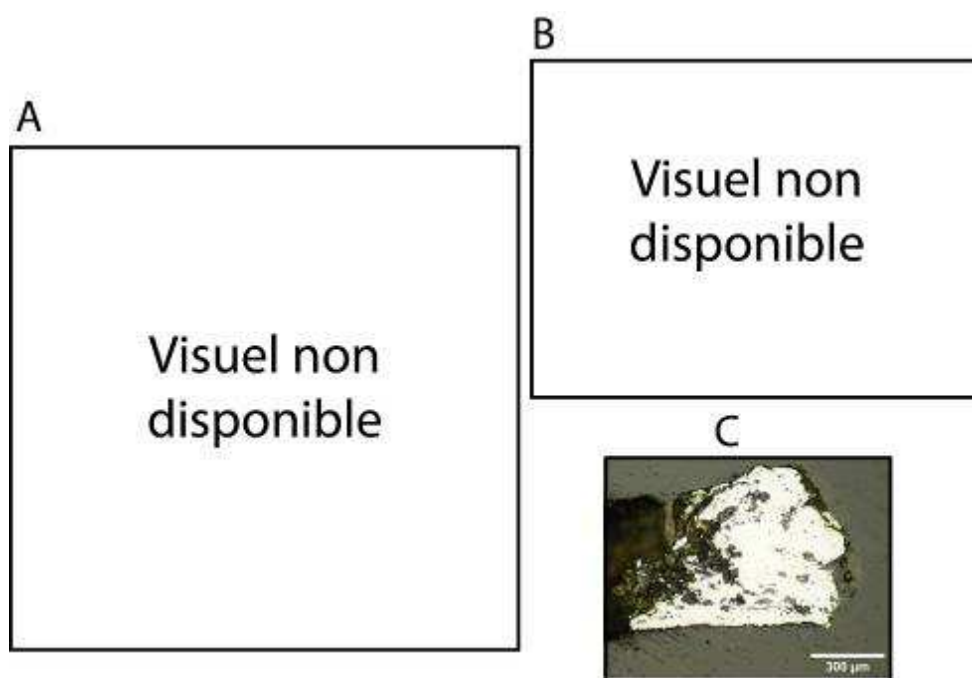
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique : (A. Williams, 2003)

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé par Alan Williams, sur le plastron d'armure (A. Williams, 2003, p.632)

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[50-200]	Non résolue	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
9,2	0,06	0,00	161 ($\sigma=36$)	<0,1	Non

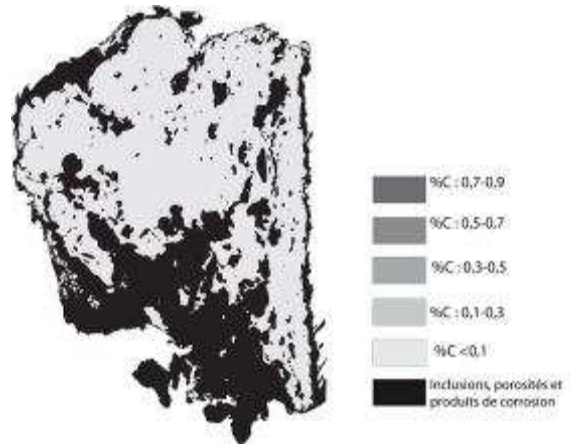
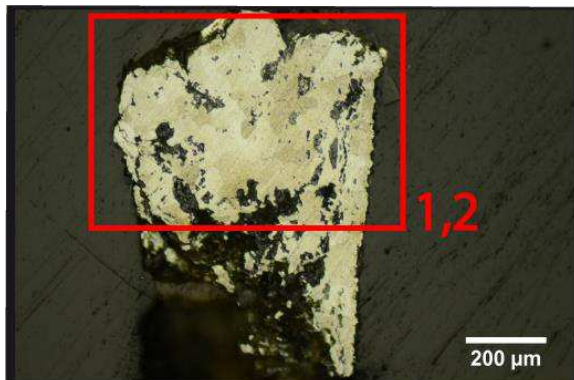
Commentaires :

Cet échantillon présente une structure entièrement ferritique. Il est fortement altéré par la corrosion.

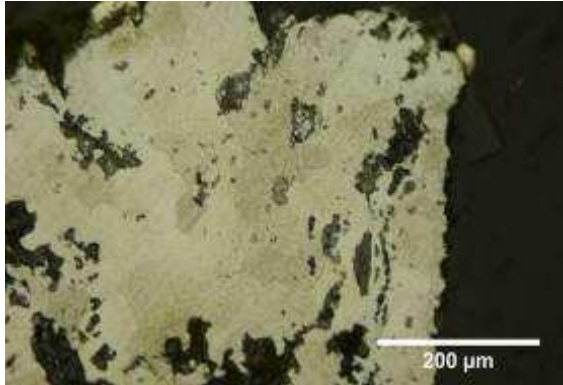
Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

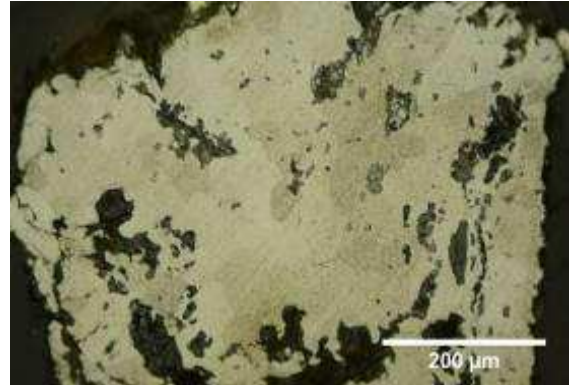
Schéma correspondant



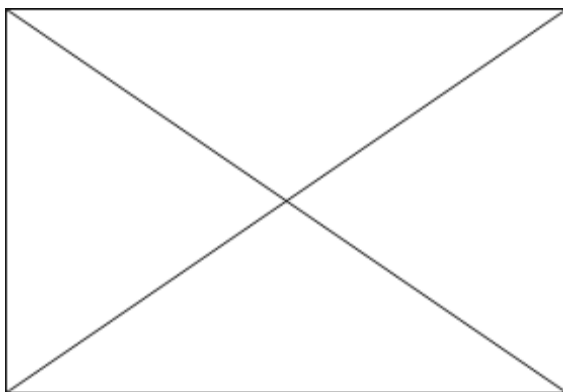
Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



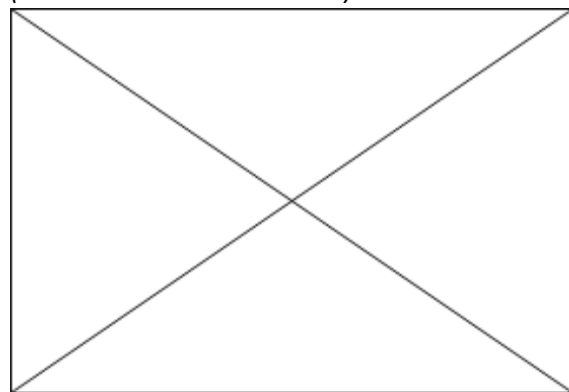
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
4	3

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Direct	<0,01
Abaque	Direct	
PROCEDE	Direct	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Oui	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon GNM1359 b

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : GNM1359

Numéro de l'élément d'armure : GNM1359

Lieu de conservation : German National Museum (Nuremberg)

Lieu de découverte :

Description : Armure d'infanterie portant des marques de maîtres armuriers. Elle est décorée de gravures représentant les quatre royaumes (Rome, Assyrie, Perse, Macédoine) (A. Williams, 2003, p. 670)

Datation : 1609 (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Allemagne

Ville : Nuremberg

Élément de l'armure étudié : Plastron

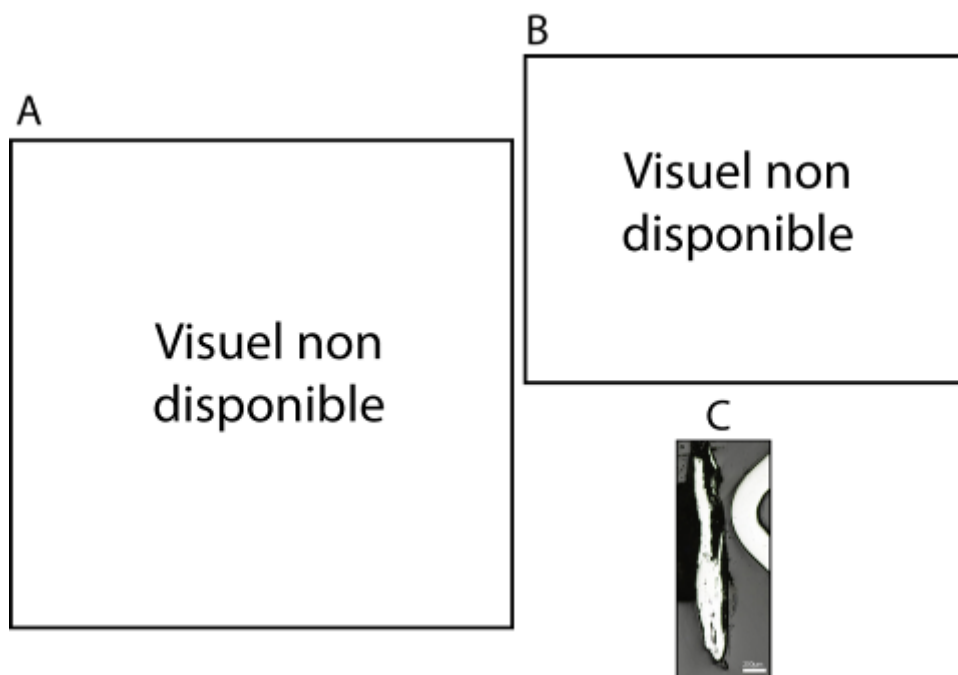
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Oui

Détails de la (ou des) marque(s) : Deux marques de maîtres "AK" et "FD"

Référence bibliographique : (A. Williams, 2003)

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé par Alan Williams sur le plastron d'armure.

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[50-200]	Non résolue	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
4,3	0,06	0,00	215 ($\sigma=12$)	0,2	Non

Commentaires :

Cet échantillon présente la structure d'un fer phosphoreux. La présence de phosphore dans le métal a été mise en évidence par les dosages EPMA à hauteur de 0,2%mass.

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon

(après attaque au Nital 3%)

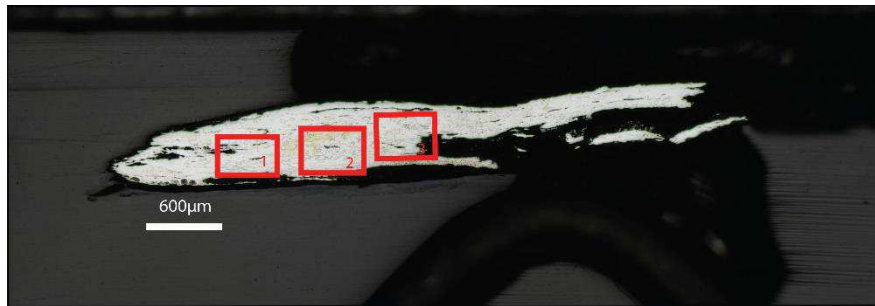
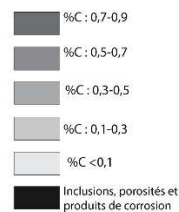
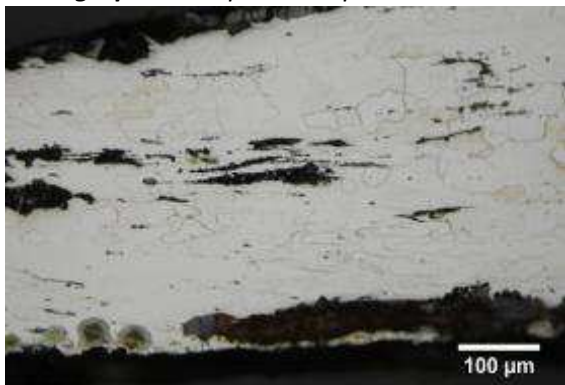


Schéma correspondant



Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



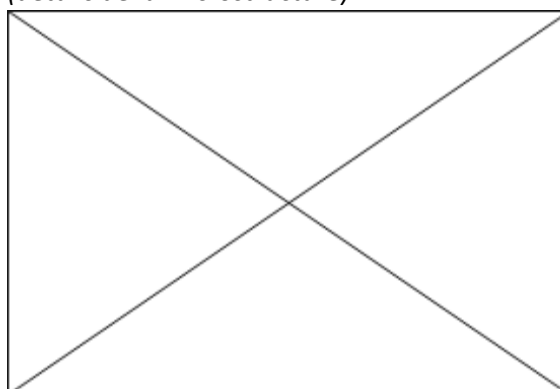
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
3	1

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Indéterminé	0,61
Abaque	Indéterminé	
PROCEDE	Indéterminé	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon GNM1359 a

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : GNM1359

Numéro de l'élément d'armure : GNM1359

Lieu de conservation : German National Museum (Nuremberg)

Lieu de découverte :

Description : Armure d'infanterie portant des marques de maîtres armuriers. Elle est décorée de gravures représentant les quatre royaumes (Rome, Assyrie, Perse, Macédoine) (A. Williams, 2003, p.670)

Datation : 1609 (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Allemagne

Ville : Nuremberg

Élément de l'armure étudié : Plastron

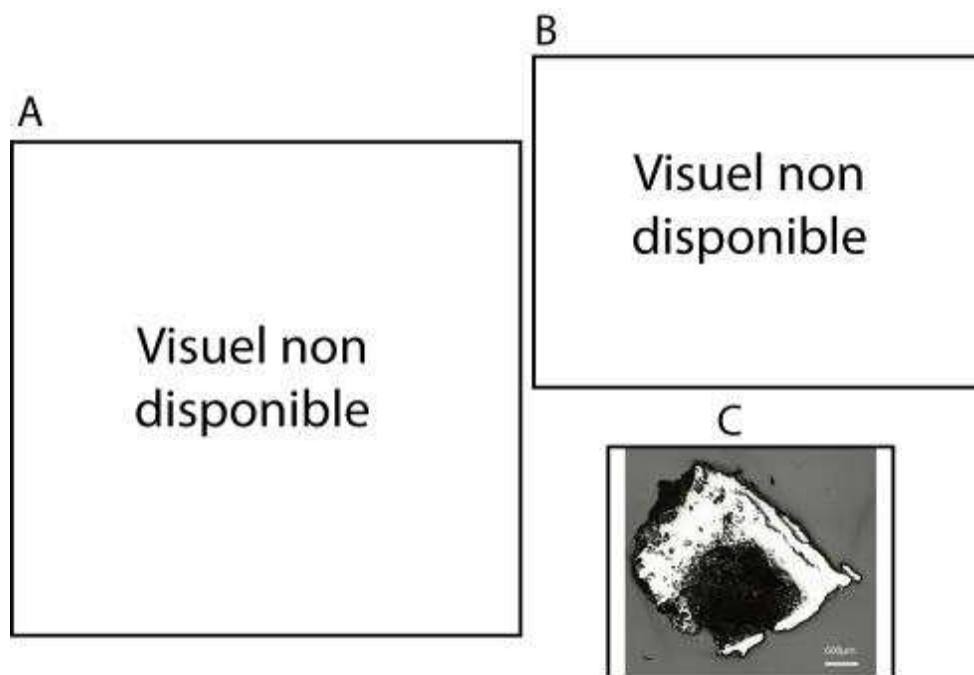
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Oui

Détails de la (ou des) marque(s) : Deux marques de maîtres "AK" et "FD"

Référence bibliographique : (A. Williams, 2003)

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé par Alan Williams sur le plastron d'armure.

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[50-200]	Non résolue	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
10,6	0,18	0,05	254 ($\sigma=21$)	0,27	Non

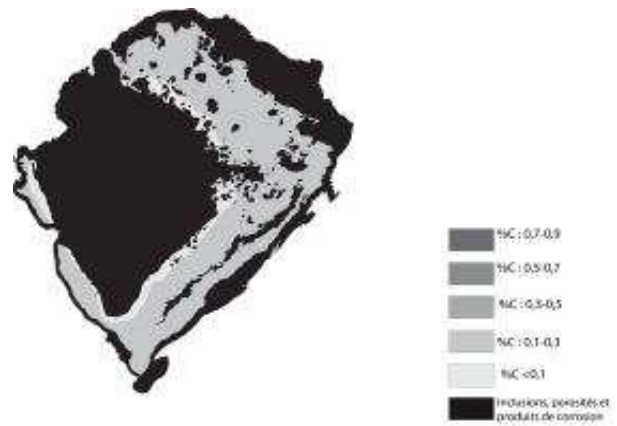
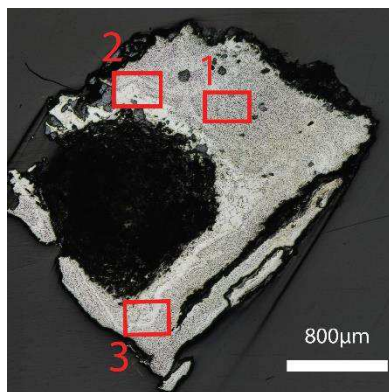
Commentaires :

Cet échantillon présente la structure d'un acier ferrito perlitique faiblement carburé (%C* < 0,2). La présence de phosphore dans le métal a également été révélée à hauteur de 0,3%mass.

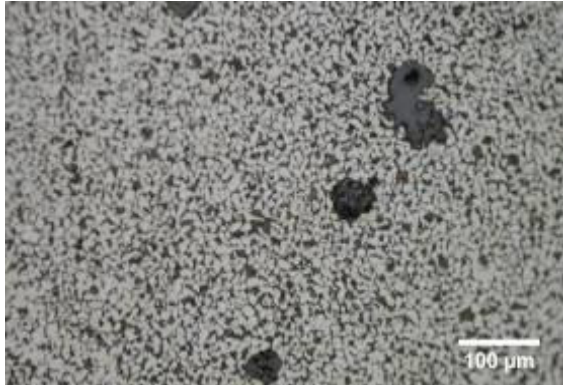
Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

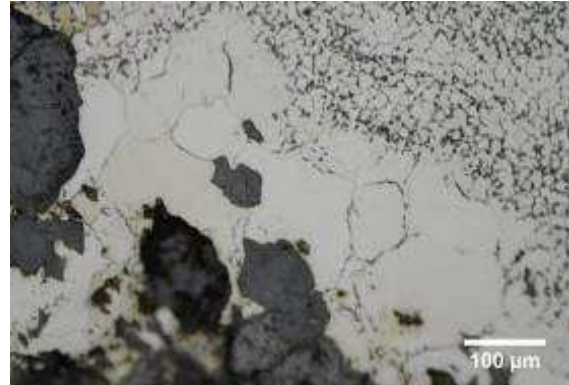
Schéma correspondant



Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



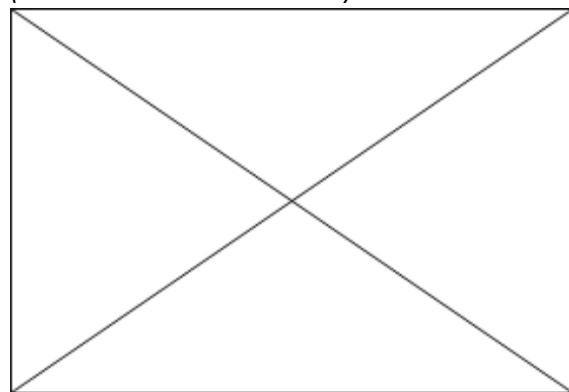
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
5	3

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Direct	0,01
Abaque	Direct	
PROCEDE	Direct	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon H1G935.B

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : H1G935

Numéro de l'élément d'armure : H1G935

Lieu de conservation : Worcester Art Museum (Worcester)

Lieu de découverte :

Description : Une armure probablement réalisée pour le mariage de Julius duc de Brunswick (A. Williams, 2003, p. 836)

Datation : 1560 (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Allemagne

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Plastron et Bavière

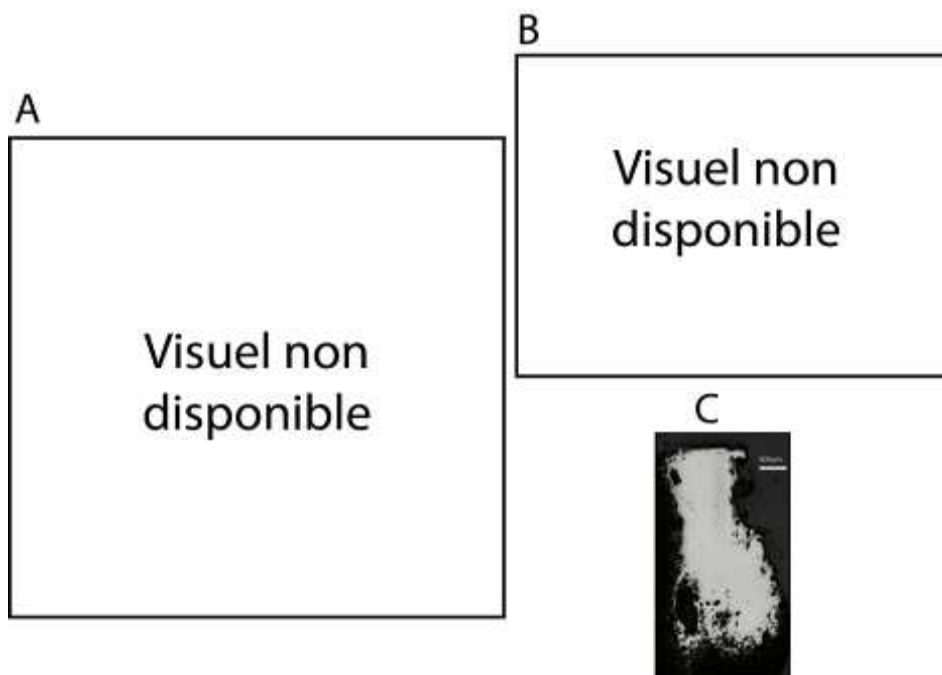
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique : (A. Williams, 2003)

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé par Alan Williams sur la défense de tête de l'armure

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[<50]	Non résolue	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
3,0	0,20	0,00	187 ($\sigma=28$)	Non dosé	Non

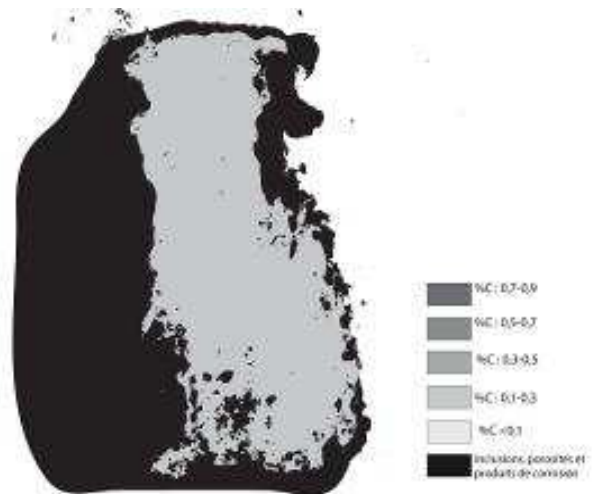
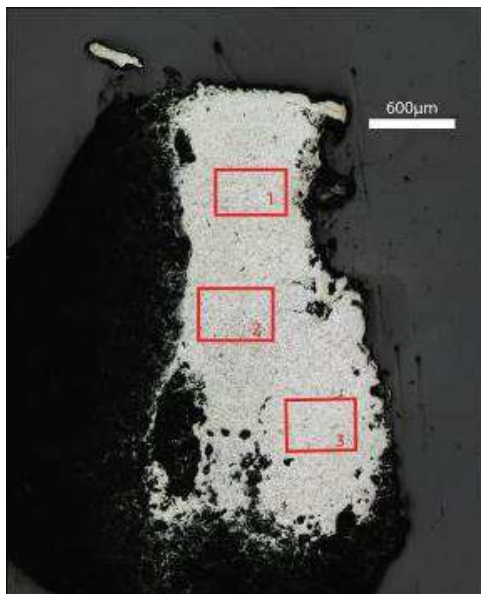
Commentaires :

Cet échantillon présente la structure d'un acier faiblement carburé (%C<0,2) homogène en teneur en carbone.

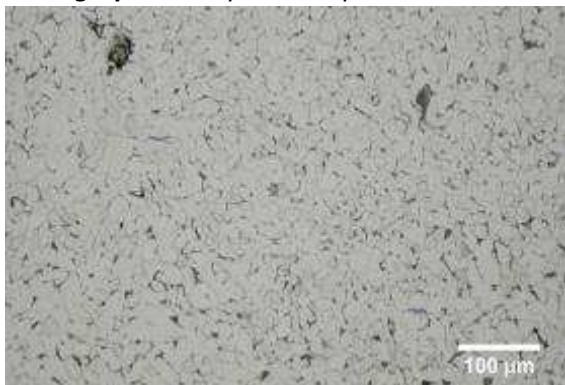
Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

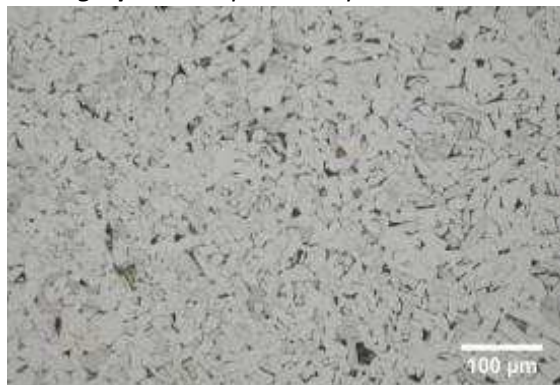
Schéma correspondant



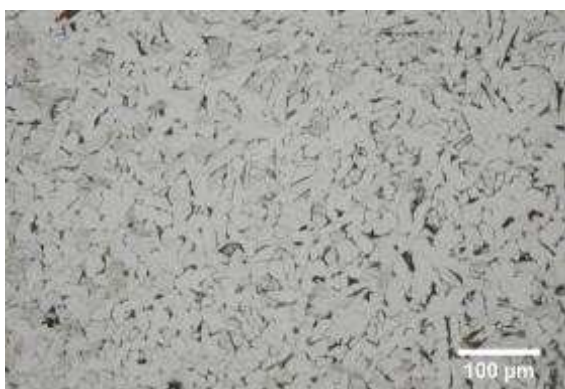
Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



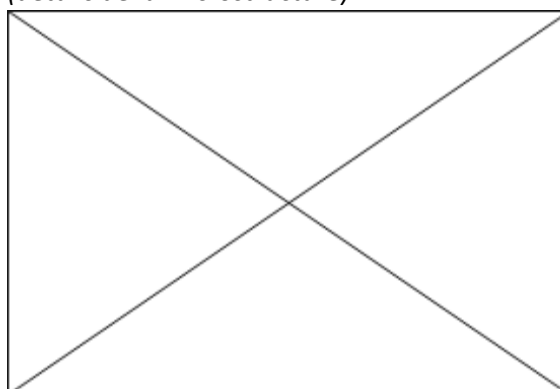
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
5	3

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Direct	<0,01
Abaque	Direct	
PROCEDE	Direct	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon H1G935

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : H1G935

Numéro de l'élément d'armure : H1G935

Lieu de conservation : Worcester Art Museum (Worcester)

Lieu de découverte :

Description : Une armure probablement réalisée pour le mariage de Julius duc de Brunswick (A. Williams, 2003, p.836)

Datation : 1560 (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Allemagne

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Plastron et Bavière

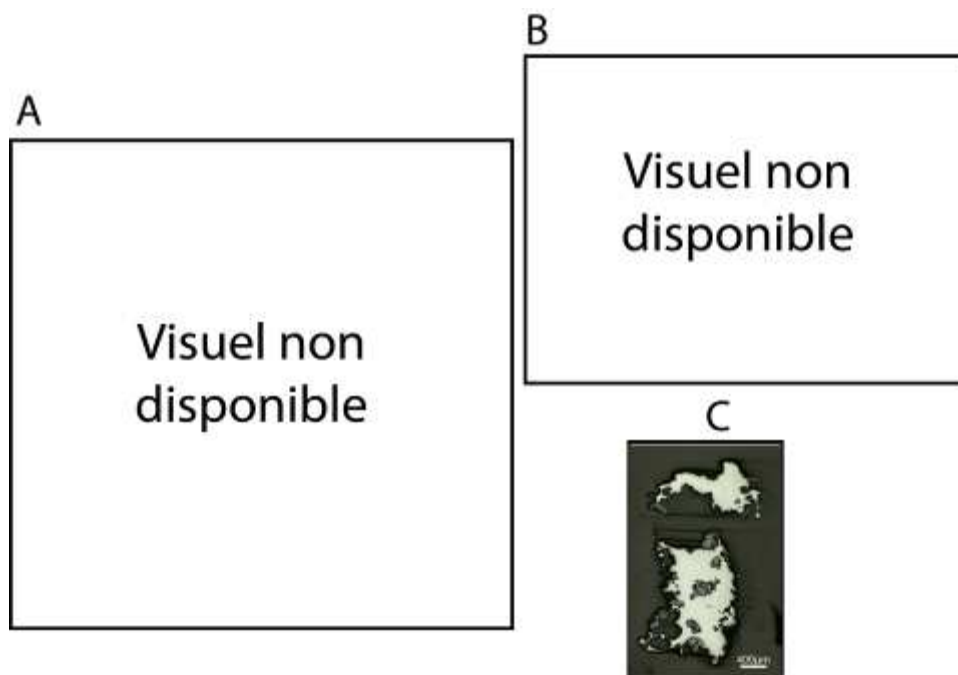
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique : (A. Williams, 2003)

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé par Alan Williams sur le plastron de l'armure

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[50-200]	Non résolue	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
11,4	0,06	0,00	164 ($\sigma=16$)	<0,1	Non

Commentaires :

Cet échantillon présente une structure ferritique. Il est fortement altéré par la corrosion, ainsi il est possible qu'une partie de l'information contenue dans le métal ait été perdue.

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

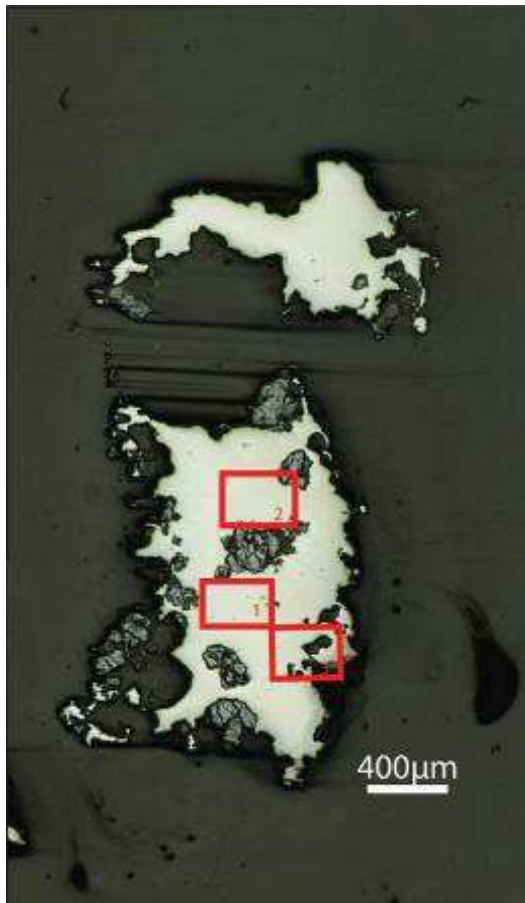
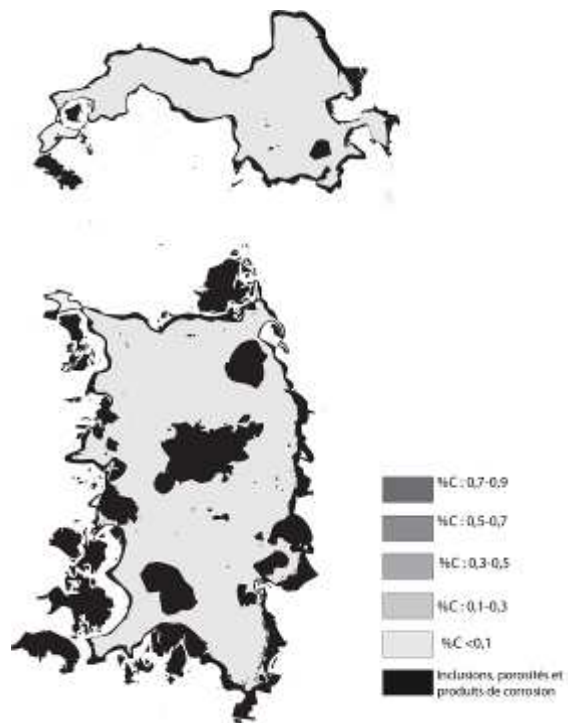


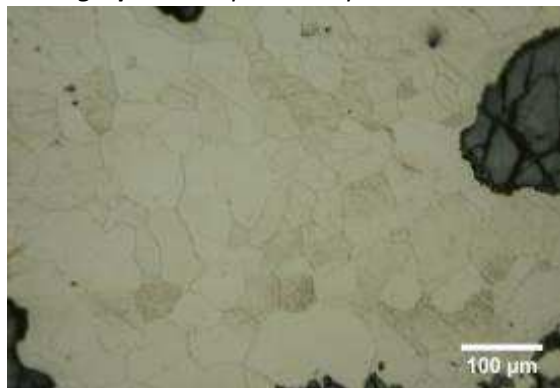
Schéma correspondant



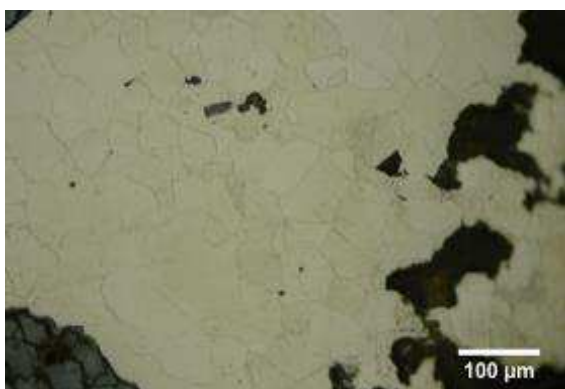
Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



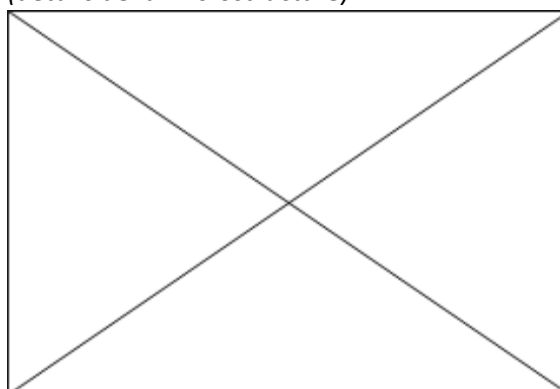
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
2	2

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Indirect	>0,99
Abaque	Indirect	
PROCEDE	Indirect	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Dissier, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon

1_casque

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : Montmorency

Numéro de l'élément d'armure : Mont_1_casque

Lieu de conservation : Musée des Beaux-Arts de Draguignan (Draguignan)

Lieu de découverte :

Description : Cette demi armure a été réalisée pour François de Montmorency dans la seconde moitié du XVI^e siècle (1560-1570). Le monogramme que l'on retrouve reproduit sur l'ensemble de la décoration des pièces se composé d'un ϕ (phi) pour François, superposé au « M » croisé des Montmorency. La décoration traduit le style maniériste de l'époque qui s'est imposé en France à la fin du siècle. Si elle est supposée de fabrication française, son atelier de fabrication demeure lui inconnu. Par la richesse de son décor mais également sa forme, cette pièce est décrite comme une armure de parade qui aurait été portée à l'occasion de cérémonies (J. P. Reverseau, 1993, p. 18).

Datation : 1560-1570

Lieu de fabrication supposé :

Région : France

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Armet

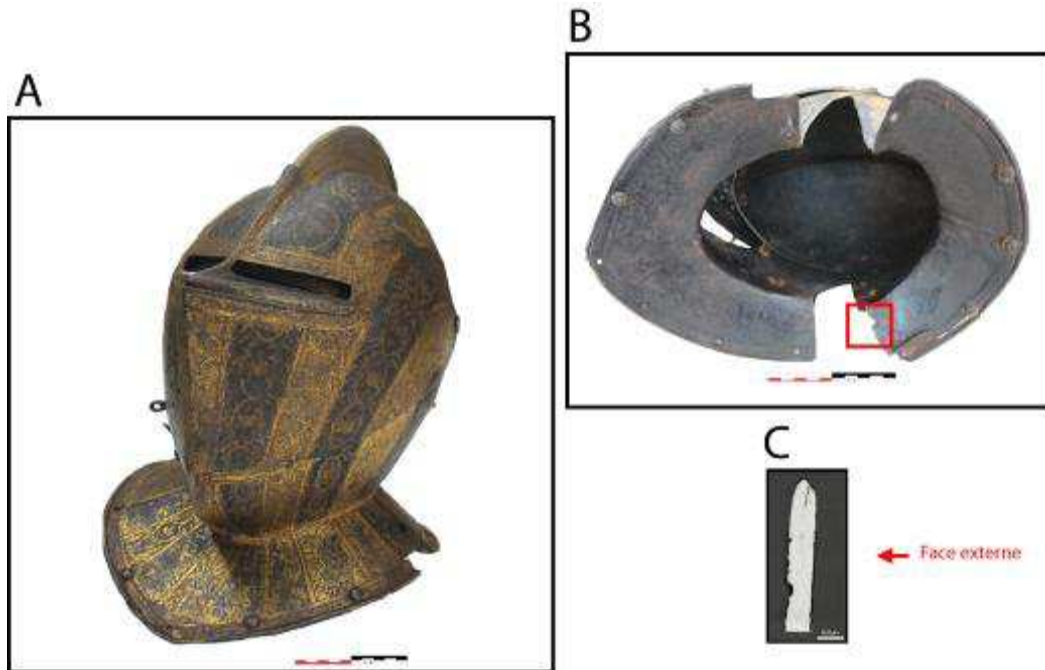
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique : (J. P. Reverseau, 1993)

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Le prélèvement a été opéré sur un bord de la défense

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[50-200]	Globulaire	Non	Non	Non	Oui

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
1,2	0,16	0,06	156 ($\sigma=19$)	Non dosé	Oui

Commentaires :

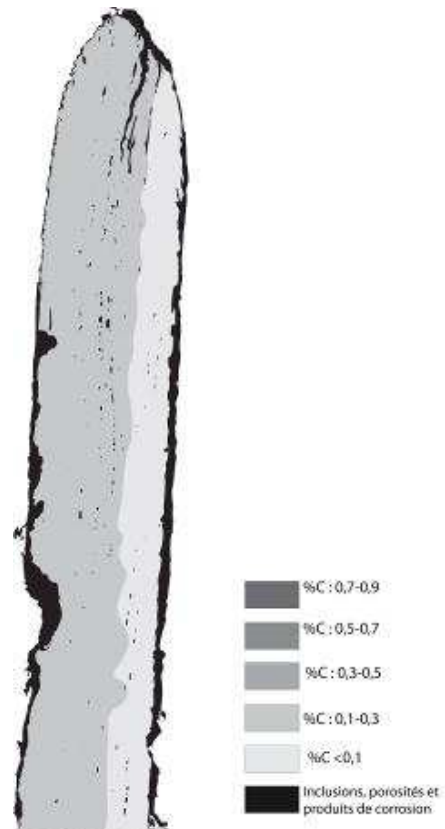
Cet échantillon présente la structure d'un acier faiblement carburé. Deux bandes de teneur en carbone distinctes sont visibles. Dans la bande la plus carburée, la perlite, de forme globulaire, témoigne qu'un recuit du métal a été opéré.

Analyses métallographiques

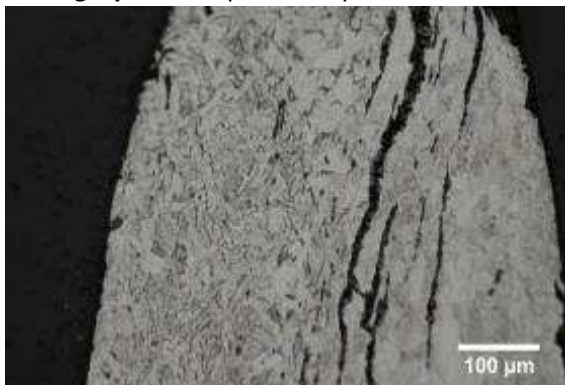
Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)



Schéma correspondant



Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



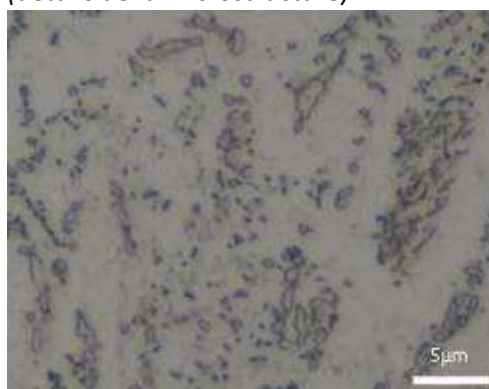
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
5	1

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Indirect	>0,99
Abaque	Indirect	
PROCEDE	Indirect	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon 2_gantelet

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : Montmorency

Numéro de l'élément d'armure : Mont_2_gantelet

Lieu de conservation : Musée des Beaux-Arts de Draguignan (Draguignan)

Lieu de découverte :

Description : voir échantillon 1_casque

Datation : 1560-1570

Lieu de fabrication supposé :

Région : France

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Gantelet

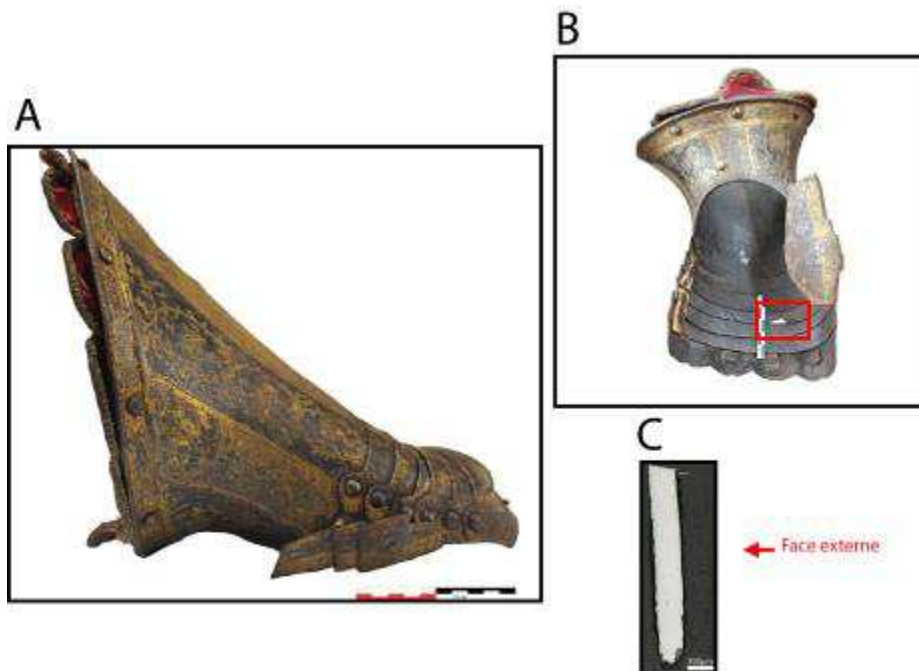
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique : (J. P. Reverseau, 1993)

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Le prélèvement a été opéré sur la 3ème lame protégeant les doigts.

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[50-200]	Lamellaire	Non	Non	Oui	Oui

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
0,7	0,66	0,14	301 ($\sigma=43$)	Non dosé	Non

Commentaires :

Cet échantillon présente la structure d'un acier moyennement carburé hétérogène en teneur en carbone. En effet un léger gradient de teneur en carbone est présent. Il s'étend d'environ 0,8%mass à 0,2%mass. De plus les grains sont déformés selon la direction de martelage ce qui prouve que le métal n'a pas subi de recuit après réalisation de l'élément d'armure.

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

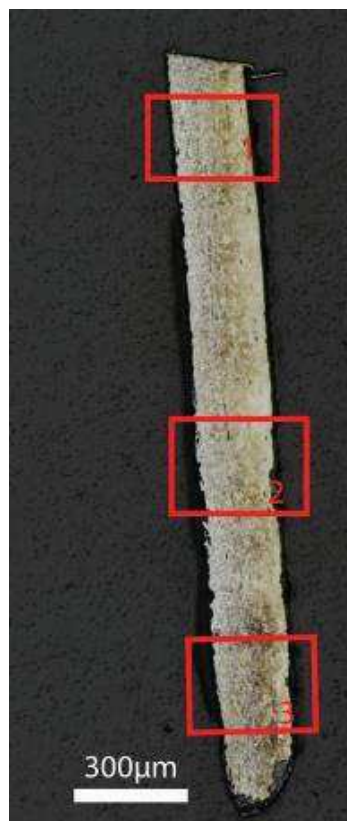
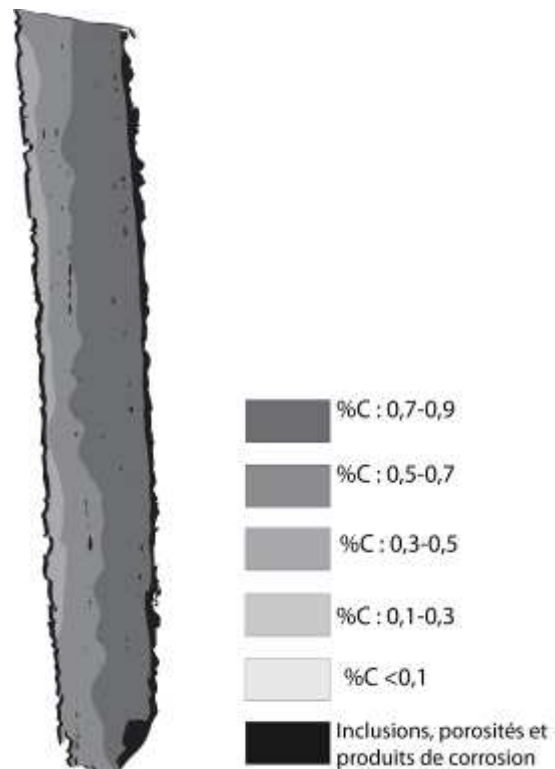


Schéma correspondant



Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



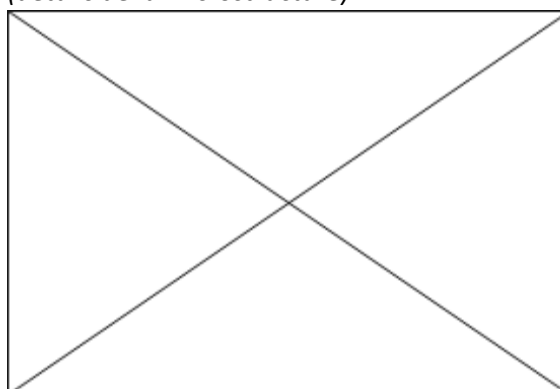
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
4	1

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Direct	<0,01
Abaque	Direct	
PROCEDE	Direct	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon 3_colletin

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : Montmorency
Numéro de l'élément d'armure : Mont_3_colletin
Lieu de conservation : Musée des Beaux-Arts de Draguignan (Draguignan)
Lieu de découverte :
Description : voir échantillon 1_casque
Datation : 1560-1570
Lieu de fabrication supposé :
 Région : France
 Ville : Inconnue
Élément de l'armure étudié : Colletin
Armurier ou atelier associé :
Présence de marque(s) : Non
Détails de la (ou des) marque(s) :
Référence bibliographique : (J. P. Reverseau, 1993)

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Le prélèvement a été opéré sur la lame inférieure du colletin.

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[50-200]	Non résolue	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
2,2	0,06	0,00	170 ($\sigma=23$)	<0,1	Non

Commentaires :

Cet échantillon possède une structure entièrement ferritique. Quelques amas de perlite sont visibles par endroit.

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

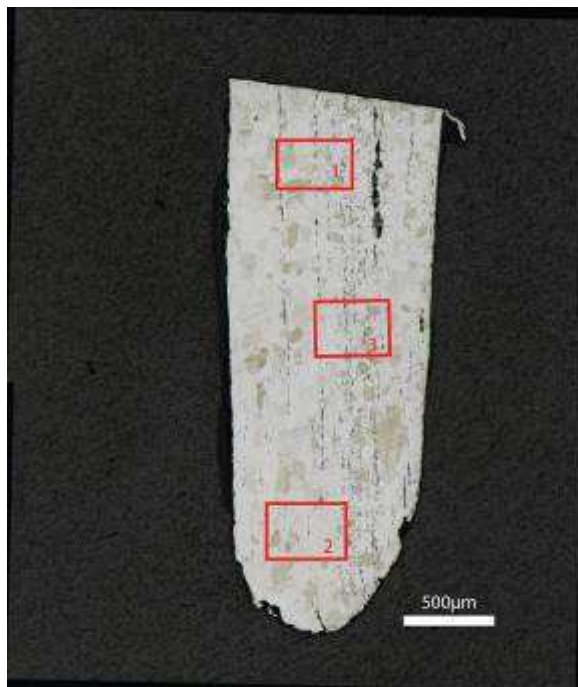
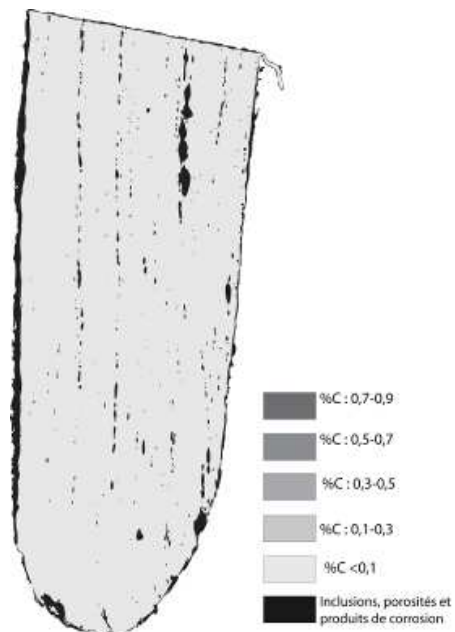
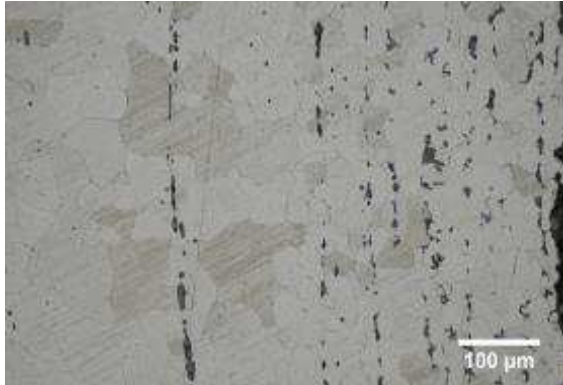


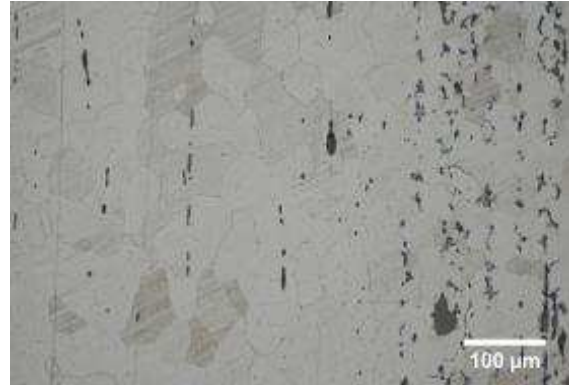
Schéma correspondant



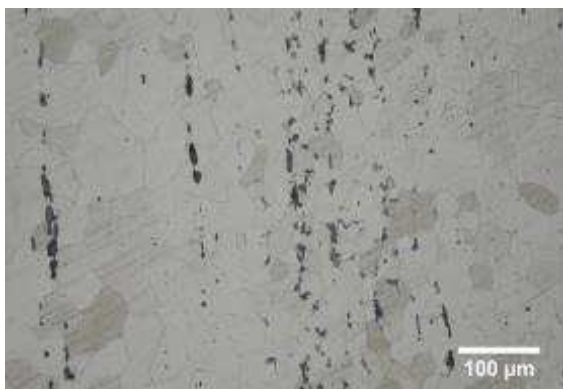
Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



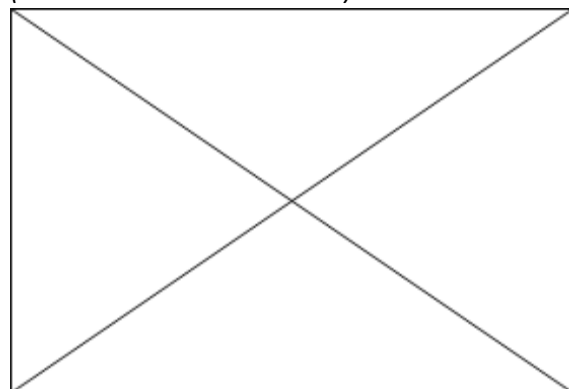
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
3	1,2

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Indirect	$p(\text{classe1}) > 0,99$ $p(\text{classe2}) = 0,99$
Abaque	Indirect	
PROCEDE	Indirect	

- Provenance et compatibilité chimique

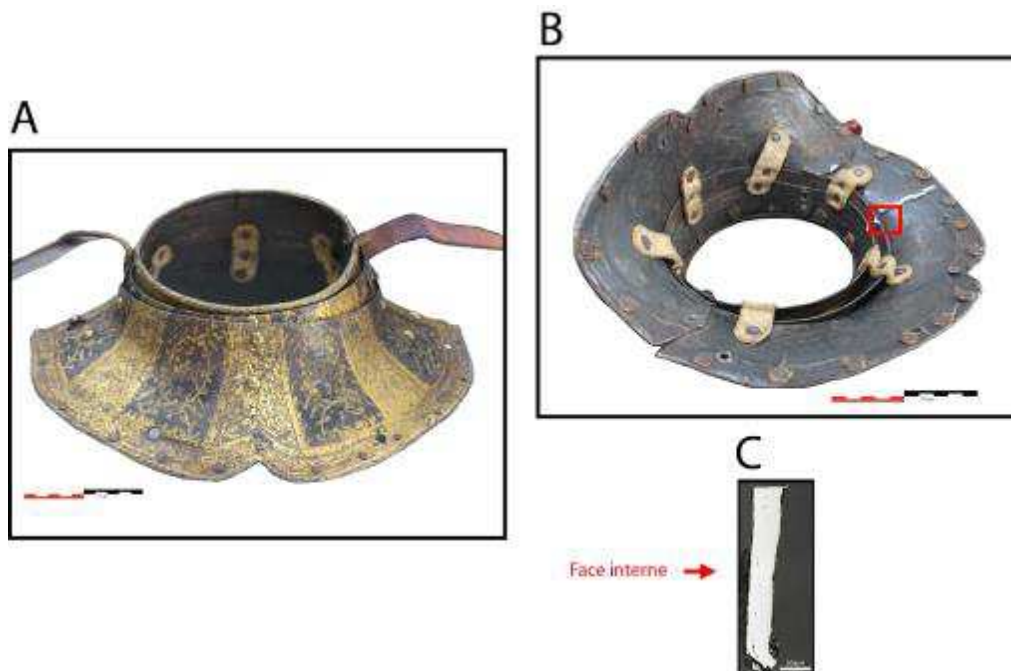
Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon 4_colletin_a

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : Montmorency
Numéro de l'élément d'armure : Mont_3_colletin
Lieu de conservation : Musée des Beaux-Arts de Draguignan (Draguignan)
Lieu de découverte :
Description : voir échantillon 1_casque
Datation : 1560-1570
Lieu de fabrication supposé :
 Région : France
 Ville : Inconnue
Élément de l'armure étudié : Colletin
Armurier ou atelier associé :
Présence de marque(s) : Non
Détails de la (ou des) marque(s) :
Référence bibliographique : (J. P. Reverseau, 1993)

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Le prélèvement a été opéré sur la deuxième lame du colletin. Il s'est scindé en deux parties lors de la découpe (échantillons 4_colletin_a et 4_colletin_b)

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[50-200]	Lamellaire et globulaire	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
0,2	0,16	0,06	153 ($\sigma=25$)	Non dosé	Non

Commentaires :

Cet échantillon présente la structure d'un acier moyennement carburé d'une faible hétérogénéité en teneur en carbone.

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

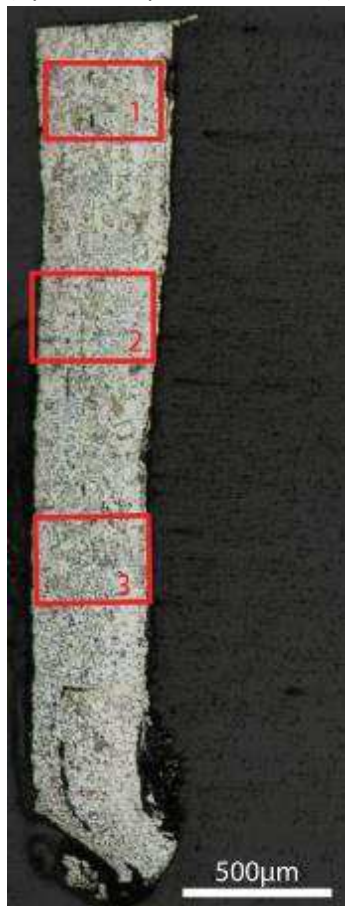
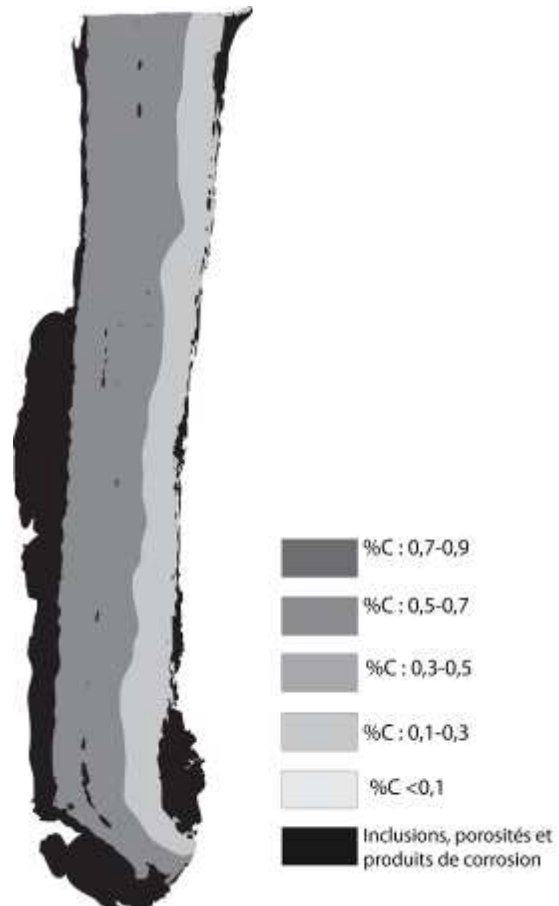


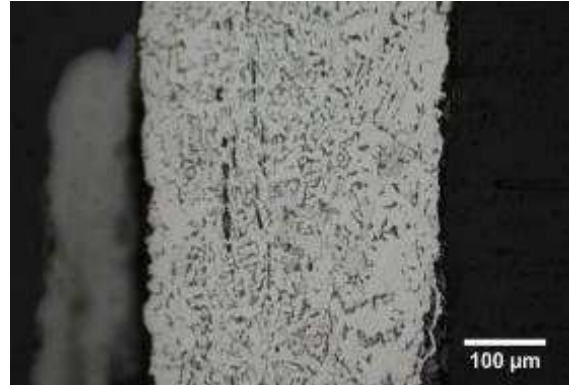
Schéma correspondant



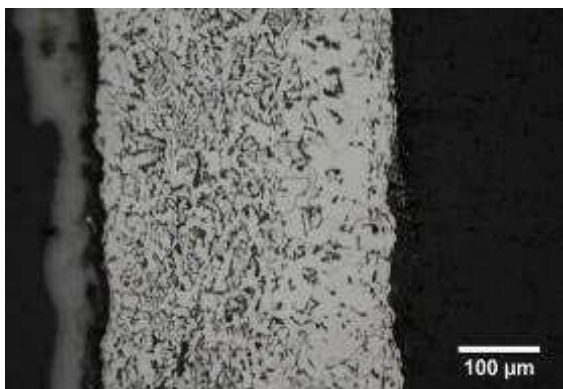
Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



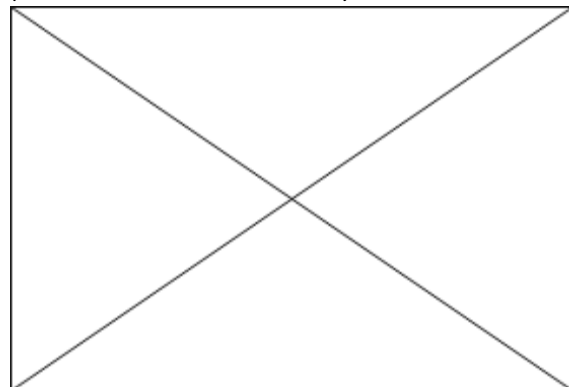
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
6	2,6

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Direct	<0,01
Abaque	Direct	
PROCEDE	Direct	

- Provenance et compatibilité chimique

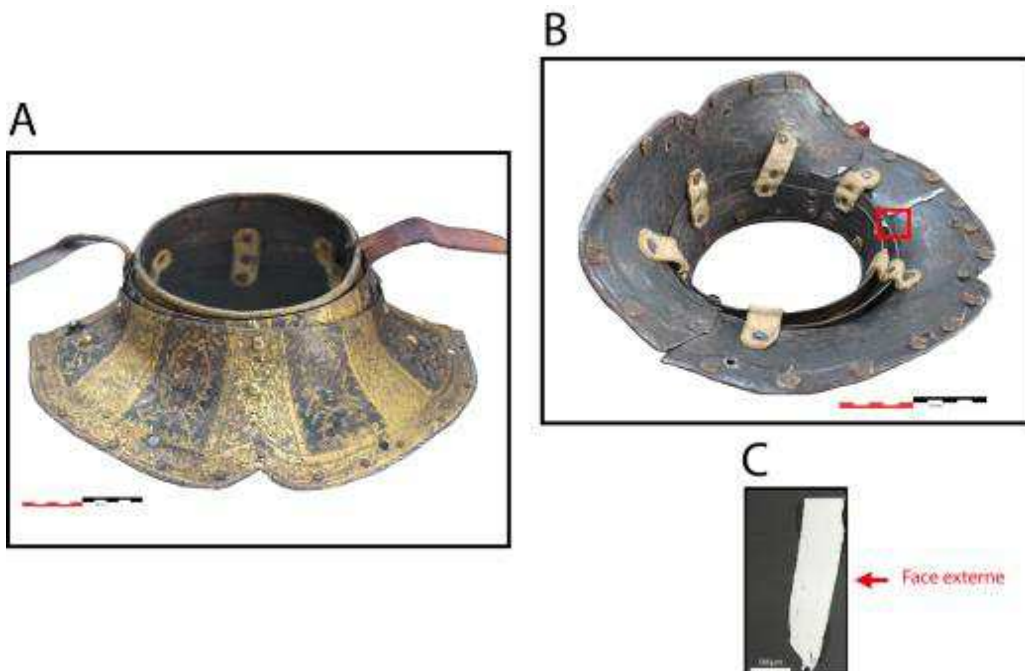
Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon 4_colletin_b

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : Montmorency
Numéro de l'élément d'armure : Mont_3_colletin
Lieu de conservation : Musée des Beaux-Arts de Draguignan (Draguignan)
Lieu de découverte :
Description : voir échantillon 1_casque
Datation : 1560-1570
Lieu de fabrication supposé :
 Région : France
 Ville : Inconnue
Élément de l'armure étudié : Colletin
Armurier ou atelier associé :
Présence de marque(s) : Non
Détails de la (ou des) marque(s) :
Référence bibliographique : (J. P. Reverseau, 1993)

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Le prélèvement a été opéré sur la deuxième lame du colletin. Il s'est scindé en deux parties lors de la découpe (échantillons 4_colletin_a et 4_colletin_b).

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[50-200]	Globulaire	Non	Non	Non	Oui

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
0,3	0,57	0,07	181 ($\sigma=20$)	Non dosé	Non

Commentaires :

Cet échantillon présente la structure d'un acier moyennement carburé. La perlite, de forme globulaire, témoigne qu'un recuit du métal a été opéré.

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

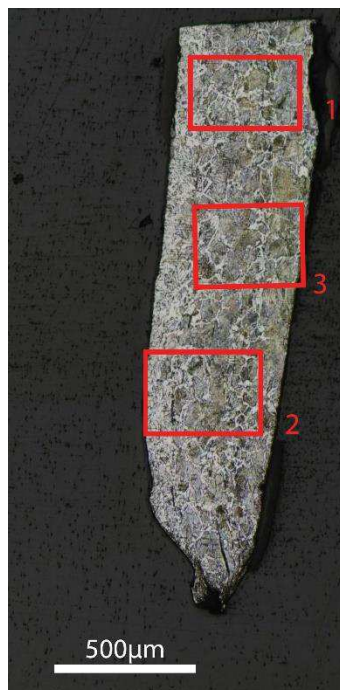
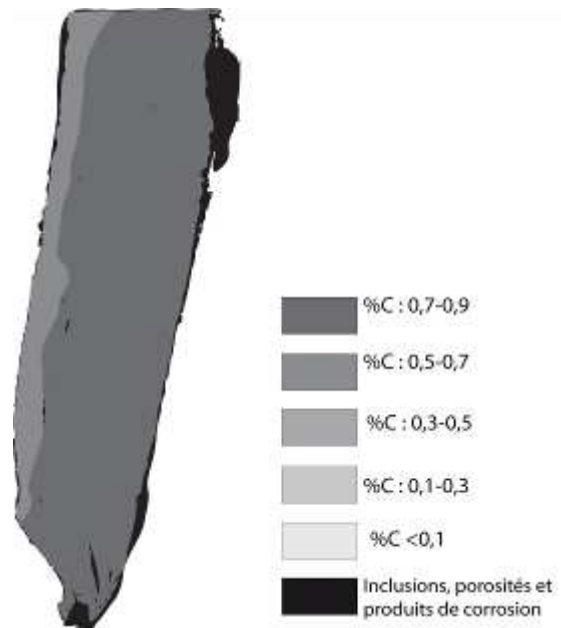


Schéma correspondant



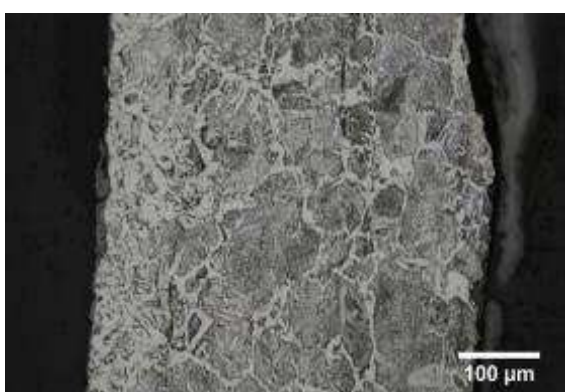
Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



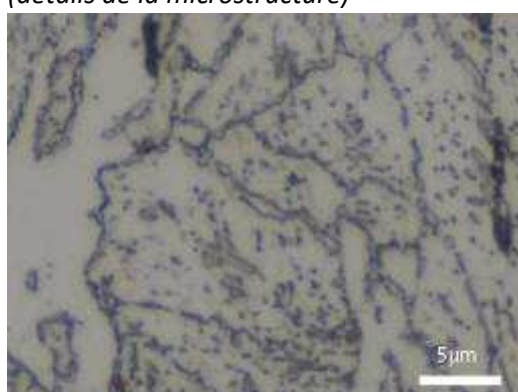
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
3	1

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Direct	<0,01
Abaque	Direct	
PROCEDE	Direct	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon 5_tassette

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : Montmorency

Numéro de l'élément d'armure : Mont_5_tassette

Lieu de conservation : Musée des Beaux-Arts de Draguignan (Draguignan)

Lieu de découverte :

Description : voir échantillon 1_casque

Datation : 1560-1570

Lieu de fabrication supposé :

Région : France

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Tassette

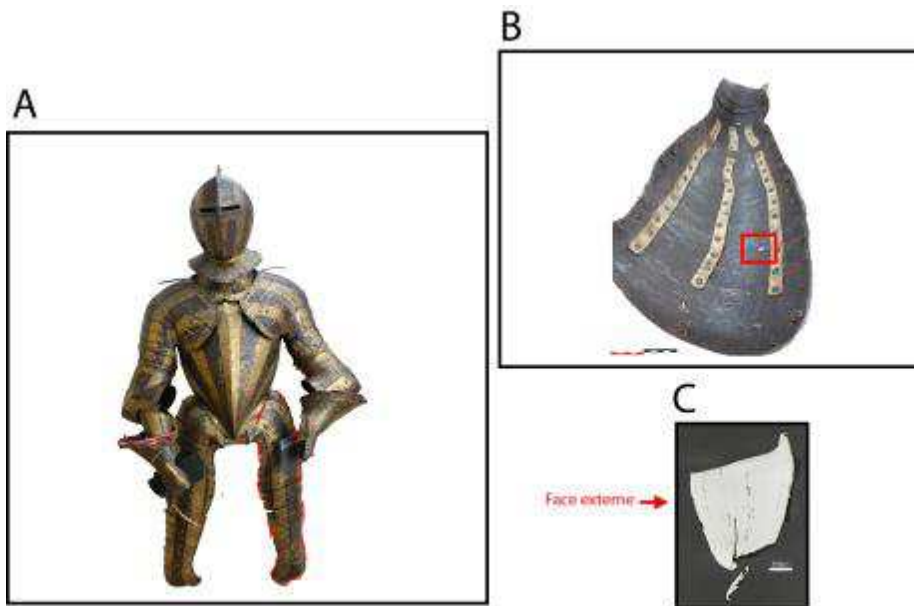
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique : (J. P. Reverseau, 1993)

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé sur la 3ème tassette de la jambe gauche

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[<50]	Lamellaire	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
0,7	0,21	0,09	165 ($\sigma=15$)	Non dosé	Non

Commentaires :

Cet échantillon présente la structure d'un acier moyennement carburé hétérogène en teneur en carbone. Une bande centrale moins carburée est visible, dans la prolongation d'une importante ligne de porosité qui pourrait correspondre à une soudure ou un repli du métal.

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

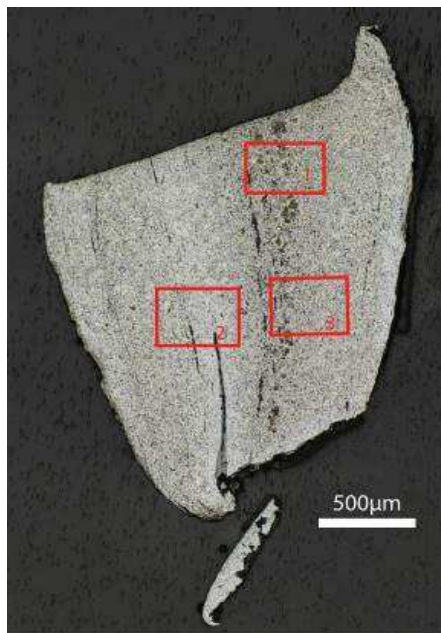
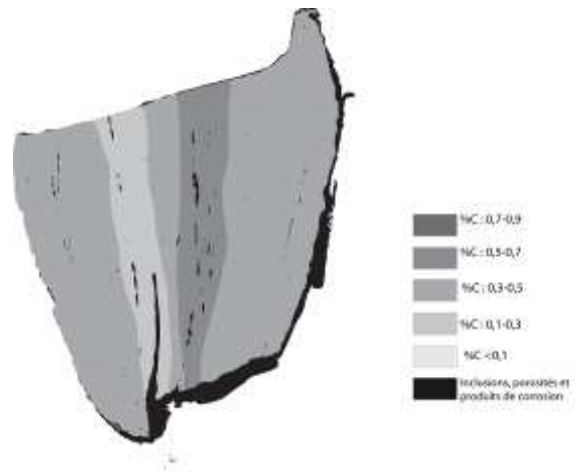
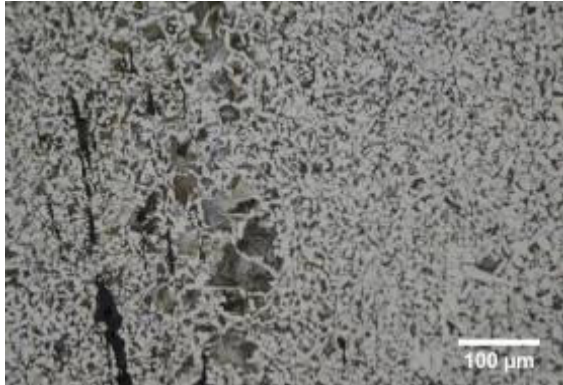


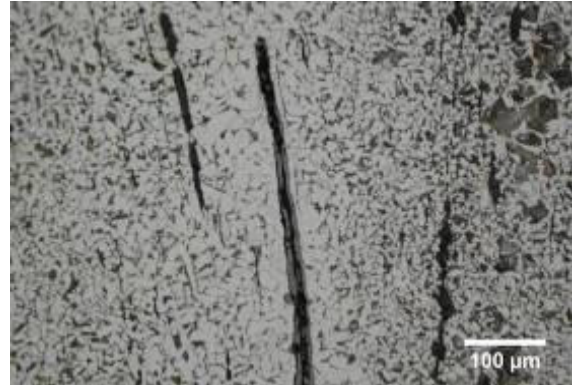
Schéma correspondant



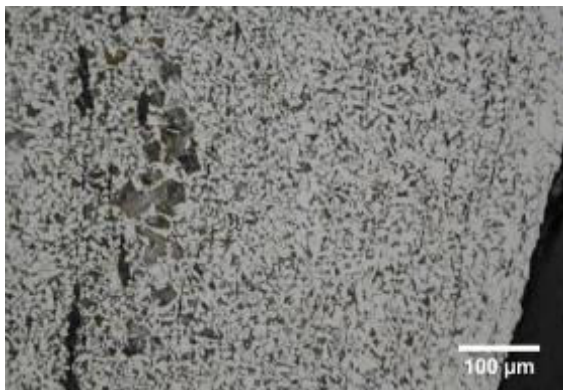
Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



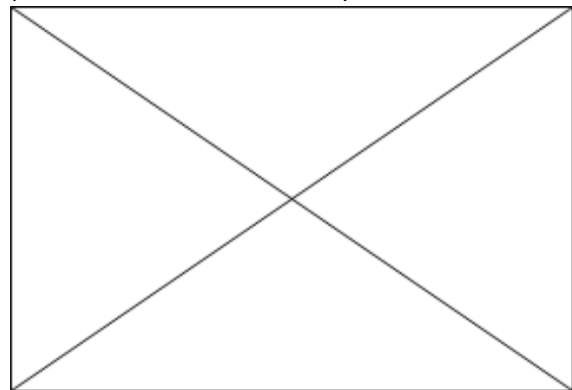
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
3	3

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Direct	<0,01
Abaque	Direct	
PROCEDE	Direct	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon 6_tassette

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : Montmorency

Numéro de l'élément d'armure : Mont_5_tassette

Lieu de conservation : Musée des Beaux-Arts de Draguignan (Draguignan)

Lieu de découverte :

Description : voir échantillon 1_casque

Datation : 1560-1570

Lieu de fabrication supposé :

Région : France

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Tassette

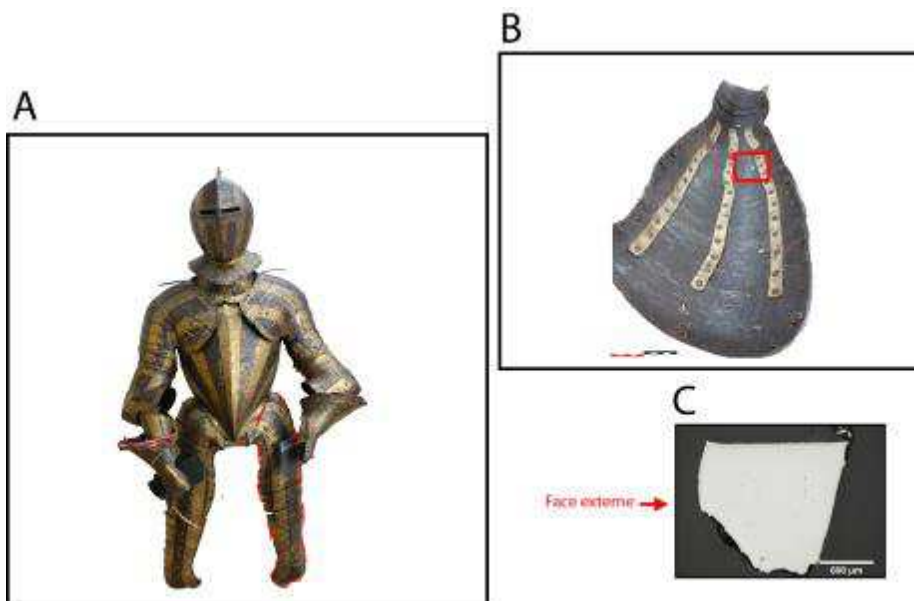
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique : (J. P. Reverseau, 1993)

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé sur la 8ème tassette de la jambe gauche

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[50-200]	Globulaire	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
0,1	0,20	0,00	162 ($\sigma=12$)	Non dosé	Non

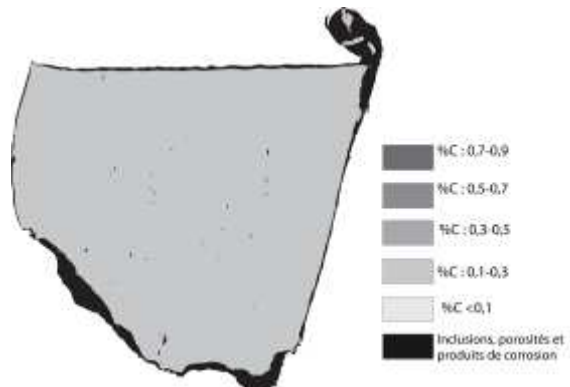
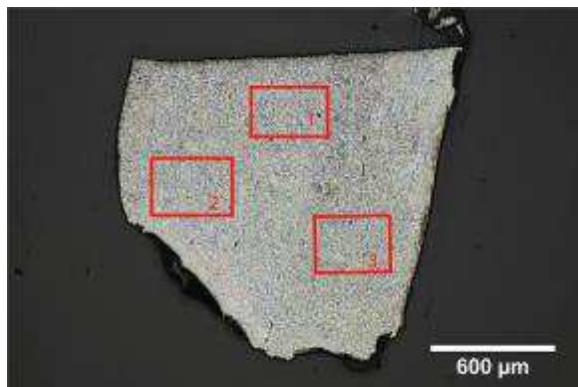
Commentaires :

Cet échantillon présente la structure d'un acier faiblement carburé homogène. La perlite, de forme globulaire, témoigne qu'un recuit du métal a été opéré.

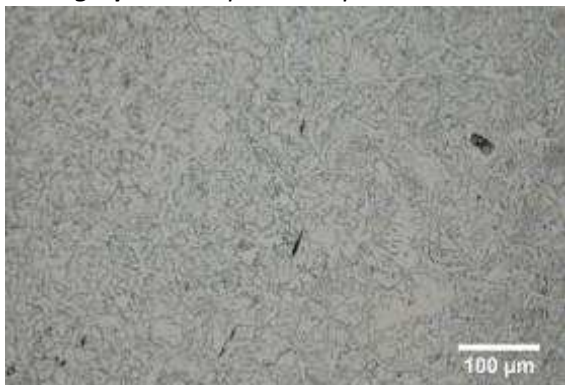
Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

Schéma correspondant



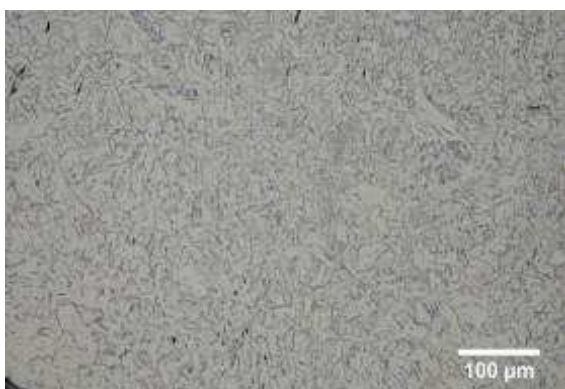
Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



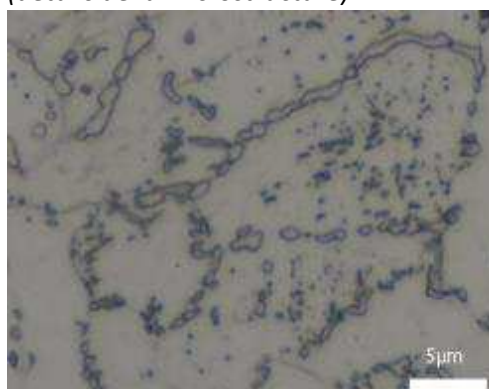
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
4	1

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Direct	<0,01
Abaque	Direct	
PROCEDE	Direct	

- Provenance et compatibilité chimique

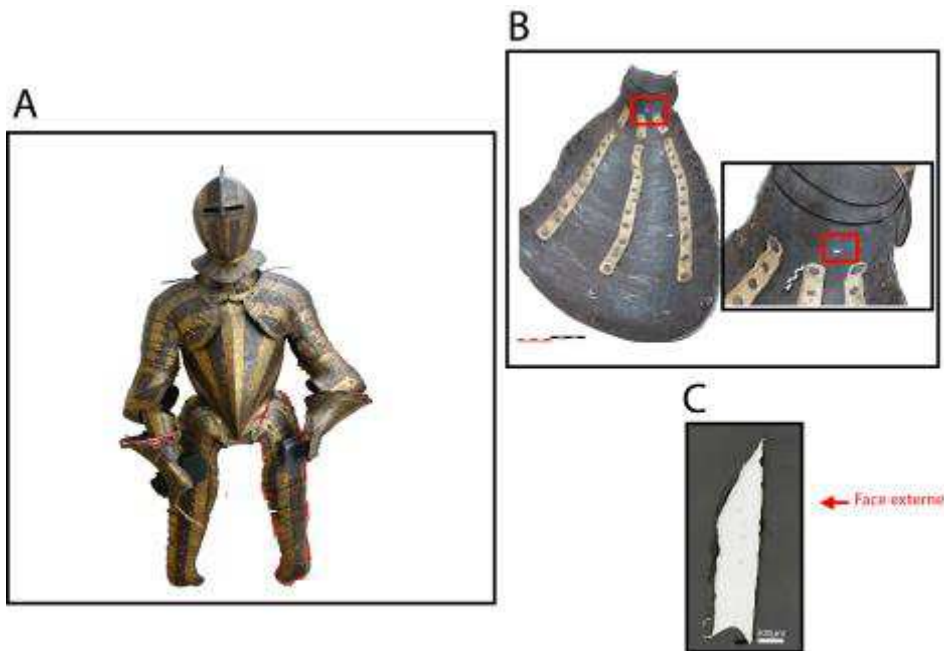
Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon 7_tassette

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : Montmorency
Numéro de l'élément d'armure : Mont_5_tassette
Lieu de conservation : Musée des Beaux-Arts de Draguignan (Draguignan)
Lieu de découverte :
Description : voir échantillon 1_casque
Datation : 1560-1570
Lieu de fabrication supposé :
 Région : France
 Ville : Inconnue
Élément de l'armure étudié : Tassette
Armurier ou atelier associé :
Présence de marque(s) : Non
Détails de la (ou des) marque(s) :
Référence bibliographique : (J. P. Reverseau, 1993)

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé sur la lame précédant la genouillère.

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
Ind	Non résolue	Non	Non	Non	Oui

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
0,1	0,53	0,09	213 ($\sigma = 7$)	Non dosé	Non

Commentaires :

Cet échantillon est un acier moyennement carburé. Un léger gradient de teneur en carbone est visible. Il s'étend du centre aux extrémités de l'échantillon. Des structures de Widmanstätten témoignent d'une surchauffe suivie d'un refroidissement relativement rapide du métal.

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

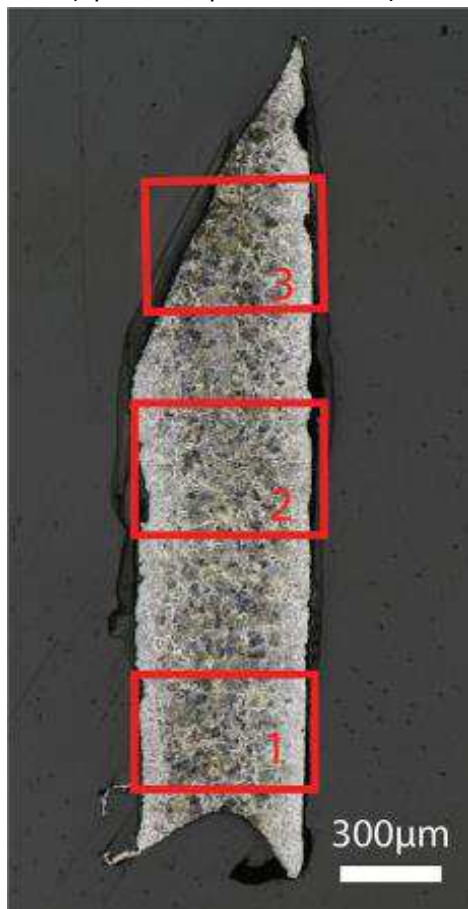
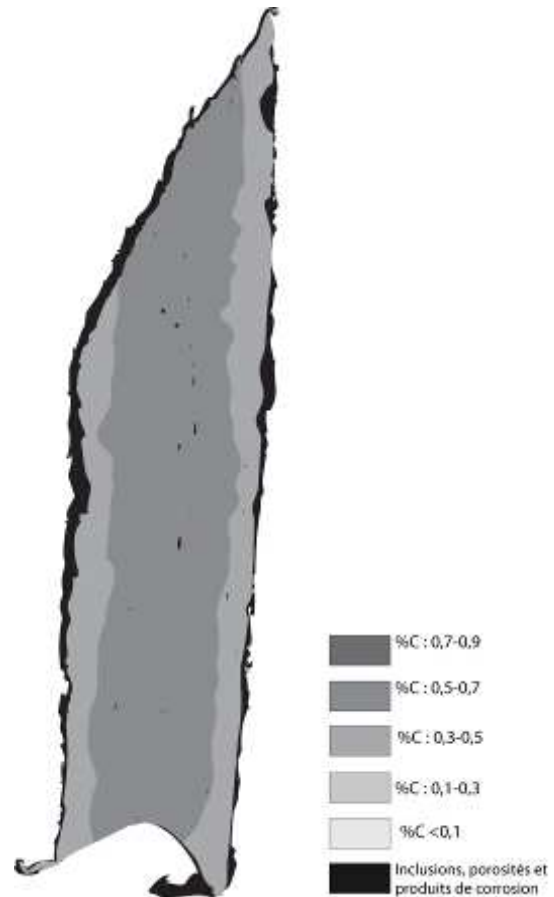
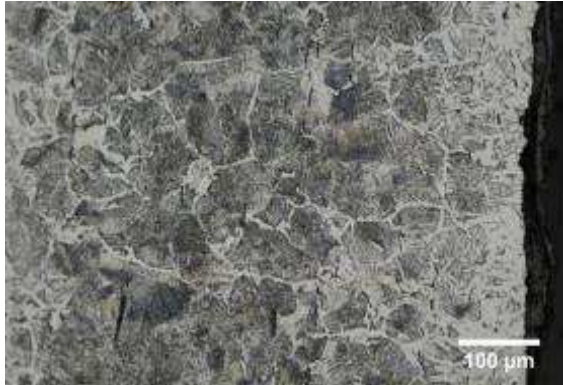


Schéma correspondant



Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



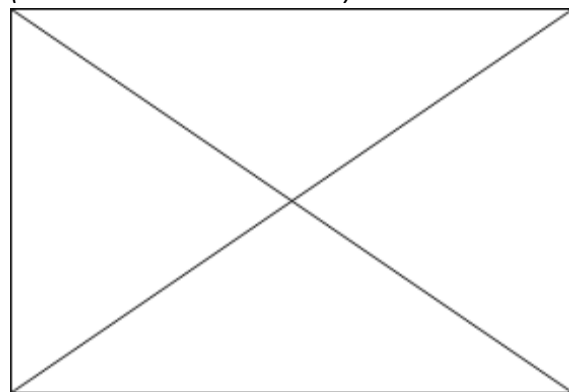
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
6	3

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Direct	<0,01
Abaque	Direct	
PROCEDE	Direct	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon 8_dossiere

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : Montmorency

Numéro de l'élément d'armure : Mont_8_dossiere

Lieu de conservation : Musée des Beaux-Arts de Draguignan (Draguignan)

Lieu de découverte :

Description : voir échantillon 1_casque

Datation : 1560-1570

Lieu de fabrication supposé :

Région : France

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Dossière

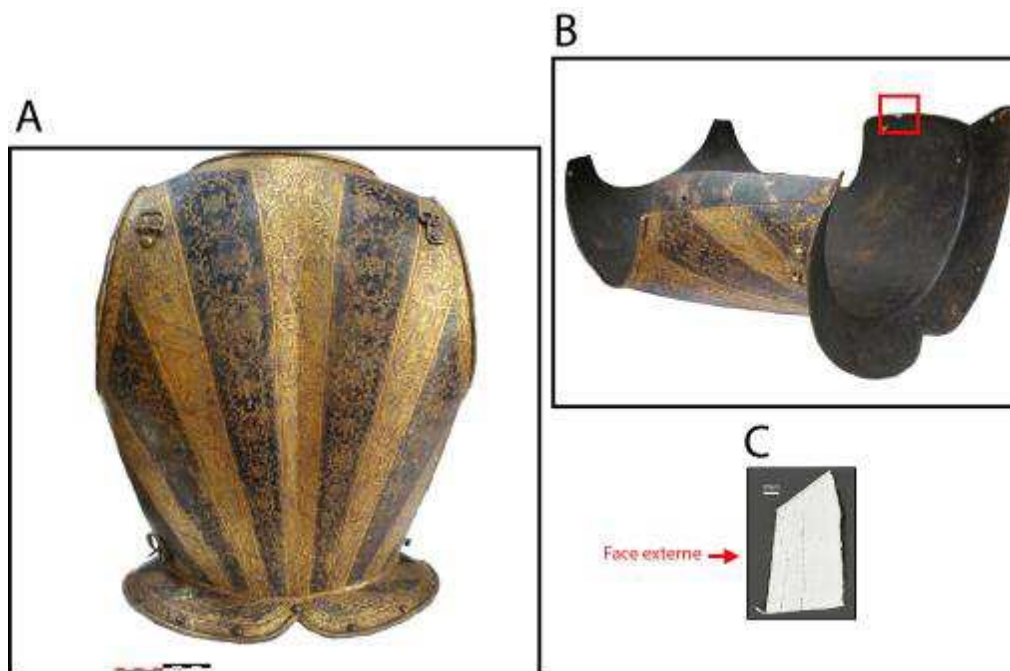
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique : (J. P. Reverseau, 1993)

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé sur la dossière à son extrémité gauche.

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[50-200]	Globulaire	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
0,6	0,14	0,07	119 ($\sigma=15$)	Non dosé	Oui

Commentaires :

Cet échantillon est faiblement carburé. Il peut être décomposé en deux bandes se différenciant par leur taux de carbone ainsi que leur taille de grain. En effet la partie la moins carburée possède des grains en moyenne de taille plus importante. L'attaque au réactif Oberhoffer a mis en évidence une bande claire entre ces deux zones qui pourrait témoigner d'une ligne de soudure.

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

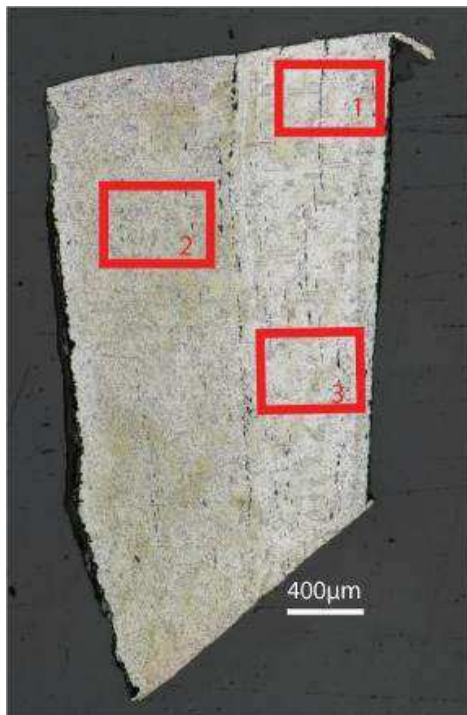
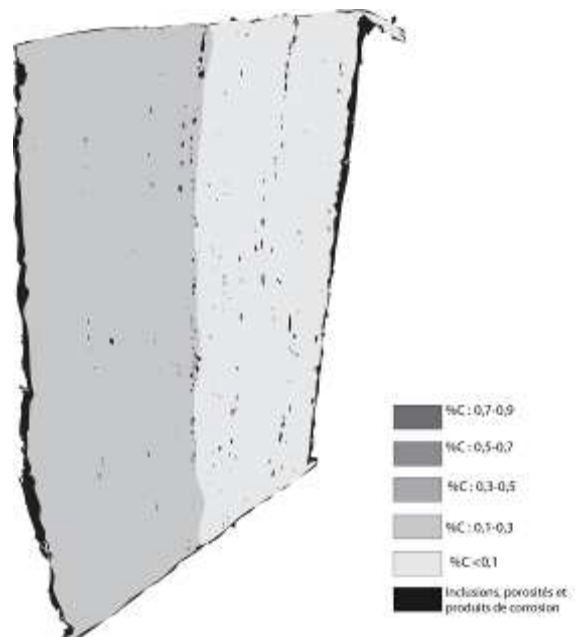


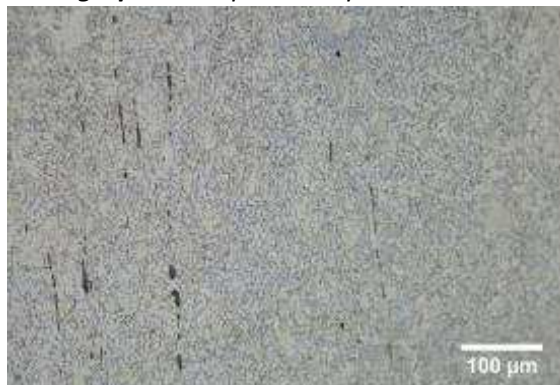
Schéma correspondant



Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 4 : Après attaque à l'Oberhoffer (détails de la microstructure)



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
6	3,4,5

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Direct	<0,01
Abaque	Direct	
PROCEDE	Direct	

- Provenance et compatibilité chimique

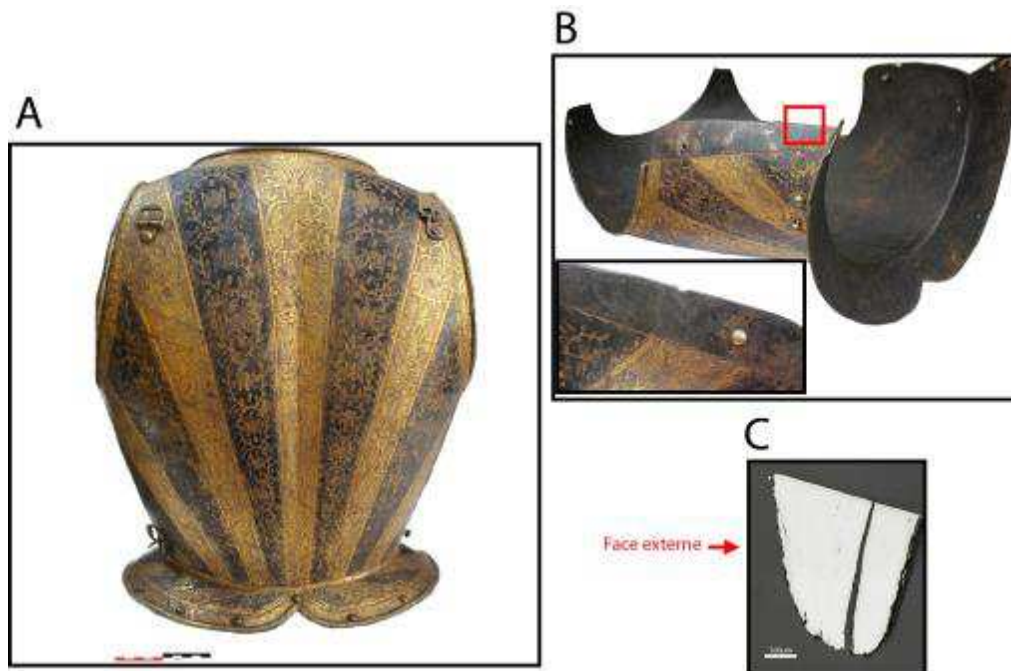
Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Dissier, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon 9_dossiere

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : Montmorency
Numéro de l'élément d'armure : Mont_8_dossiere
Lieu de conservation : Musée des Beaux-Arts de Draguignan (Draguignan)
Lieu de découverte :
Description : voir échantillon 1_casque
Datation : 1560-1570
Lieu de fabrication supposé :
 Région : France
 Ville : Inconnue
Élément de l'armure étudié : Dossière
Armurier ou atelier associé :
Présence de marque(s) : Non
Détails de la (ou des) marque(s) :
Référence bibliographique : (J. P. Reverseau, 1993)

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé sur la dossière à son extrémité droite.

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[<50]	Lamellaire	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
0,3	0,37	0,13	161 ($\sigma=33$)	Non dosé	Non

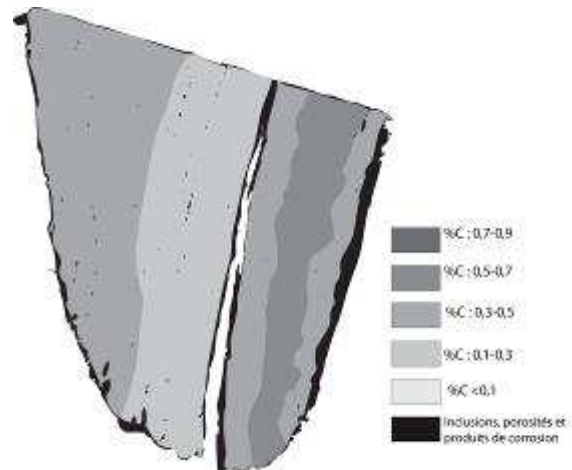
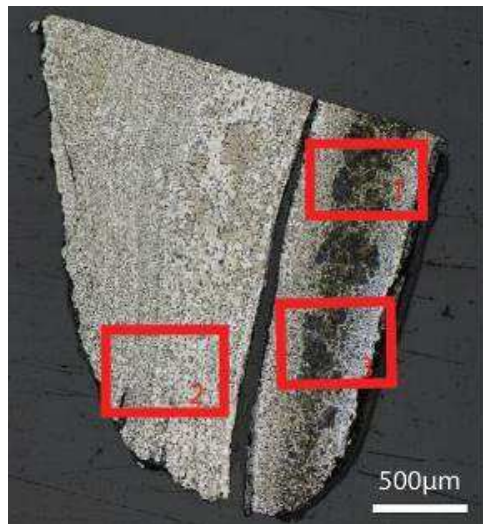
Commentaires :

Cet échantillon présente la structure d'un acier moyennement carburé. Il peut être décomposé en deux parties qui diffèrent par leur taux de carbone. Elles sont délimitées par une fissure qui témoigne sans doute d'un compactage insuffisant de la tôle.

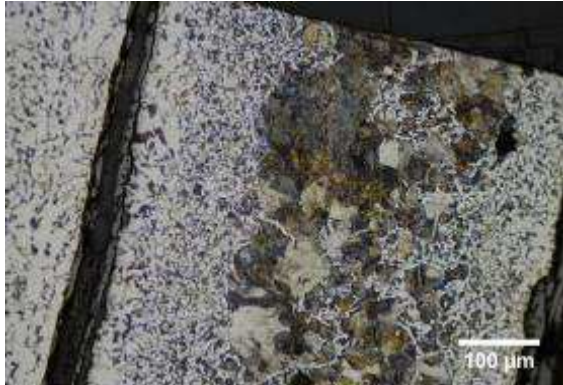
Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

Schéma correspondant



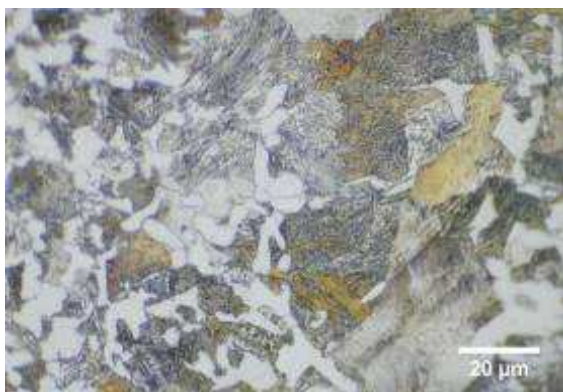
Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



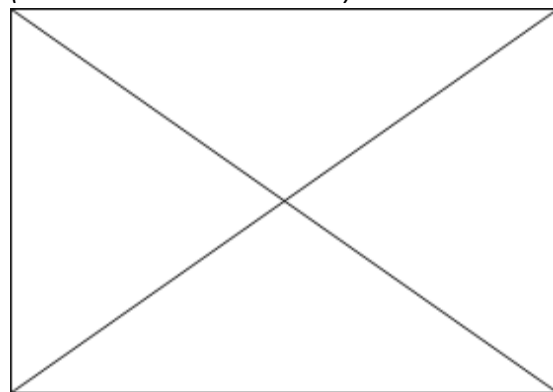
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
6	1,3,4

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Direct	<0,01
Abaque	Direct	
PROCEDE	Direct	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon 10_epauliere

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : Montmorency

Numéro de l'élément d'armure : Mont_10_epauliere

Lieu de conservation : Musée des Beaux-Arts de Draguignan (Draguignan)

Lieu de découverte :

Description : voir échantillon 1_casque

Datation : 1560-1570

Lieu de fabrication supposé :

Région : France

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Epaulière

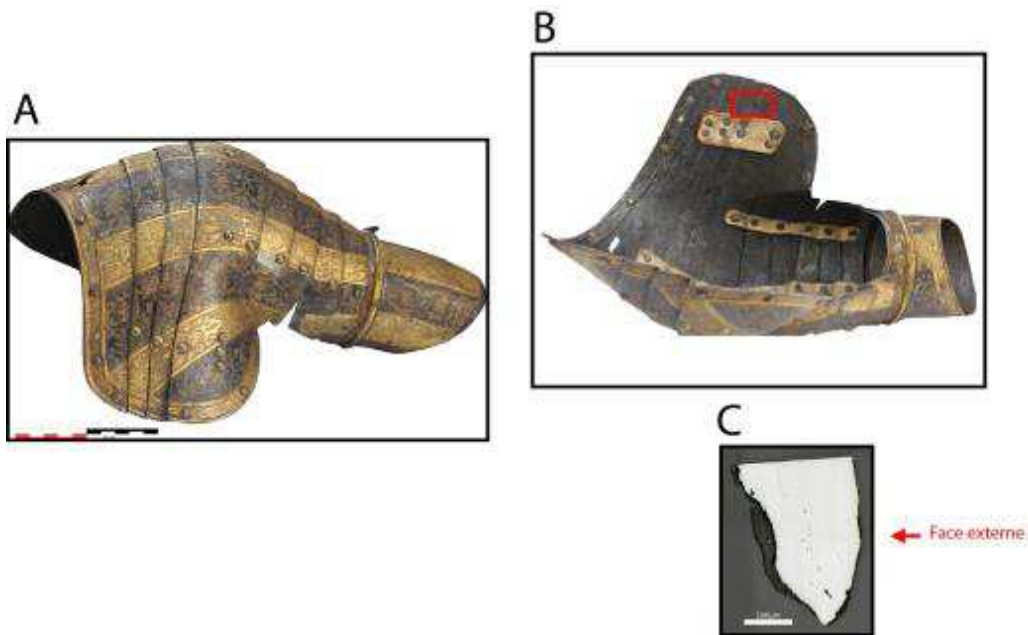
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique : (J. P. Reverseau, 1993)

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé sur la troisième lame de l'épaulière gauche.

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
Ind	Non résolue	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
0,6	0,60	0,00	195 ($\sigma=18$)	Non dosé	Non

Commentaires :

Cet échantillon est un acier moyennement carburé homogène en teneur en carbone.

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

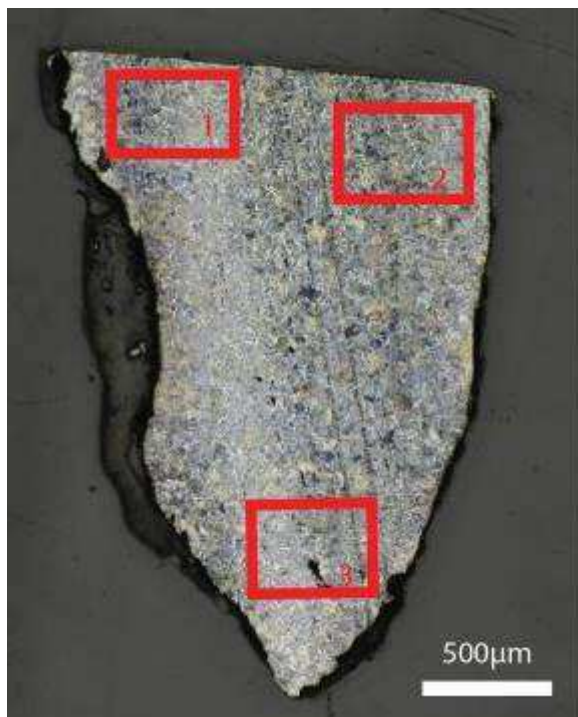
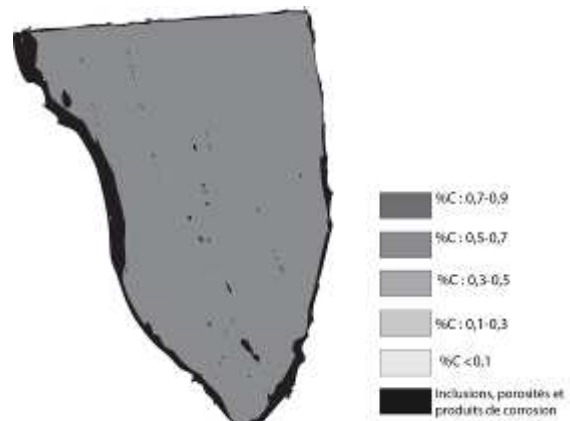
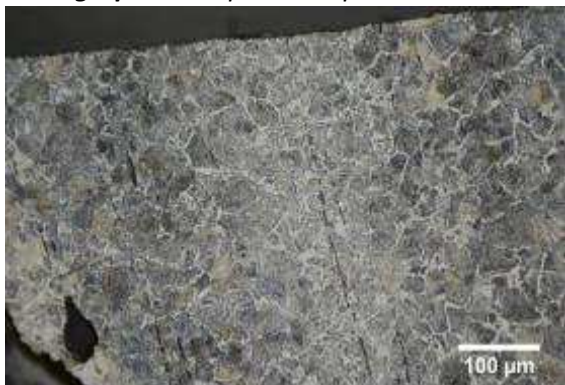


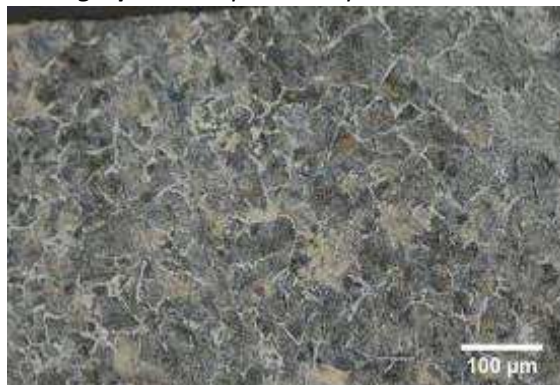
Schéma correspondant



Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



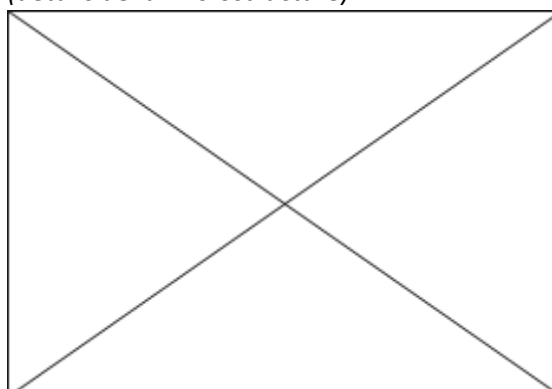
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
4	1,2

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Direct	<0,01
Abaque	Direct	
PROCEDE	Direct	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon 11_epauliere

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : Montmorency

Numéro de l'élément d'armure : Mont_11_epauliere

Lieu de conservation : Musée des Beaux-Arts de Draguignan (Draguignan)

Lieu de découverte :

Description : voir échantillon 1_casque

Datation : 1560-1570

Lieu de fabrication supposé :

Région : France

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Arrière bras

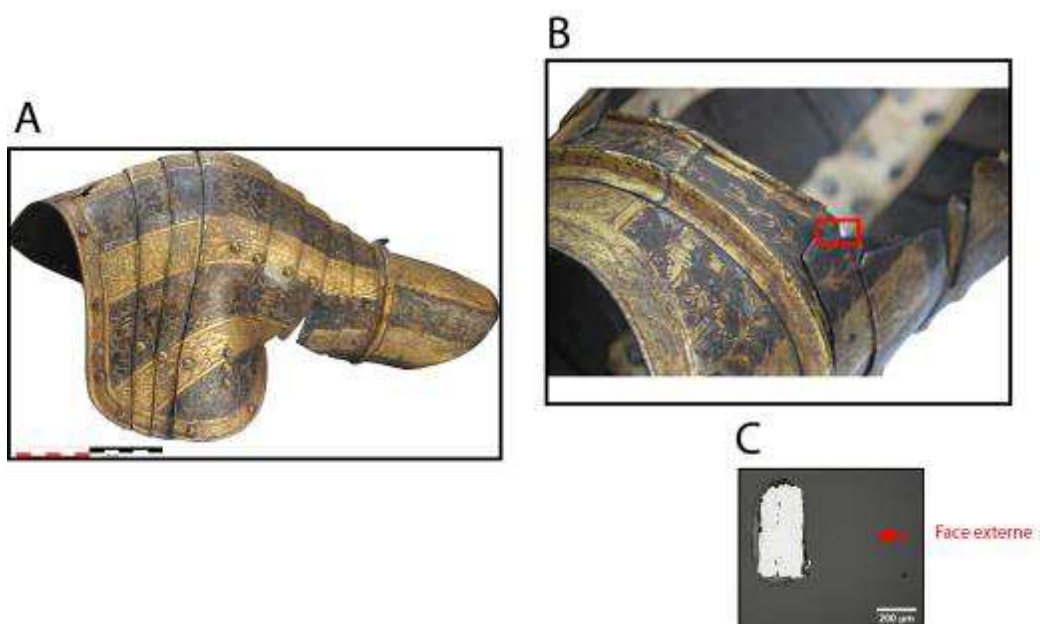
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique : (J. P. Reverseau, 1993)

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé sur la partie coulissante de l'arrière bras. La difficulté d'accès de cette zone n'a permis de prélever qu'un échantillon de taille très réduite.

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[<50]	Globulaire	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
1,2	0,20	0,00	230 ($\sigma=17$)	Non dosé	Non

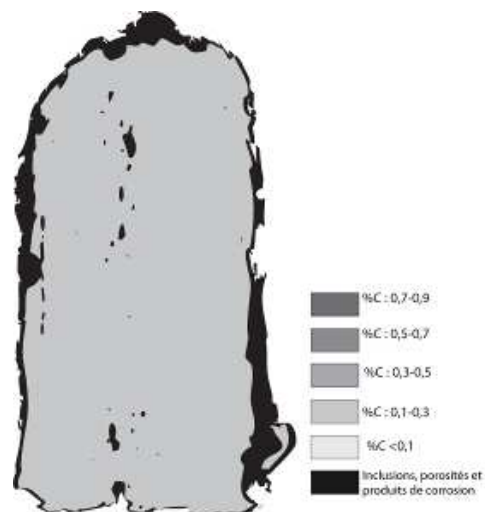
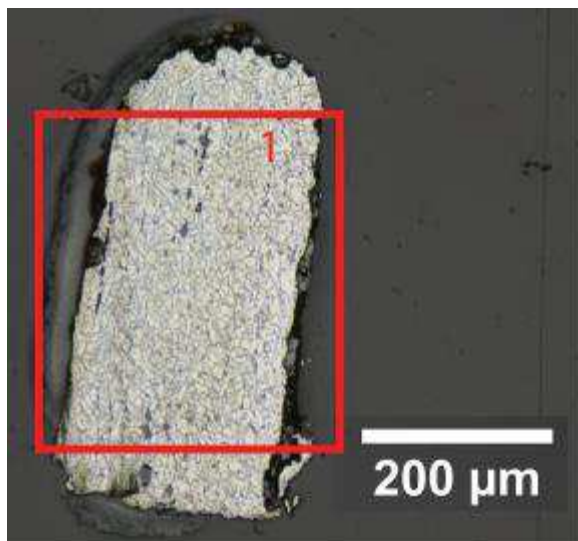
Commentaires :

Cet échantillon est un acier faiblement carburé homogène. La perlite, de forme globulaire, témoigne qu'un recuit du métal a été opéré.

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

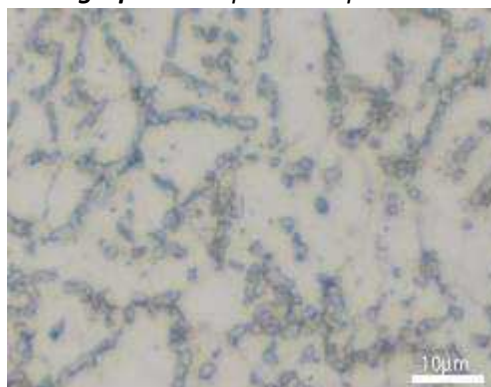
Schéma correspondant



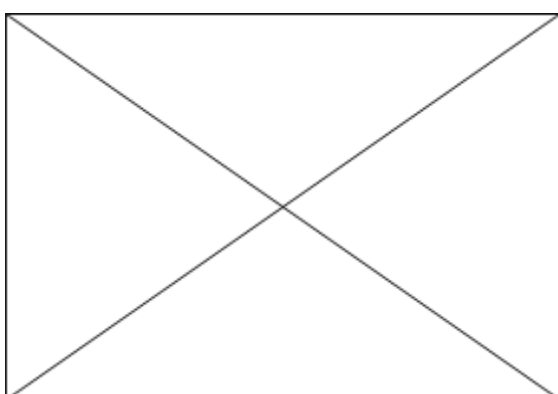
Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



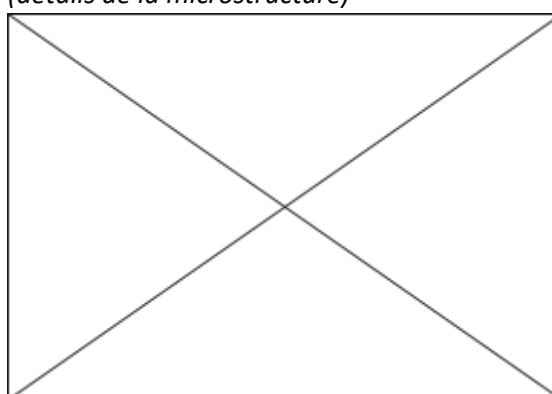
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
2	2

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Direct	<0,01
Abaque	Direct	
PROCEDE	Direct	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Dissier, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon 12_cubitiere

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : Montmorency

Numéro de l'élément d'armure : Mont_11_cubitiere

Lieu de conservation : Musée des Beaux-Arts de Draguignan (Draguignan)

Lieu de découverte :

Description : voir échantillon 1_casque

Datation : 1560-1570

Lieu de fabrication supposé :

Région : France

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Canon d'avant bras

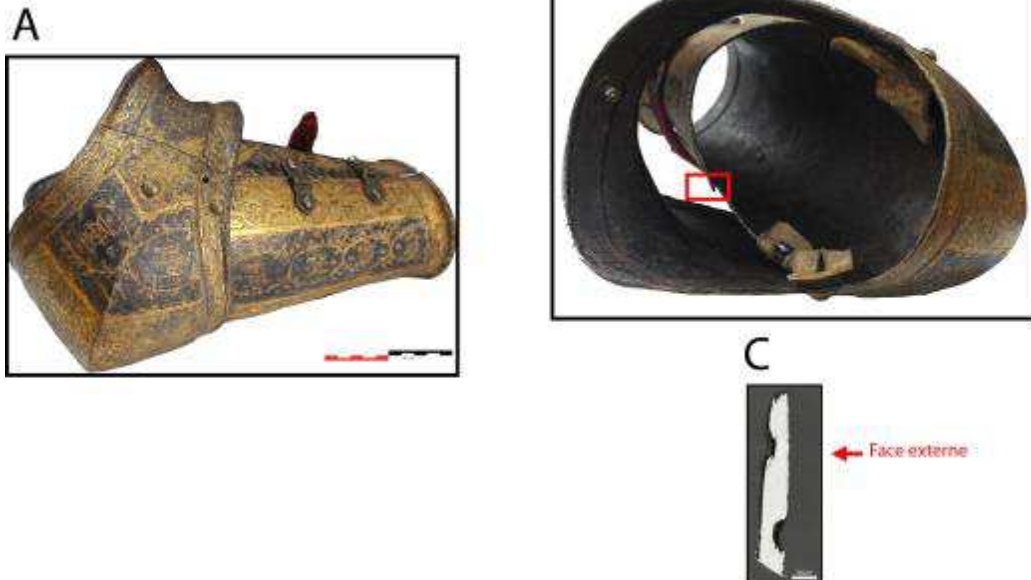
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique : (J. P. Reverseau, 1993)

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé au niveau de la cubitière sur le canon d'avant bras.

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[<50]	Non résolue	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
0,3	0,20	0,00	208 ($\sigma=12$)	Non dosé	Non

Commentaires :

Cet échantillon présente la structure d'un acier faiblement carburé homogène. Les grains sont déformés selon la direction de martelage ce qui prouve que le métal n'a pas subi de recuit à l'issue de la réalisation de l'élément d'armure. La dorure externe est également visible par endroit (micrographie 1).

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

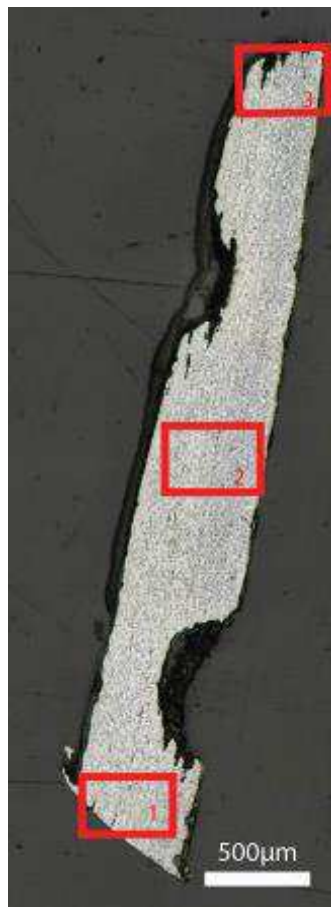
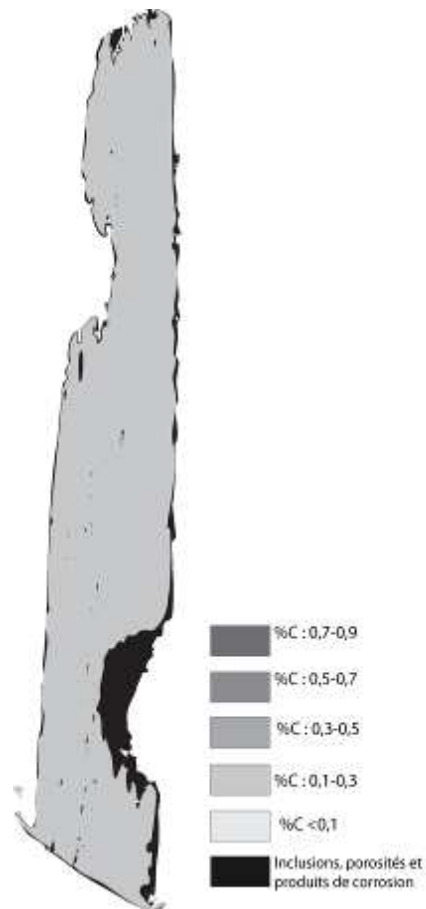
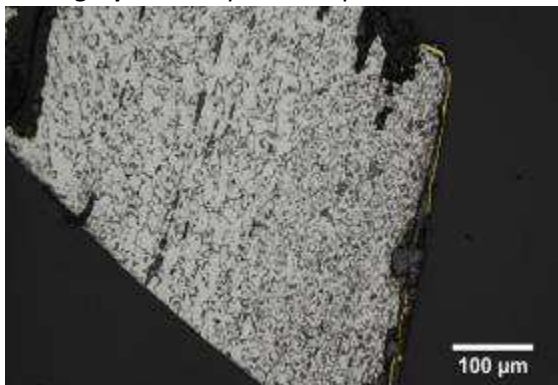


Schéma correspondant



Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



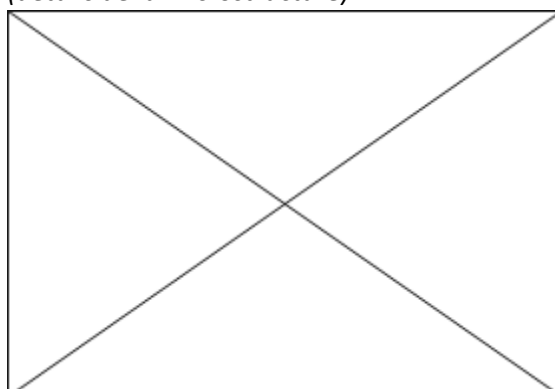
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
3	1

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Direct	<0,01
Abaque	Direct	
PROCEDE	Direct	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon 13_tassette

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : Montmorency

Numéro de l'élément d'armure : Mont_13_tassette

Lieu de conservation : Musée des Beaux-Arts de Draguignan (Draguignan)

Lieu de découverte :

Description : voir échantillon 1_casque

Datation : 1560-1570

Lieu de fabrication supposé :

Région : France

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Tassette

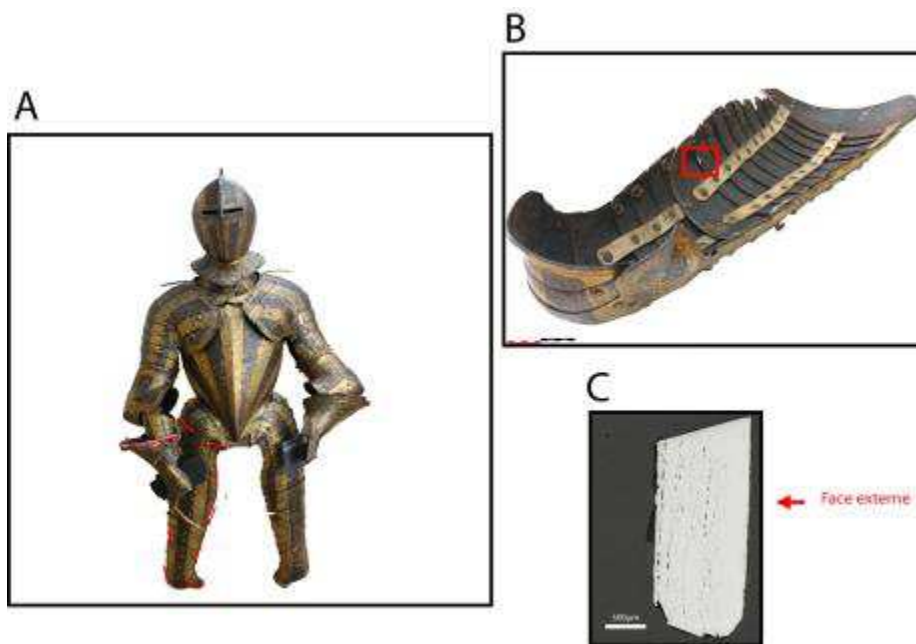
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique : (J. P. Reverseau, 1993)

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé sur la 10ème tassette de la jambe droite

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[<50]	Lamellaire	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
1,2	0,50	0,10	246 ($\sigma=12$)	Non dosé	Non

Commentaires :

Cet échantillon est un acier moyennement carburé. Un léger gradient de teneur en carbone est visible. Il s'étend du centre aux extrémités de l'échantillon. De plus les grains sont de faible taille (<50 μm) et par endroit déformés selon la direction de martelage.

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

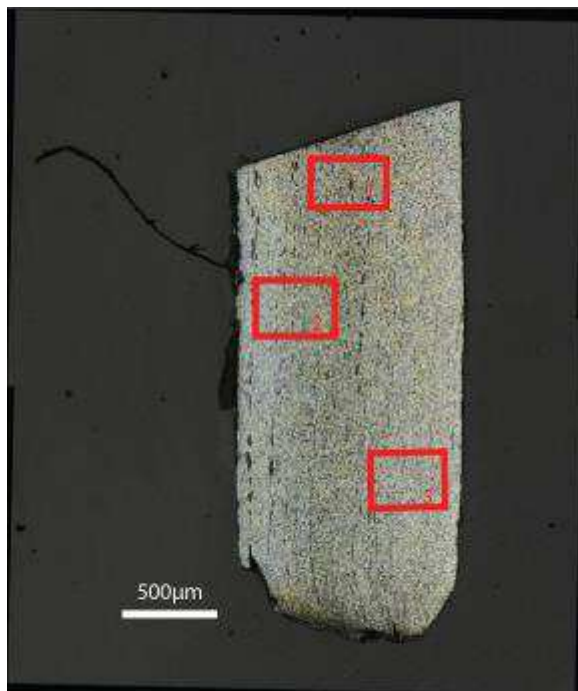
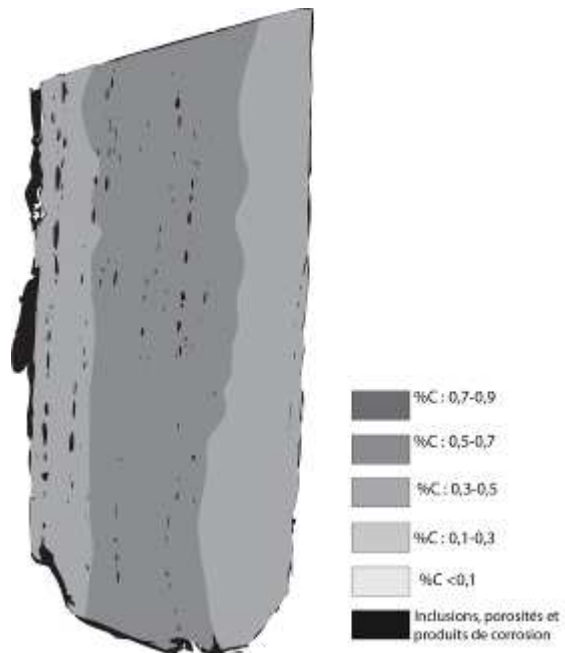


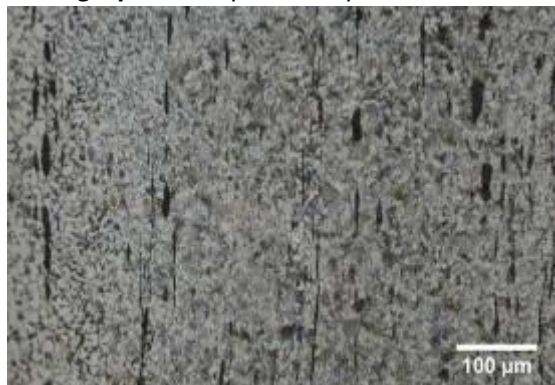
Schéma correspondant



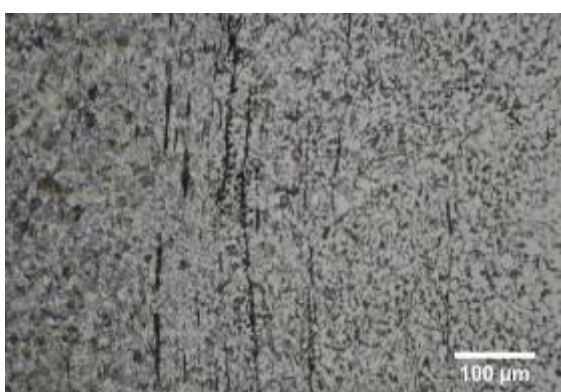
Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



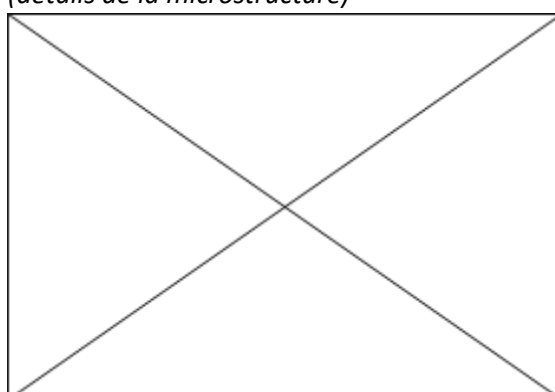
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
4	1,2

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Direct	$p(\text{classe1})=0,02$ $p(\text{classe2})<0,01$
Abaque	Direct	
PROCEDE	Direct	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon 14_tassette

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : Montmorency

Numéro de l'élément d'armure : Mont_13_tassette

Lieu de conservation : Musée des Beaux-Arts de Draguignan (Draguignan)

Lieu de découverte :

Description : voir échantillon 1_casque

Datation : 1560-1570

Lieu de fabrication supposé :

Région : France

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : genouillère

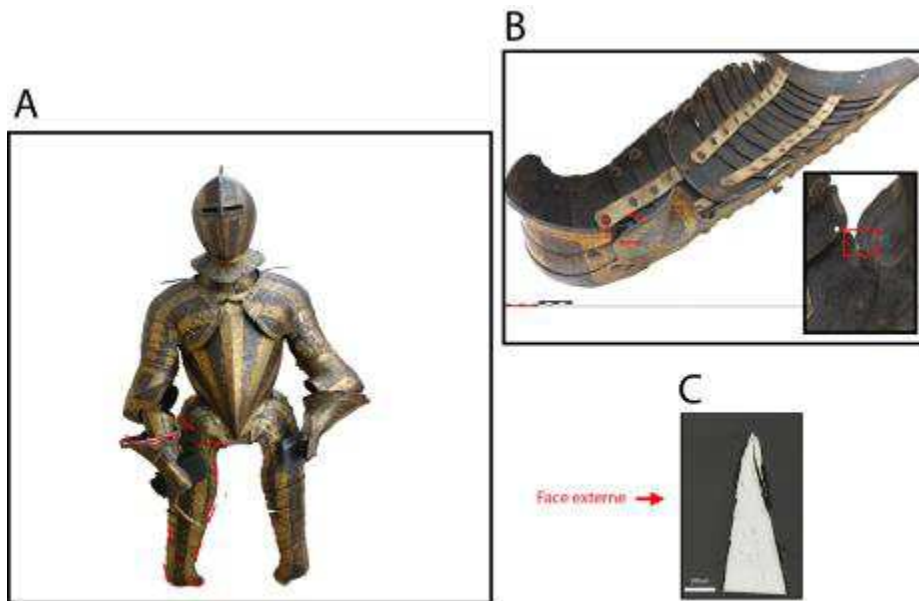
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique : (J. P. Reverseau, 1993)

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé sur la genouillère de la jambe droite

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[<50]	Lamellaire	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
0,6	0,45	0,08	243 ($\sigma=30$)	Non dosé	Non

Commentaires :

Cet échantillon présente la structure d'un acier moyennement carburé. Un léger gradient de teneur en carbone est visible. Il s'étend du centre aux extrémités de l'échantillon.

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

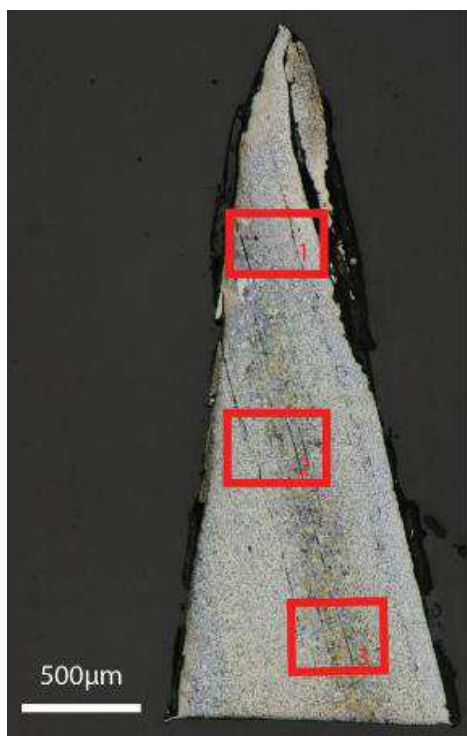
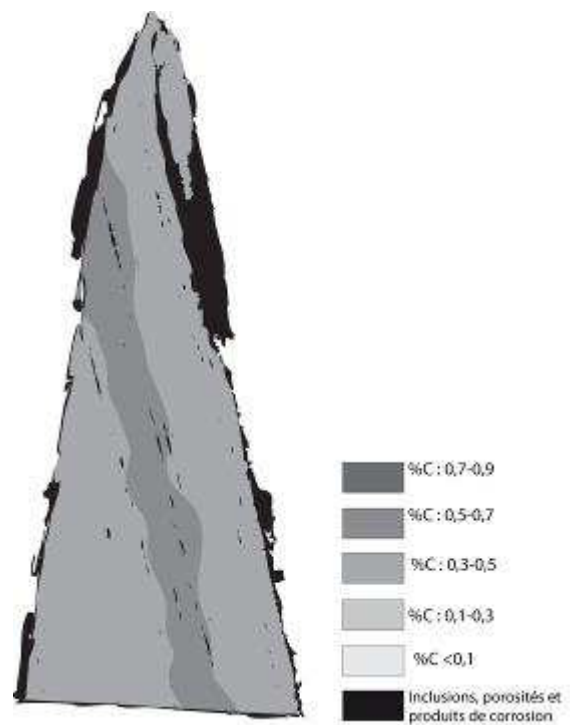


Schéma correspondant



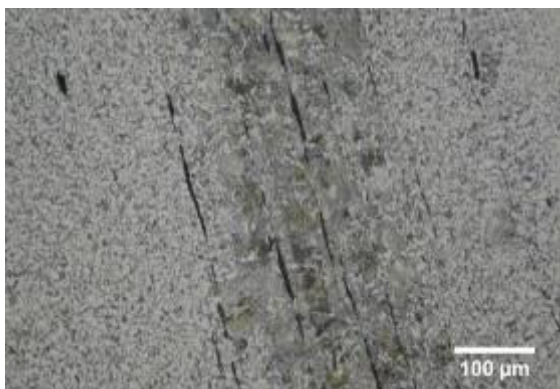
Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



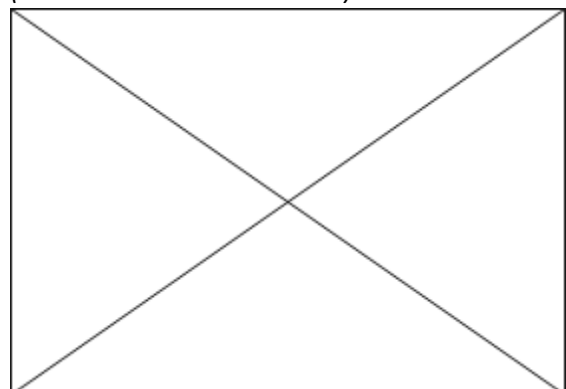
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
4	1,2

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Direct	<0,01
Abaque	Direct	
PROCEDE	Direct	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon 15_colletin

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : Montmorency

Numéro de l'élément d'armure : Mont_3_colletin

Lieu de conservation : Musée des Beaux-Arts de Draguignan (Draguignan)

Lieu de découverte :

Description : voir échantillon 1_casque

Datation : 1560-1570

Lieu de fabrication supposé :

Région : France

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Colletin

Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique : (J. P. Reverseau, 1993)

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Le prélèvement a été opéré sur la troisième lame du colletin.

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[50-200]	Globulaire	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
0,4	0,54	0,09	155 ($\sigma=20$)	Non dosé	Non

Commentaires :

Cet échantillon présente la structure d'un acier moyennement carburé légèrement hétérogène en teneur en carbone. La perlite, de forme globulaire, témoigne qu'un recuit du métal a été opéré. L'attaque au réactif Oberhoffer a mis en évidence une bande claire entre deux zones de teneur en carbone différentes qui pourrait témoigner d'une ligne de soudure ou d'un replis du métal lors de la mise en forme de la tôle.

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon

(après attaque au Nital 3%)

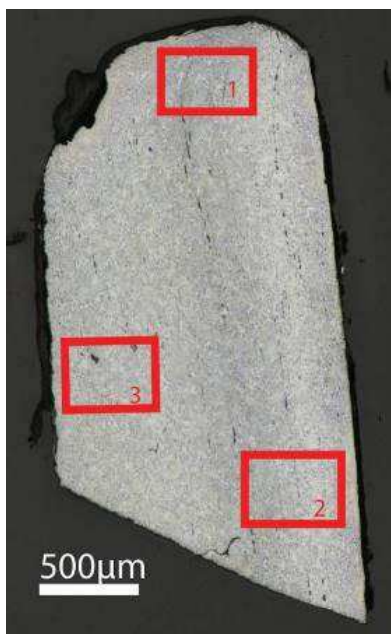
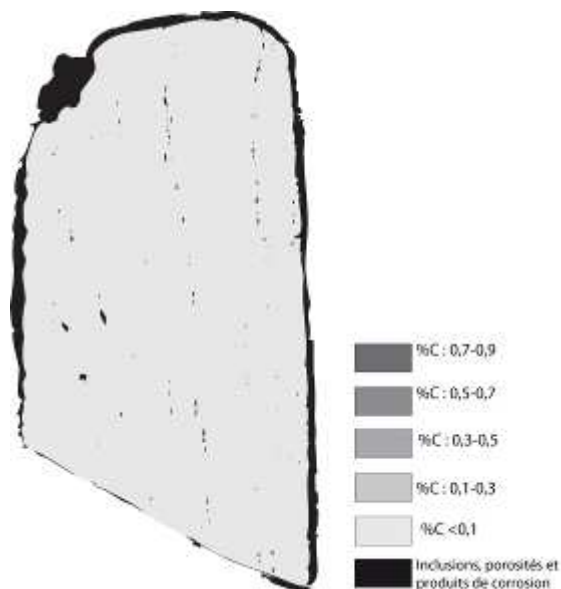


Schéma correspondant



Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



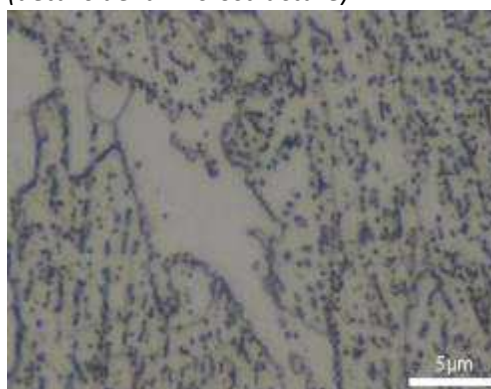
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
2	1

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Direct	<0,01
Abaque	Direct	
PROCEDE	Direct	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon G93-2-ou3-ech1

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : G93-2-ou3

Numéro de l'élément d'armure : G93-2-ou3

Lieu de conservation : Musée de l'Armée (Paris)

Lieu de découverte :

Description : Brassard repoussé et doré faisant partie d'une paire. Cette dernière est supposée de fabrication française vers 1580-1590 (Notice du musée de l'Armée)

Datation : 1580-1590 (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : France

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Brassard

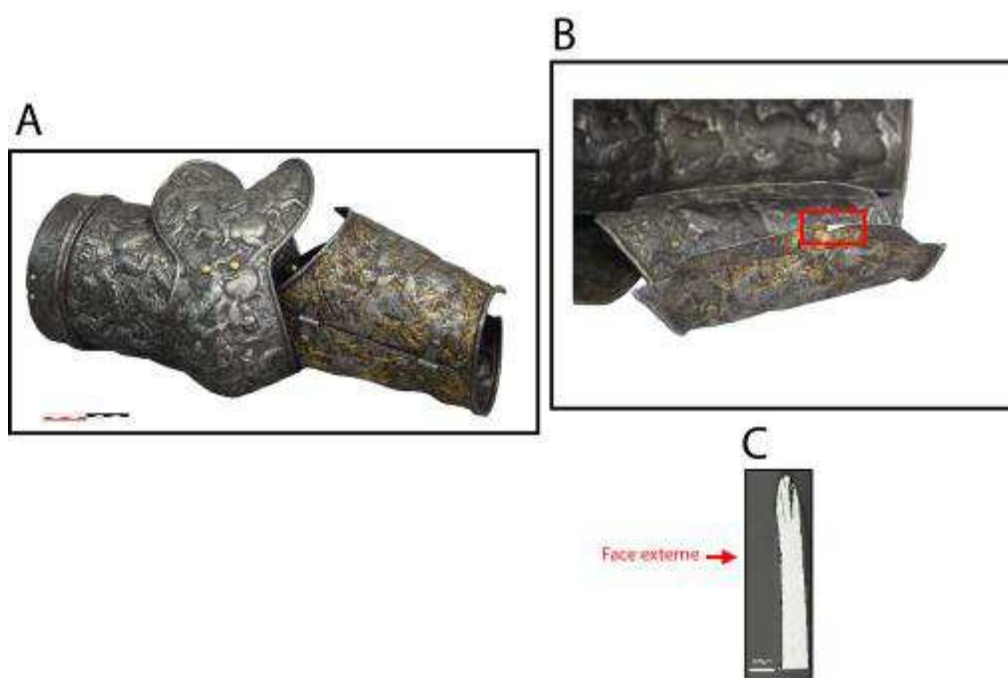
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique :

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Le prélèvement a été réalisé sur un bord extérieur de la pièce au niveau du mécanisme de fermeture

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[50-200]	Non résolue	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
1,7	0,06	0,00	129 ($\sigma=15$)	Non dosé	Non

Commentaires :

Cet échantillon présente une structure entièrement ferritique avec une taille de grain variable.

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

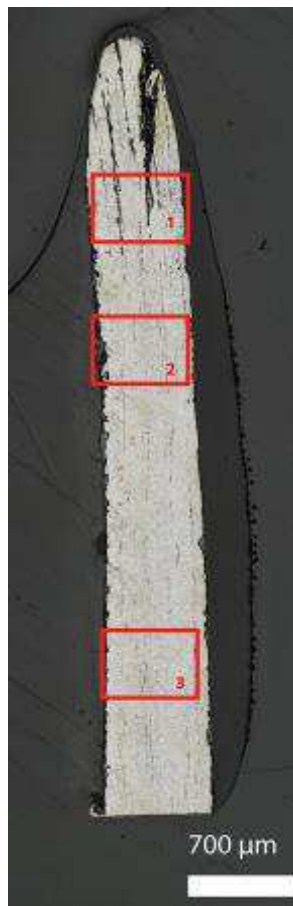
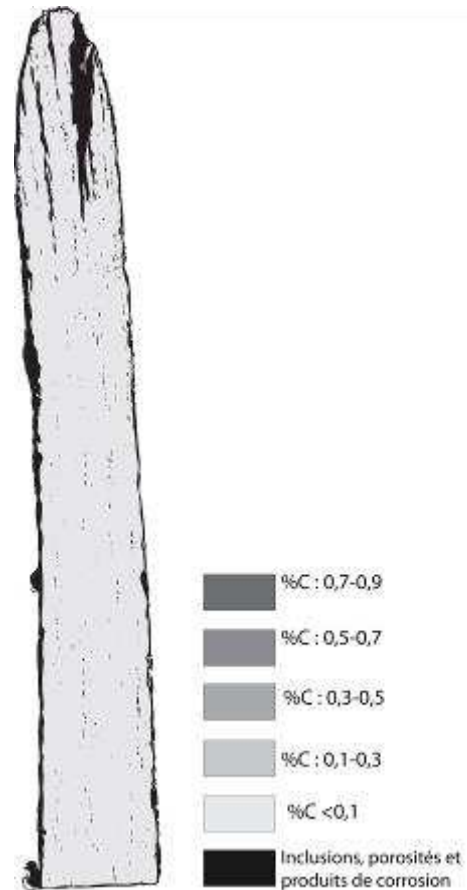


Schéma correspondant



Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



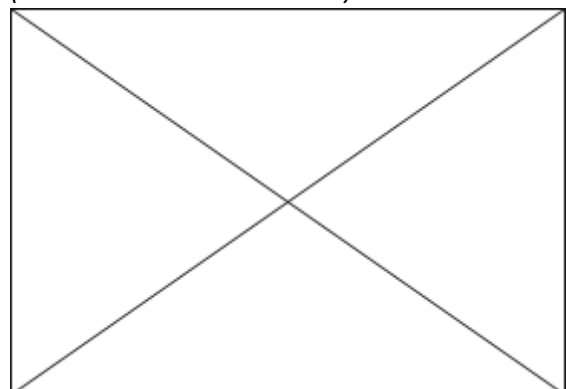
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
5	1,2

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Indirect	>0,99
Abaque	Indirect	
PROCEDE	Indirect	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon G93-2-ou3_ech2

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : G93-2-ou3

Numéro de l'élément d'armure : G93-2-ou3

Lieu de conservation : Musée de l'Armée (Paris)

Lieu de découverte :

Description : Brassard repoussé et doré faisant partie d'une paire. Cette dernière est supposée de fabrication française vers 1580-1590 (notice du musée de l'Armée).

Datation : 1580-1590 (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : France

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Brassard

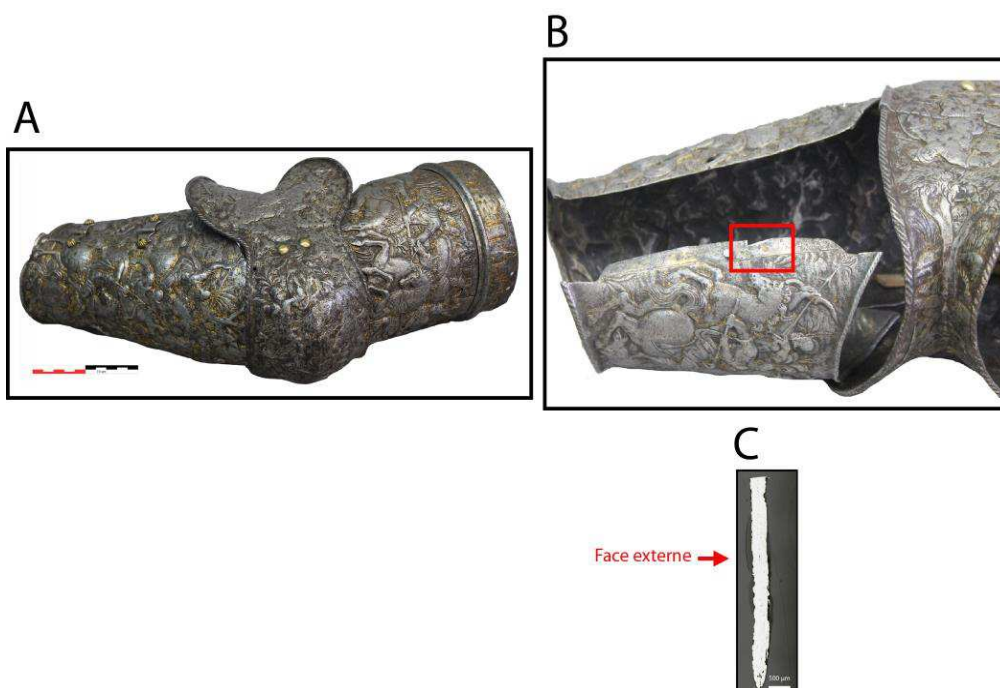
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique :

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Le prélèvement a été réalisé sur un bord extérieur de la pièce au niveau du mécanisme de fermeture

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[50-200]	Non résolue	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
1,5	0,15	0,07	178 ($\sigma=21$)	Non dosé	Oui

Commentaires :

Cet échantillon présente une structure qui peut être décomposée en deux bandes distinctes. La première, plus carburée (%C=0,2), présente des grains de faible taille ($<50\mu\text{m}$), tandis que dans la seconde ils sont de plus grande taille ($>50\mu\text{m}$).

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

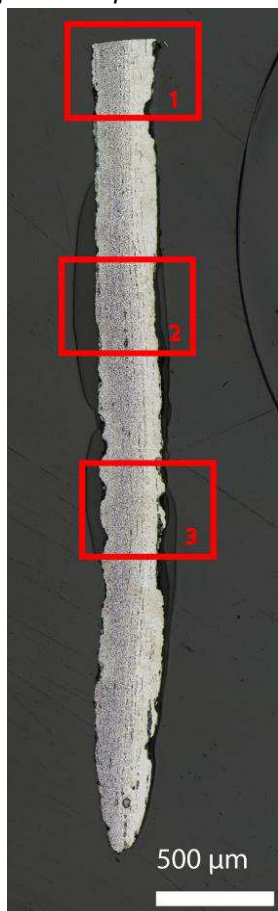
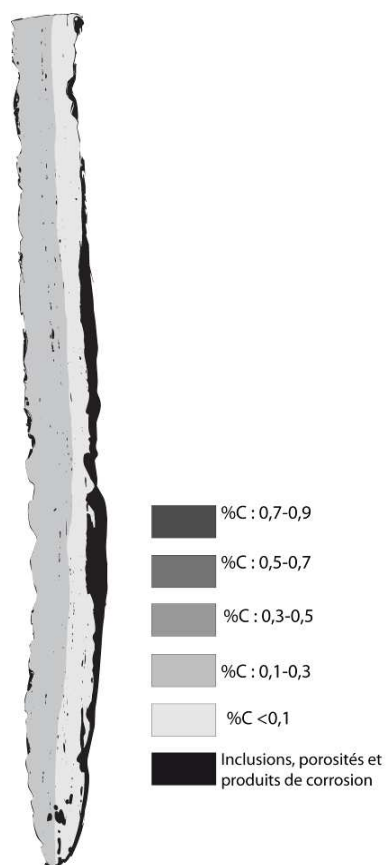
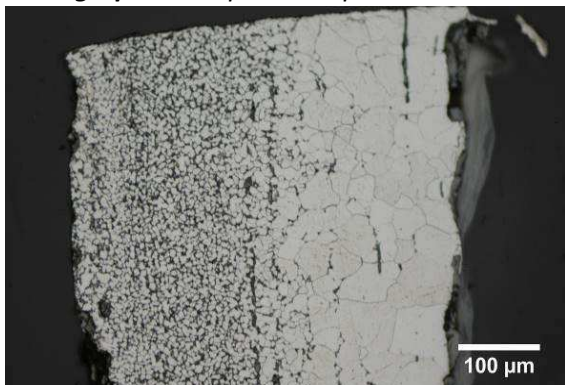


Schéma correspondant



Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



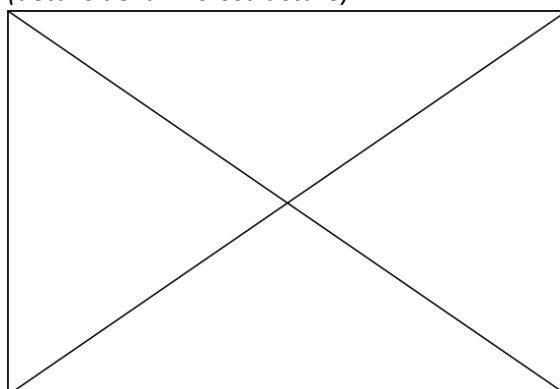
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
4	1,2,4

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Indirect	$p(\text{classe1})=0,85$ $p(\text{classe2})>0,99$ $p(\text{classe4})>0,99$
Abaque	Indéterminé	
PROCEDE	Indirect	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon G27618_ech1

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : G27618

Numéro de l'élément d'armure : G27618

Lieu de conservation : Musée de l'Armée (Paris)

Lieu de découverte :

Description : Epaulière gauche supposée avoir été fabriquée à Nuremberg vers 1560 (Notice du musée de l'Armée)

Datation : vers 1560 (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Allemagne

Ville : Nuremberg

Élément de l'armure étudié : Epaulière

Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique :

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé sur la première lame dédiée à la protection du bras.

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[50-200]	Lamellaire	Non	Non	Non	Oui

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
1,2	0,21	0,16	153 ($\sigma=19$)	Non dosé	Oui

Commentaires :

Cet échantillon présente la structure d'un acier hétérogène moyennement carburé porteur d'un léger gradient de teneur en carbone.

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

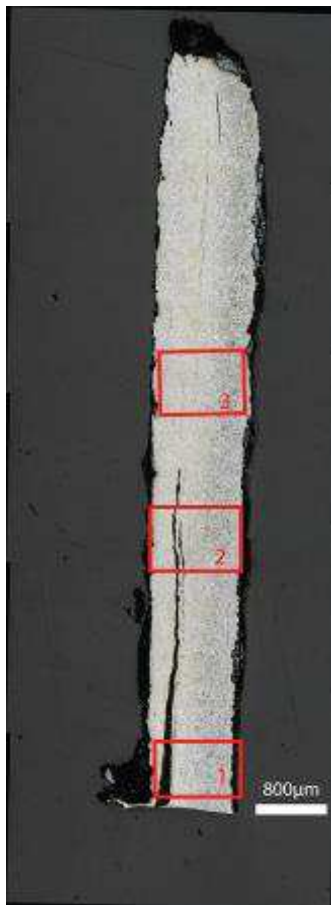
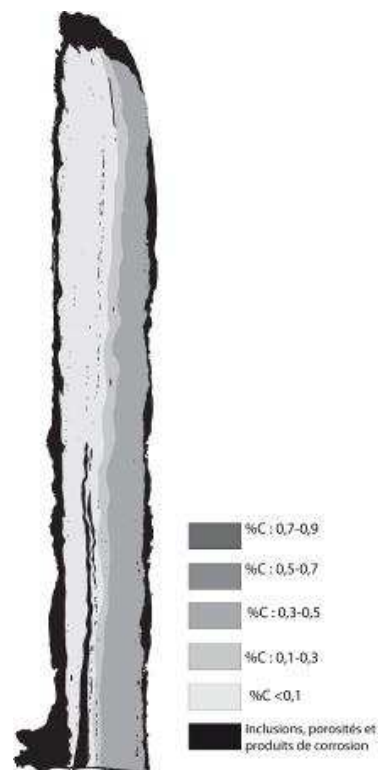


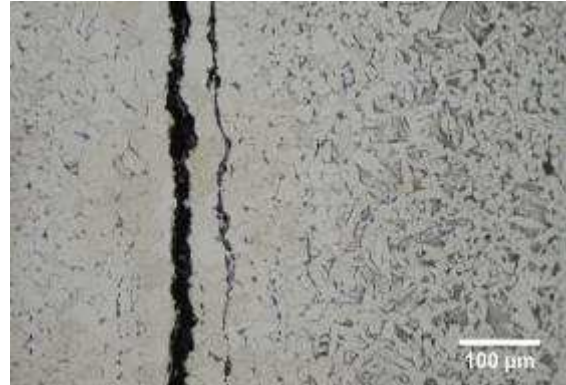
Schéma correspondant



Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



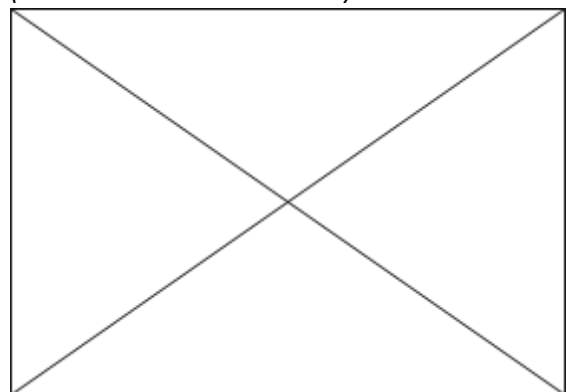
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
5	1

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Direct	<0,01
Abaque	Direct	
PROCEDE	Direct	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Oui	Oui	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon G27618_ech2

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : G27618

Numéro de l'élément d'armure : G27618

Lieu de conservation : Musée de l'Armée (Paris)

Lieu de découverte :

Description : Epaulière gauche supposée avoir été fabriquée à Nuremberg vers 1560 (Notice du musée de l'Armée)

Datation : vers 1560 (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Allemagne

Ville : Nuremberg

Élément de l'armure étudié : Epaulière

Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique :

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé sur la deuxième lame protégeant l'épaule du combattant.

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (µm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
Ind	Lamellaire et globulaire	Non	Non	Non	Oui

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
0,7	0,53	0,09	158 ($\sigma = 21$)	Non dosé	Non

Commentaires :

Cet échantillon présente la structure d'un acier relativement homogène moyennement carburé. Il présente un léger gradient de teneur en carbone qui s'étend du centre à ses extrémités.

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

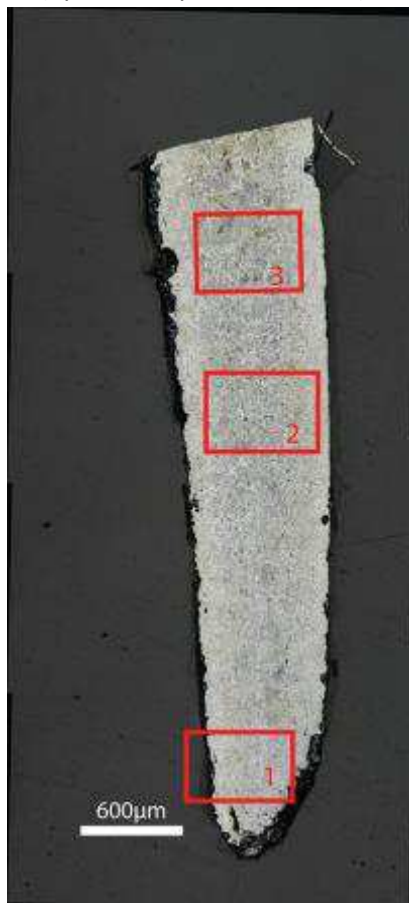
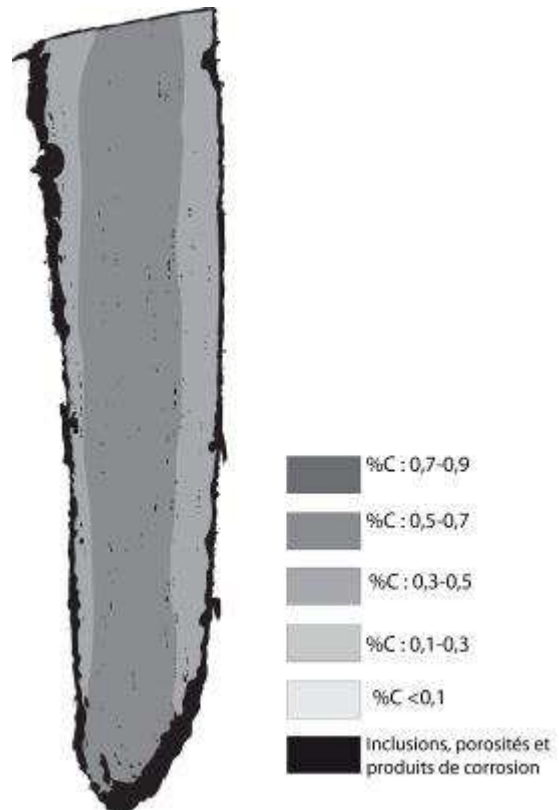


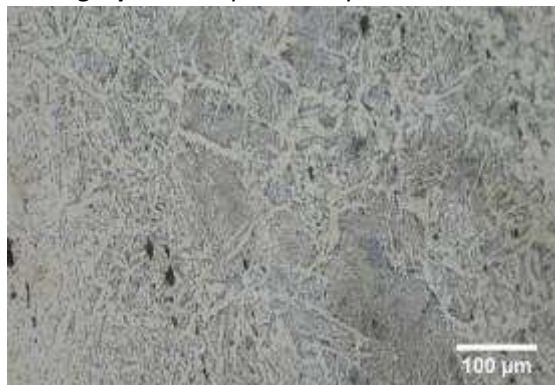
Schéma correspondant



Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



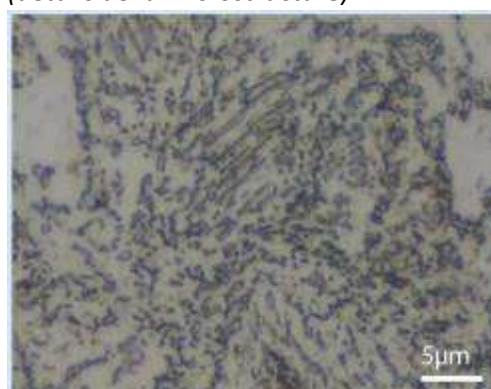
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3% (détails de la microstructure)



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
6	1

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Direct	<0,01
Abaque	Direct	
PROCEDE	Direct	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Dissert, 2014)
Non	Non	Oui	Oui	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon G42_ech1

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : G42

Numéro de l'élément d'armure : G42

Lieu de conservation : Musée de l'Armée (Paris)

Lieu de découverte :

Description : Bourguignotte supposée avoir été fabriquée en France vers 1560 (Notice du musée de l'Armée)

Datation : vers 1560 (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : France

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Bourguignotte

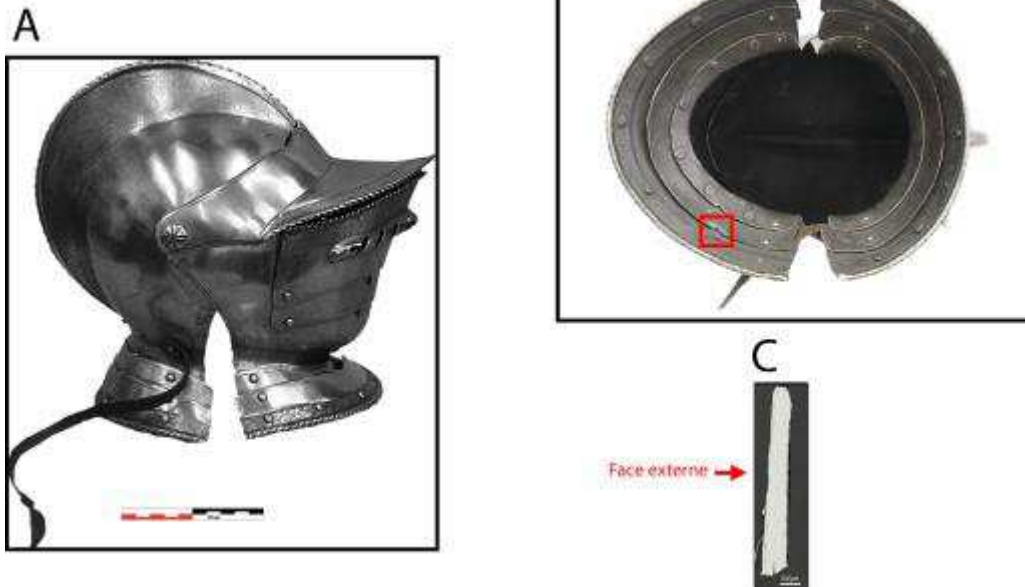
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique :

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé sur la seconde lame protégeant le cou

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[<50]	Non résolue	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
1,3	0,13	0,07	153 ($\sigma=19$)	Non dosé	Oui

Commentaires :

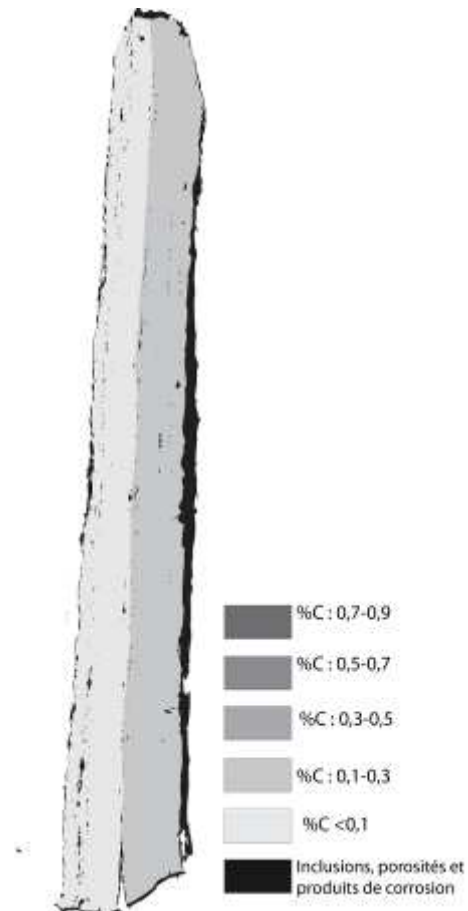
Il s'agit d'un acier faiblement carburé hétérogène qui peut être décomposé en deux bandes de teneur en carbone distinctes. Les grains de ferrite sont en moyenne de plus faible taille dans la partie la plus carburée.

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)



Schéma correspondant



Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



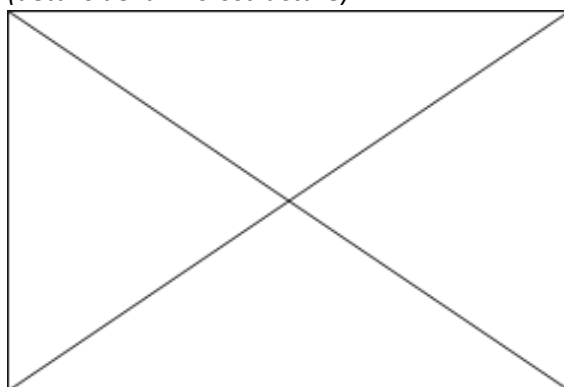
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
5	2,3

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Indéterminé	$p(\text{classe2})=0,94$ $p(\text{classe3})=0,69$
Abaque	Indéterminé	
PROCEDE	Indéterminé	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon G42_ech2

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : G42

Numéro de l'élément d'armure : G42

Lieu de conservation : Musée de l'Armée (Paris)

Lieu de découverte :

Description : Bourguignotte supposée avoir été fabriquée en France vers 1560 (notice du musée de l'Armée).

Datation : 1560 (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : France

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Bourguignotte

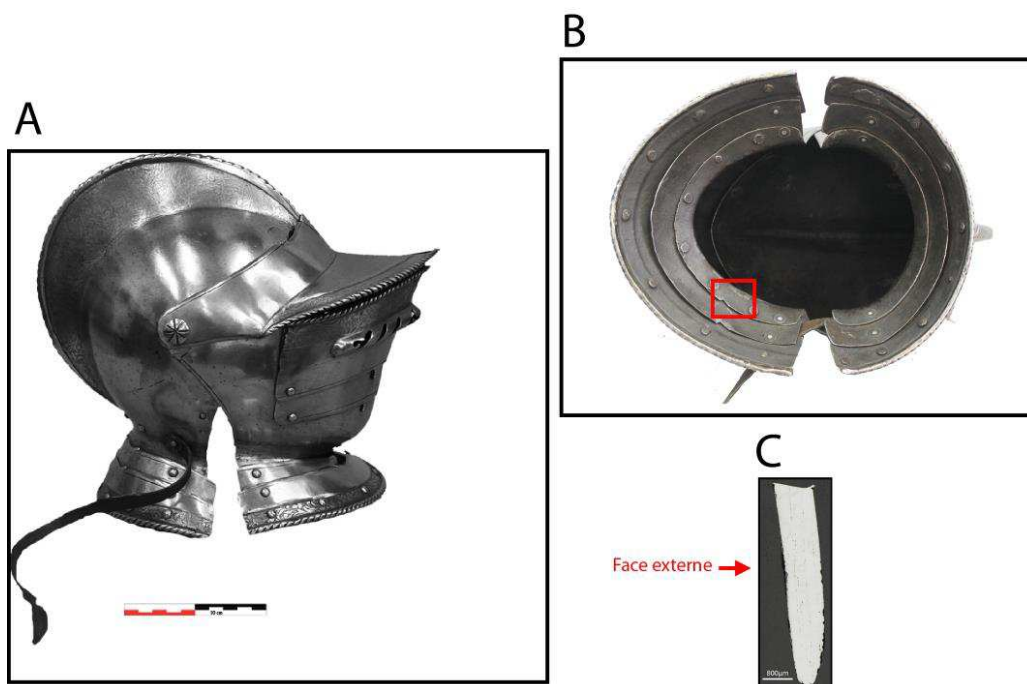
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique :

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé sur la première lame protégeant le cou

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[<50]	Non résolue	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
0,4	0,40	0,00	156 ($\sigma=13$)	Non dosé	Non

Commentaires :

Cet échantillon présente la structure d'un acier moyennement carburé homogène en teneur en carbone.

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

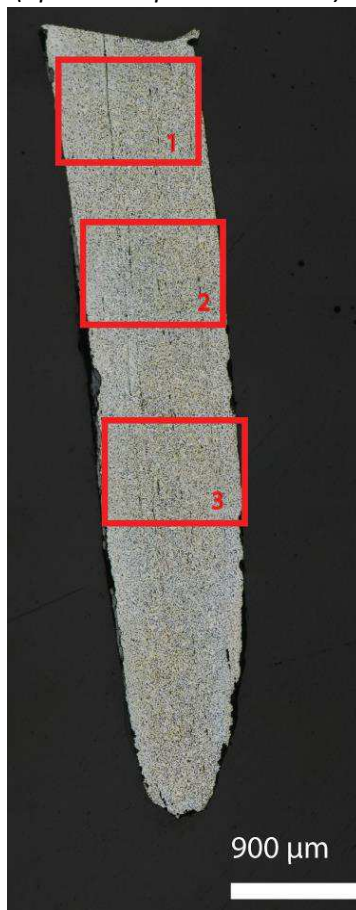
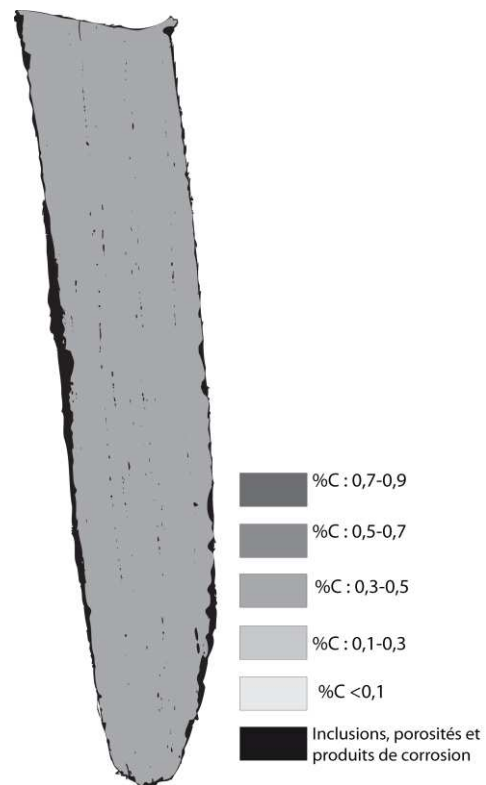


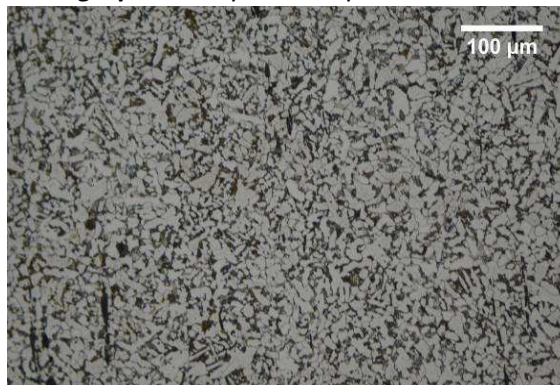
Schéma correspondant



Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



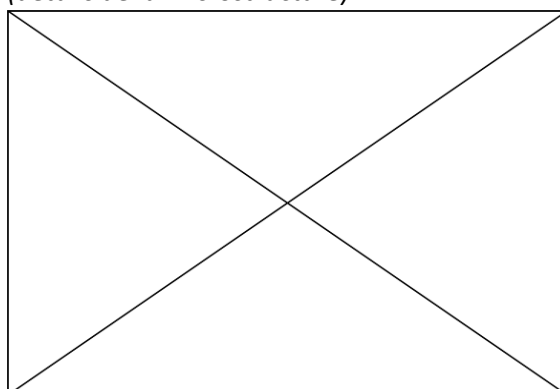
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
5	2

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Direct	<0,01
Abaque	Direct	
PROCEDE	Direct	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon G40-1

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : G40

Numéro de l'élément d'armure : G40-1

Lieu de conservation : Musée de l'Armée (Paris)

Lieu de découverte :

Description : Cette armure fait partie d'une garniture commandée à un armurier Nurembergeois Hans Ringler en 1531 par Otto Henri. Les pièces de cet ensemble sont réparties dans différents musées. Le musée de l'Armée possède lui l'armure de campagne et sa barde de cheval (J. P. Reverseau, 1996, p130)

Datation : 1533 (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Allemagne

Ville : Nuremberg

Élément de l'armure étudié : Cuissard

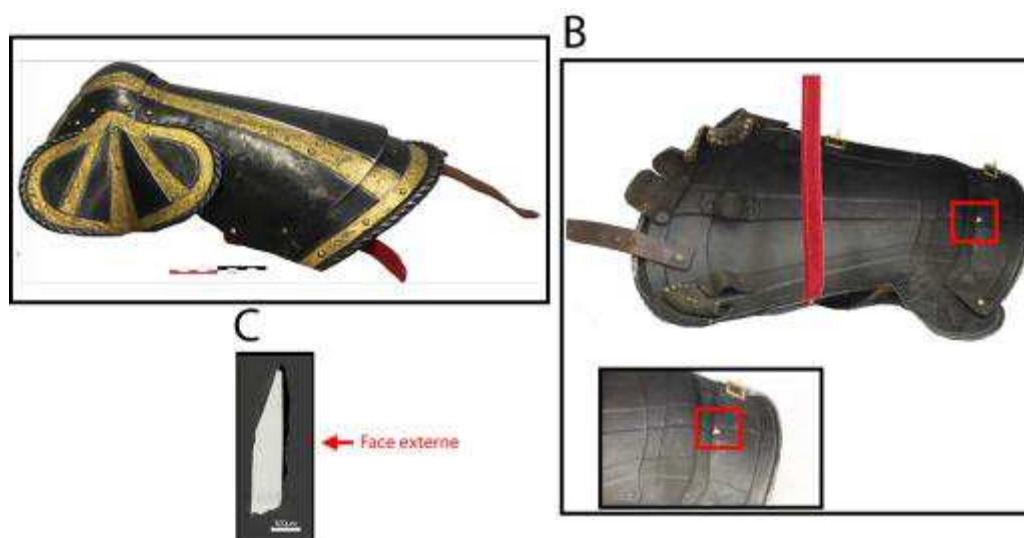
Armurier ou atelier associé : Hans Ringler

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique : (J. P. Reverseau, 1996)

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon est issu d'une des lames inférieures du cuissard, protégeant le genou.

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[<50]	Non résolue	Oui	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
0,4	>0,3	0,00	266 ($\sigma=23$)	Non dosé	Non

Commentaires :

Cet échantillon présente des structures de trempe (martensite, bainite) dans une matrice de ferrite. La structure pourrait être rapprochée de celle des aciers modernes "dual phase".

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

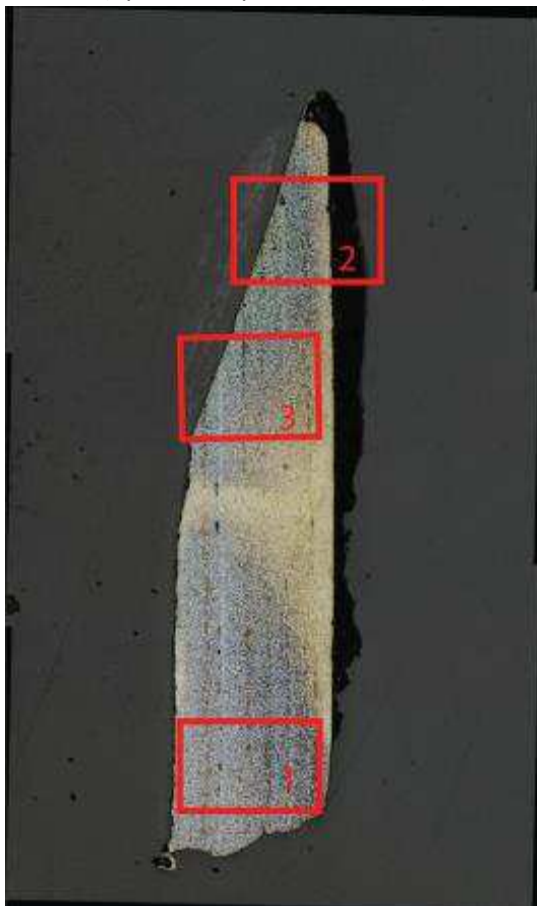
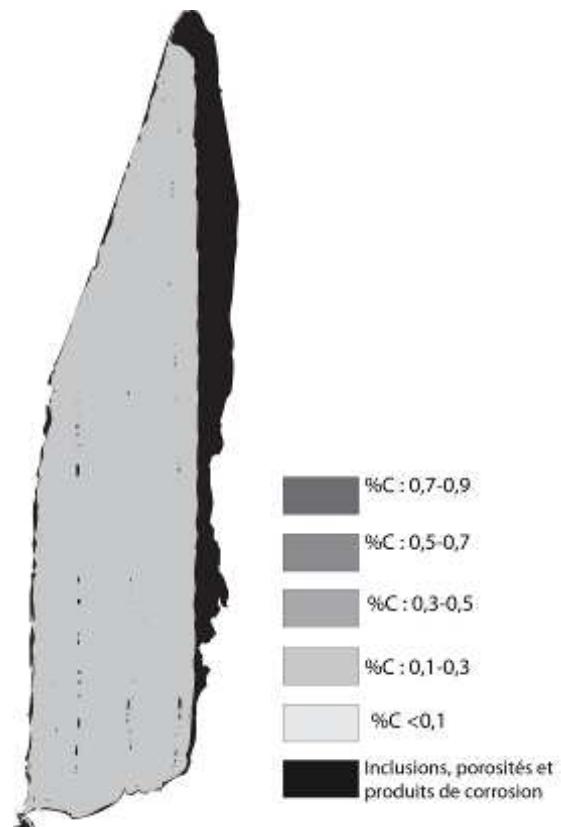


Schéma correspondant



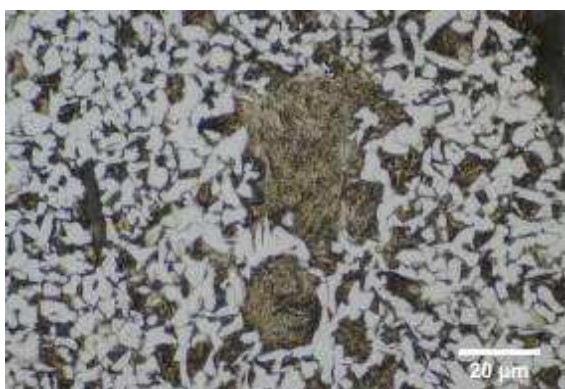
Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



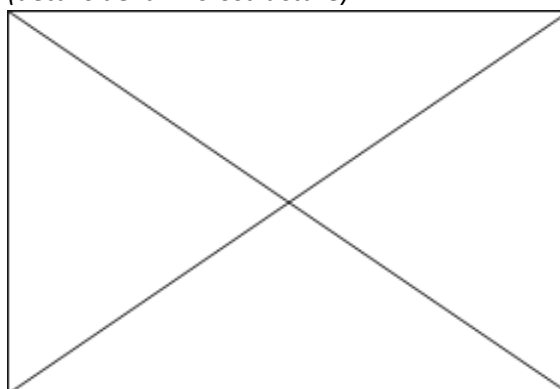
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3% (détails de la microstructure)



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
4	1,3

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Direct	<0,01
Abaque	Direct	
PROCEDE	Direct	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Dissier, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon G40-2

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : G40

Numéro de l'élément d'armure : G40-2

Lieu de conservation : Musée de l'Armée (Paris)

Lieu de découverte :

Description : Cette armure fait partie d'une garniture commandée à un armurier Nurembergeois Hans Ringler en 1531 par Otto Henri. Les pièces de cet ensemble sont réparties dans différents musées. Le musée de l'Armée possède lui l'armure de campagne et sa barde de cheval (J. P. Reverseau, 1996)

Datation : 1533 (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Allemagne

Ville : Nuremberg

Élément de l'armure étudié : Element de harnachement

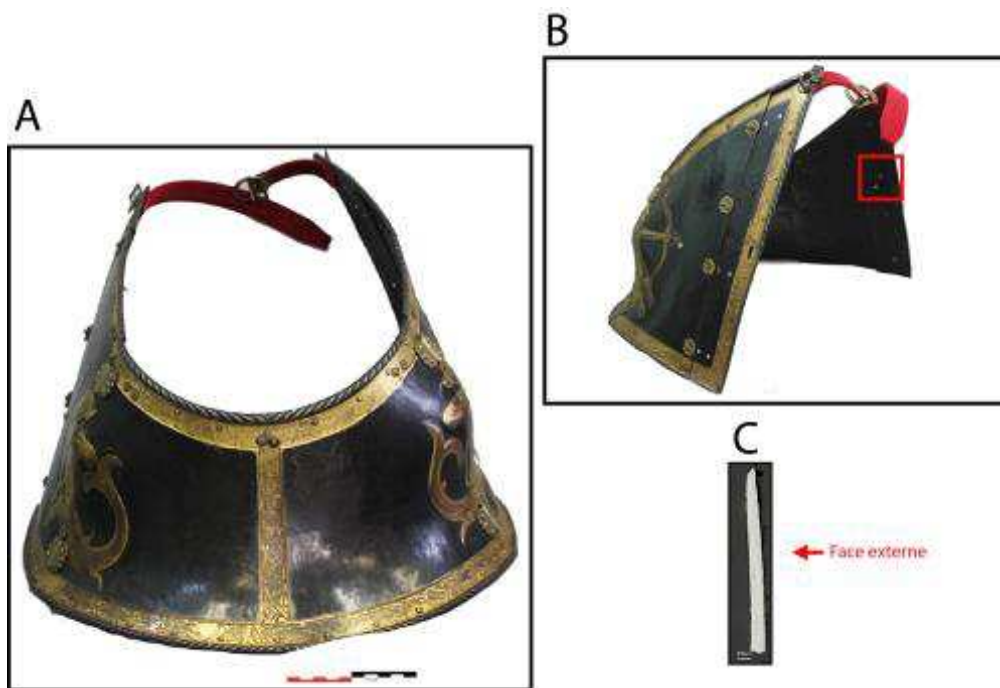
Armurier ou atelier associé : Hans Ringler

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique : (J. P. Reverseau, 1996)

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé sur la défense de cheval protégeant le poitrail.

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[<50]	Non résolue	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
1,3	0,20	0,00	154 ($\sigma=12$)	Non dosé	Non

Commentaires :

Cet échantillon présente la structure d'un acier homogène moyennement carburé. Les grains de ferrite sont de faible taille (<50 μm) et légèrement déformés par endroit selon la direction de martelage.

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

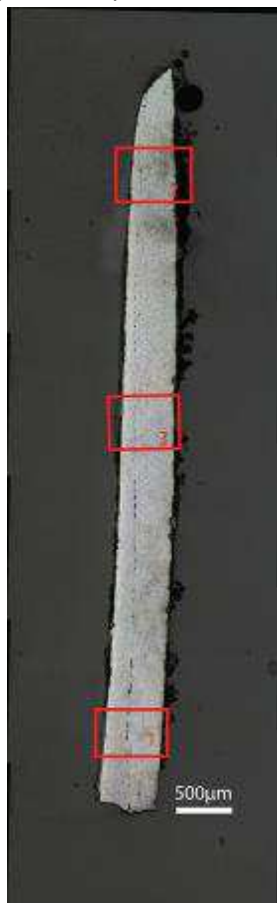
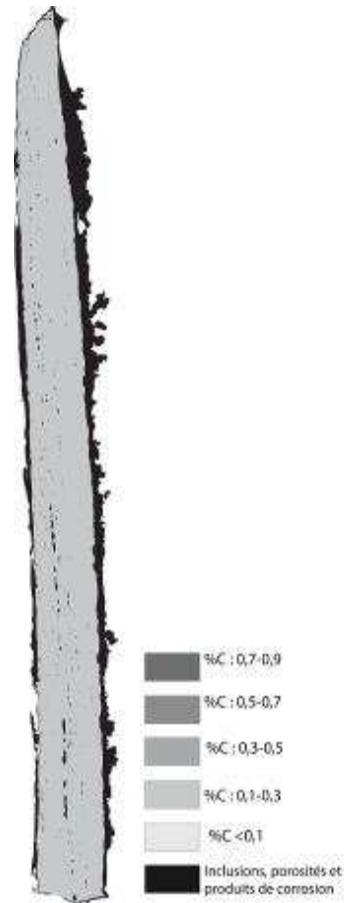
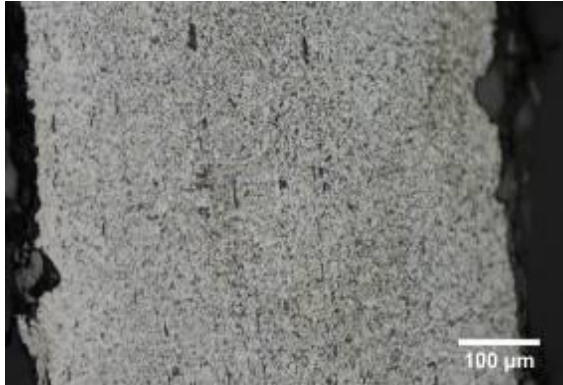


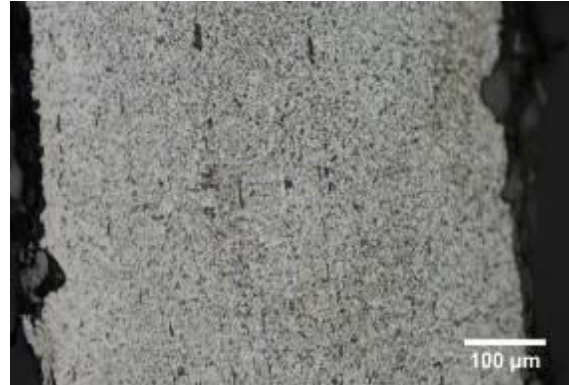
Schéma correspondant



Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



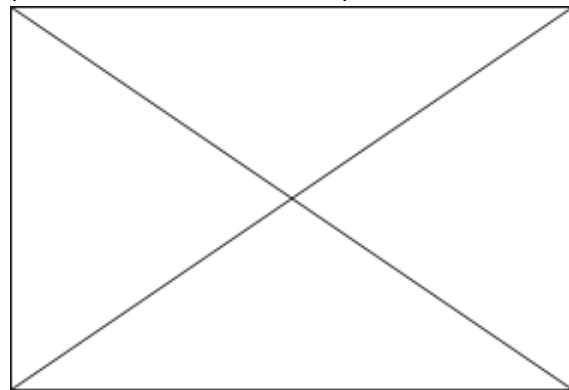
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
4	2

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Direct	<0,01
Abaque	Direct	
PROCEDE	Direct	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Oui	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon G40-3

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : G40

Numéro de l'élément d'armure : G40-3

Lieu de conservation : Musée de l'Armée (Paris)

Lieu de découverte :

Description : Cette armure fait partie d'une garniture commandée à un armurier Nurembergeois Hans Ringler en 1531 par Otto Henri. Les pièces de cet ensemble sont réparties dans différents musées. Le musée de l'Armée possède lui l'armure de campagne et sa barde de cheval (J. P. Reverseau, 1996)

Datation : 1533 (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Allemagne

Ville : Nuremberg

Élément de l'armure étudié : Élément de harnachement

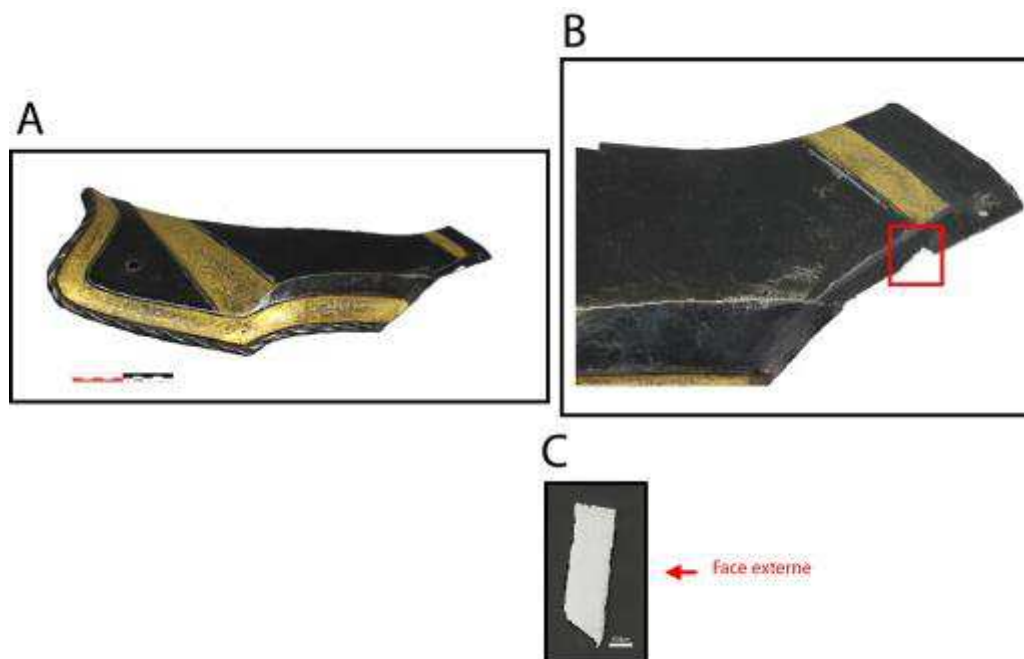
Armurier ou atelier associé : Hans Ringler

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique : (J. P. Reverseau, 1996)

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Ce prélèvement a été réalisé sur un bord de l'élément de harnachement.

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[50-200]	Non résolue	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
0,3	0,12	0,07	162 ($\sigma=18$)	Non dosé	Non

Commentaires :

Cet échantillon est constitué de deux bandes qui se distinguent par leur teneur en carbone mais également leur taille de grains. La tôle aura été plus fortement martelée sur le côté le plus carburé qui présente des grains de plus faible taille et plus déformés.

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

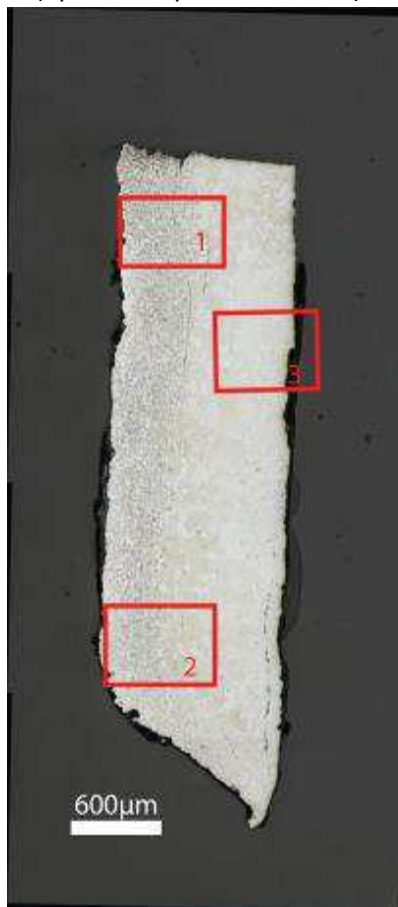
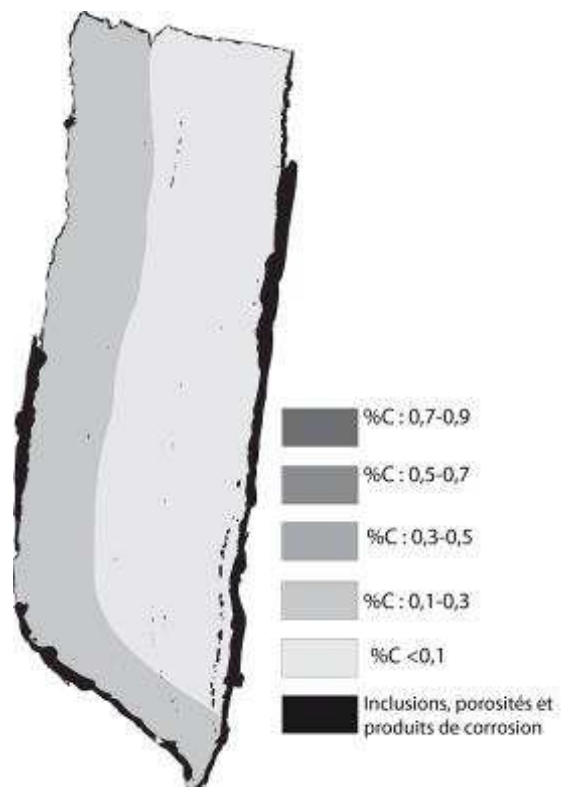


Schéma correspondant



Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



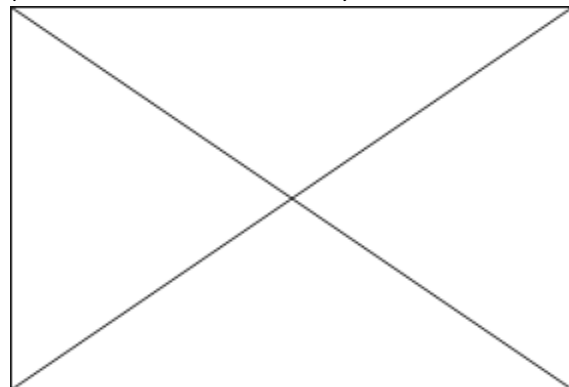
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
4	3

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Direct	<0,01
Abaque	Direct	
PROCEDE	Direct	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Dissert, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon G40-4

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : G40

Numéro de l'élément d'armure : G40-4

Lieu de conservation : Musée de l'Armée (Paris)

Lieu de découverte :

Description : Cette armure fait partie d'une garniture commandée à un armurier Nurembergeois Hans Ringler en 1531 par Otto Henri. Les pièces de cet ensemble sont réparties dans différents musées. Le musée de l'Armée possède lui l'armure de campagne et sa barde de cheval (J. P. Reverseau, 1996)

Datation : 1533 (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Allemagne

Ville : Nuremberg

Élément de l'armure étudié : Élément de harnachement

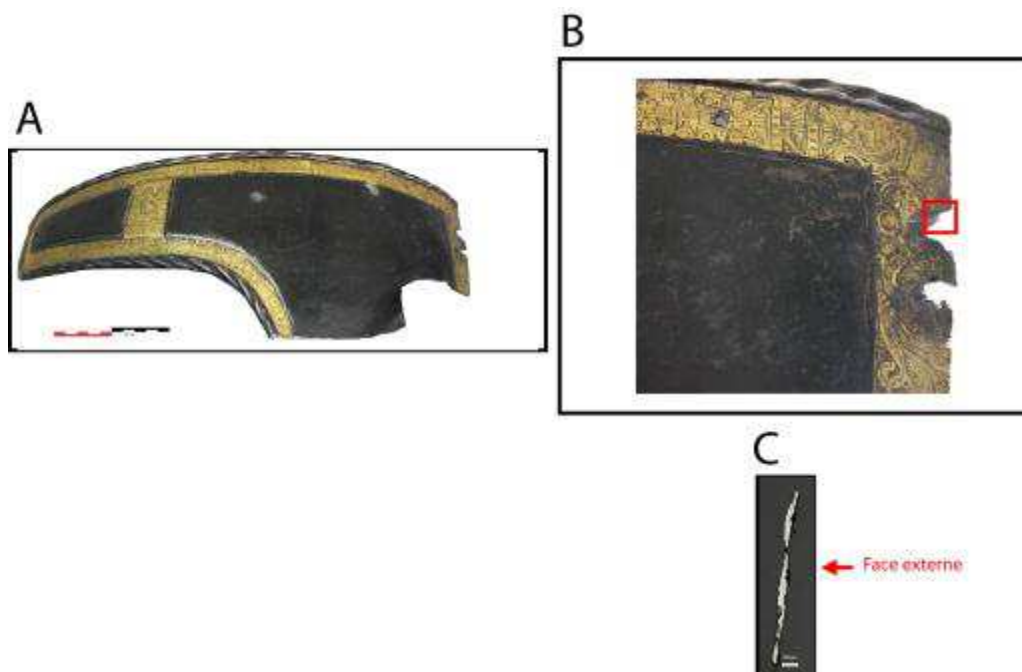
Armurier ou atelier associé : Hans Ringler

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique : (J. P. Reverseau, 1996)

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Ce prélèvement a été réalisé sur un bord endommagé de la défense.

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[50-200]	Non résolue	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
6,0	0,06	0,00	155 ($\sigma=16$)	<0,1	Non

Commentaires :

Cet échantillon est fortement corrodé, par conséquent une partie de l'information initiale est manquante. Le métal présente une structure de grains de ferrite de taille variable.

Analyses métallographiques

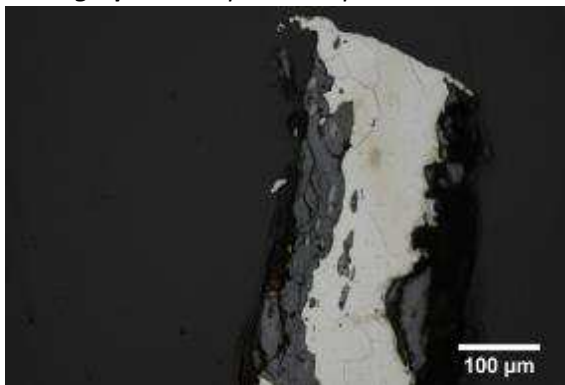
Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)



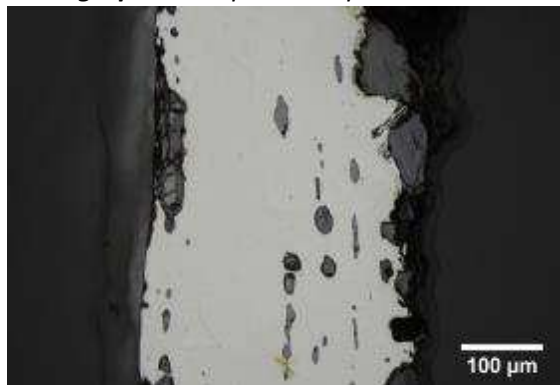
Schéma correspondant



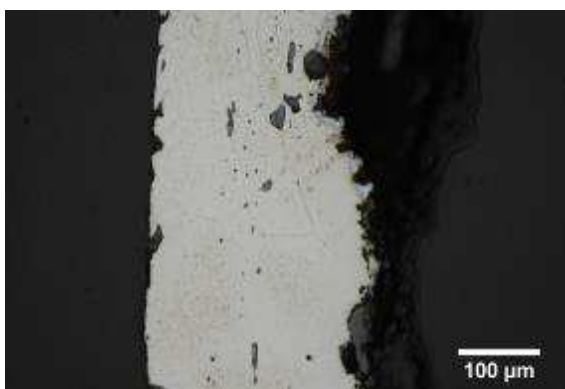
Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



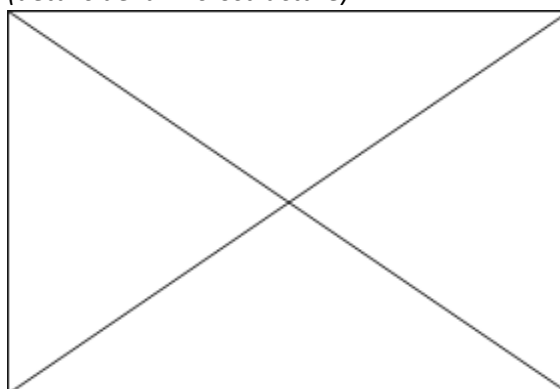
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3% (détails de la microstructure)



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
Non défini	Non défini

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Non défini	Non défini
Abaque	Non défini	
PROCEDE	Non défini	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Dissier, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon G70-1

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : G70

Numéro de l'élément d'armure : G70-1

Lieu de conservation : Musée de l'Armée (Paris)

Lieu de découverte :

Description : Bras droit d'une demi-armure de joute fabriquée en France vers 1560 (Notice du musée de l'Armée)

Datation : 1560 (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : France

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Epaulière

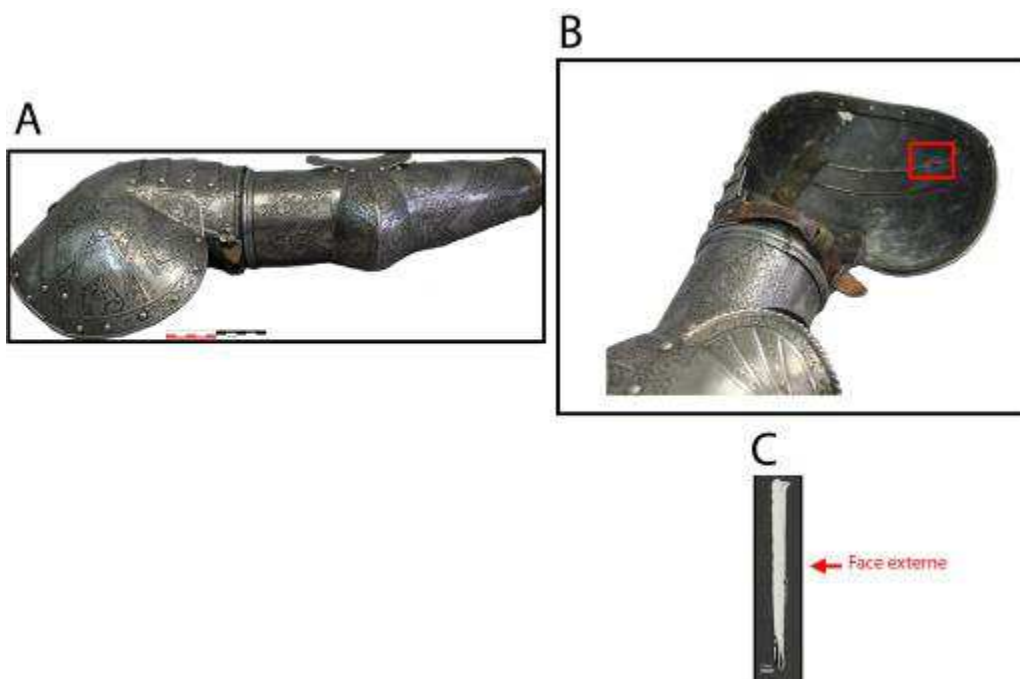
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique :

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé sur l'épaulière de la défense.

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[50-200]	Non résolue	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
3,3	0,06	0,00	128 ($\sigma=12$)	<0,1	Non

Commentaires :

Cet échantillon présente une structure presque exclusivement composée de ferrite. Quelques amas de perlite sont visibles sur les analyses métallographiques. La teneur en carbone demeure cependant faible (<0,1%mass).

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

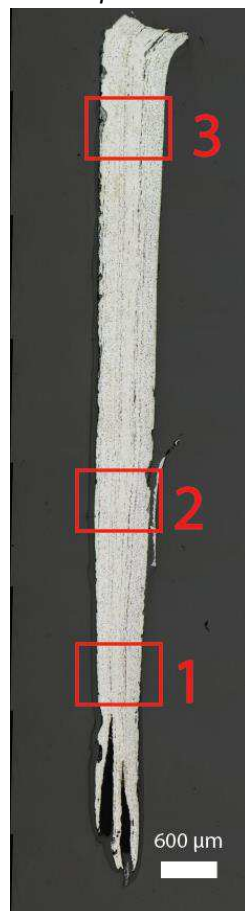
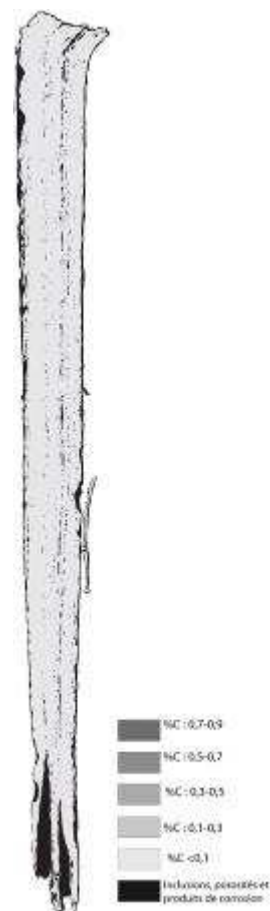


Schéma correspondant



Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



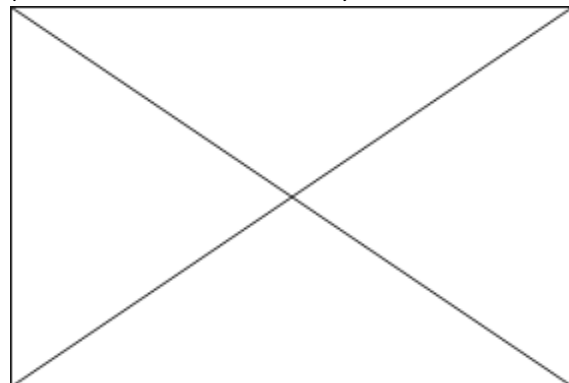
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
6	4

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Indirect	0,99
Abaque	Indirect	
PROCEDE	Indirect	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon G70-2

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : G70

Numéro de l'élément d'armure : G70-2

Lieu de conservation : Musée de l'Armée (Paris)

Lieu de découverte :

Description : Bras droit d'une demi-armure de joute fabriquée en France vers 1560 (Notice du musée de l'Armée)

Datation : 1560 (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : France

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Canon d'avant bras

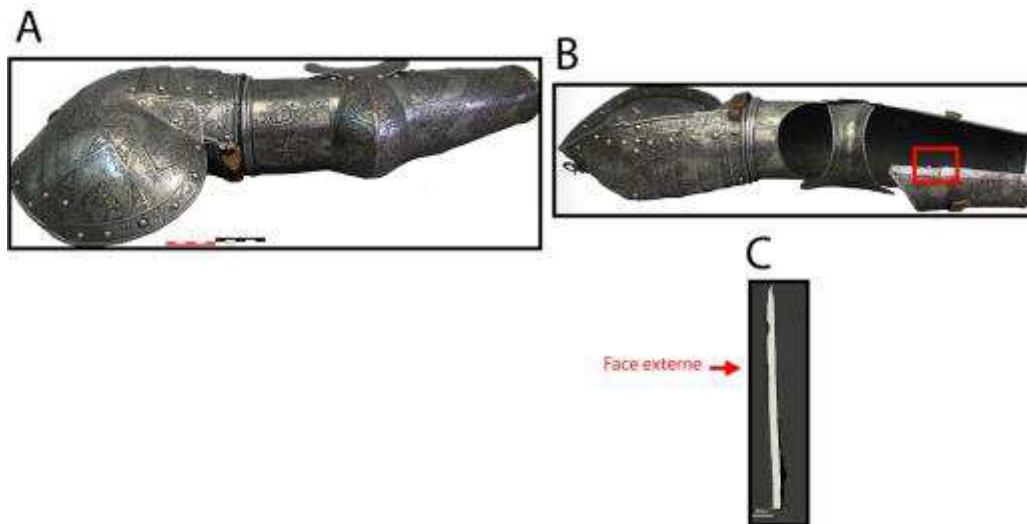
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique :

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé sur le canon d'avant bras de la défense.

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[>200]	Non résolue	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
0,1	0,06	0,00	158 ($\sigma=12$)	<0,1	Non

Commentaires :

Cet échantillon présente une structure ferritique à larges grains (>200 μm), témoignant d'une opération de recuit. Sa dureté est légèrement plus élevée que celle attendu pour ce type de structure. La présence de phosphore en solution solide pourrait expliquer ce phénomène mais son taux dans le métal demeure relativement faible (<0,1%mass).

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon

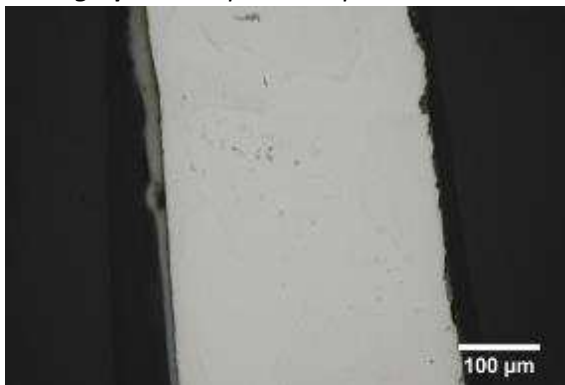
(après attaque au Nital 3%)



Schéma correspondant



Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



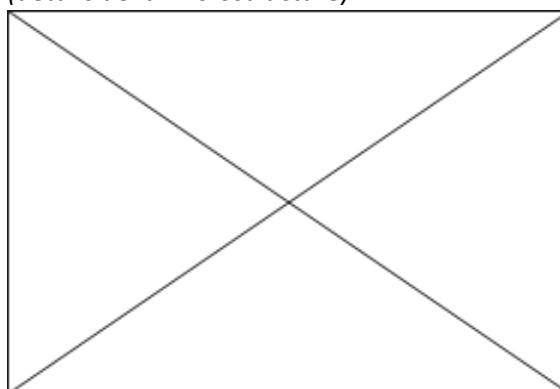
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
3	2

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Indirect	>0,99
Abaque	Indirect	
PROCEDE	Indirect	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon H35

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : H35

Numéro de l'élément d'armure : H35

Lieu de conservation : Musée de l'Armée (Paris)

Lieu de découverte :

Description : Petite salade de piéton datée du XVe siècle et qui pourrait avoir été fabriquée en Italie (Notice du musée de l'Armée)

Datation : XVe siècle (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Italie

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Salade

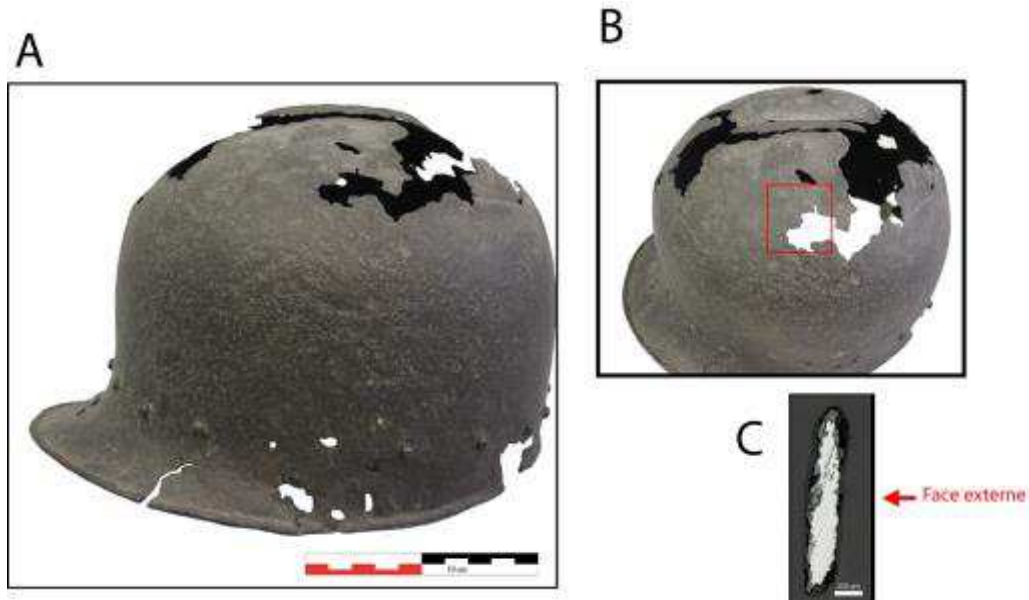
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique :

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé sur la partie supérieure de la salade

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[<50]	Non résolue	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
3,8	0,20	0,00	156 ($\sigma=12$)	Non dosé	Non

Commentaires :

Cet échantillon présente la structure d'un acier faiblement carburé homogène.

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

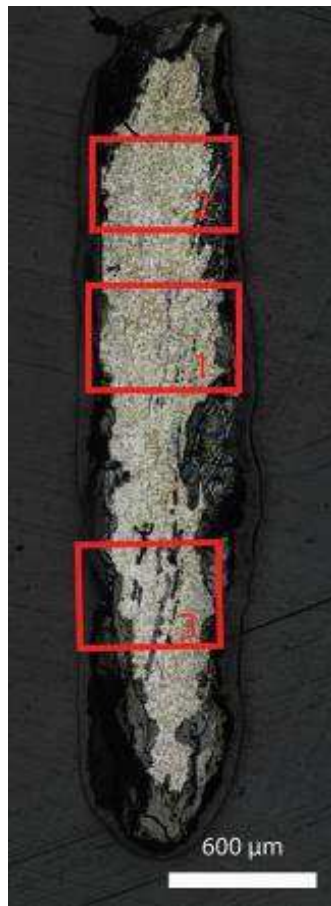
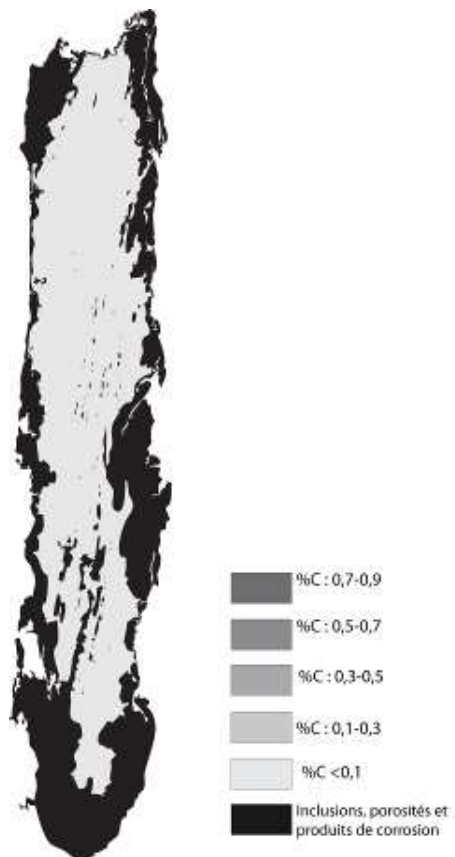


Schéma correspondant



Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



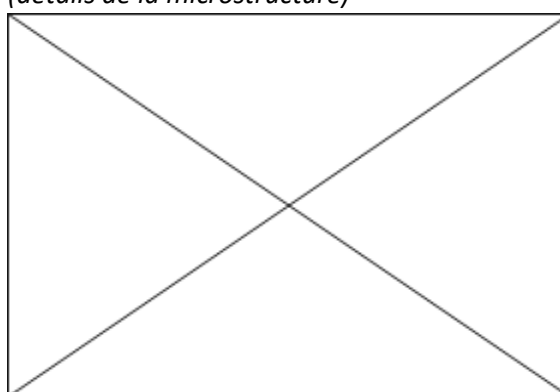
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
6	5

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Direct	<0,01
Abaque	Direct	
PROCEDE	Direct	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon HPO2608_1

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : HPO2608

Numéro de l'élément d'armure : HPO2608

Lieu de conservation : Musée de l'Armée (Paris)

Lieu de découverte :

Description : Défense de bras supposée avoir été fabriquée en Allemagne vers 1480 (O. Renaudeau)

Datation : 1480 (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Allemagne

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Cubitière

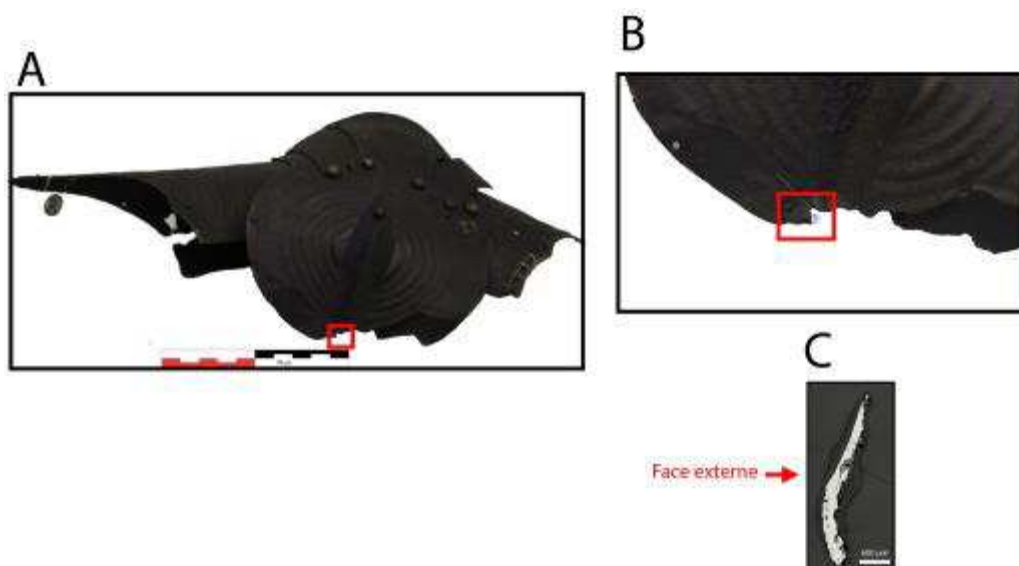
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique :

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé sur la lame centrale de la cubitière

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[50-200]	Non résolue	Non	Non	Non	Oui

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
2,3	0,06	0,00	168 ($\sigma=25$)	<0,1	Non

Commentaires :

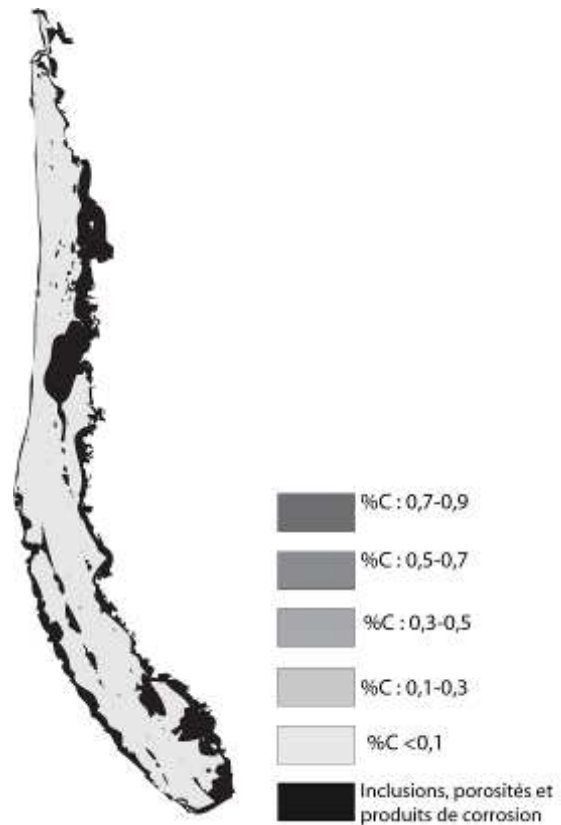
Cet échantillon présente une structure ferritique homogène.

Analyses métallographiques

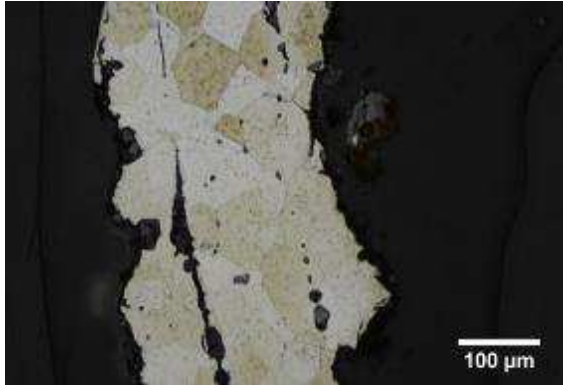
Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)



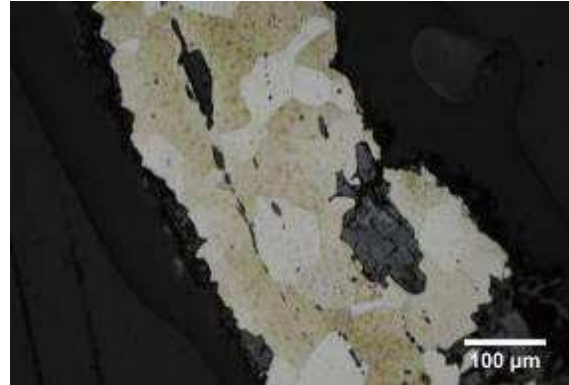
Schéma correspondant



Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



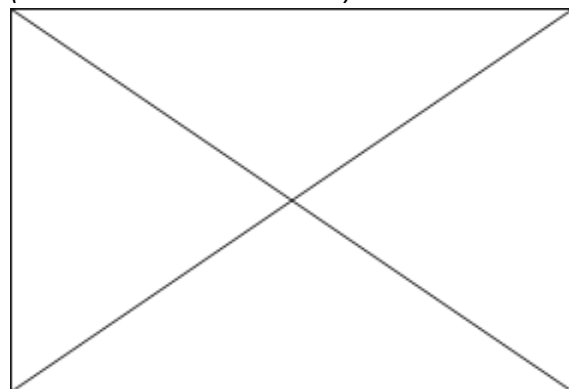
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
5	2,4

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Direct	<0,01
Abaque	Direct	
PROCEDE	Direct	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Oui	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon HPO2608_2

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : HPO2608

Numéro de l'élément d'armure : HPO2608

Lieu de conservation : Musée de l'Armée (Paris)

Lieu de découverte :

Description : Défense de bras supposée avoir été fabriquée en Allemagne vers 1480 (O. Renaudeau)

Datation : 1480 (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Allemagne

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Arrière bras

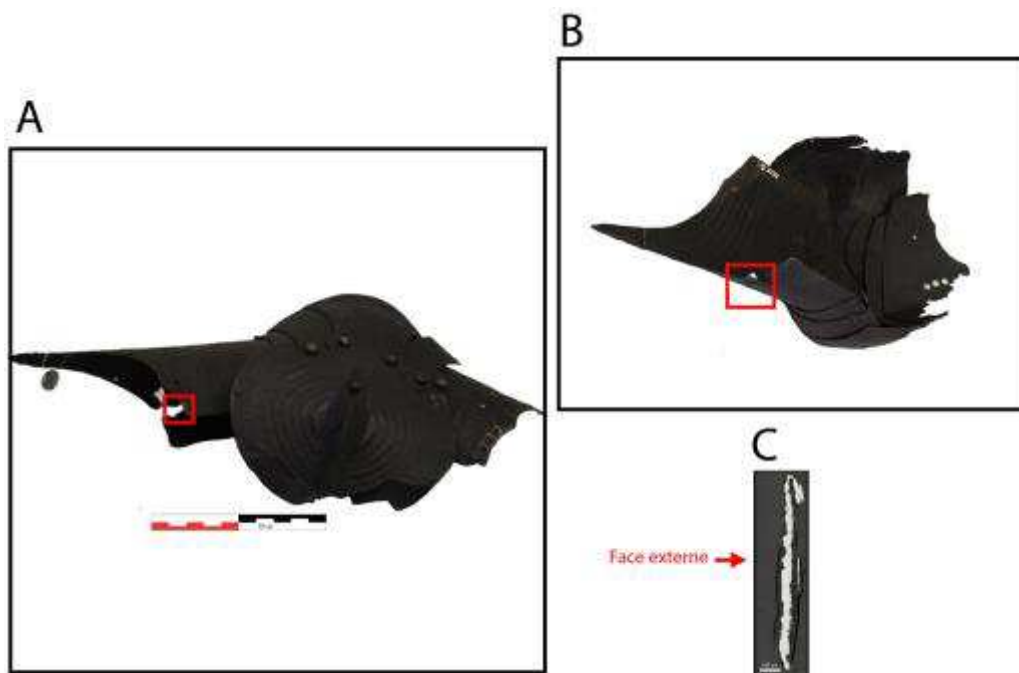
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique :

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé sur l'arrière bras de la pièce.

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[50-200]	Non résolue	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
1,4	0,06	0,00	182 ($\sigma=20$)	<0,1	Non

Commentaires :

Cet échantillon présente une structure ferritique homogène.

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)



Schéma correspondant



Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



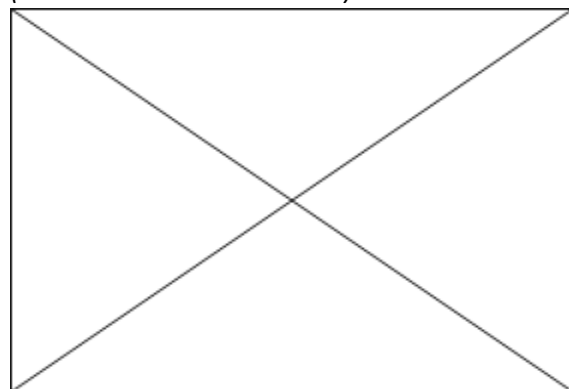
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
6	1

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Direct	0,16
Abaque	Indéterminé	
PROCEDE	Direct	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Oui	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon H3_1

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : H3

Numéro de l'élément d'armure : H3

Lieu de conservation : Musée de l'Armée (Paris)

Lieu de découverte :

Description : Ancienne collection du musée d'Artillerie, publié par Viollet le Duc comme un heaume du XIII^e siècle. Don de Boucher de Perthes, trouvé dans la somme près d'Abbeville. Sa datation est aujourd'hui questionnée (Notice du musée de l'Armée)

Datation : XIII^e siècle ? (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Indéterminée

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Défense de tête

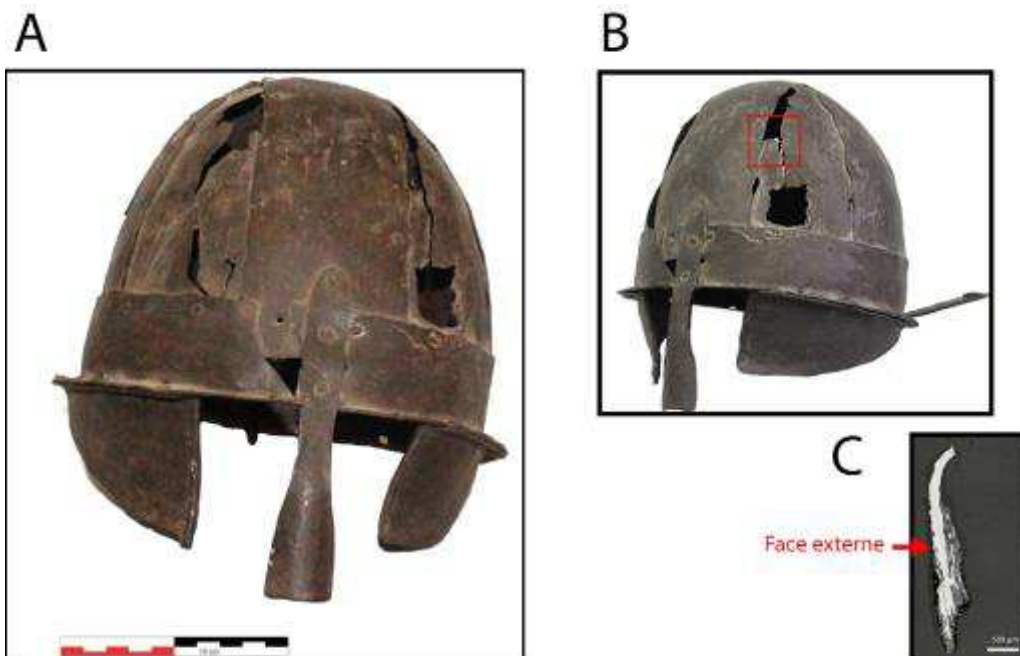
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique :

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé sur une lame du heaume

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[50-200]	Non résolue	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
2,9	0,06	0,00	156 ($\sigma=25$)	0,16	Non

Commentaires :

Cet échantillon possède une structure entièrement ferritique. Aucune structure fantôme n'a été mise en évidence, toutefois les dosages réalisés par EPMA ont confirmé la présence de phosphore dans le métal.

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

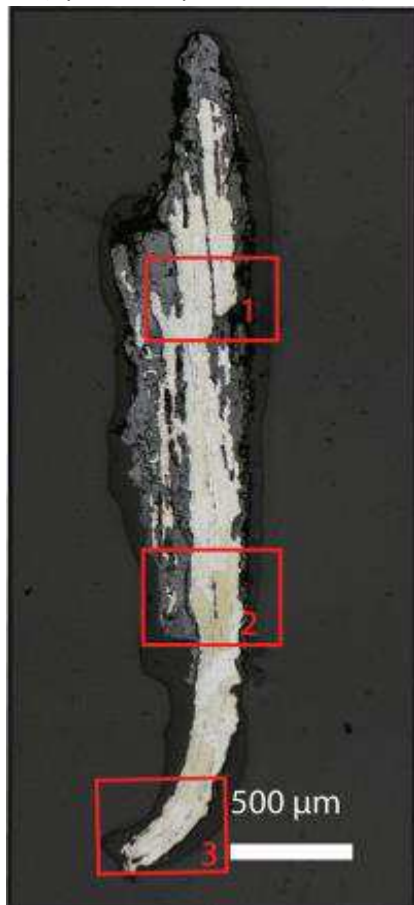
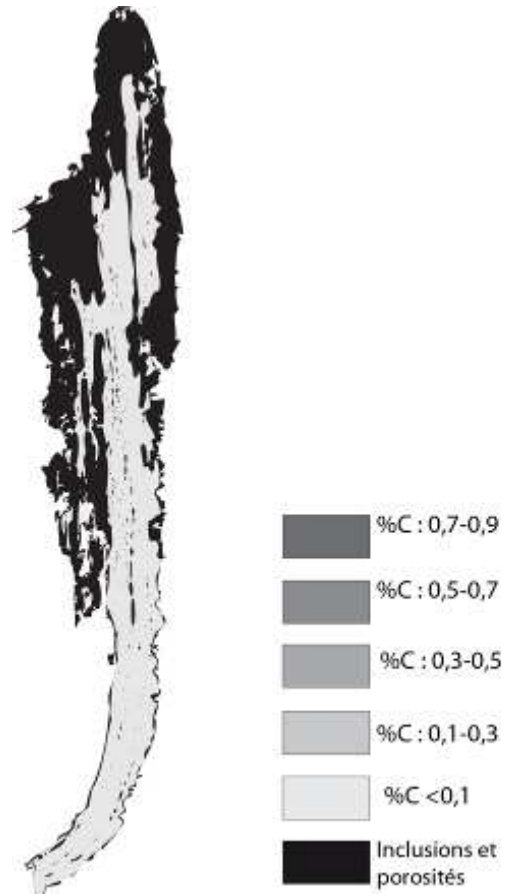
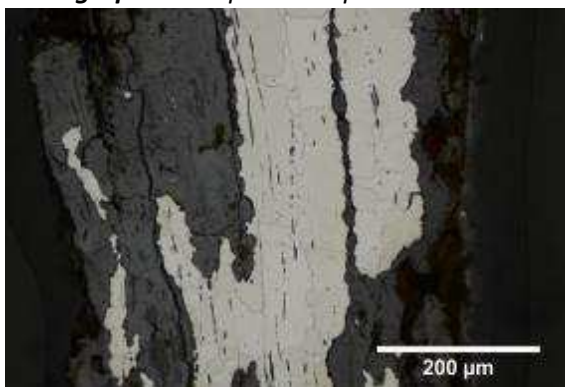


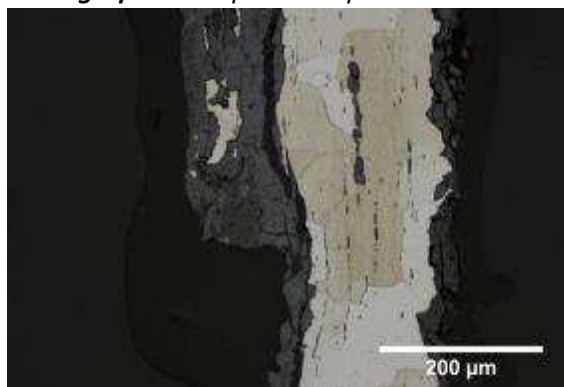
Schéma correspondant



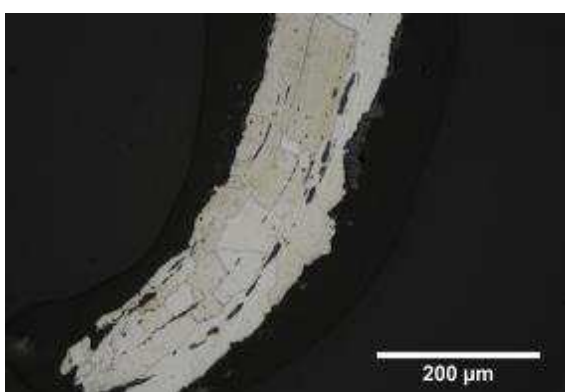
Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



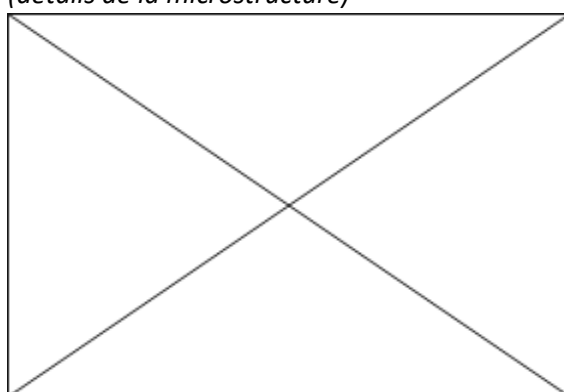
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
4	2

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Direct	<0,01
Abaque	Direct	
PROCEDE	Direct	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon H3_2

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : H3

Numéro de l'élément d'armure : H3

Lieu de conservation : Musée de l'Armée (Paris)

Lieu de découverte :

Description : Ancienne collection du musée d'Artillerie, publié par Viollet le Duc comme un heaume du XIII^e siècle. Don de Boucher de Perthes, trouvé dans la somme près d'Abbeville. Sa datation est aujourd'hui questionnée (Notice du musée de l'Armée)

Datation : XIII^e siècle ? (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Indéterminée

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Défense de tête

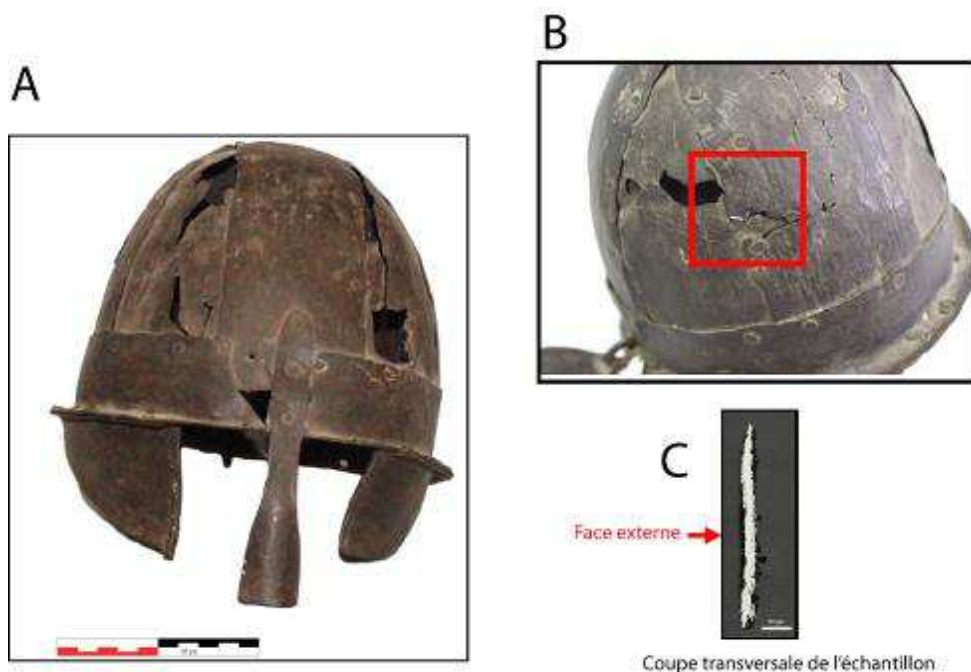
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique :

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé sur une lame du heaume

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[50-200]	Non résolue	Non	Oui	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
1,8	0,06	0,00	162 ($\sigma=10$)	0,13	Non

Commentaires :

Cet échantillon possède une structure entièrement ferritique. L'attaque au réactif Oberhoffer a mis en évidence des structures fantômes. Les dosages réalisés par EPMA ont également confirmé la présence de phosphore dans le métal.

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)



Schéma correspondant



Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



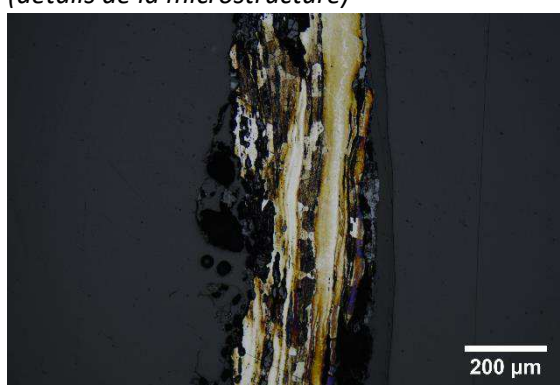
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 4 : Après attaque à l'Oberhoffer (détails de la microstructure)



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
6	1,2,4,5

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Direct	<0,01
Abaque	Direct	
PROCEDE	Direct	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Dissier, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon H3_3

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : H3

Numéro de l'élément d'armure : H3

Lieu de conservation : Musée de l'Armée (Paris)

Lieu de découverte :

Description : Ancienne collection du musée d'Artillerie, publié par Viollet le Duc comme un heaume du XIII^e siècle. Don de Boucher de Perthes, trouvé dans la somme près d'Abbeville. Sa datation est aujourd'hui questionnée (Notice du musée de l'Armée)

Datation : XIII^e siècle ? (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Indéterminée

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Défense de tête

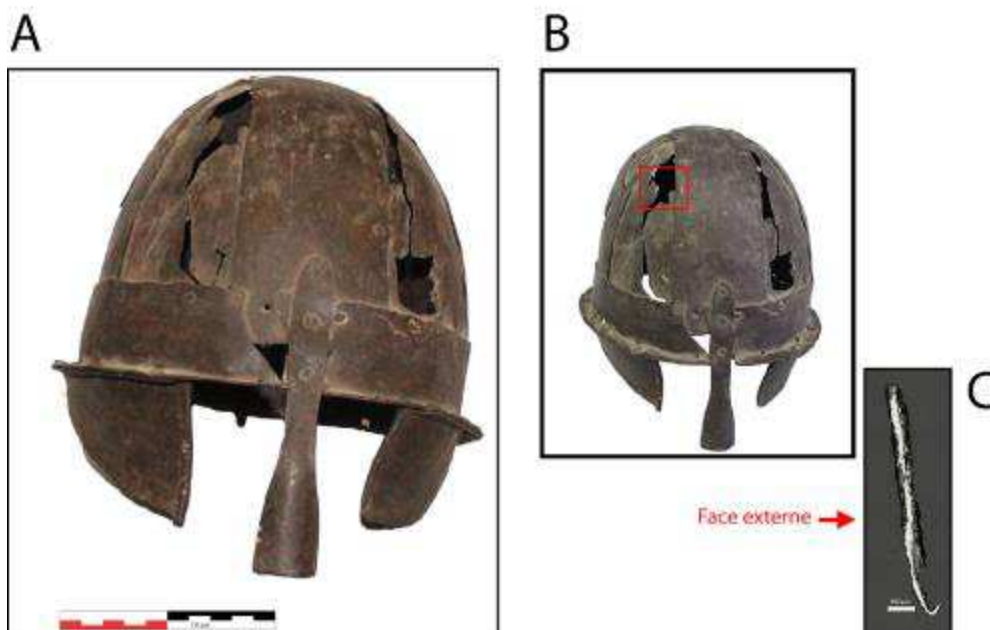
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique :

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé sur une lame du heaume

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[<50]	Non résolue	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
1,7	0,06	0,00	164 ($\sigma=14$)	0,18	Non

Commentaires :

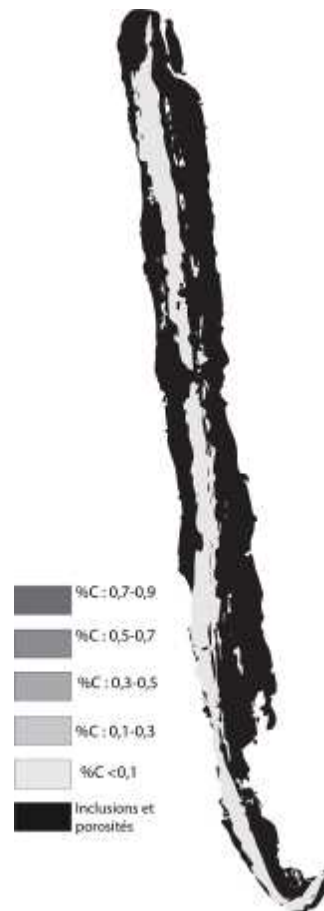
Cet échantillon possède une structure entièrement ferritique. Aucune structure fantôme n'a été mise en évidence, toutefois les dosages réalisés par EPMA ont confirmé la présence de phosphore dans le métal.

Analyses métallographiques

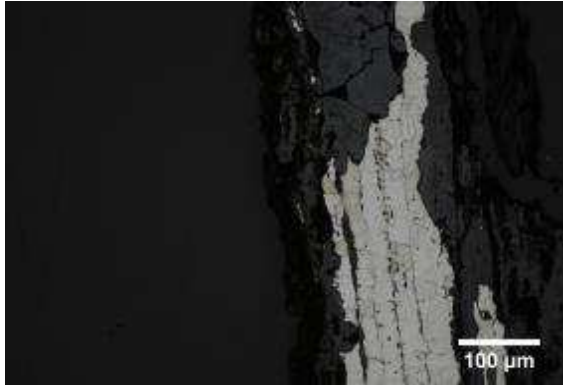
Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)



Schéma correspondant



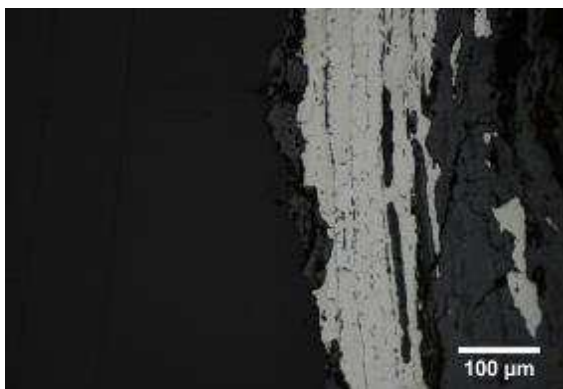
Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



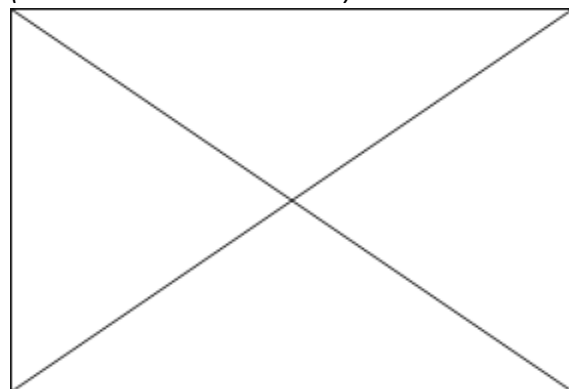
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
5	2

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Direct	<0,01
Abaque	Direct	
PROCEDE	Direct	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon H26

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : H 26

Numéro de l'élément d'armure : H 26

Lieu de conservation : Musée de l'Armée (Paris)

Lieu de découverte :

Description : Cette pièce est un timbre de bacinet daté du XIV^e siècle dont la provenance est inconnue (Notice du musée de l'Armée)

Datation : XIV^e siècle (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Indéterminée

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Timbre de bacinet

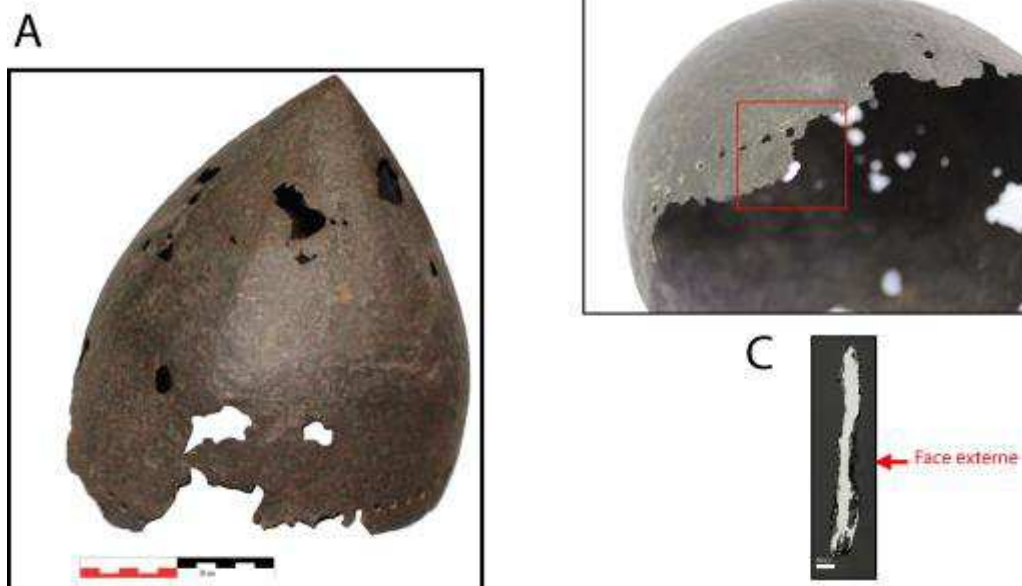
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique :

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé sur un bord endommagé du timbre de bacinet

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[50-200]	Non résolue	Non	Oui	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
0,2	0,14	0,07	161 ($\sigma=21$)	Non dosé	Oui

Commentaires :

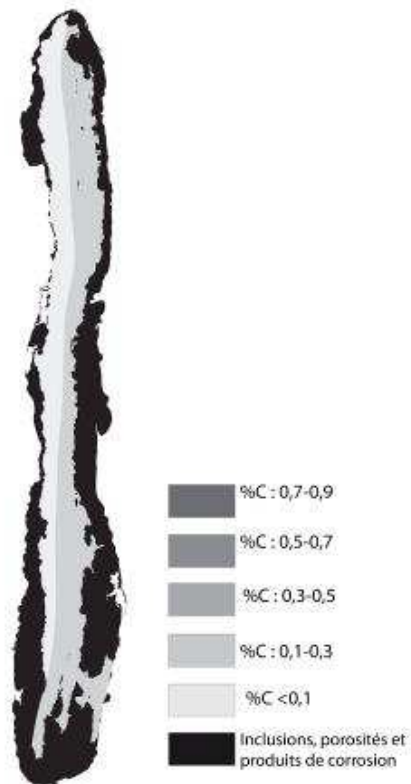
Cet échantillon est composé de deux bandes principales. L'une est uniquement composée de ferrite, l'autre est ferrito perlitique. L'attaque met en évidence une bande claire qui pourrait matérialiser la présence d'une ligne de soudure entre les deux bandes. L'attaque au réactif Oberhoffer a permis de révéler la présence de phosphore dans la partie ferritique.

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)



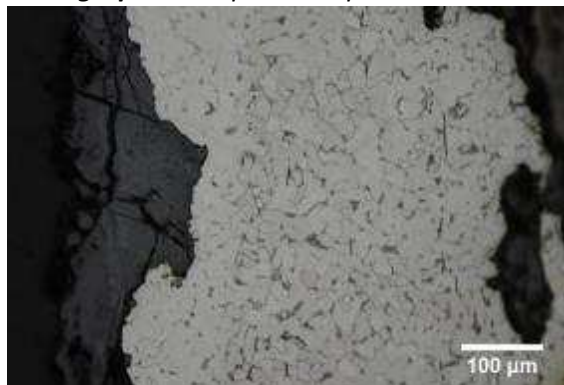
Schéma correspondant



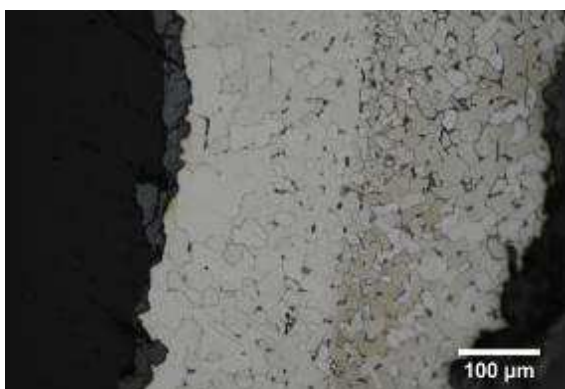
Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 4 : Après attaque à l'Oberhoffer (détails de la microstructure)



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
4	1,2

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Indéterminé	$p(\text{classe1})=0,6$ $p(\text{classe2})> 0,99$
Abaque	Indéterminé	
PROCEDE	Indéterminé	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon 20036

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : 20036

Numéro de l'élément d'armure : 20036

Lieu de conservation : Musée de l'Armée (Paris)

Lieu de découverte :

Description : Il s'agit d'un timbre de bacinet daté du XIVe siècle de provenance inconnue (Notice du musée de l'Armée).

Datation : XIVe siècle (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Indéterminée

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Timbre de bacinet

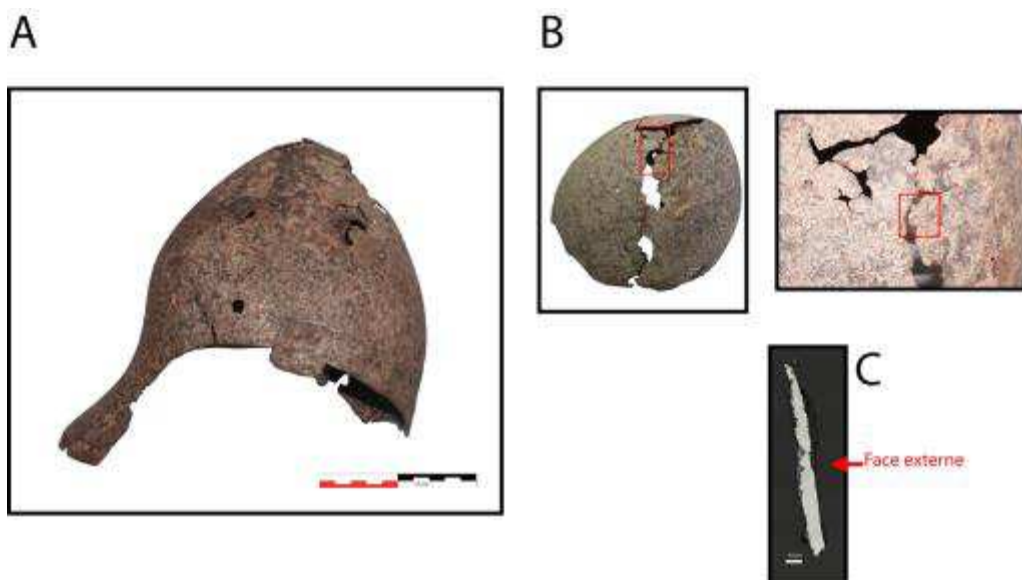
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique :

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé sur la partie supérieure du timbre de bacinet.

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[50-200]	Non résolue	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
0,1	0,06	0,00	170 ($\sigma = 7$)	<0,1	Non

Commentaires :

Cet échantillon possède une structure entièrement ferritique. Les grains sont de taille très hétérogène de 50 à 200 μm . Très peu d'inclusions sont visibles.

Analyses métallographiques

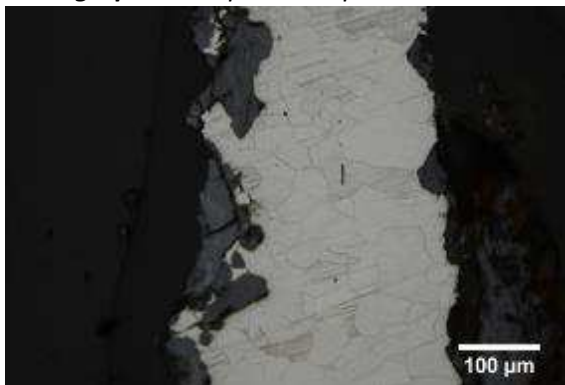
Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)



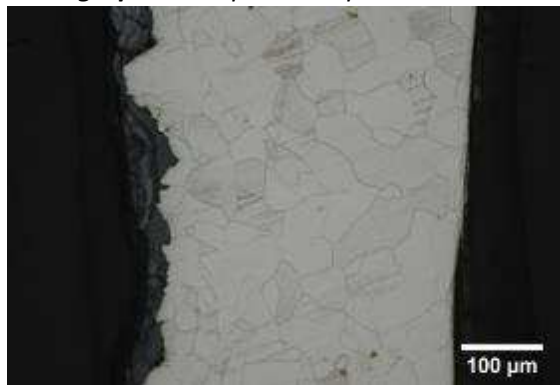
Schéma correspondant



Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



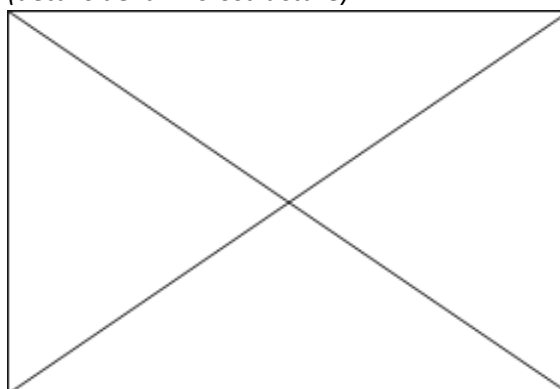
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3% (détails de la microstructure)



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
Non défini	Non défini

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Non défini	Non défini
Abaque	Non défini	
PROCEDE	Non défini	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Dissier, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon H43.1

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : H43.1

Numéro de l'élément d'armure : H43.1

Lieu de conservation : Musée de l'Armée (Paris)

Lieu de découverte :

Description : Timbre de salade daté du XVe siècle (Notice du musée de l'Armée)

Datation : XVe siècle (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Indéterminée

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Timbre de salade

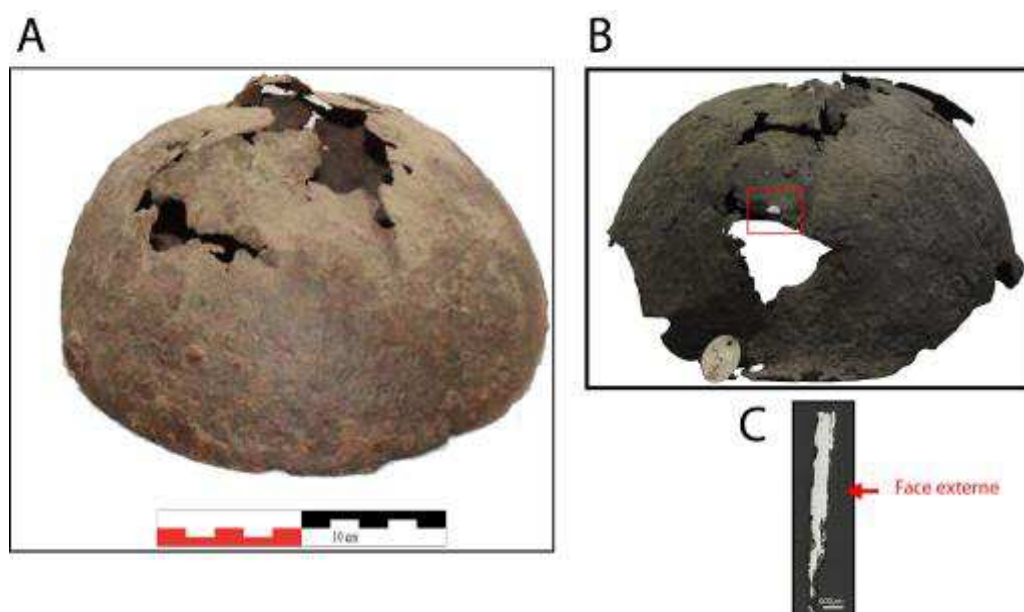
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique :

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé sur la partie supérieure du timbre de salade

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[<50]	Non résolue	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
1,0	0,20	0,00	179 ($\sigma = 4$)	Non dosé	Non

Commentaires :

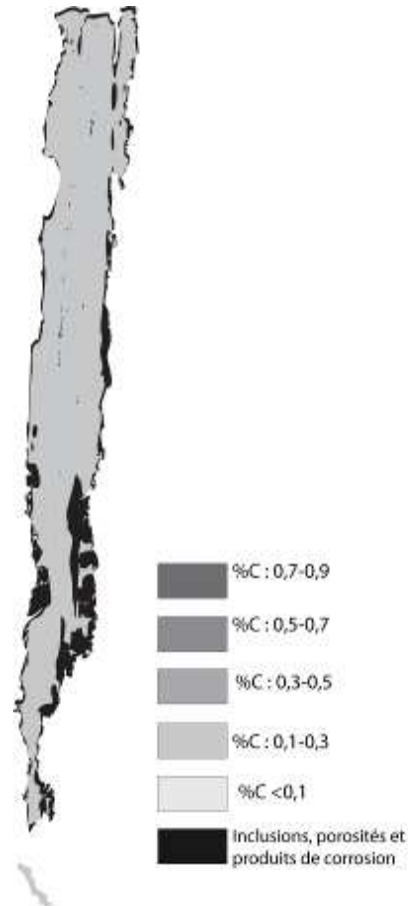
Cet échantillon présente la structure d'un acier faiblement carburé homogène (%C=0,2). Les grains de ferrite sont de faible taille, mais peu déformés.

Analyses métallographiques

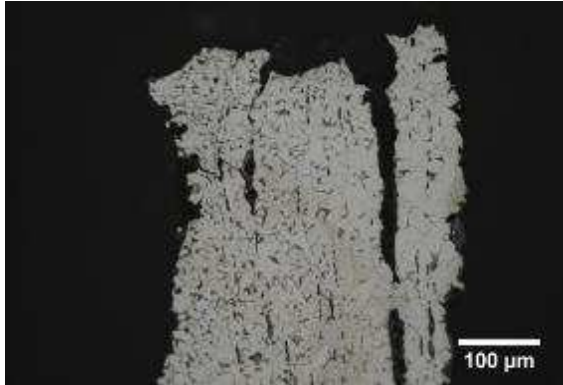
Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)



Schéma correspondant



Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



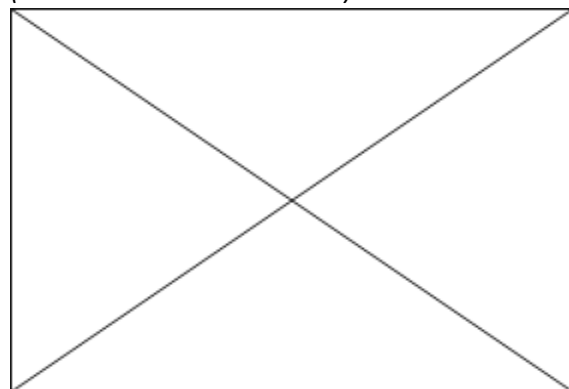
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
3	1

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Direct	0,02
Abaque	Direct	
PROCEDE	Direct	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon H6

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : H6

Numéro de l'élément d'armure : H6

Lieu de conservation : Musée de l'Armée (Paris)

Lieu de découverte :

Description : Heaume funéraire du XVIII^e siècle mais reprenant la typologie du XIII^e siècle (Notice du musée de l'Armée)

Datation : XVIII^e siècle

Lieu de fabrication supposé :

Région : Indéterminée

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Heaume

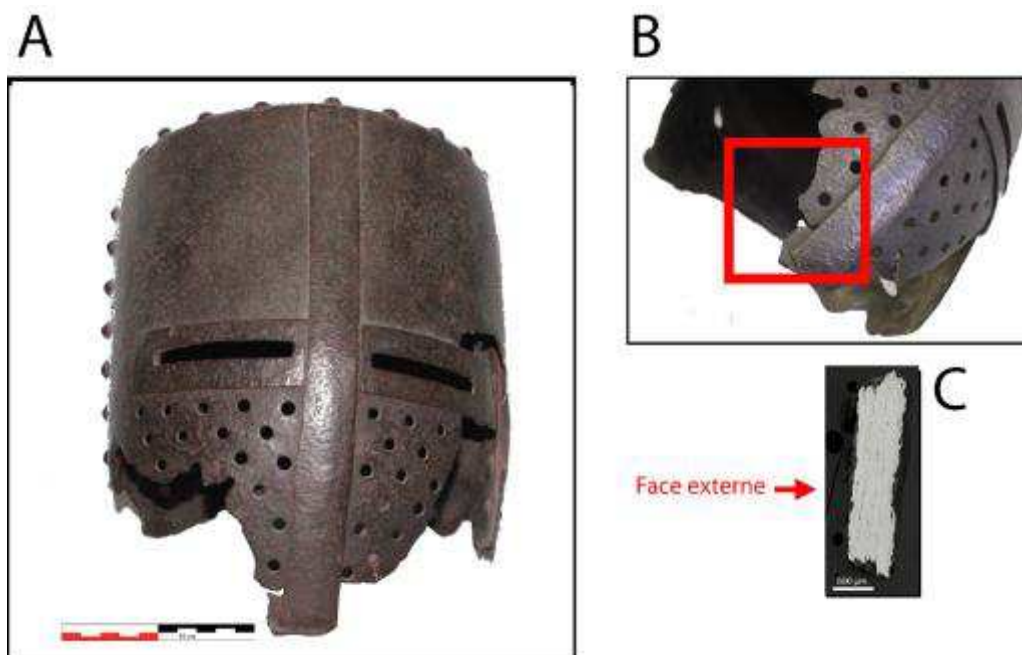
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique :

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé sur la partie inférieure du heaume

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (µm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[<50]	Lamellaire et globulaire	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
2,0	0,30	0,22	217 (σ= 26)	Non dosé	Non

Commentaires :

La structure de cet échantillon est très hétérogène en teneur en carbone. La partie interne est la moins carburée. Les grains sont fortement déformés selon la direction de martelage.

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

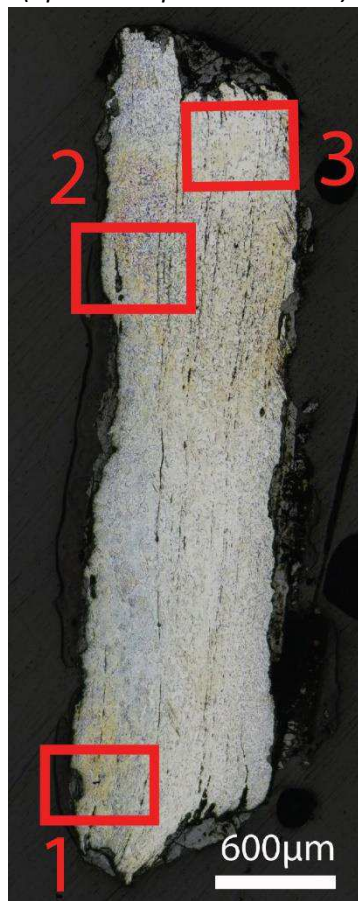
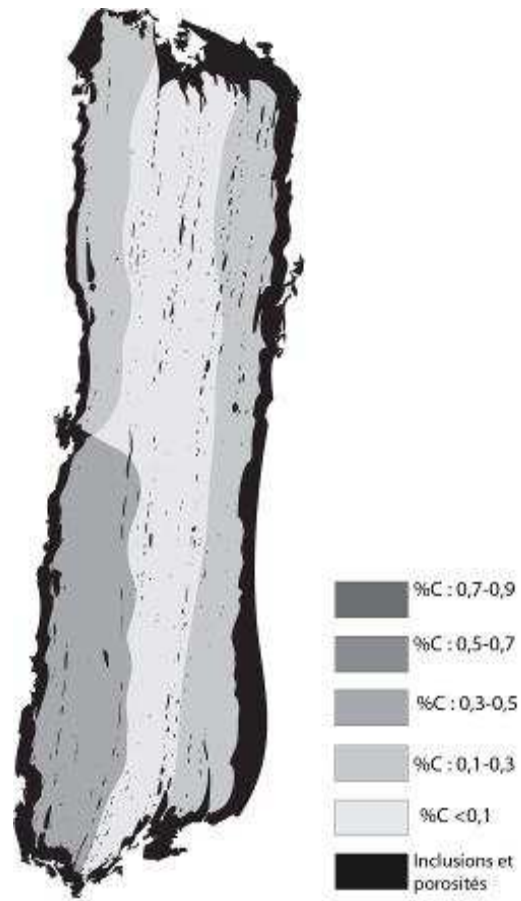


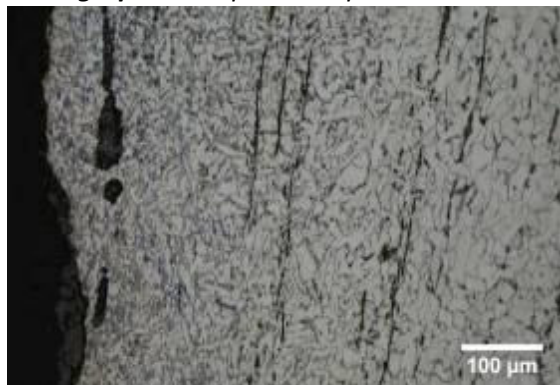
Schéma correspondant



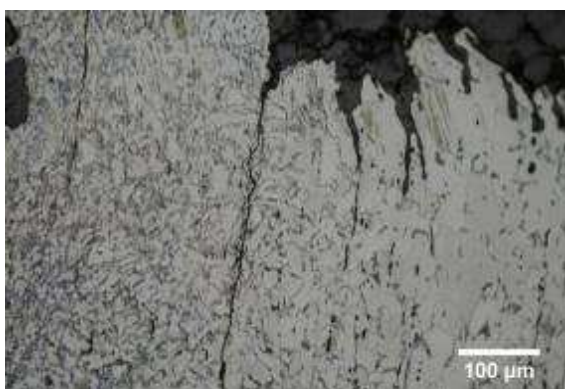
Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



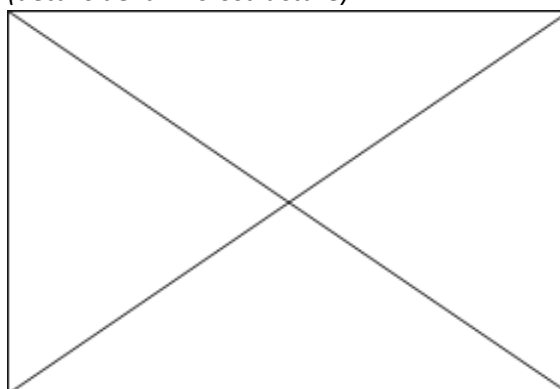
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
4	1

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Direct	<0,01
Abaque	Direct	
PROCEDE	Direct	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon HPO 618.1

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : HPO 618.1

Numéro de l'élément d'armure : HPO618.1

Lieu de conservation : Musée de l'Armée (Paris)

Lieu de découverte :

Description : Timbre de bacinet daté du XIV^e siècle qui provient de la collection Georges Pauilhac acquise par le musée de l'Armée en 1964 (Notice du musée de l'Armée).

Datation : XIV^e siècle (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Indéterminée

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Timbre de bacinet

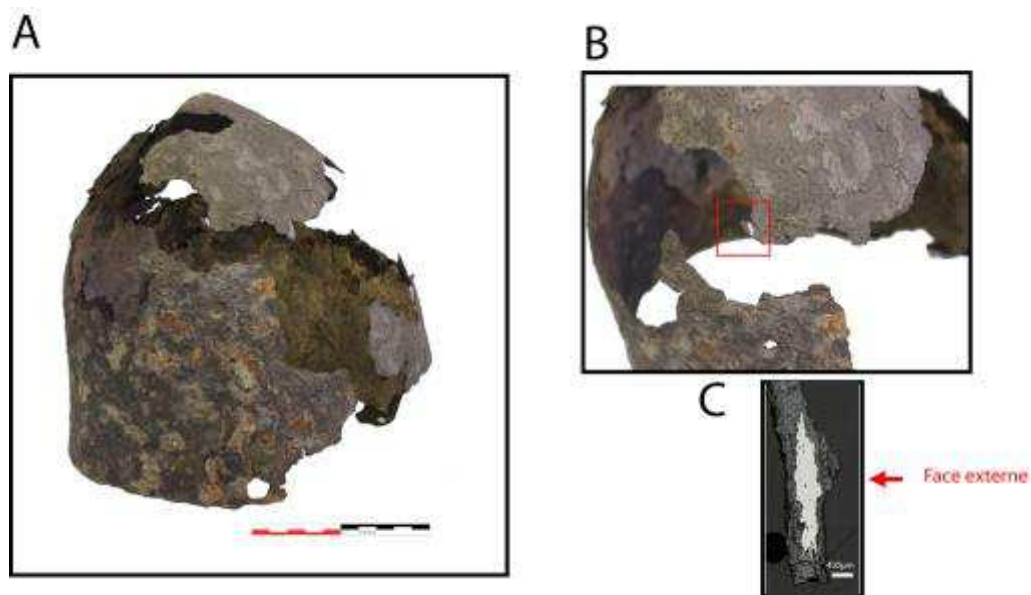
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique :

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé sur une partie endommagée du timbre de bacinet

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[50-200]	Lamellaire	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
1,7	0,40	0,00	175 ($\sigma=36$)	Non dosé	Non

Commentaires :

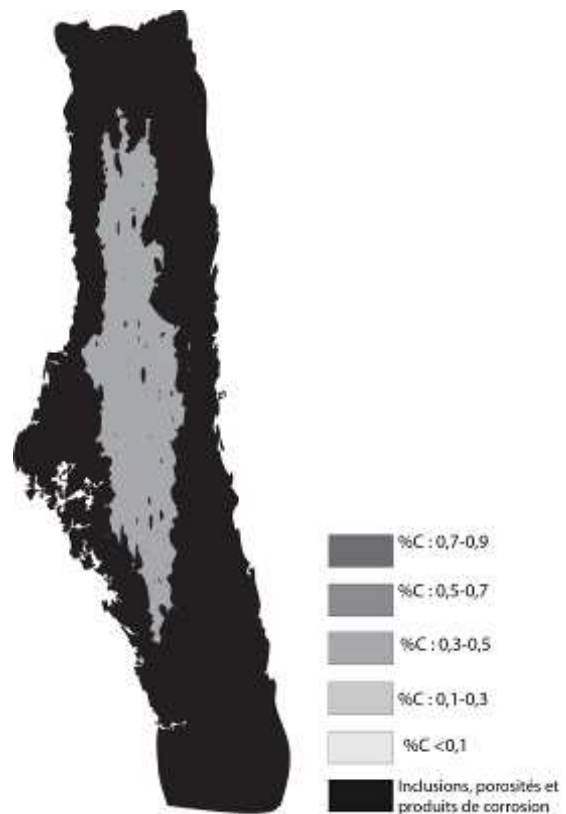
Cet échantillon présente la structure d'un acier homogène moyennement carburé.

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)



Schéma correspondant



Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



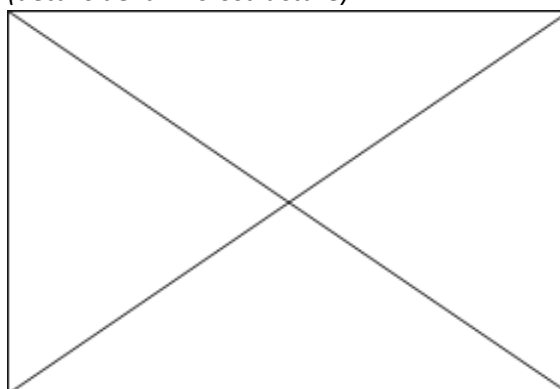
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
3	2

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Indirect	0,99
Abaque	Indéterminé	
PROCEDE	Indirect	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon HPO668

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : HPO668

Numéro de l'élément d'armure : HPO668

Lieu de conservation : Musée de l'Armée (Paris)

Lieu de découverte :

Description : Timbre de bacinet daté du XIV^e siècle issu de la collection Georges Pauilhac acquise par le musée de l'Armée en 1964 (Notice du musée de l'Armée)

Datation : XIV^e siècle (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Indéterminée

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Timbre de bacinet

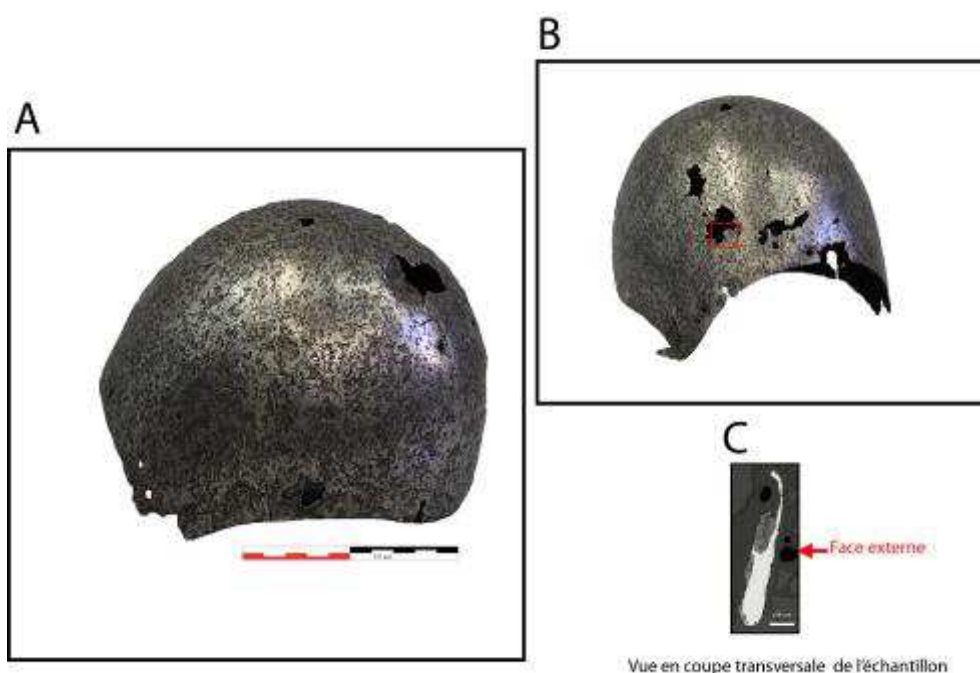
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique :

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé sur une partie endommagée du timbre de bacinet

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[50-200]	Non résolue	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
0,5	0,11	0,07	208 ($\sigma=18$)	Non dosé	Non

Commentaires :

Cet échantillon peut être décomposé en deux bandes qui diffèrent par leur teneur en carbone. La partie interne du métal est légèrement plus carburée que la face externe et possède des grains en moyenne de taille plus faible.

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

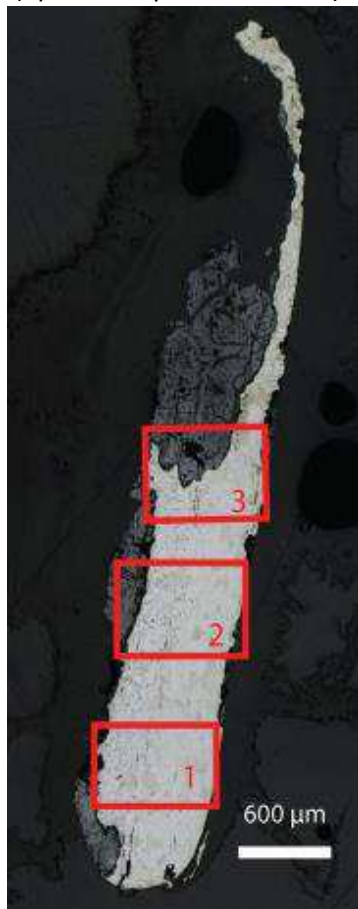
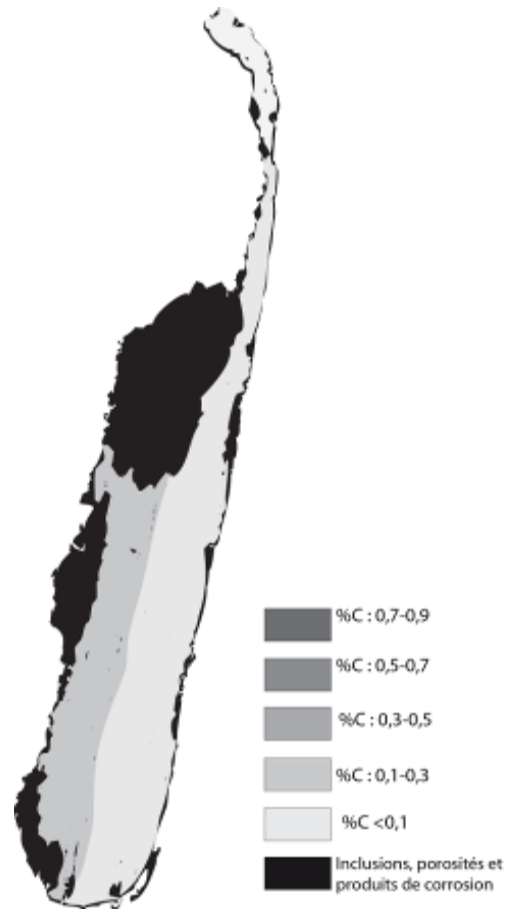
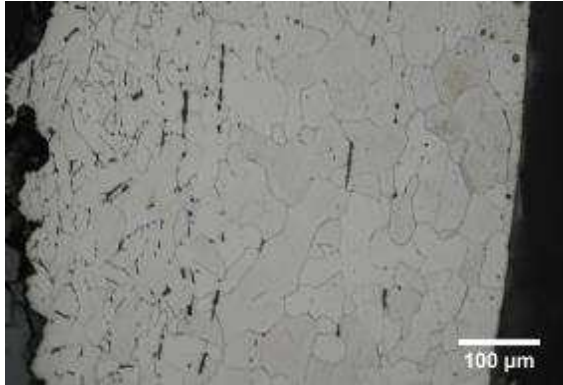


Schéma correspondant



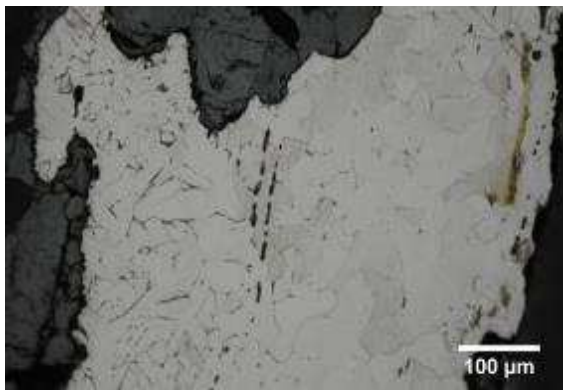
Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



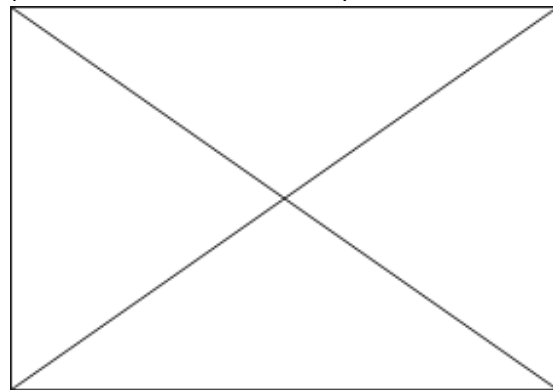
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
Non défini	Non défini

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Non défini	Non défini
Abaque	Non défini	
PROCEDE	Non défini	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon HPO717

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : HPO 717

Numéro de l'élément d'armure : HPO717

Lieu de conservation : Musée de l'Armée (Paris)

Lieu de découverte :

Description : Timbre de grand bacinet daté de la première moitié du XVe siècle, issu de la collection Georges Pauilhac acquise par le musée de l'Armée en 1964 (Notice du musée de l'Armée).

Datation : 1ère moitié du XVe siècle (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Indéterminée

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Timbre de bacinet

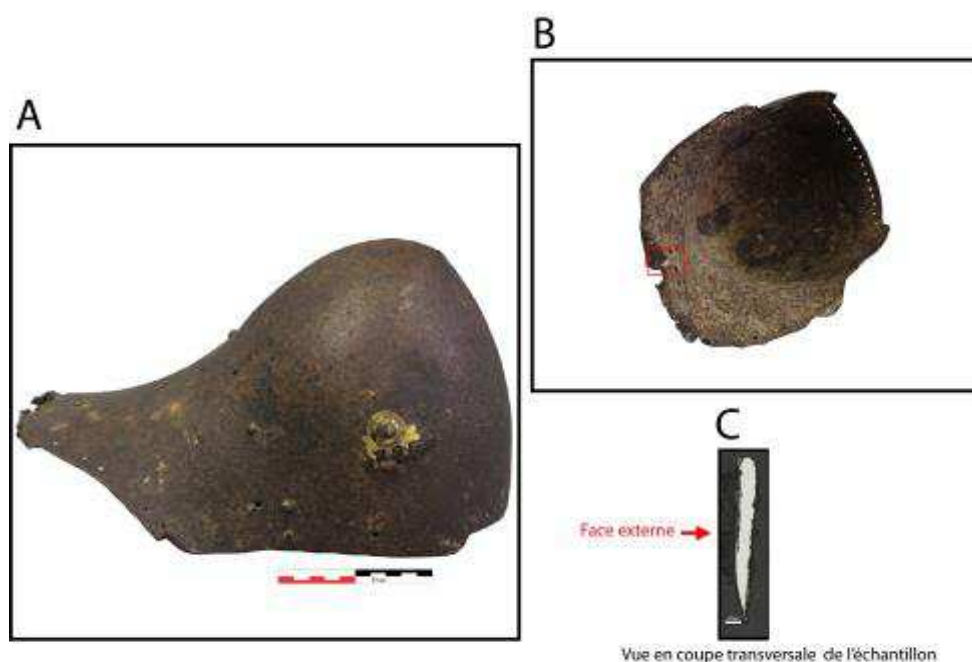
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique :

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé sur un bord replié de la défense

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[50-200]	Non résolue	Non	Non	Non	Oui

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
0,7	0,40	0,00	200 ($\sigma=11$)	Non dosé	Non

Commentaires :

Cet échantillon présente la structure d'un acier moyennement carburé. Des structures de Widmanstätten témoignent qu'une surchauffe du matériau a eu lieu suivie d'un refroidissement rapide.

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)



Schéma correspondant



Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



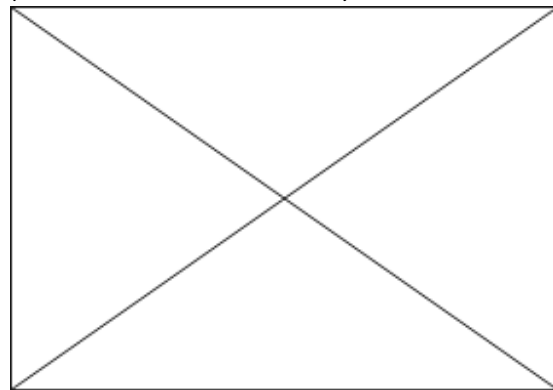
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3% (détails de la microstructure)



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
3	1,2

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Direct	$p(\text{classe1})=0,08$ $p(\text{classe2})=0,05$
Abaque	Direct	
PROCEDE	Direct	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon HPO618.2_1

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : HPO618.2

Numéro de l'élément d'armure : HPO618.2

Lieu de conservation : Musée de l'Armée (Paris)

Lieu de découverte :

Description : Timbre de salade daté du XVe siècle issu de la collection Georges Pauilhac acquise par le musée de l'Armée en 1964 (Notice du musée de l'Armée)

Datation : XVe siècle (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Indéterminée

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Timbre de salade

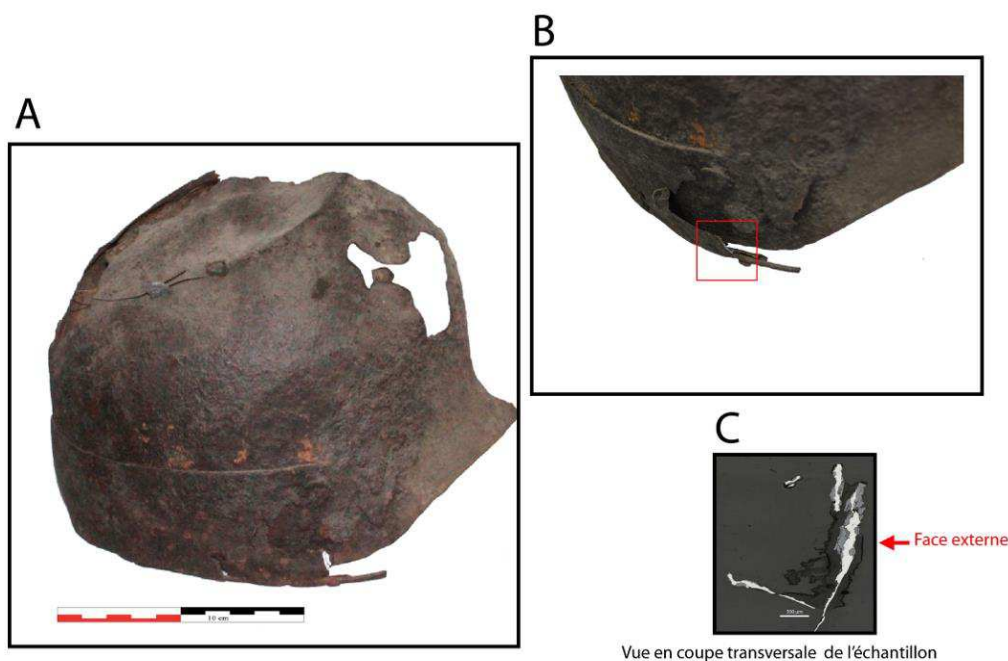
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique :

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé sur un bord endommagé, dans la partie inférieure de la pièce.

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[50-200]	Non résolue	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
0,1	0,20	0,00	186 ($\sigma=19$)	Non dosé	Non

Commentaires :

Cet échantillon présente la structure d'un acier homogène faiblement carburé.

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

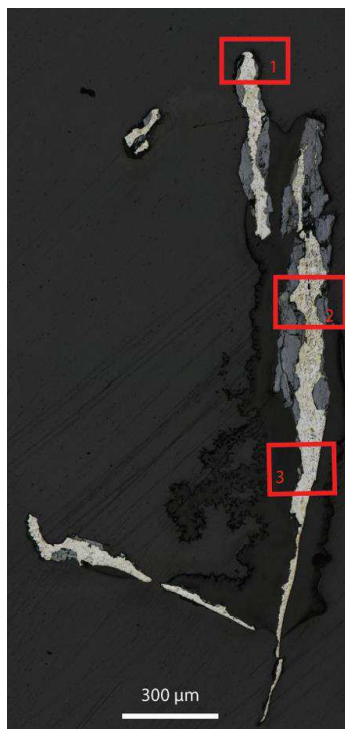
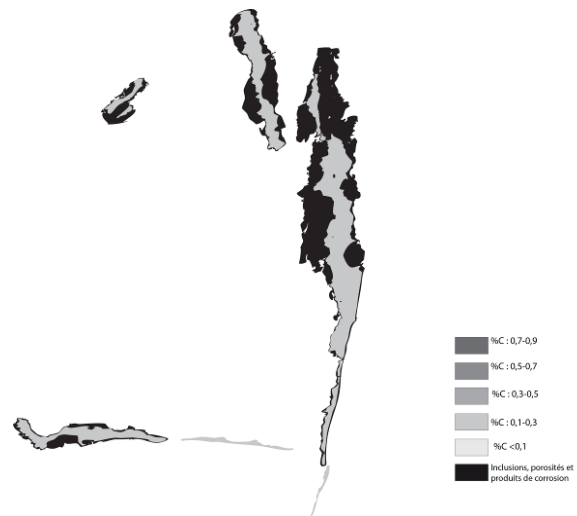
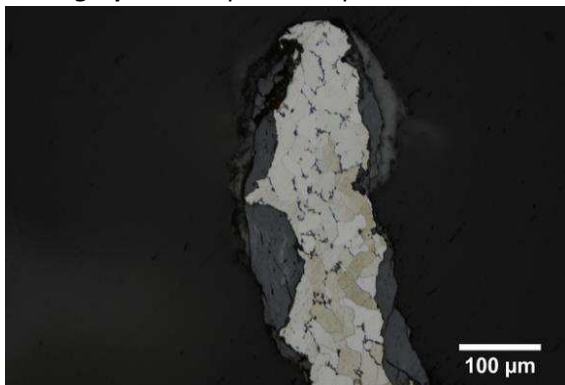


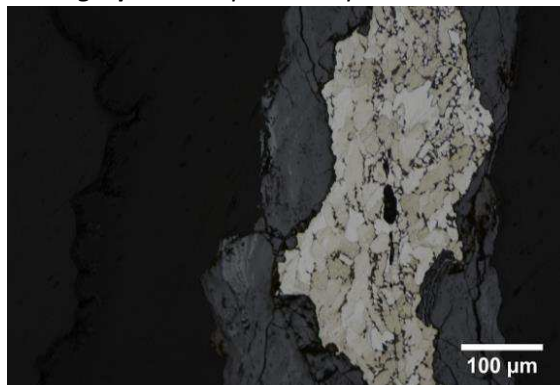
Schéma correspondant



Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



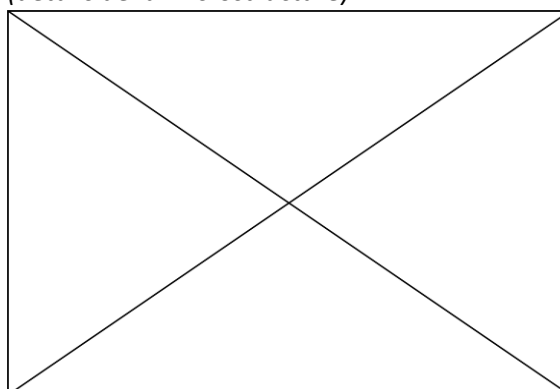
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
Non défini	Non défini

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Non défini	Non défini
Abaque	Non défini	
PROCEDE	Non défini	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon HPO618.2_2

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : HPO618.2

Numéro de l'élément d'armure : HPO618.2

Lieu de conservation : Musée de l'Armée (Paris)

Lieu de découverte :

Description : Timbre de salade daté du XVe siècle issu de la collection Georges Pauilhac acquise par le musée de l'Armée en 1964 (Notice du musée de l'Armée)

Datation : XVe siècle (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Indéterminée

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Timbre de salade

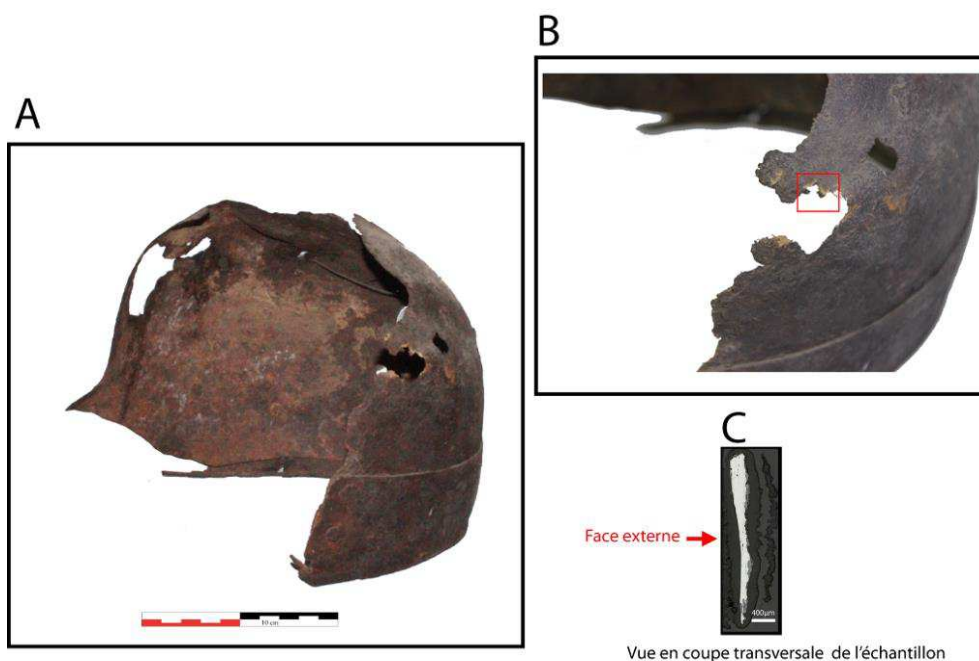
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique :

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé sur un bord endommagé dans la partie supérieure de la pièce.

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (µm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[<50]	Lamellaire	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
1,5	0,20	0,00	177 ($\sigma = 8$)	Non dosé	Non

Commentaires :

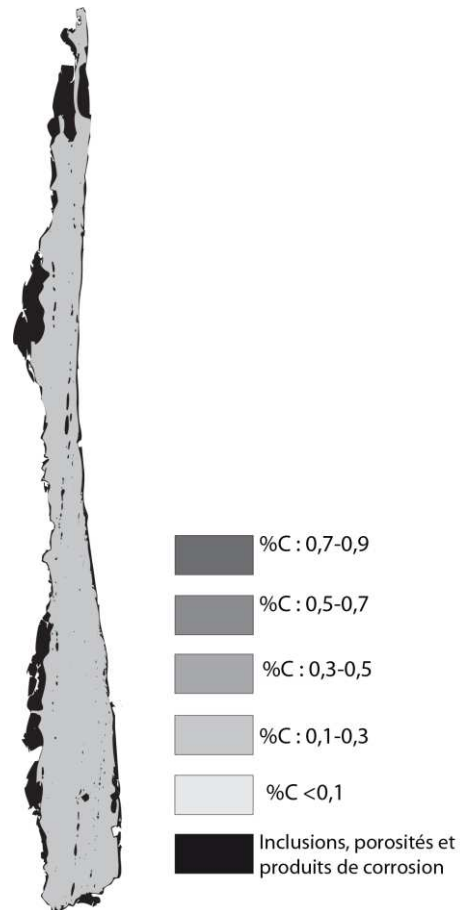
Le métal présente la structure d'un acier homogène faiblement carburé.

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)



Schéma correspondant



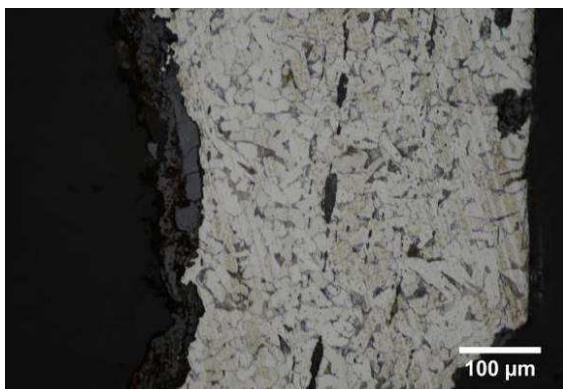
Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



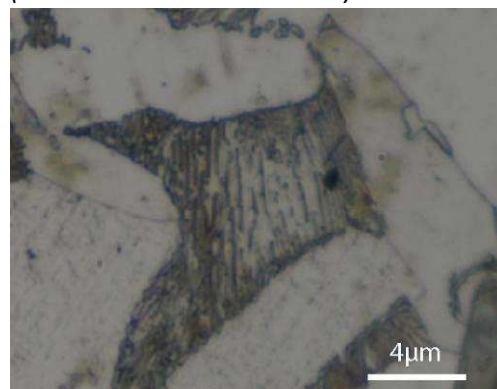
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
4	1,4

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Direct	0,13
Abaque	Indéterminé	
PROCEDE	Direct	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon HPO618

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : HPO618

Numéro de l'élément d'armure : HPO618

Lieu de conservation : Musée de l'Armée (Paris)

Lieu de découverte :

Description : Timbre de petite salade espagnole daté du XVe siècle issu de la collection Georges Pauilhac acquise par le musée de l'Armée en 1964 (Notice du musée de l'Armée)

Datation : XVe siècle (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Espagne

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Timbre de salade

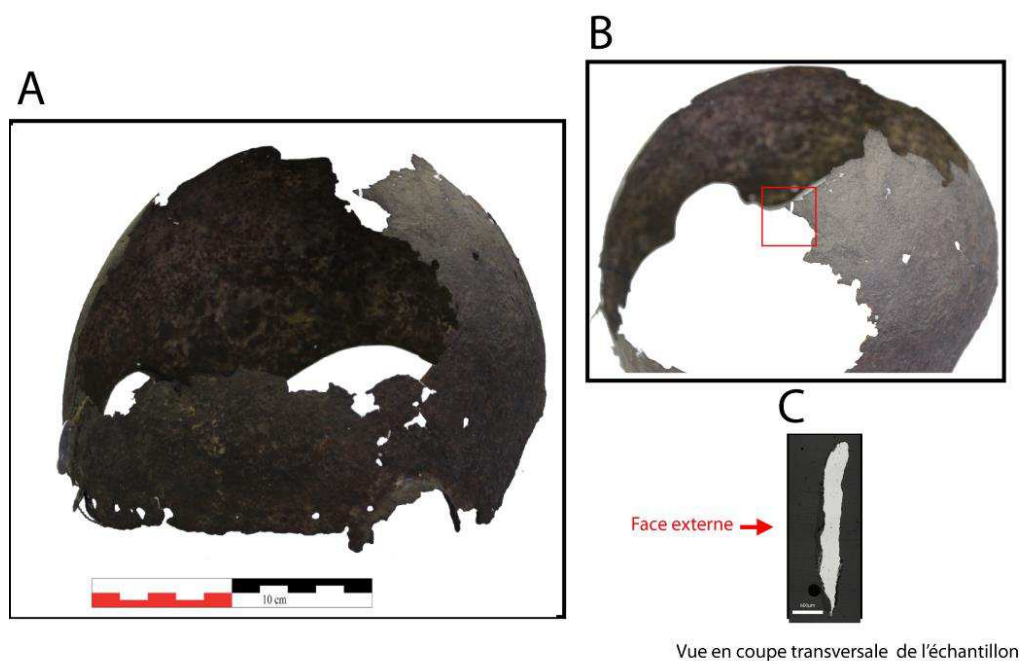
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique :

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé sur un bord endommagé de cette salade

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
Ind	Non résolue	Oui	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
0,8	>0,3	0,00	474 ($\sigma=24$)	Non dosé	Non

Commentaires :

Cet échantillon présente un faciès typique de structure de trempe homogène (martensite et bainite). La teneur en carbone ne peut pas être déterminée précisément par métallographie. Il s'agit toutefois d'un acier moyennement carburé (%C>0,3 et %C<0,7)

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

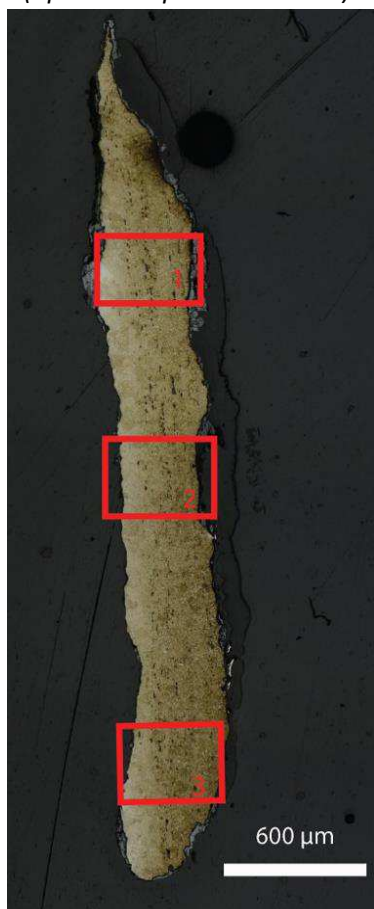
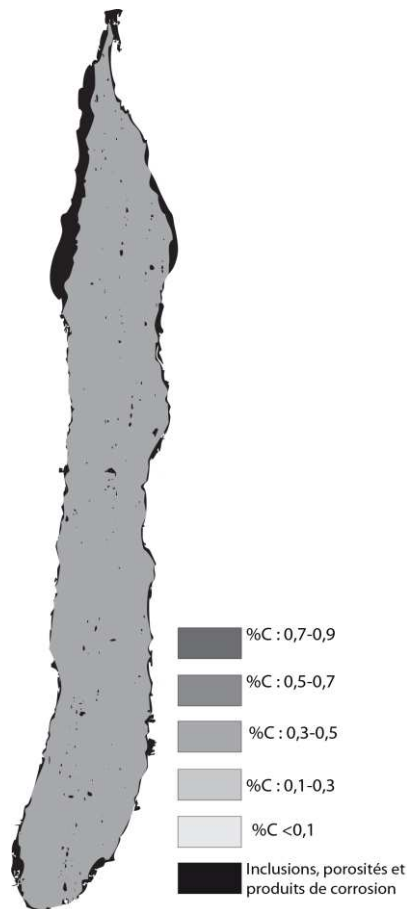
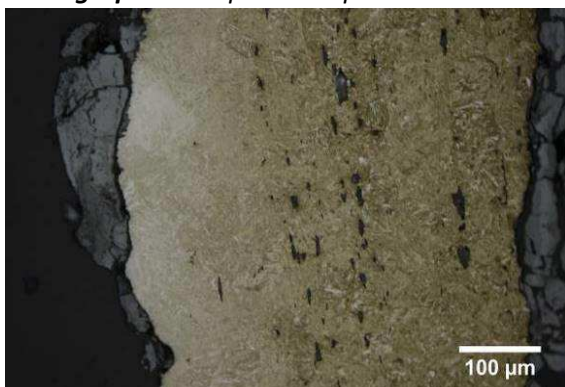


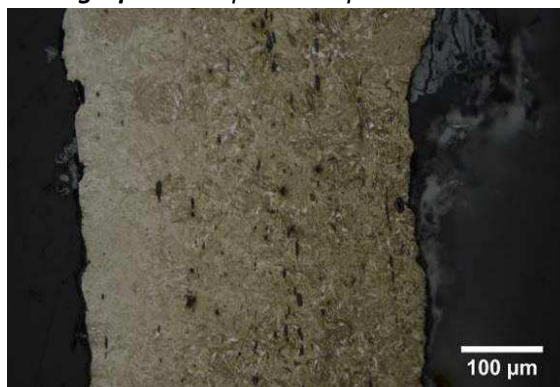
Schéma correspondant



Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



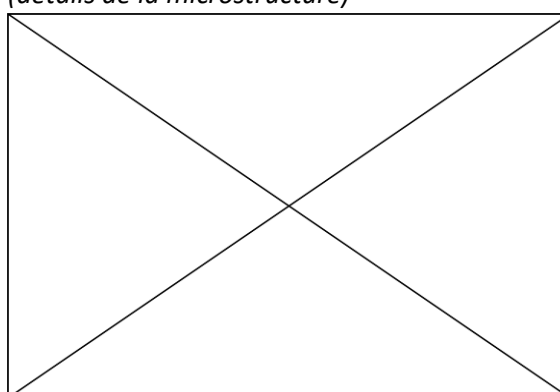
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
3	1

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Direct	<0,01
Abaque	Direct	
PROCEDE	Direct	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Oui	Oui	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon 11423

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : 11423

Numéro de l'élément d'armure : 11423

Lieu de conservation : Musée de l'Armée (Paris)

Lieu de découverte :

Description : Plastron de demi-armure de lansquenet, fabriquée dans les années 1550 à Nuremberg (notice du musée de l'Armée).

Datation : 1550 (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Allemagne

Ville : Nuremberg

Élément de l'armure étudié : Plastron

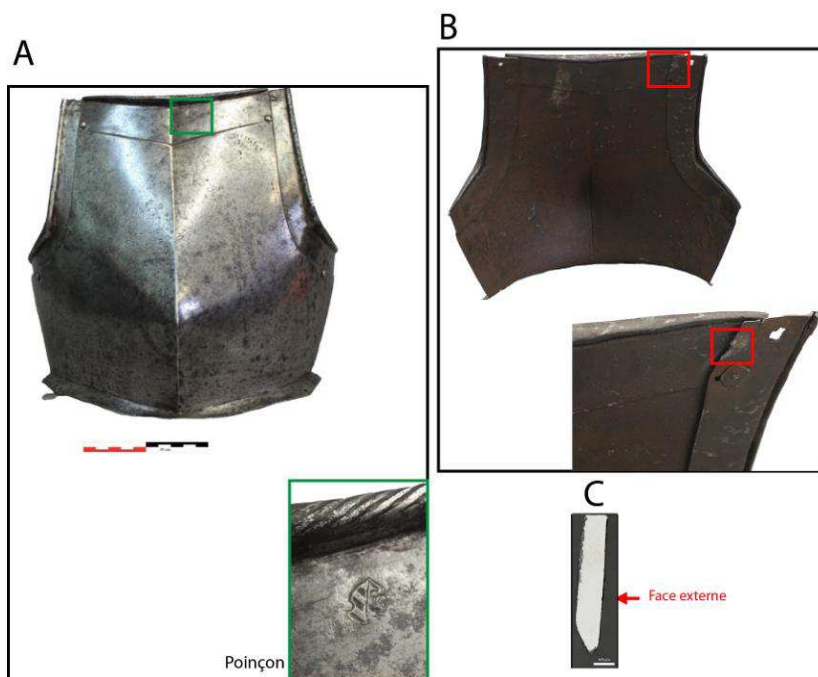
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Oui

Détails de la (ou des) marque(s) : marque de la ville de Nuremberg

Référence bibliographique :

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé sur la partie interne du plastron au niveau de l'épaule droite.

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[50-200]	Non résolue	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
<0,1	0,06	0,00	155 ($\sigma=16$)	0,15	Non

Commentaires :

Cet échantillon présente une structure ferritique à taille de grain hétérogène. L'attaque au réactif Oberhoffer n'avait pas permis de mettre en évidence la présence de structures fantômes. Toutefois du phosphore a été détecté dans le métal à hauteur de 0,15%mass. Il s'agit donc d'un fer phosphoreux.

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

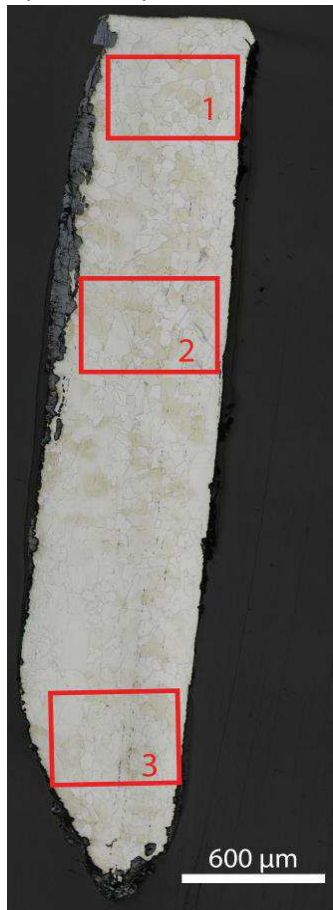
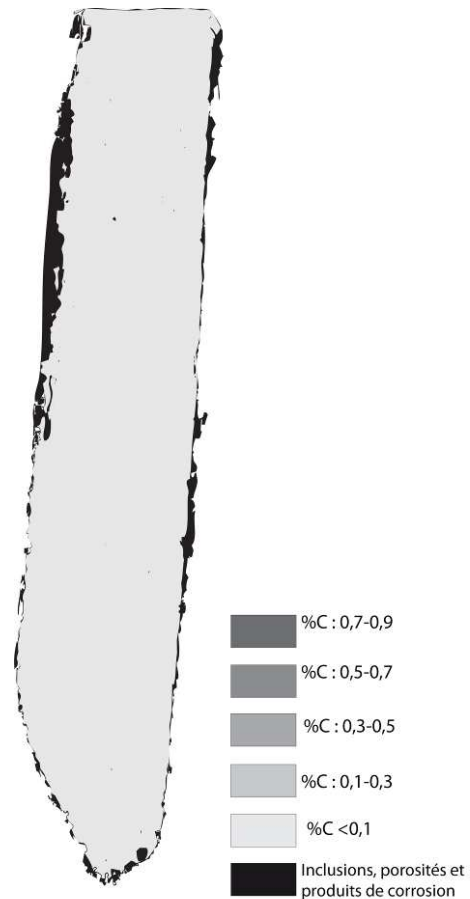
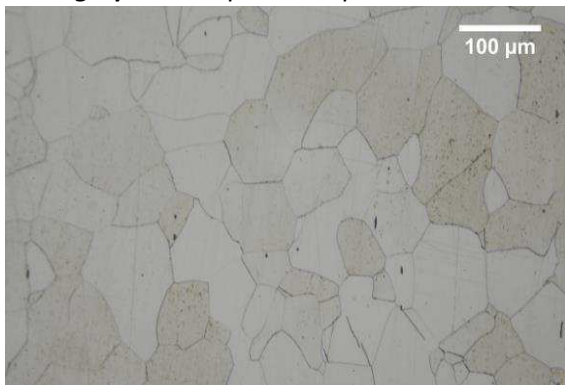


Schéma correspondant



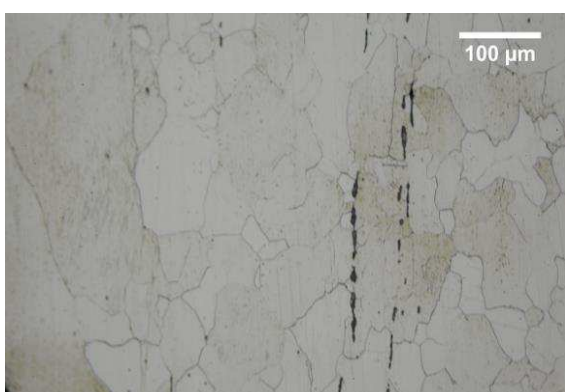
Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



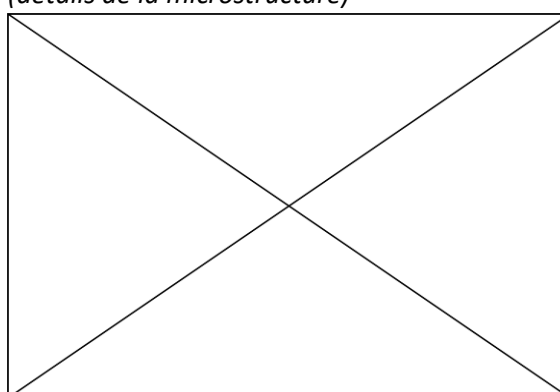
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
4	1,3

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Indirect	$p(\text{classe1}) > 0,99$ $p(\text{classe3}) = 0,97$
Abaque	Indirect	
PROCEDE	Indirect	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon G204_ech1

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : G204

Numéro de l'élément d'armure : G204

Lieu de conservation : Musée de l'Armée (Paris)

Lieu de découverte :

Description : Plastron de demi armure de lansquenet fabriquée à Nuremberg vers 1550 (notice du musée de l'Armée).

Datation : 1550 (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Allemagne

Ville : Nuremberg

Élément de l'armure étudié : Plastron

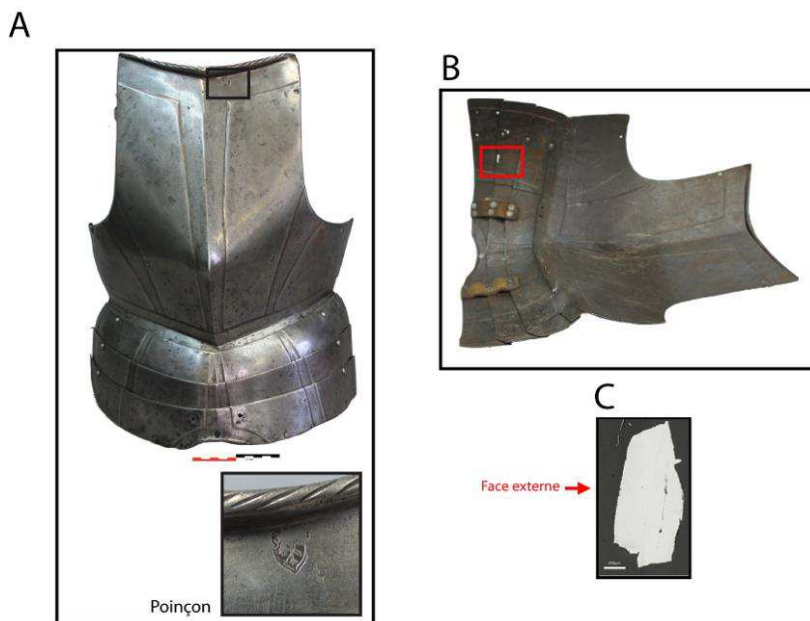
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Oui

Détails de la (ou des) marque(s) : marque de la ville de Nuremberg

Référence bibliographique :

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Le prélèvement a été effectué sur la seconde lame de la partie inférieure de la pièce.

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[50-200]	Non résolue	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
0,6	0,06	0,00	154 ($\sigma=16$)	0,10	Non

Commentaires :

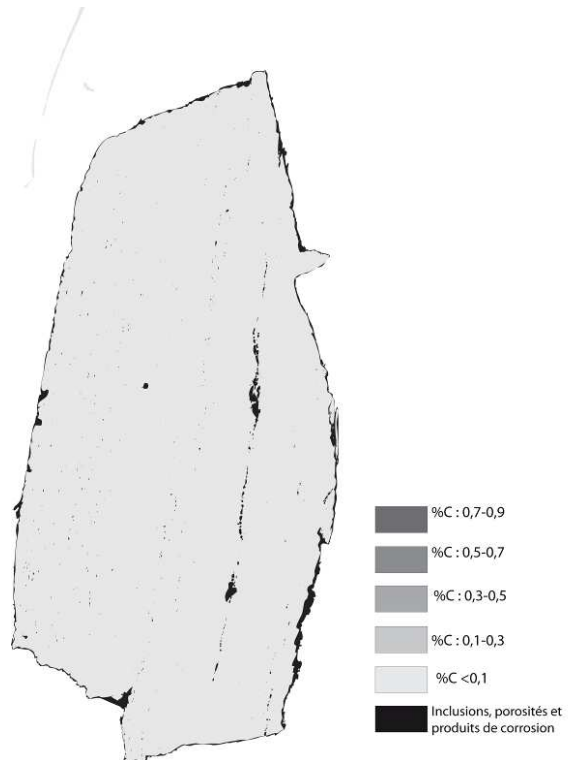
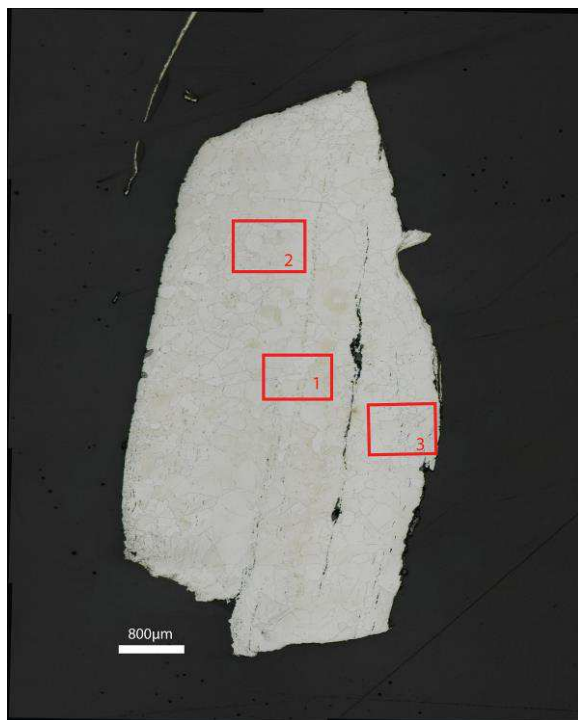
Cet échantillon présente une structure ferritique à taille de grain hétérogène. La présence de phosphore en solution solide dans le métal est attestée à hauteur de 0,1%mass. Il s'agit donc d'un fer phosphoreux

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon

(après attaque au Nital 3%)

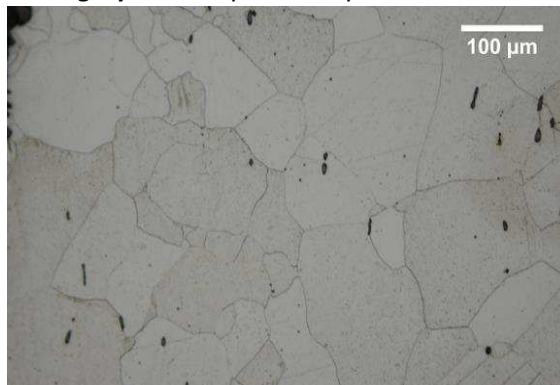
Schéma correspondant



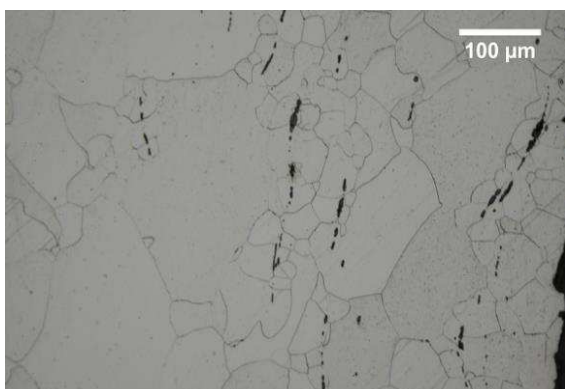
Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



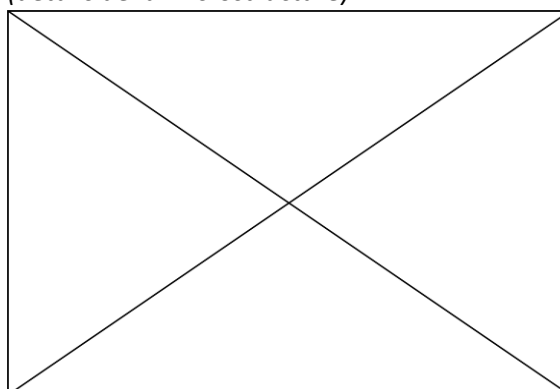
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
5	1,4,5

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Indéterminé	$p(\text{classe1})=0,83$ $p(\text{classe4})>0,99$ $p(\text{classe5})<0,01$
Abaque	Indéterminé	
PROCEDE	Indéterminé	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon G204_ech2

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : G204

Numéro de l'élément d'armure : G204

Lieu de conservation : Musée de l'Armée (Paris)

Lieu de découverte :

Description : Plastron de demi armure de lansquenet fabriquée à Nuremberg vers 1550 (notice du musée de l'Armée).

Datation : 1550 (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Allemagne

Ville : Nuremberg

Élément de l'armure étudié : Plastron

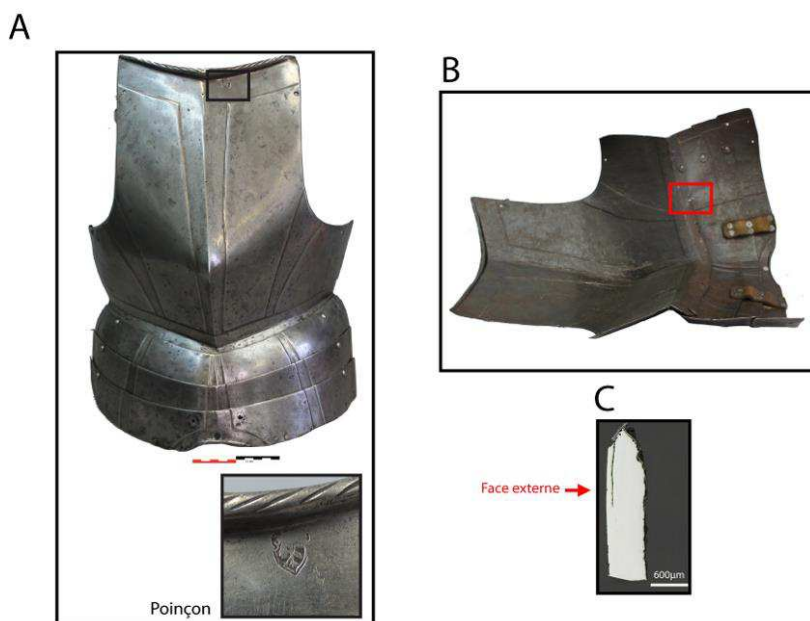
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Oui

Détails de la (ou des) marque(s) : marque de la ville de Nuremberg

Référence bibliographique :

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Le prélèvement a été effectué sur la partie inférieure du plastron

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[50-200]	Non résolue	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
0,1	0,06	0,00	158 ($\sigma=18$)	0,11	Non

Commentaires :

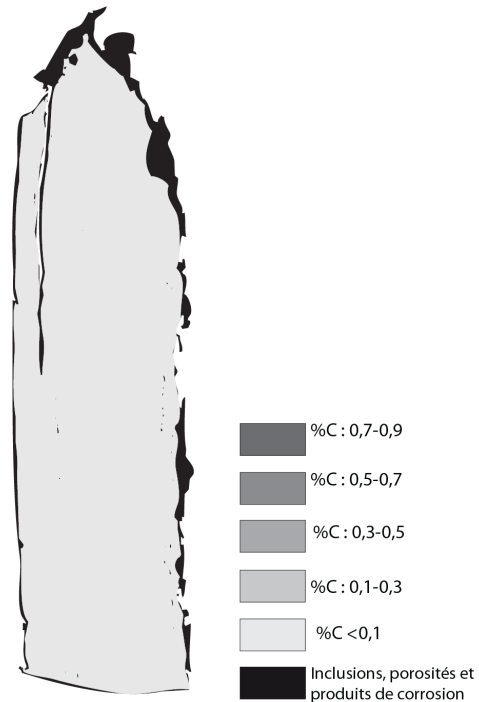
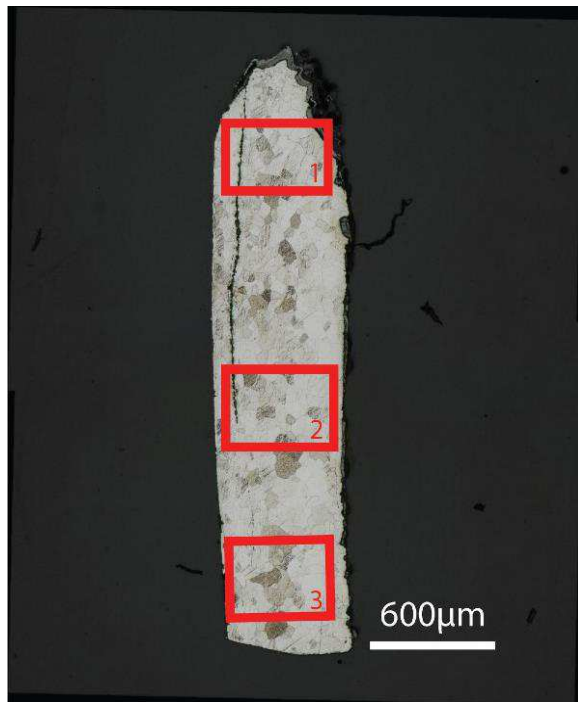
Cet échantillon présente une structure ferritique à taille de grain hétérogène. La présence de phosphore en solution solide dans le métal est attestée à hauteur de 0,1%mass. Il s'agit donc d'un fer phosphoreux

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon

(après attaque au Nital 3%)

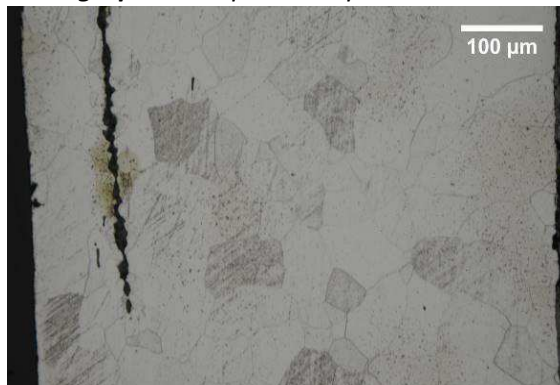
Schéma correspondant



Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



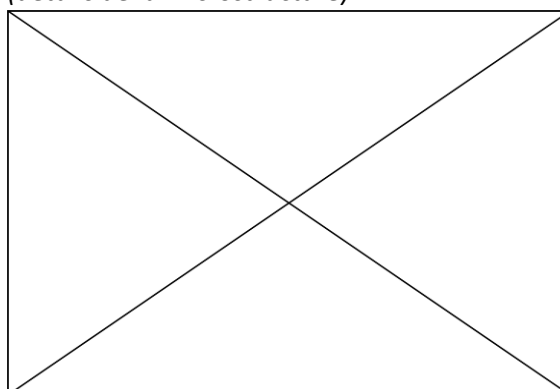
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
2	1

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Indirect	0,87
Abaque	Indirect	
PROCEDE	Indirect	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon SN

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : SN

Numéro de l'élément d'armure : SN

Lieu de conservation : Musée de l'Armée (Paris)

Lieu de découverte :

Description : Dossière de demi armure de lansquenet, en trois pièces, fabriquée à Nuremberg vers 1535-1540 (Notice du Musée de l'Armée)

Datation : 1535-1540 (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Allemagne

Ville : Nuremberg

Élément de l'armure étudié : Dossière

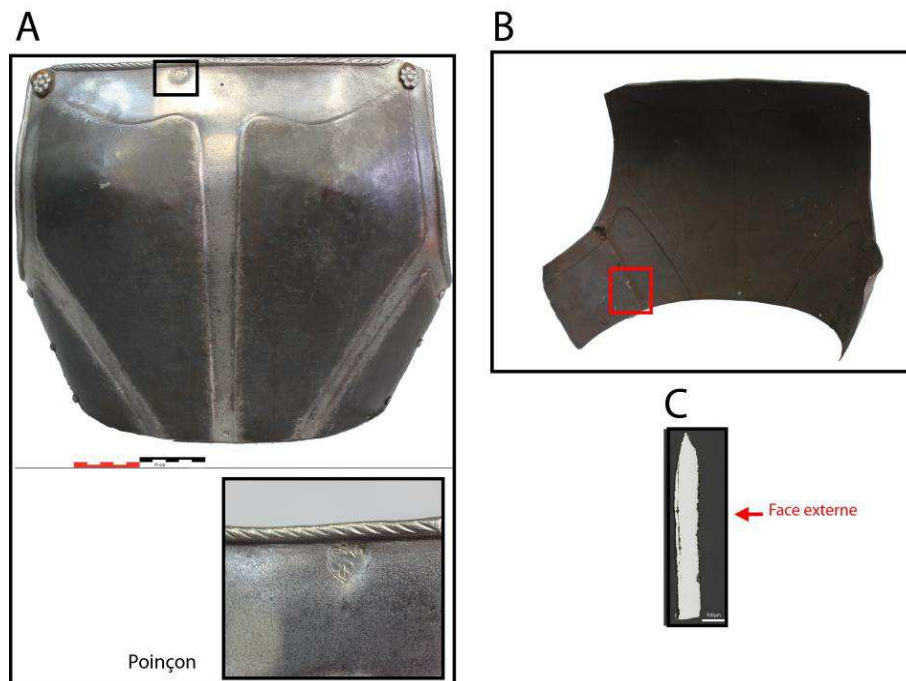
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Oui

Détails de la (ou des) marque(s) : marque de la ville de Nuremberg

Référence bibliographique :

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Le prélèvement a été effectué sur un bord extérieur de la dossière

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[50-200]	Non résolue	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
1,8	0,06	0,00	142 ($\sigma=11$)	<0,1	Non

Commentaires :

Cet échantillon présente une structure ferritique à taille de grain hétérogène

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

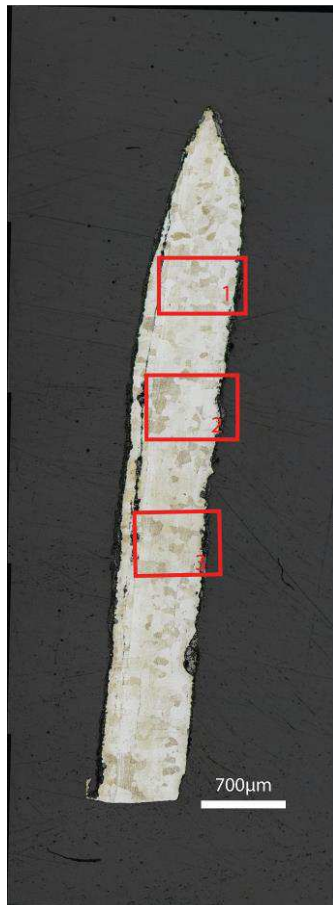
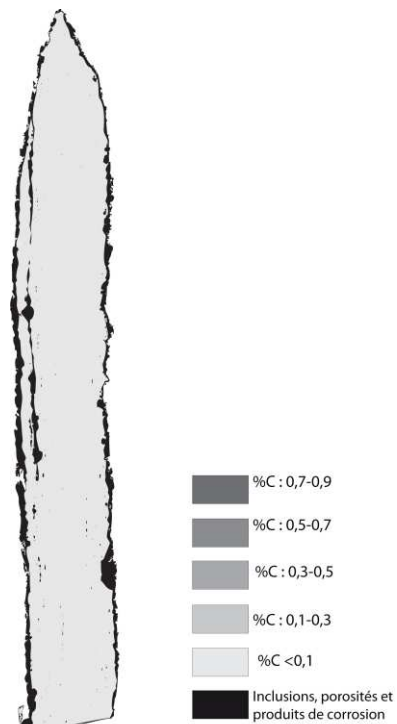


Schéma correspondant



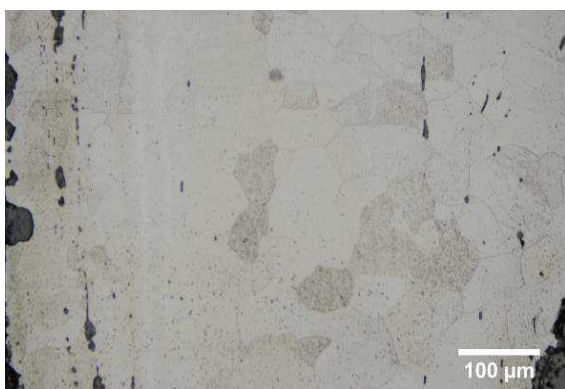
Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



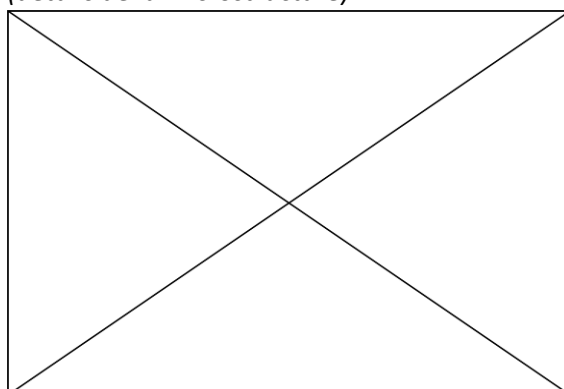
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
8	2

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Direct	0,02
Abaque	Direct	
PROCEDE	Direct	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Oui	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon G143_ech1

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : G143

Numéro de l'élément d'armure : G143

Lieu de conservation : Musée de l'Armée (Paris)

Lieu de découverte :

Description : Bourguignotte d'Anne de Montmorency issue de la collection d'Ambras. Travail français réalisé vers 1550 (notice du musée de l'Armée).

Datation : 1550 (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : France

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Bourguignotte

Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique :

Repérage du prélèvement

A



B



C



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Le prélèvement a été effectué sur la seconde lame protégeant le cou.

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (µm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[<50]	Lamellaire	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
0,3	0,42	0,05	225 (σ= 14)	Non dosé	Non

Commentaires :

Cet échantillon est un acier moyennement carburé légèrement hétérogène. En effet une bande de métal plus carburé se détache (micrographie 1). Elle est certainement liée à l'hétérogénéité du lopin de métal utilisé par l'armurier.

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

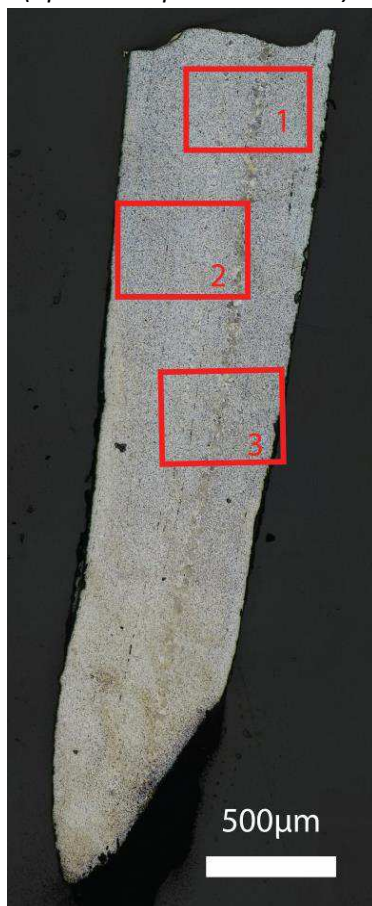
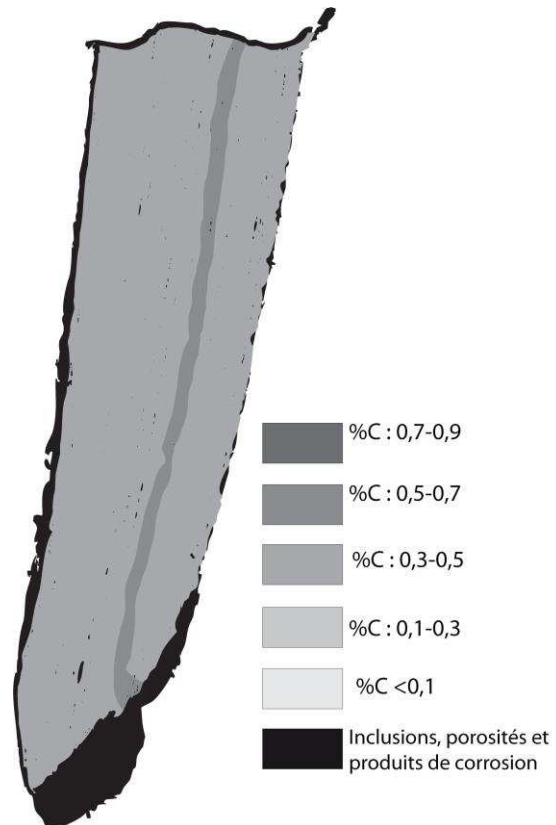
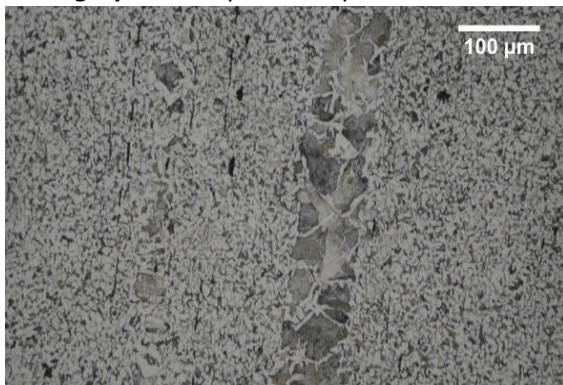


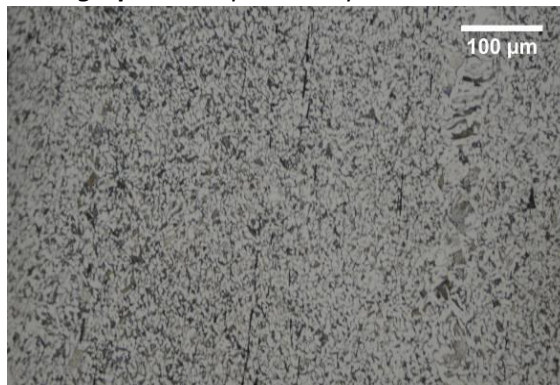
Schéma correspondant



Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



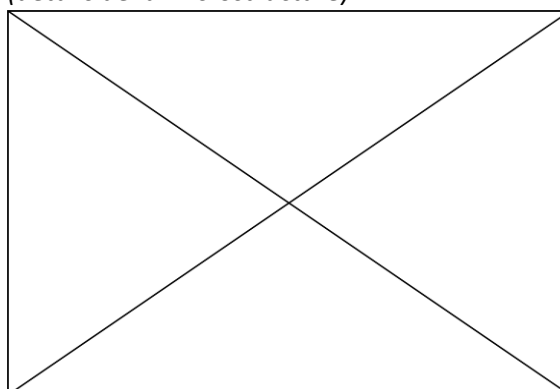
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
5	2,4

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Direct	<0,01
Abaque	Direct	
PROCEDE	Direct	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon G143_ech2

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : G143

Numéro de l'élément d'armure : G143

Lieu de conservation : Musée de l'Armée (Paris)

Lieu de découverte :

Description : Bourguignotte d'Anne de Montmorency issue de la collection d'Ambras. Travail français réalisé vers 1550 (notice du musée de l'Armée).

Datation : 1550 (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : France

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Bourguignotte

Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique :

Repérage du prélèvement

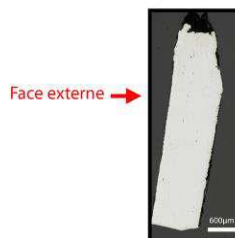
A



B



C



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Le prélèvement a été effectué sur la première lame protégeant le cou.

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[<50]	Lamellaire	Non	Non	Non	Oui

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
0,3	0,29	0,14	173 ($\sigma=29$)	Non dosé	Non

Commentaires :

Cet échantillon présente la structure d'un acier moyennement carburé hétérogène en teneur en carbone. Un léger gradient de teneur en carbone est visible à chacune des extrémités. La pièce étant en bon état de conservation il est peu probable que ce phénomène soit lié à une cémentation, les extrémités de l'échantillon n'étant pas fortement carburées (autour de 0,4% de carbone). L'hétérogénéité observée refléterait plutôt celle du lopin de métal initial utilisé par l'armurier.

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

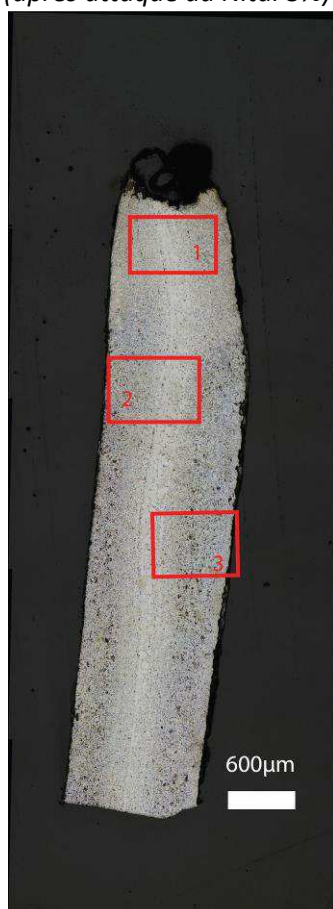
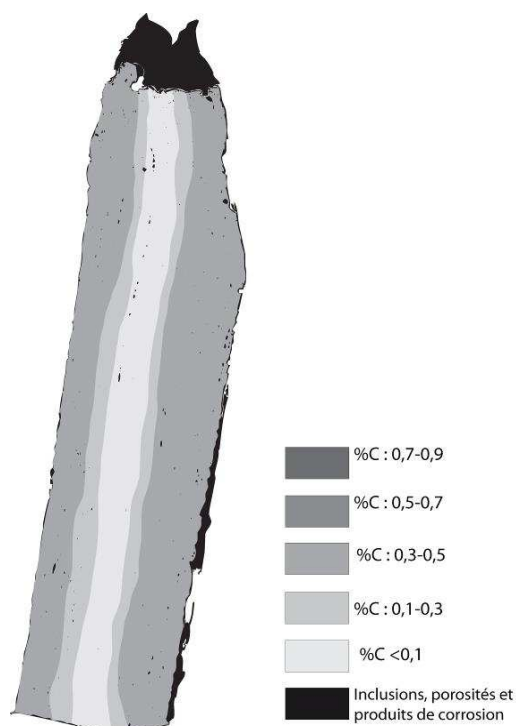
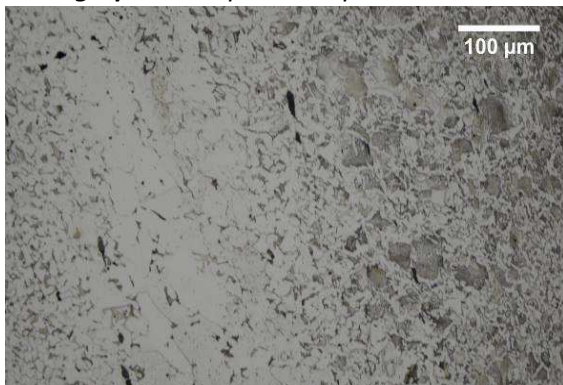


Schéma correspondant



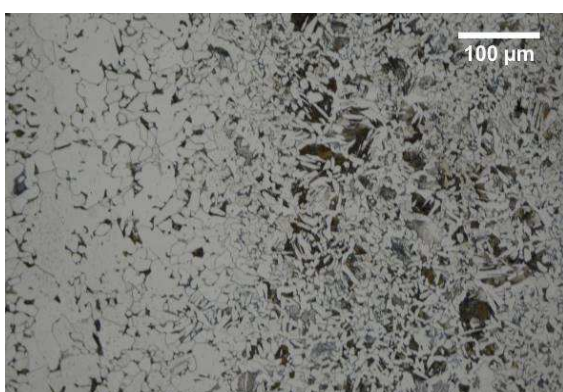
Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



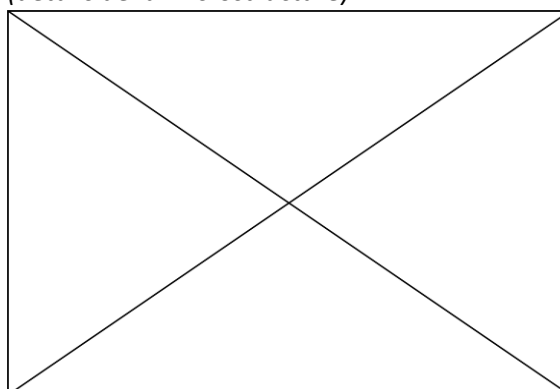
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
3	1,2

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Direct	<0,01
Abaque	Direct	
PROCEDE	Direct	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon G93-1

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : G93-1

Numéro de l'élément d'armure : G93-1

Lieu de conservation : Musée de l'Armée (Paris)

Lieu de découverte :

Description : Fragment de colletin repoussé et doré, travail supposé français réalisé vers 1580-1590 (notice du musée de l'Armée).

Datation : 1580-1590 (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : France

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : colletin

Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique :

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé sur le bord gauche du colletin, au niveau de sa fermeture.

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[50-200]	Non résolue	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
4,8	0,06	0,00	123 ($\sigma=5$)	<0,1	Non

Commentaires :

Cet échantillon présente une structure entièrement ferritique à taille de grains variable.

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

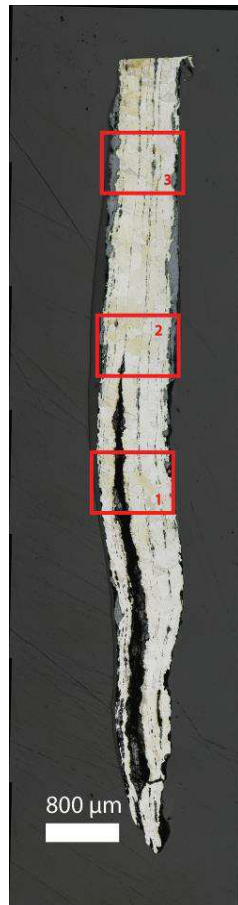
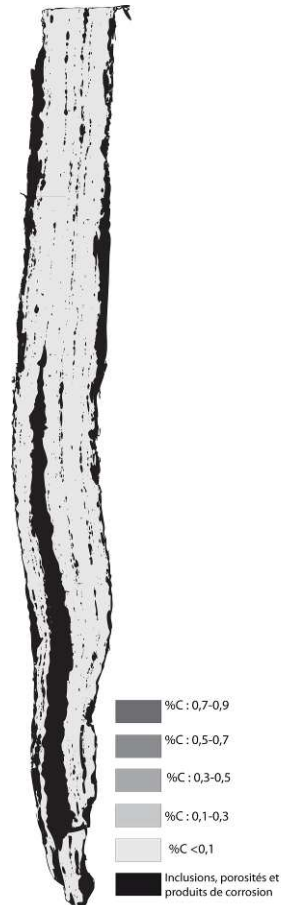
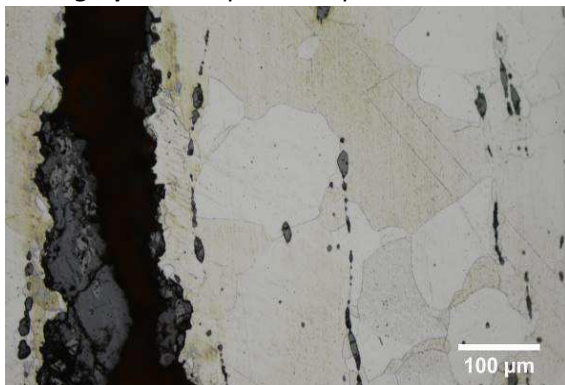


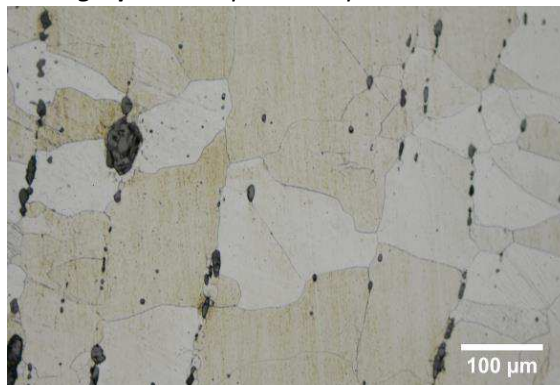
Schéma correspondant



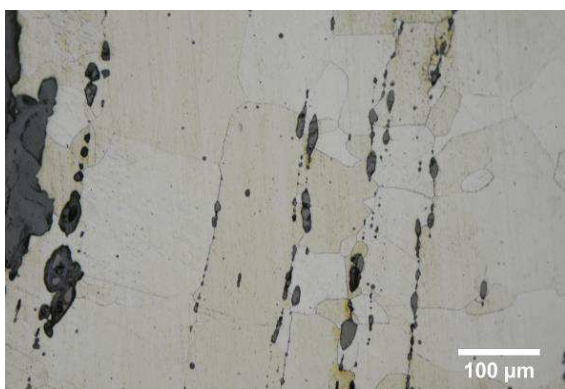
Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



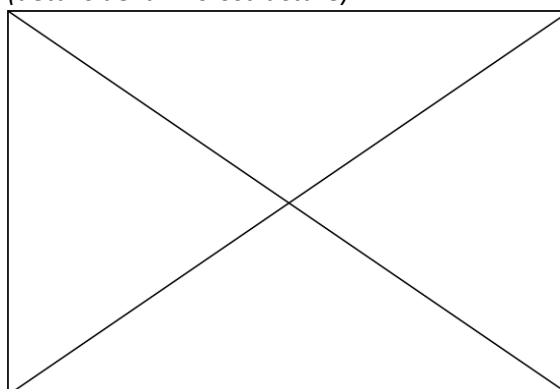
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
5	1,5

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Indirect	>0,99
Abaque	Indirect	
PROCEDE	Indirect	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Dissier, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon G435_ech1

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : G435

Numéro de l'élément d'armure : G435_G

Lieu de conservation : Musée de l'Armée (Paris)

Lieu de découverte :

Description : Cuissard gauche d'une paire issue de l'atelier de Valentin Siebenbürger, armurier Nurembergeois. Elle est datée de 1535-1540 (notice du musée de l'Armée).

Datation : 1535-1540 (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Allemagne

Ville : Nuremberg

Élément de l'armure étudié : Cuissard

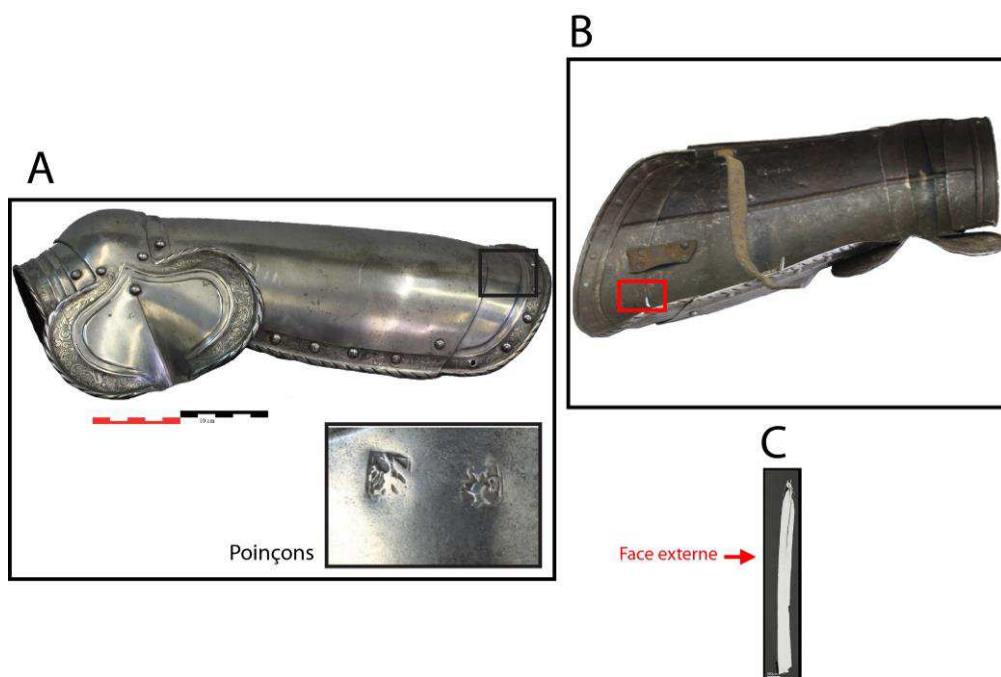
Armurier ou atelier associé : Valentin Siebenbürger

Présence de marque(s) : Oui

Détails de la (ou des) marque(s) : marque de la ville de Nuremberg et de Valentin Siebenbürger

Référence bibliographique :

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé sur la partie supérieure du cuissard.

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[<50]	Non résolue	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
1,4	0,37	0,07	247 ($\sigma=17$)	Non dosé	Non

Commentaires :

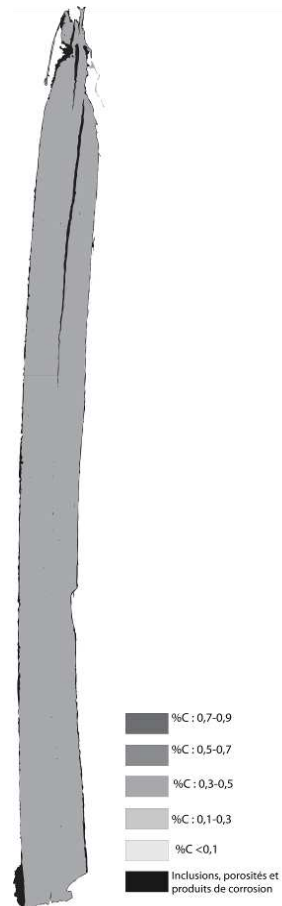
Cet échantillon présente la structure d'un acier moyennement carburé.

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)



Schéma correspondant



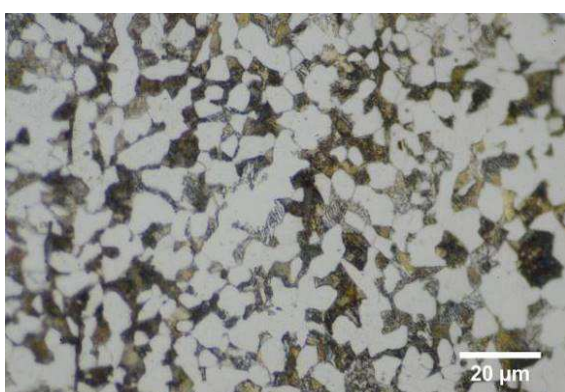
Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



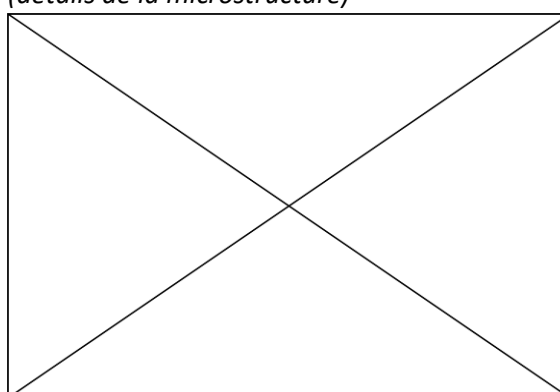
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
4	1,3,4

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Direct	<0,01
Abaque	Direct	
PROCEDE	Direct	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Oui	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon G435_ech2

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : G435

Numéro de l'élément d'armure : G435_G

Lieu de conservation : Musée de l'Armée (Paris)

Lieu de découverte :

Description : Cuissard gauche d'une paire issue de l'atelier de Valentin Siebenbürger, armurier Nurembergeois. Elle est datée de 1535-1540 (notice du musée de l'Armée).

Datation : 1535-1540 (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Allemagne

Ville : Nuremberg

Élément de l'armure étudié : Cuissard

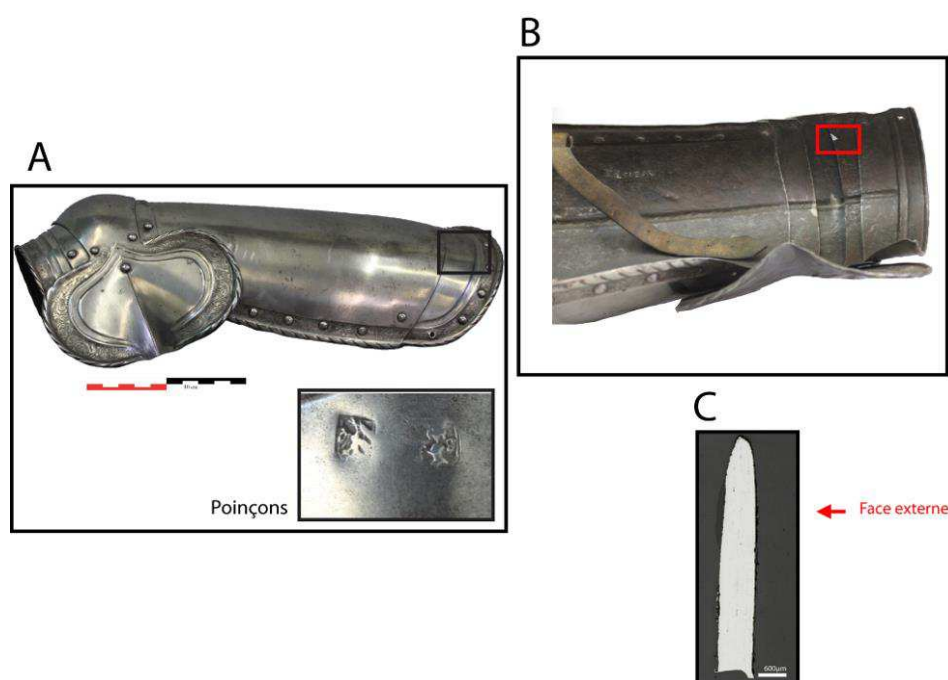
Armurier ou atelier associé : Valentin Siebenbürger

Présence de marque(s) : Oui

Détails de la (ou des) marque(s) : marque de la ville de Nuremberg et de Valentin Siebenbürger

Référence bibliographique :

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé sur la 3ème lame du cuissard protégeant le genou

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[<50]	Non résolue	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
0,5	0,17	0,06	147 ($\sigma=13$)	Non dosé	Non

Commentaires :

Cet échantillon présente la structure d'un acier moyennement carburé.

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

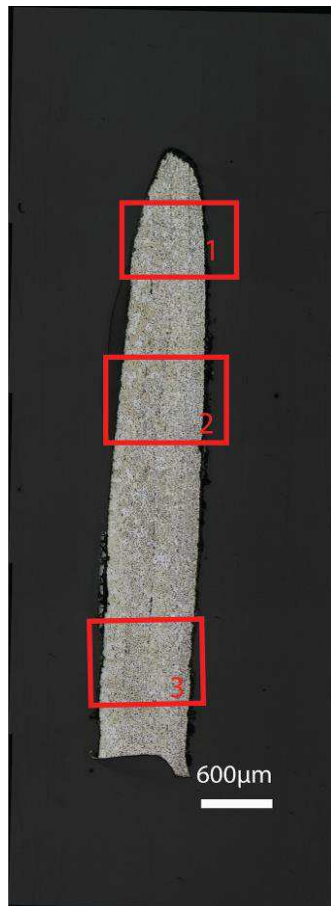
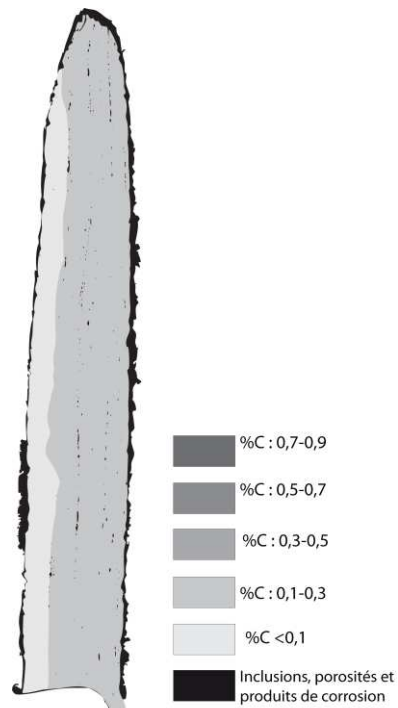


Schéma correspondant



Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



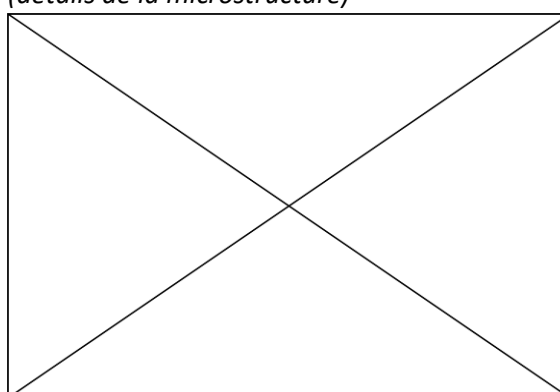
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
3	3

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Direct	<0,01
Abaque	Direct	
PROCEDE	Direct	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Oui	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon G435_G3

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : G435

Numéro de l'élément d'armure : G435_G

Lieu de conservation : Musée de l'Armée (Paris)

Lieu de découverte :

Description : Cuissard gauche d'une paire issue de l'atelier de Valentin Siebenbürger, armurier Nurembergeois. Elle est datée de 1535-1540 (notice du musée de l'Armée).

Datation : 1535-1540 (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Allemagne

Ville : Nuremberg

Élément de l'armure étudié : Cuissard

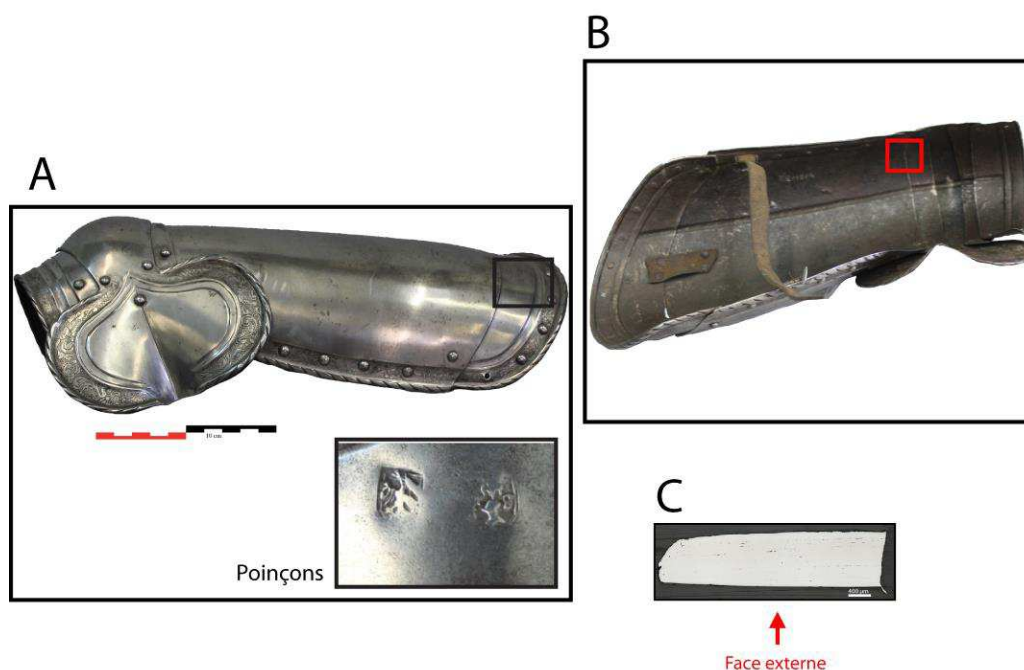
Armurier ou atelier associé : Valentin Siebenbürger

Présence de marque(s) : Oui

Détails de la (ou des) marque(s) : marque de la ville de Nuremberg et de Valentin Siebenbürger

Référence bibliographique :

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé sur la lame centrale du cuissard

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[<50]	Lamellaire	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
0,8	0,26	0,14	172 ($\sigma=25$)	Non dosé	Non

Commentaires :

Cet échantillon présente la structure d'un acier ferrito perlitique hétérogène en teneur en carbone.

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon

(après attaque au Nital 3%)

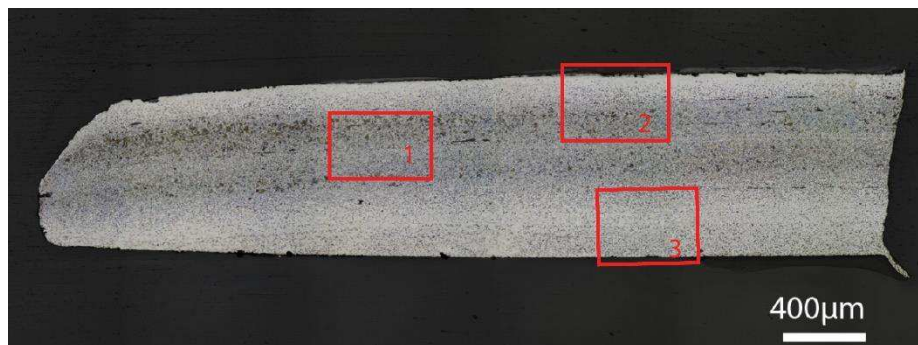


Schéma correspondant



Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



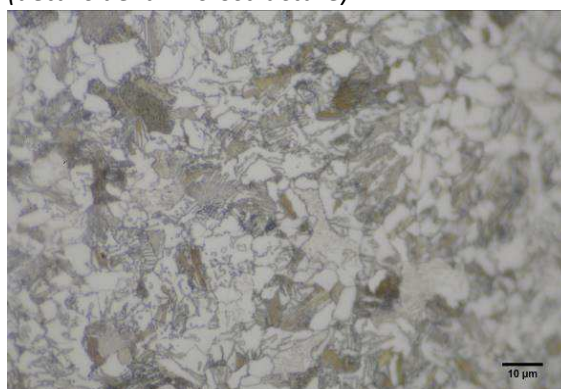
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
5	2

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Direct	<0,01
Abaque	Direct	
PROCEDE	Direct	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Oui	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon G435_G4

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : G435

Numéro de l'élément d'armure : G435_G

Lieu de conservation : Musée de l'Armée (Paris)

Lieu de découverte :

Description : Cuissard gauche d'une paire issue de l'atelier de Valentin Siebenbürger, armurier Nurembergeois. Elle est datée de 1535-1540 (notice du musée de l'Armée).

Datation : 1535-1540 (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Allemagne

Ville : Nuremberg

Élément de l'armure étudié : Cuissard

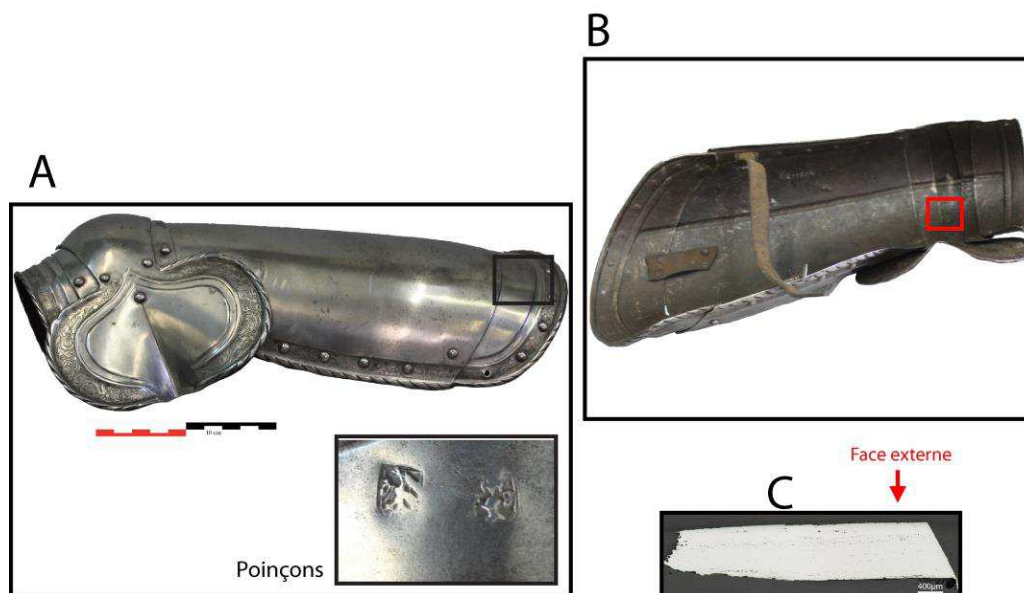
Armurier ou atelier associé : Valentin Siebenbürger

Présence de marque(s) : Oui

Détails de la (ou des) marque(s) : marque de la ville de Nuremberg et de Valentin Siebenbürger

Référence bibliographique :

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé sur la troisième lame du cuissard

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[<50]	Non résolue	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
1,0	0,17		162 ($\sigma=17$)	Non dosé	Non

Commentaires :

Cet échantillon présente la structure d'un acier ferrito perlitique faiblement carburé (%C* < 0,2). Sur la partie centrale se détache une bande moins carburée.

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon (après attaque au Nital 3%)

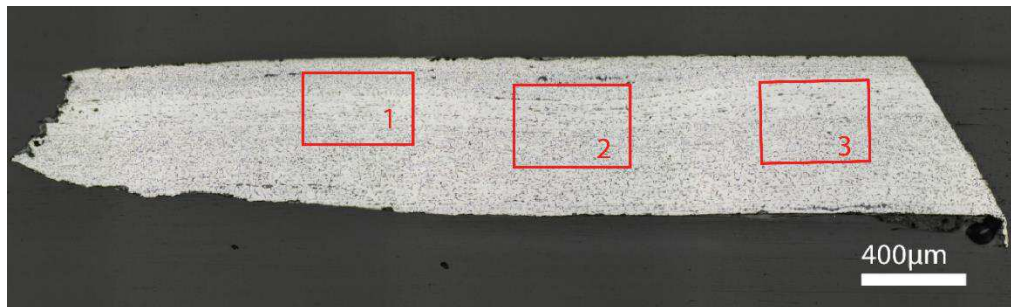
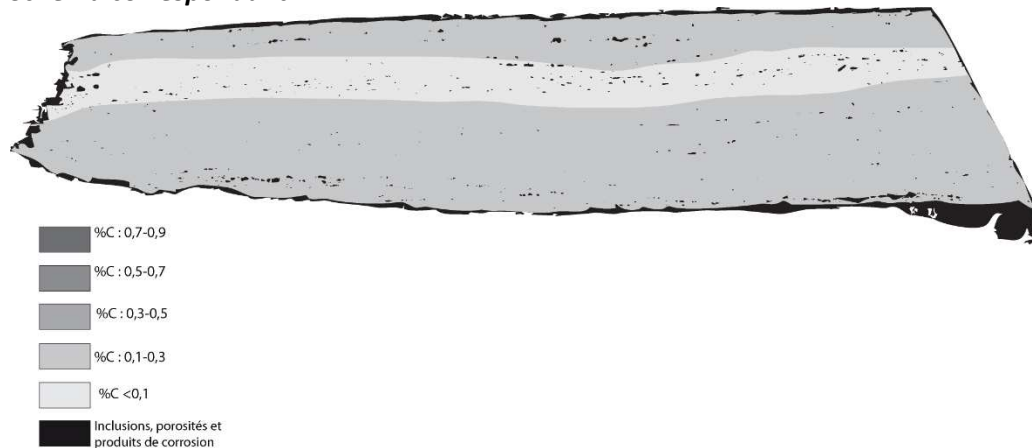


Schéma correspondant



Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



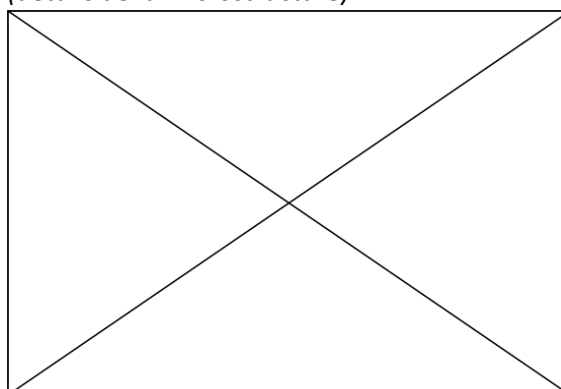
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
7	5

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Direct	<0,01
Abaque	Direct	
PROCEDE	Direct	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon G435_G5

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : G435

Numéro de l'élément d'armure : G435_G

Lieu de conservation : Musée de l'Armée (Paris)

Lieu de découverte :

Description : Cuissard gauche d'une paire issue de l'atelier de Valentin Siebenbürger, armurier Nurembergeois. Elle est datée de 1535-1540 (notice du musée de l'Armée).

Datation : 1535-1540 (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Allemagne

Ville : Nuremberg

Élément de l'armure étudié : Cuissard

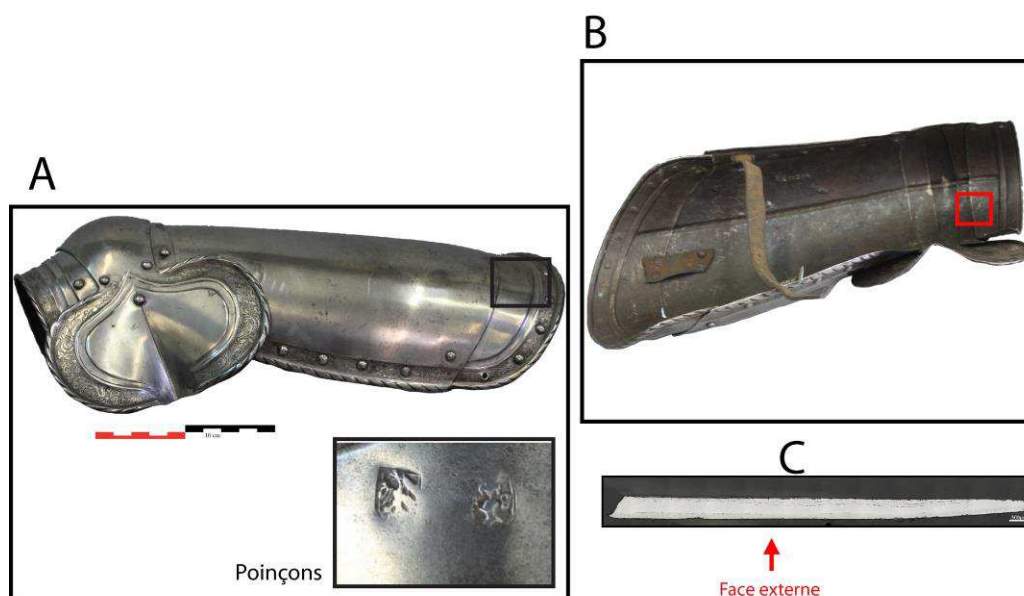
Armurier ou atelier associé : Valentin Siebenbürger

Présence de marque(s) : Oui

Détails de la (ou des) marque(s) : marque de la ville de Nuremberg et de Valentin Siebenbürger

Référence bibliographique :

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé sur la cinquième lame du cuissard

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[50-200] et [>200]	Non résolue	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
1,6	0,09		132 ($\sigma=18$)	Non dosé	Non

Commentaires :

Cet échantillon présente la structure d'un acier faiblement carburé (%C* $<0,1$). Une bande ferrito perlitique plus carburée est présente sur une des extrémités de l'échantillon.

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon

(après attaque au Nital 3%)

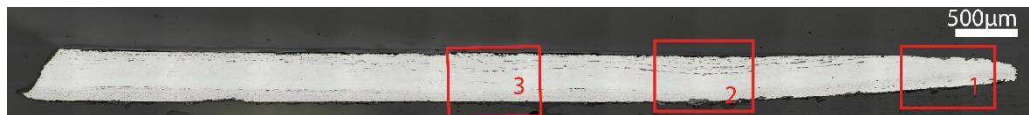
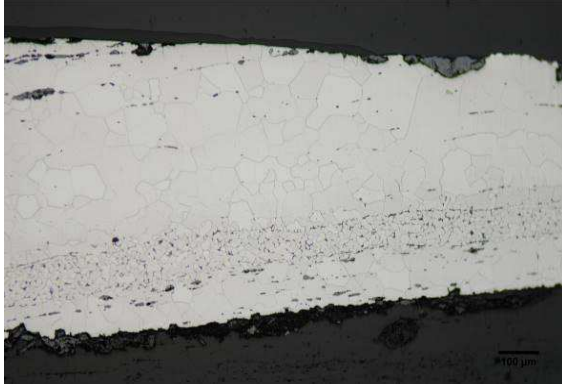


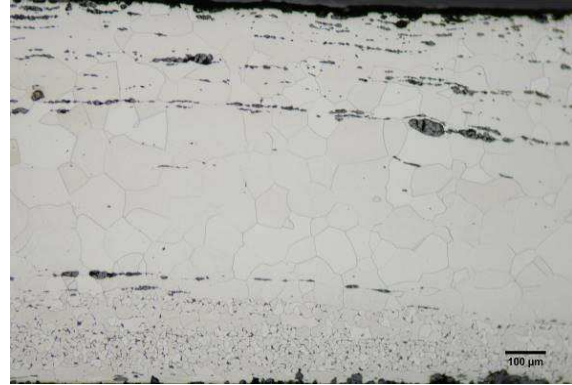
Schéma correspondant



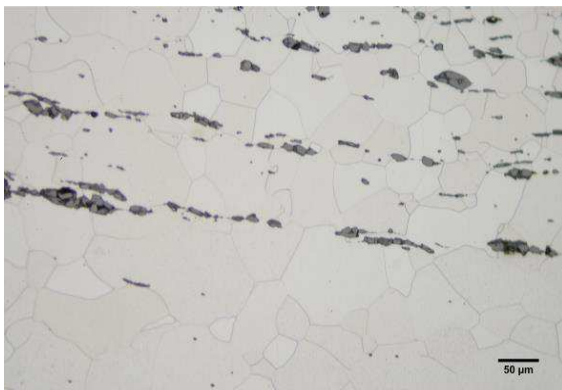
Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



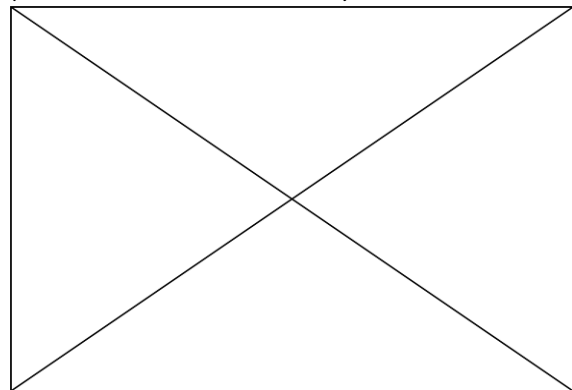
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
7	6,7

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Direct	<0,01
Abaque	Direct	
PROCEDE	Direct	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon G436_ech1

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : G436

Numéro de l'élément d'armure : G436_G

Lieu de conservation : Musée de l'Armée (Paris)

Lieu de découverte :

Description : Cuissard gauche d'une paire issue de l'atelier de Valentin Siebenbürger, armurier Nurembergeois. Elle est datée de 1535-1540 (notice du musée de l'Armée).

Datation : 1535-1540 (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Allemagne

Ville : Nuremberg

Élément de l'armure étudié : Cuissard

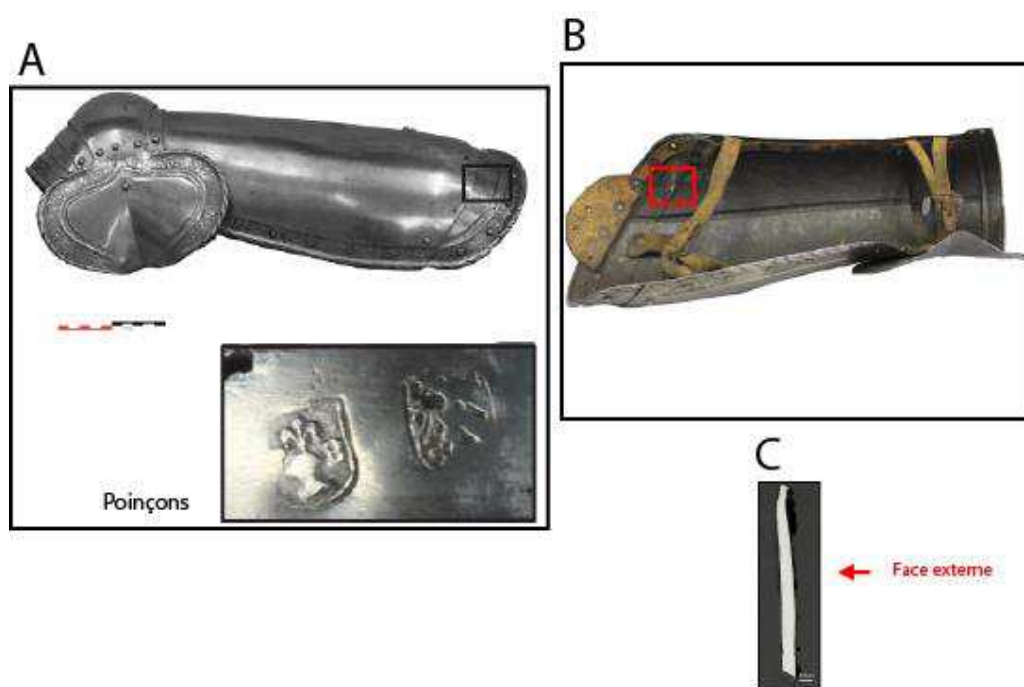
Armurier ou atelier associé : Valentin Siebenbürger

Présence de marque(s) : Oui

Détails de la (ou des) marque(s) : marque de la ville de Nuremberg et de Valentin Siebenbürger

Référence bibliographique :

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé sur la partie supérieure du cuissard. Le prélèvement effectué à cet endroit s'est brisé en deux lors de la découpe. Cet échantillon correspond à la partie supérieure de la tôle.

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
Ind	Non résolue	Oui	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
1,1	>0,3	0,00	361 ($\sigma=35$)	Non dosé	Non

Commentaires :

Cet échantillon présente une structure de trempe hétérogène. Il alterne des bandes ferritiques avec d'autres comprenant des structures de trempe (martensite et bainite). Sa structure pourrait se rapprocher de celle des aciers modernes dits "dual-phase".

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

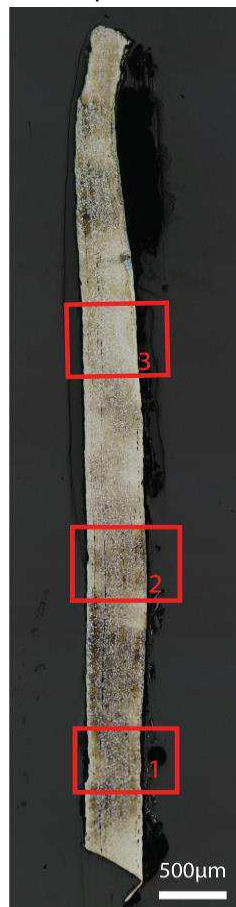
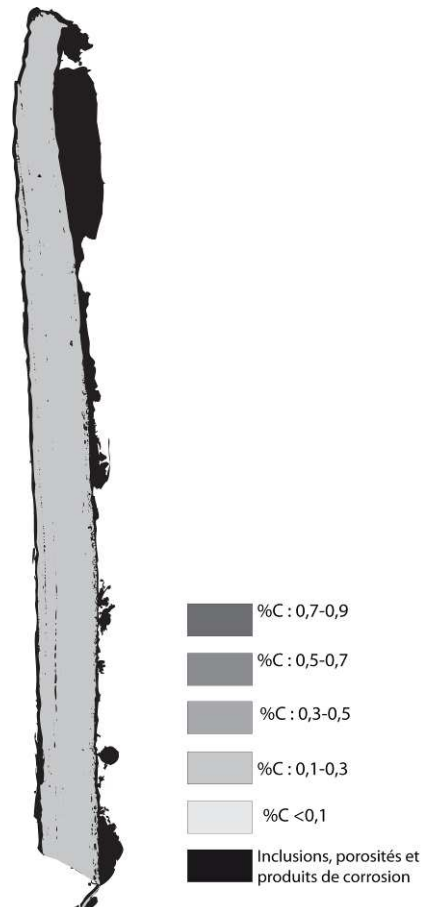


Schéma correspondant



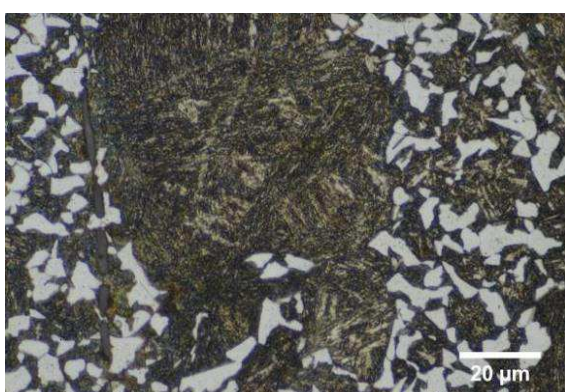
Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



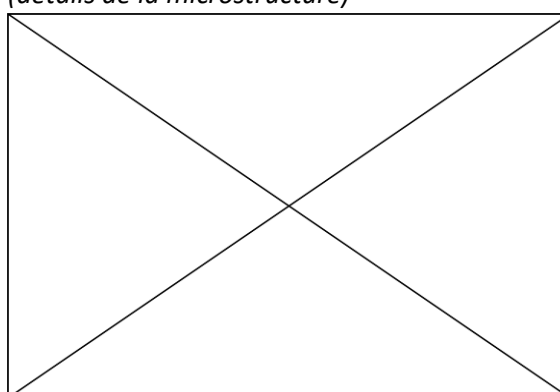
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
6	1,2

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Direct	<0,01
Abaque	Direct	
PROCEDE	Direct	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Oui	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon G436_ech2

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : G436

Numéro de l'élément d'armure : G436_G

Lieu de conservation : Musée de l'Armée (Paris)

Lieu de découverte :

Description : Cuissard gauche d'une paire issue de l'atelier de Valentin Siebenbürger, armurier Nurembergeois. Elle est datée de 1535-1540 (notice du musée de l'Armée).

Datation : 1535-1540 (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Allemagne

Ville : Nuremberg

Élément de l'armure étudié : Cuissard

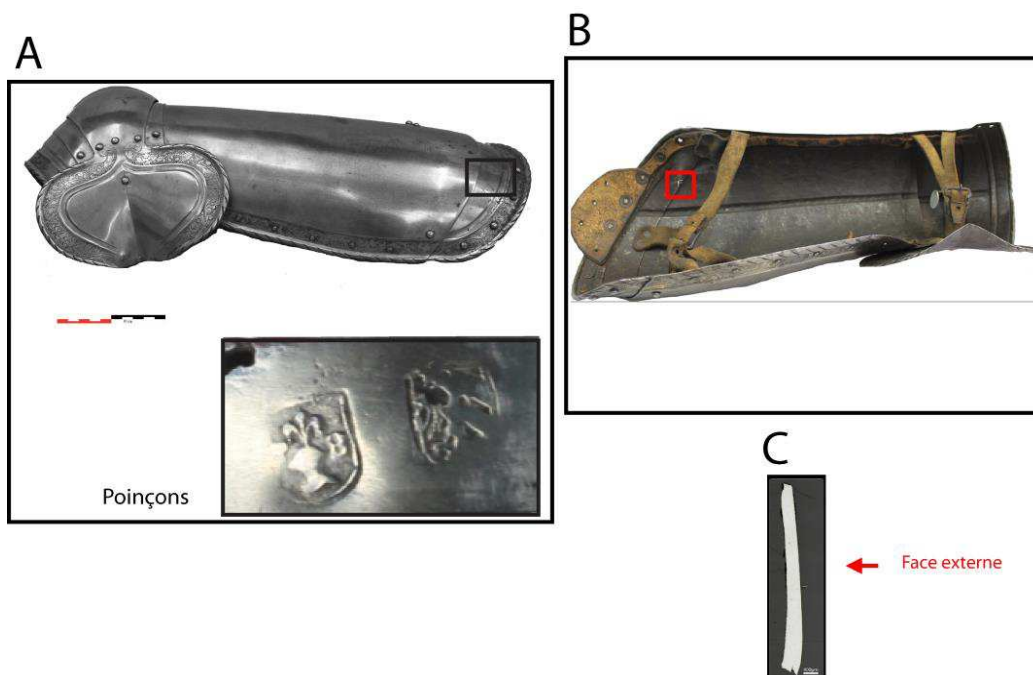
Armurier ou atelier associé : Valentin Siebenbürger

Présence de marque(s) : Oui

Détails de la (ou des) marque(s) : marque de la ville de Nuremberg et de Valentin Siebenbürger

Référence bibliographique :

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé sur la partie supérieure du cuissard. Le prélèvement effectué à cet endroit s'est brisé en deux lors de la découpe. Cet échantillon correspond à la partie inférieure de la tôle.

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
Ind	Non résolue	Oui	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
0,5	>0,3	0,00	444 ($\sigma=13$)	Non dosé	Non

Commentaires :

Cet échantillon présente une structure homogène de trempe. Cette différence de structure avec l'échantillon précédent explique que la tôle se soit brisée lors de la découpe, les deux parties la constituant n'étant pas homogènes.

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

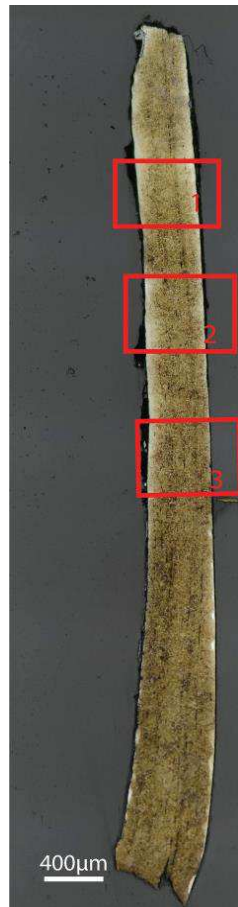
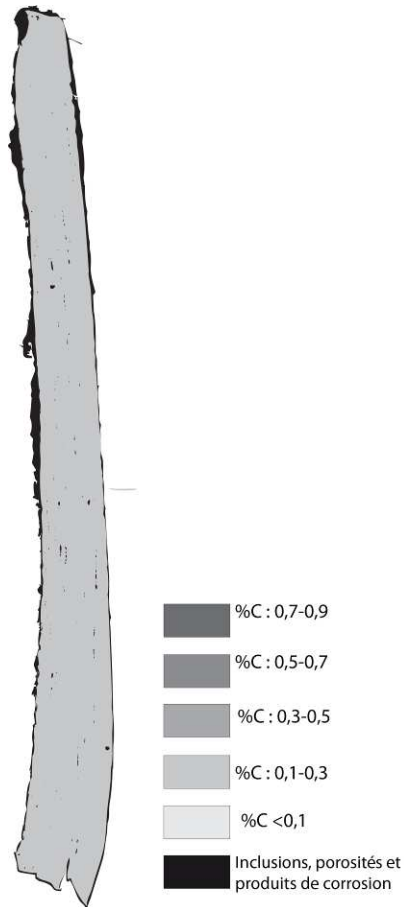
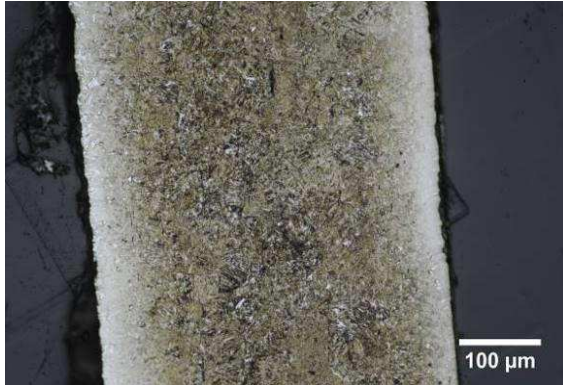


Schéma correspondant



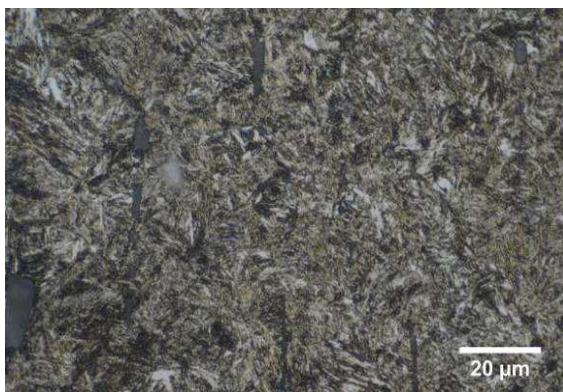
Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
3	2

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Direct	<0,01
Abaque	Direct	
PROCEDE	Direct	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Dissier, 2014)
Non	Oui	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon G436_ech3

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : G436

Numéro de l'élément d'armure : G436_G

Lieu de conservation : Musée de l'Armée (Paris)

Lieu de découverte :

Description : Cuissard gauche d'une paire issue de l'atelier de Valentin Siebenbürger, armurier Nurembergeois. Elle est datée de 1535-1540 (Notice du Musée de l'Armée)

Datation : 1535-1540 (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Allemagne

Ville : Nuremberg

Élément de l'armure étudié : Cuissard

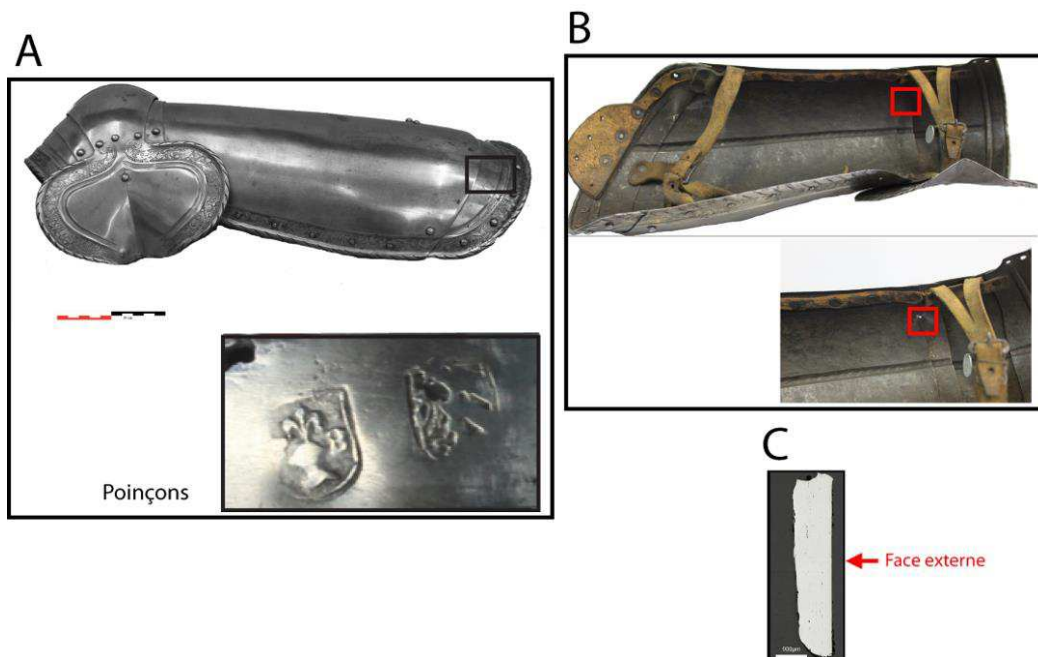
Armurier ou atelier associé : Valentin Siebenbürger

Présence de marque(s) : Oui

Détails de la (ou des) marque(s) : marque de la ville de Nuremberg et de Valentin Siebenbürger

Référence bibliographique :

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé à une extrémité de la partie centrale du cuissard.

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
Ind	Lamellaire et globulaire	Non	Non	Oui	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
0,4	0,36	0,19	191 ($\sigma=24$)	Non dosé	Non

Commentaires :

Cet échantillon présente la structure d'un acier moyennement carburé présentant un léger gradient de teneur en carbone qui s'étend du centre vers les extrémités. La perlite de forme globulaire par endroit, témoigne qu'un recuit du métal a été opéré.

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

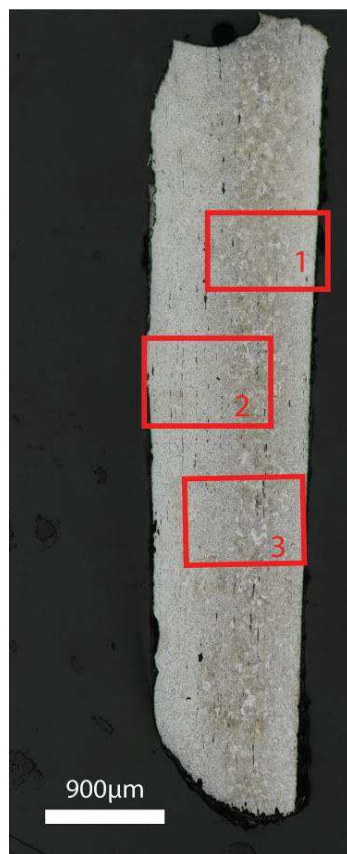
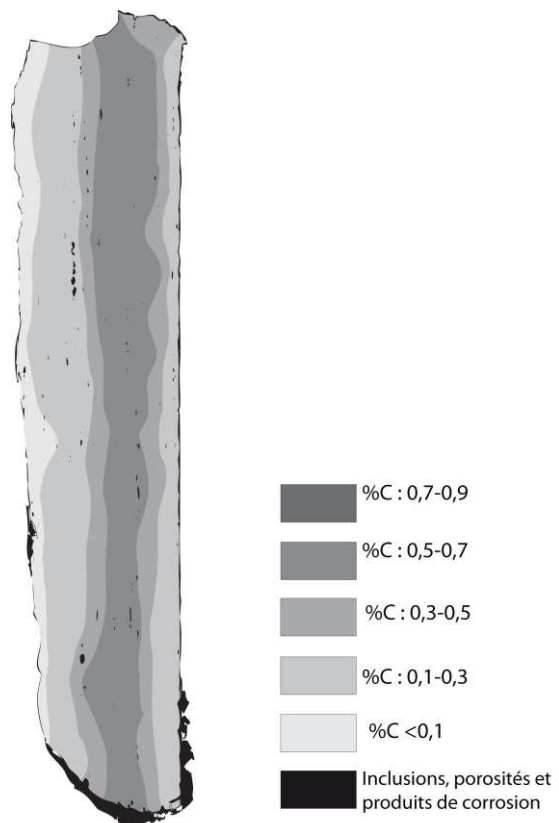


Schéma correspondant



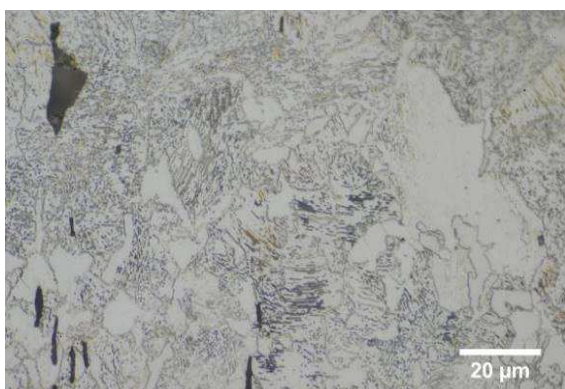
Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



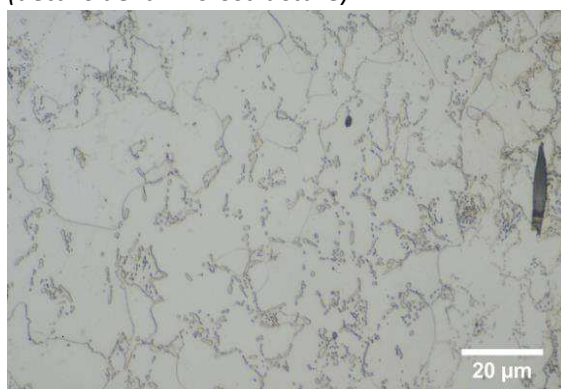
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
3	3

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Direct	<0,01
Abaque	Direct	
PROCEDE	Direct	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Oui	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon G436_G4

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : G436

Numéro de l'élément d'armure : G436_G

Lieu de conservation : Musée de l'Armée (Paris)

Lieu de découverte :

Description : Cuissard gauche d'une paire issue de l'atelier de Valentin Siebenbürger, armurier Nurembergeois. Elle est datée de 1535-1540 (notice du musée de l'Armée).

Datation : 1535-1540 (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Allemagne

Ville : Nuremberg

Élément de l'armure étudié : Cuissard

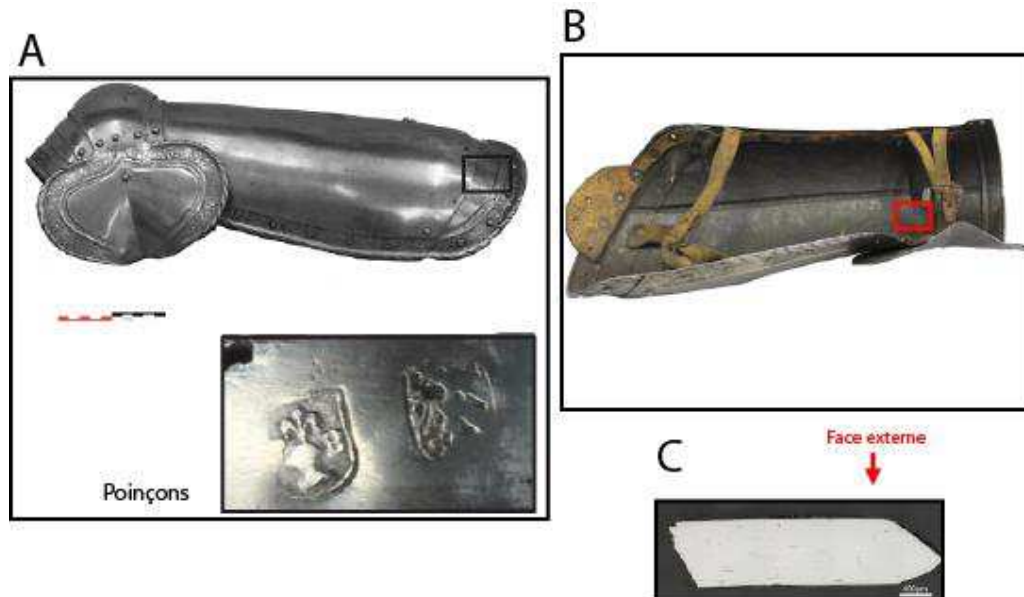
Armurier ou atelier associé : Valentin Siebenbürger

Présence de marque(s) : Oui

Détails de la (ou des) marque(s) : marque de la ville de Nuremberg et de Valentin Siebenbürger

Référence bibliographique :

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé sur la lame centrale du cuissard

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
Ind	Non résolue	Oui	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
0,6	>0,3	0,00	497 (σ= 55)	Non dosé	Non

Commentaires :

Cet échantillon présente la structure d'un acier relativement homogène en teneur en carbone. Un faciès typique de structures de trempe (martensite et bainite) est observé sauf aux extrémités, moins carburées.

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon

(après attaque au Nital 3%)

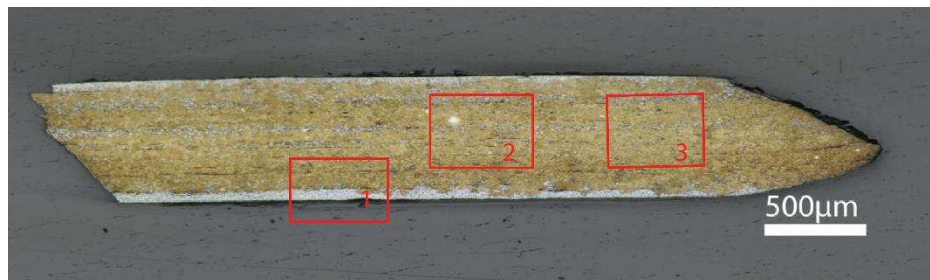
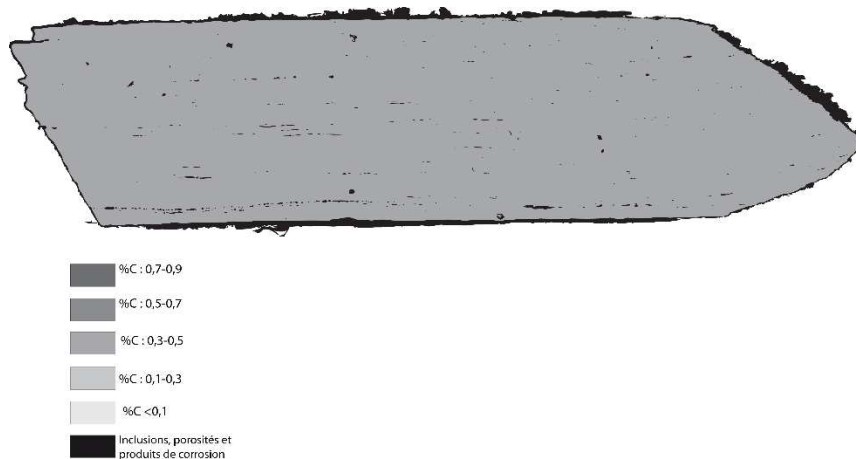
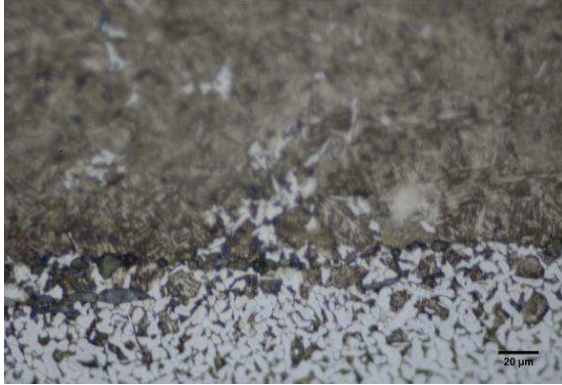


Schéma correspondant



Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



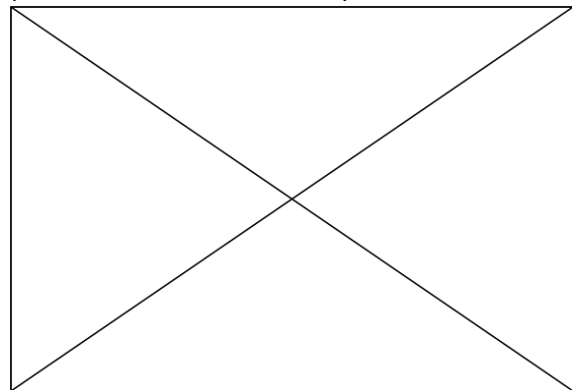
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
6	1,3,4

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Direct	<0,01
Abaque	Direct	
PROCEDE	Direct	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Oui	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon G436_G5

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : G436

Numéro de l'élément d'armure : G436_G

Lieu de conservation : Musée de l'Armée (Paris)

Lieu de découverte :

Description : Cuissard gauche d'une paire issue de l'atelier de Valentin Siebenbürger, armurier Nurembergeois. Elle est datée de 1535-1540 (notice du musée de l'Armée).

Datation : 1535-1540 (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Allemagne

Ville : Nuremberg

Élément de l'armure étudié : Cuissard

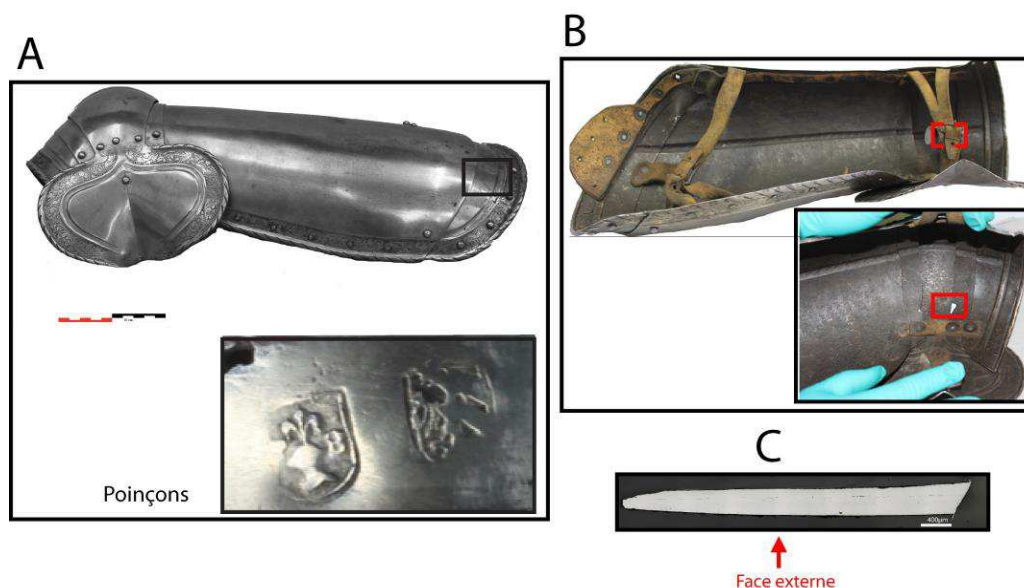
Armurier ou atelier associé : Valentin Siebenbürger

Présence de marque(s) : Oui

Détails de la (ou des) marque(s) : marque de la ville de Nuremberg et de Valentin Siebenbürger

Référence bibliographique :

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé sur quatrième lame du cuissard

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
Ind	Non résolue	Oui	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
0,3	>0,3	0,00	463 ($\sigma=92$)	Non dosé	Non

Commentaires :

Cet échantillon présente une structure de trempe hétérogène, comprenant martensite et bainite, ferrite mais aussi de la perlite nodulaire.

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon (après attaque au Nital 3%)

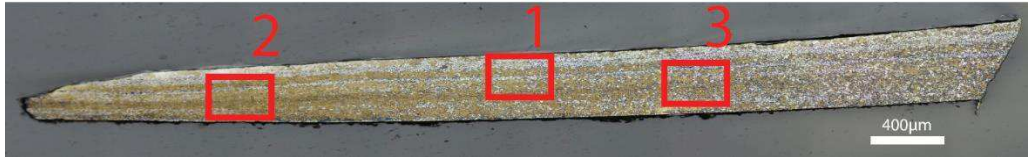
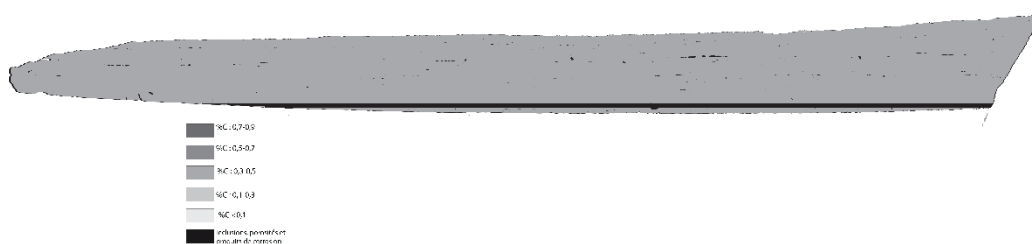


Schéma correspondant



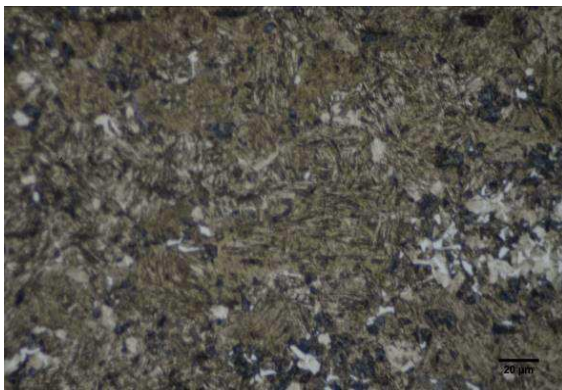
Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



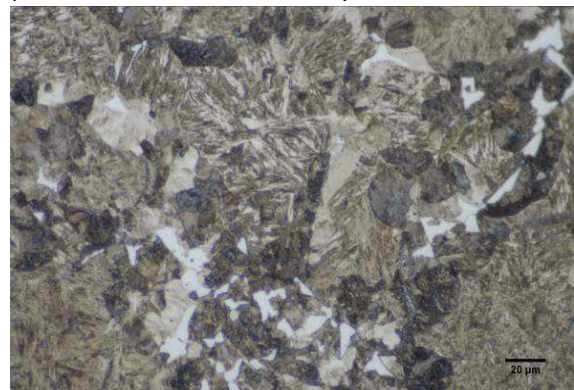
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
6	1,2,3,5

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Direct	<0,01
Abaque	Direct	
PROCEDE	Direct	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Oui	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon G436_G6

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : G436

Numéro de l'élément d'armure : G436_G

Lieu de conservation : Musée de l'Armée (Paris)

Lieu de découverte :

Description : Cuissard gauche d'une paire issue de l'atelier de Valentin Siebenbürger, armurier Nurembergeois. Elle est datée de 1535-1540 (notice du musée de l'Armée).

Datation : 1535-1540 (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Allemagne

Ville : Nuremberg

Élément de l'armure étudié : Cuissard

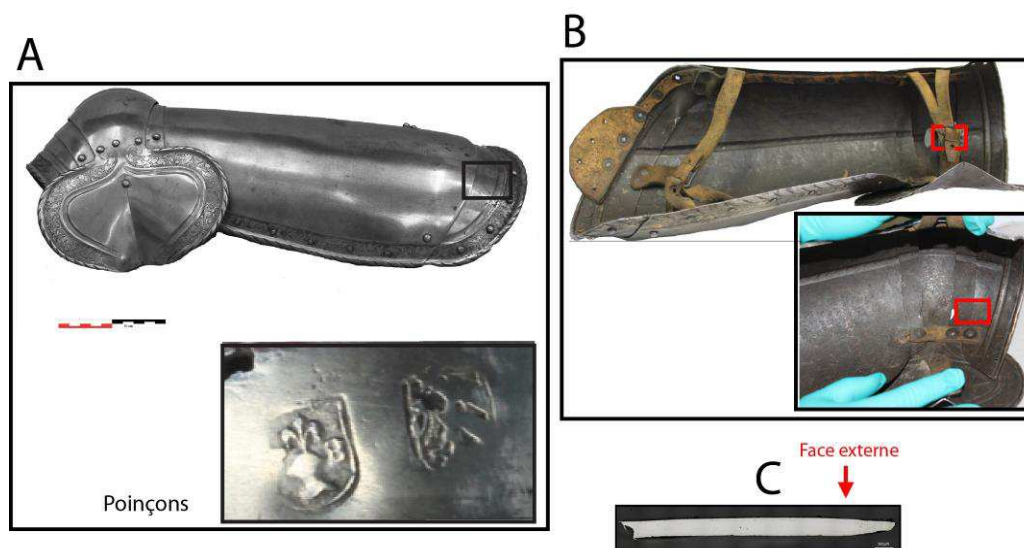
Armurier ou atelier associé : Valentin Siebenbürger

Présence de marque(s) : Oui

Détails de la (ou des) marque(s) : marque de la ville de Nuremberg et de Valentin Siebenbürger

Référence bibliographique :

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé sur cinquième lame du cuissard

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[<50]	Non résolue	Oui	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
0,3	>0,3	0,00	278 ($\sigma= 82$)	Non dosé	Non

Commentaires :

Cet échantillon présente une structure de trempe très hétérogène, comprenant martensite et bainite, ferrite mais aussi perlite nodulaire.

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

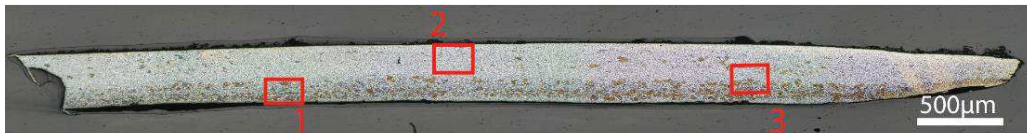


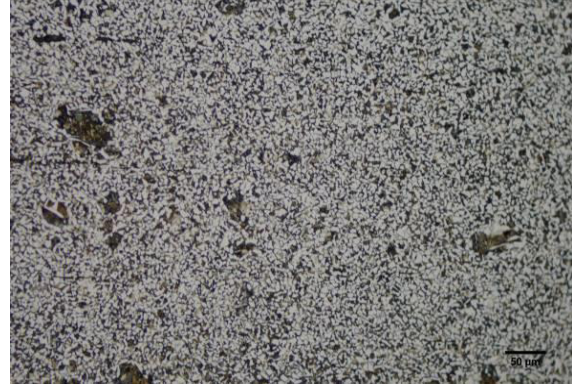
Schéma correspondant



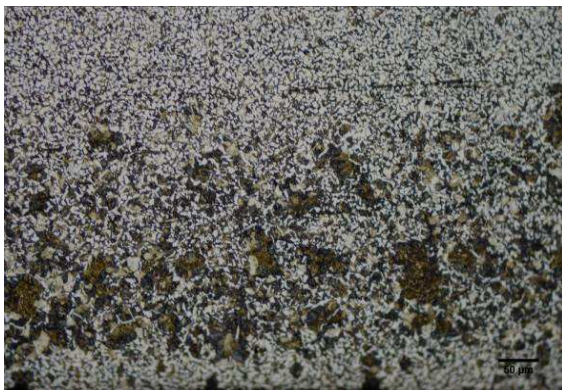
Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



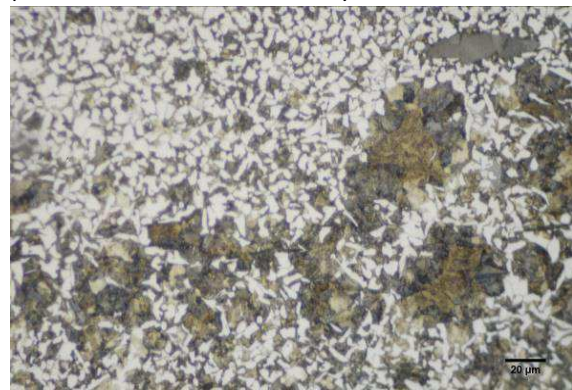
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
5	1,2

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Direct	<0,01
Abaque	Direct	
PROCEDE	Direct	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon G435_D1

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : G435

Numéro de l'élément d'armure : G435_D

Lieu de conservation : Musée de l'Armée (Paris)

Lieu de découverte :

Description : Cuissard droit d'une paire issue de l'atelier de Valentin Siebenbürger, armurier Nurembergeois. Elle est datée de 1535-1540 (notice du musée de l'Armée).

Datation : 1535-1540 (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Allemagne

Ville : Nuremberg

Élément de l'armure étudié : Cuissard

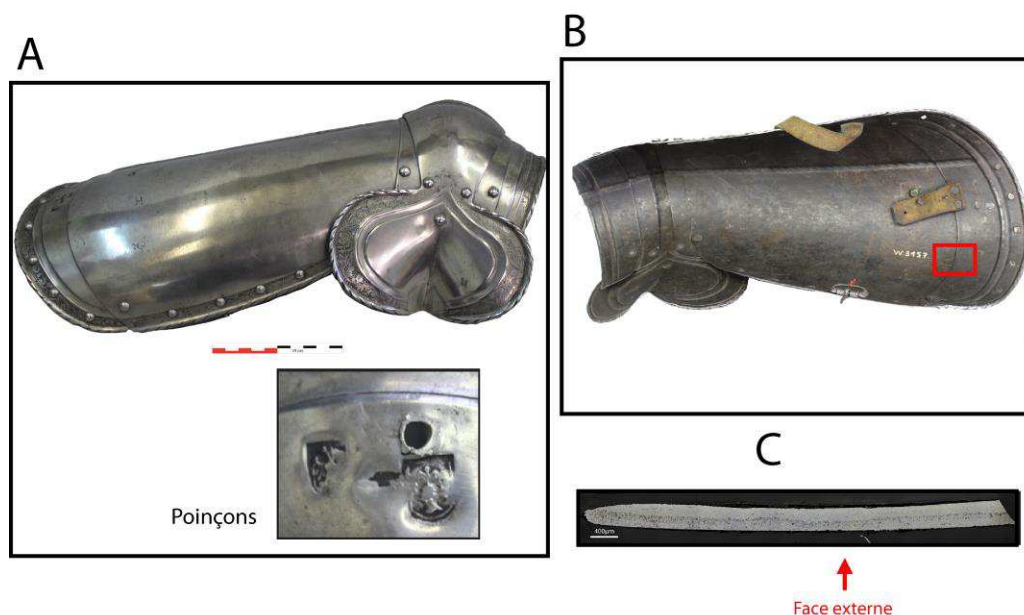
Armurier ou atelier associé : Valentin Siebenbürger

Présence de marque(s) : Oui

Détails de la (ou des) marque(s) : marque de la ville de Nuremberg et de Valentin Siebenbürger

Référence bibliographique :

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé sur la lame supérieure du cuissard.

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[<50]	Lamellaire	Non	Non	Non	Oui

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
0,8	0,30	0,11	182 ($\sigma=16$)		Non

Commentaires :

Cet échantillon présente la structure d'un acier ferrito perlitique hétérogène en teneur en carbone.

Analyses métallographiques

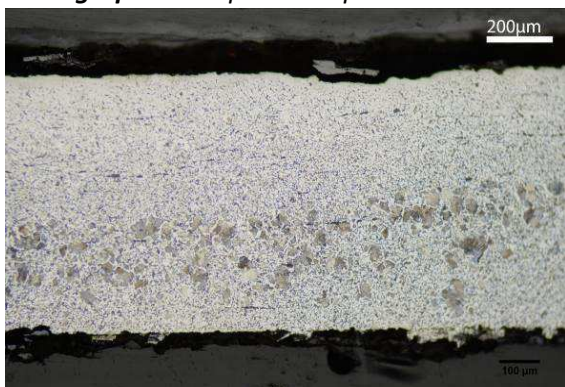
Mosaïque de l'échantillon (après attaque au Nital 3%)



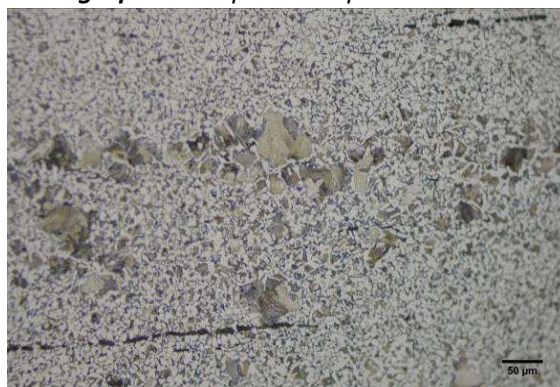
Schéma correspondant



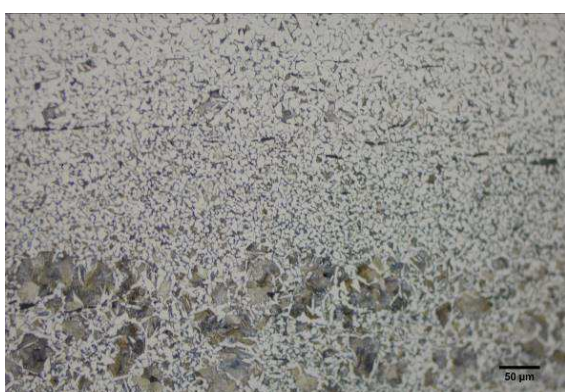
Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
5	2, 3, 5

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Direct	$p(\text{classe2})=0,1$ $p(\text{classe3})<0,01$ $p(\text{classe5})<0,01$
Abaque	Direct	
PROCEDE	Direct	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Oui	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon G435_D2

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : G435

Numéro de l'élément d'armure : G435_D

Lieu de conservation : Musée de l'Armée (Paris)

Lieu de découverte :

Description : Cuissard droit d'une paire issue de l'atelier de Valentin Siebenbürger, armurier Nurembergeois. Elle est datée de 1535-1540 (notice du musée de l'Armée).

Datation : 1535-1540 (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Allemagne

Ville : Nuremberg

Élément de l'armure étudié : Cuissard

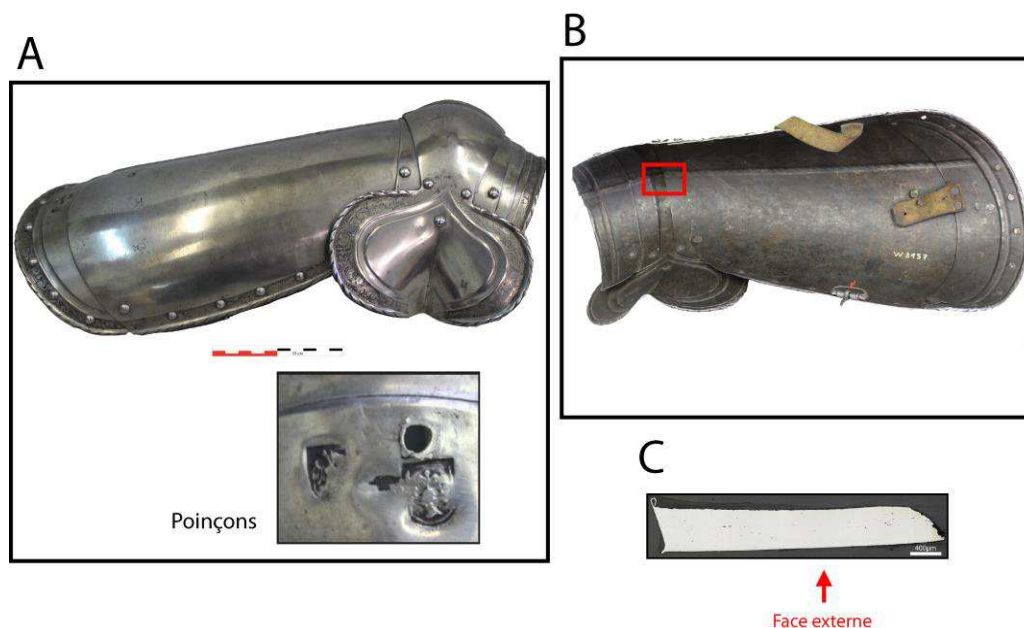
Armurier ou atelier associé : Valentin Siebenbürger

Présence de marque(s) : Oui

Détails de la (ou des) marque(s) : marque de la ville de Nuremberg et de Valentin Siebenbürger

Référence bibliographique :

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé sur la lame centrale du cuissard

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[<50]	Globulaire	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
0,4	0,20	0,00	168 ($\sigma=23$)		Non

Commentaires :

Cet échantillon présente la structure d'un acier homogène en teneur en carbone. La perlite, de forme majoritairement globulaire témoigne qu'un recuit a été opéré.

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon

(après attaque au Nital 3%)

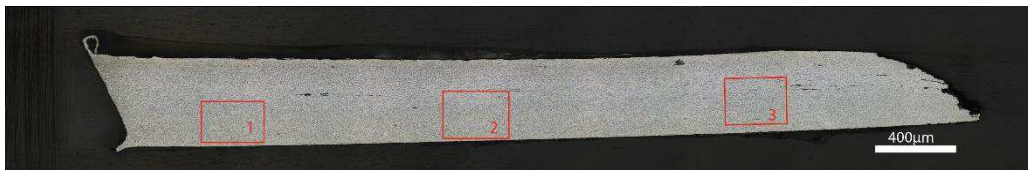
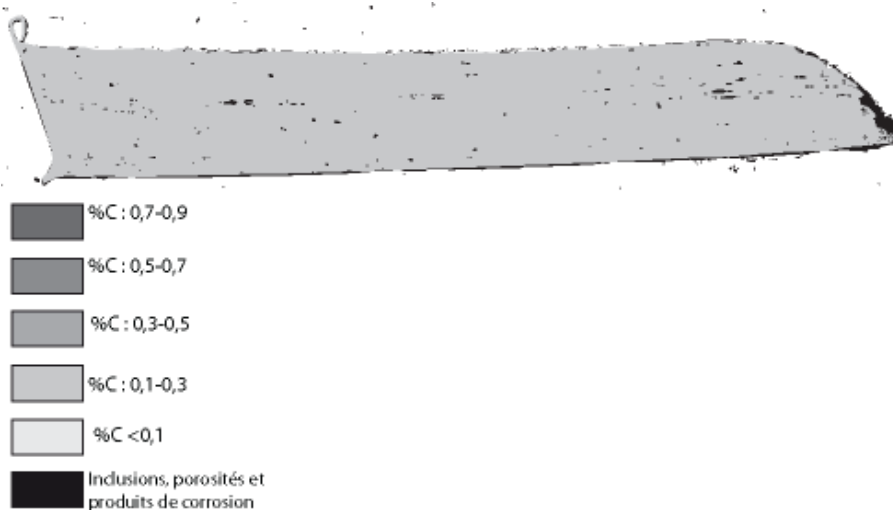


Schéma correspondant



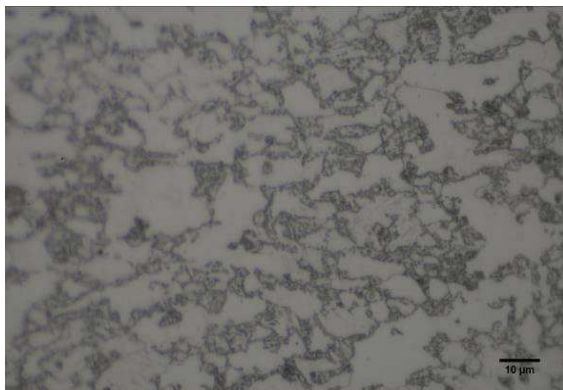
Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



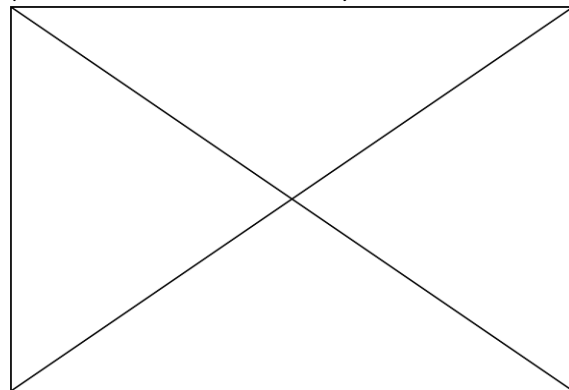
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
6	1, 4

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Direct	<0,01
Abaque	Direct	
PROCEDE	Direct	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Oui	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon G436_D1

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : G436

Numéro de l'élément d'armure : G436_D

Lieu de conservation : Musée de l'Armée (Paris)

Lieu de découverte :

Description : Cuissard droit d'une paire issue de l'atelier de Valentin Siebenbürger, armurier Nurembergeois. Elle est datée de 1535-1540 (notice du musée de l'Armée).

Datation : 1535-1540 (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Allemagne

Ville : Nuremberg

Élément de l'armure étudié : Cuissard

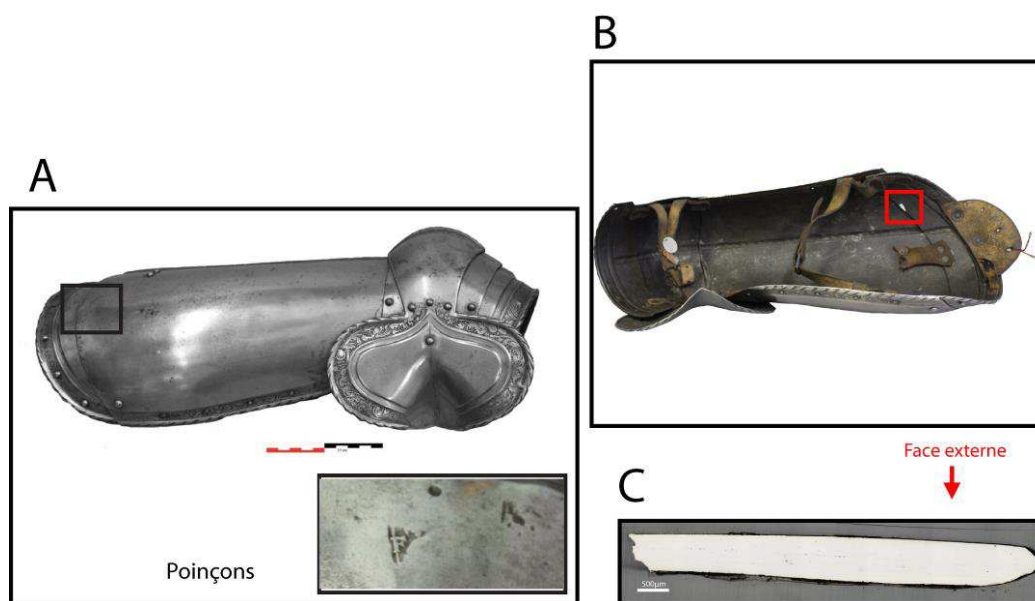
Armurier ou atelier associé : Valentin Siebenbürger

Présence de marque(s) : Oui

Détails de la (ou des) marque(s) : marque de la ville de Nuremberg et de Valentin Siebenbürger

Référence bibliographique :

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé sur la lame supérieure du cuissard

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[<50]	Non résolue	Oui	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
0,1	>0,3		349 ($\sigma=116$)	Non dosé	Oui

Commentaires :

La structure de cet échantillon se décompose en deux bandes. La première comprend une structure de trempe (martensite et bainite perlite nodulaire et ferrite), la seconde est un acier ferrito perlitique comprenant quelques amas de structure de trempe (martensite et bainite).

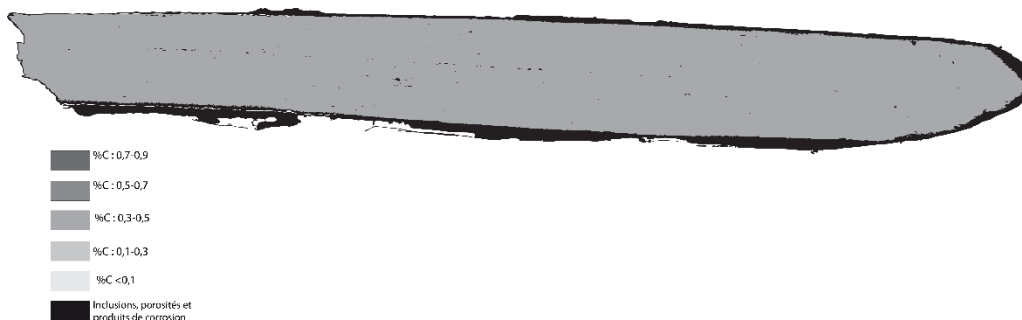
Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon

(après attaque au Nital 3%)



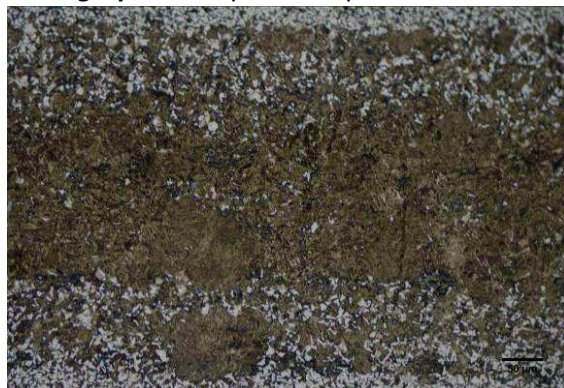
Schéma correspondant



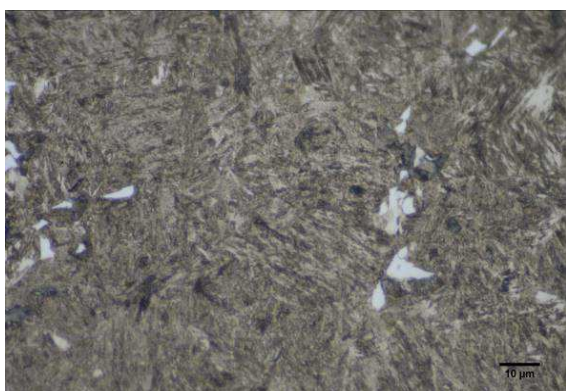
Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



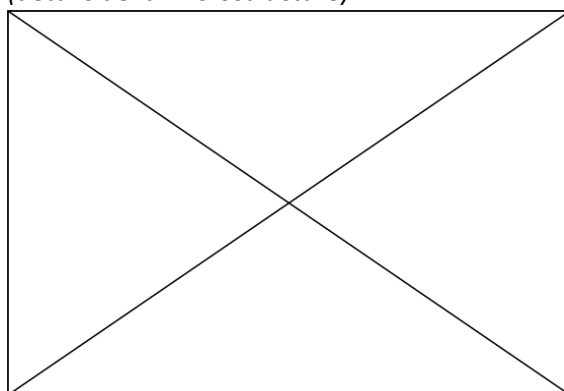
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
6	1 et 6

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Direct	<0,01
Abaque	Direct	
PROCEDE	Direct	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon G436_D2

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : G436

Numéro de l'élément d'armure : G436_D

Lieu de conservation : Musée de l'Armée (Paris)

Lieu de découverte :

Description : Cuissard droit d'une paire issue de l'atelier de Valentin Siebenbürger, armurier Nurembergeois. Elle est datée de 1535-1540 (notice du musée de l'Armée).

Datation : 1535-1540 (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Allemagne

Ville : Nuremberg

Élément de l'armure étudié : Cuissard

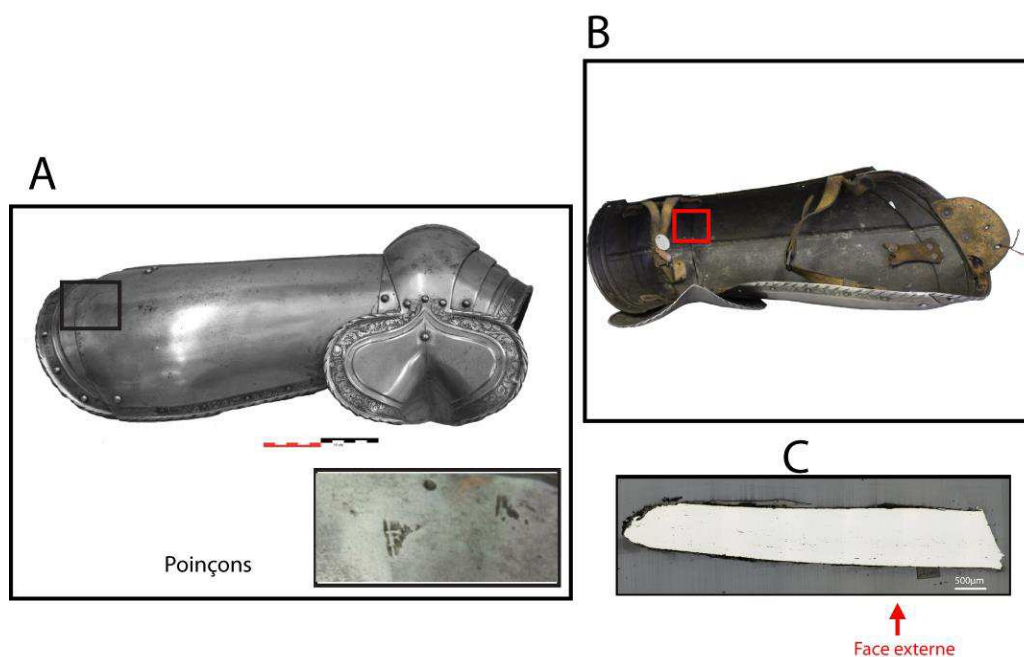
Armurier ou atelier associé : Valentin Siebenbürger

Présence de marque(s) : Oui

Détails de la (ou des) marque(s) : marque de la ville de Nuremberg et de Valentin Siebenbürger

Référence bibliographique :

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé sur la lame centrale du cuissard

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[<50]	Lamellaire	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
0,5	0,26		183 ($\sigma = 17$)	Non dosé	Non

Commentaires :

Cet échantillon présente la structure d'un acier ferrito perlitique légèrement hétérogène en teneur en carbone. La perlite est de forme lamellaire.

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon

(après attaque au Nital 3%)

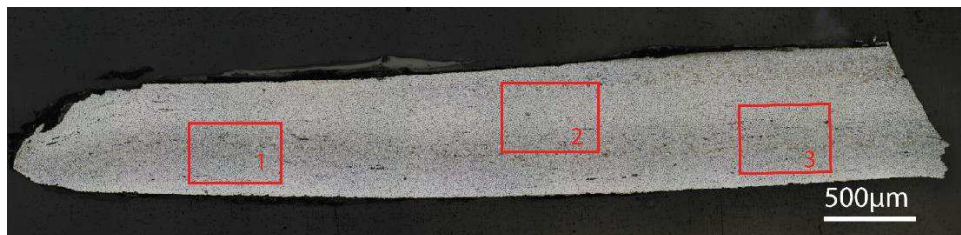
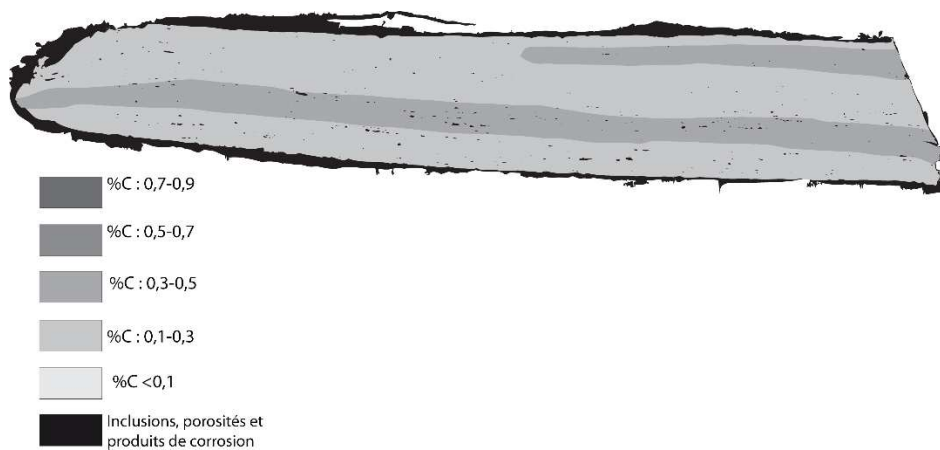


Schéma correspondant



Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



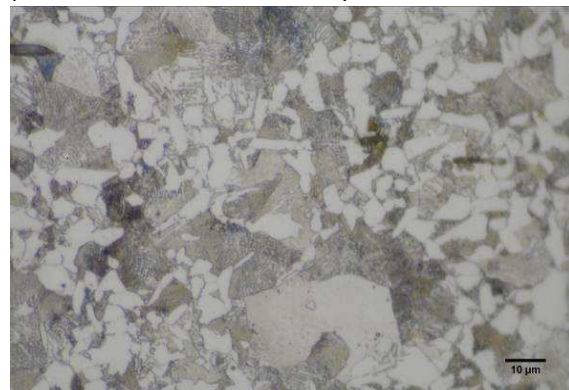
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
5	2,4,5

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Direct	<0,01
Abaque	Direct	
PROCEDE	Direct	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon G436_D3

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : G436

Numéro de l'élément d'armure : G436_D

Lieu de conservation : Musée de l'Armée (Paris)

Lieu de découverte :

Description : Cuissard droit d'une paire issue de l'atelier de Valentin Siebenbürger, armurier Nurembergeois. Elle est datée de 1535-1540 (notice du musée de l'Armée).

Datation : 1535-1540 (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Allemagne

Ville : Nuremberg

Élément de l'armure étudié : Cuissard

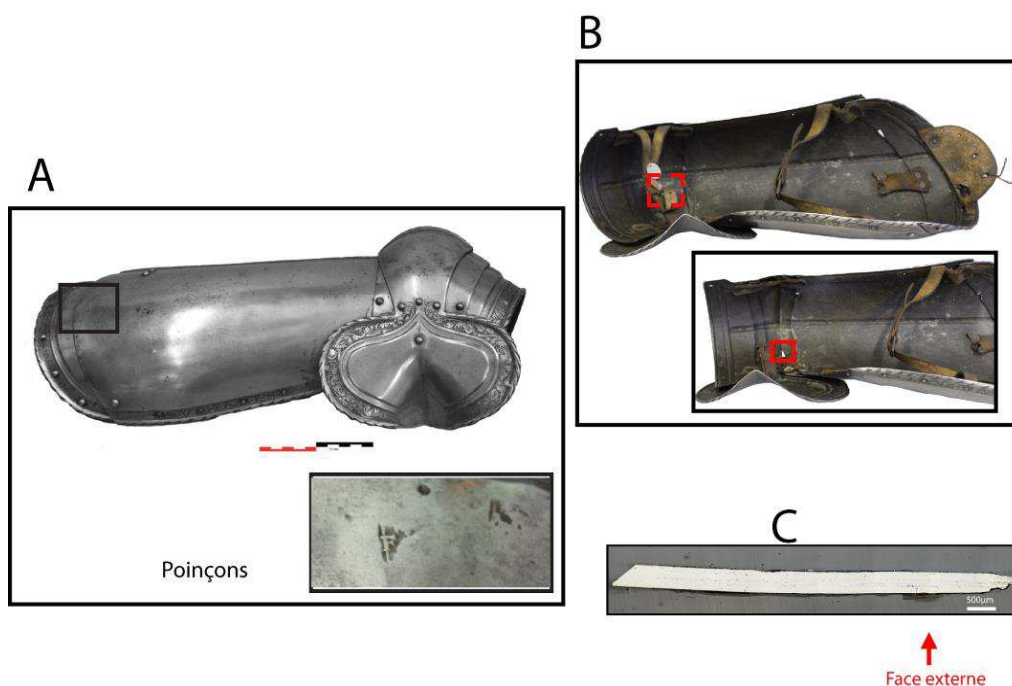
Armurier ou atelier associé : Valentin Siebenbürger

Présence de marque(s) : Oui

Détails de la (ou des) marque(s) : marque de la ville de Nuremberg et de Valentin Siebenbürger

Référence bibliographique :

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé sur la troisième lame du cuissard

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[50-200]	Non résolue	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
2,1	0,06	0,00	127 ($\sigma = 14$)	Non dosé	Non

Commentaires :

Cet échantillon présente une structure ferritique à taille de grains variable [50 μm -200 μm]. Quelques amas de perlite sont présents par endroit.

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon (après attaque au Nital 3%)

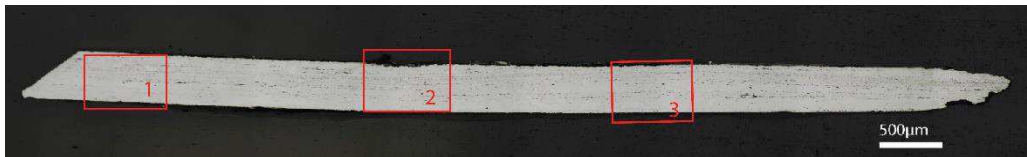
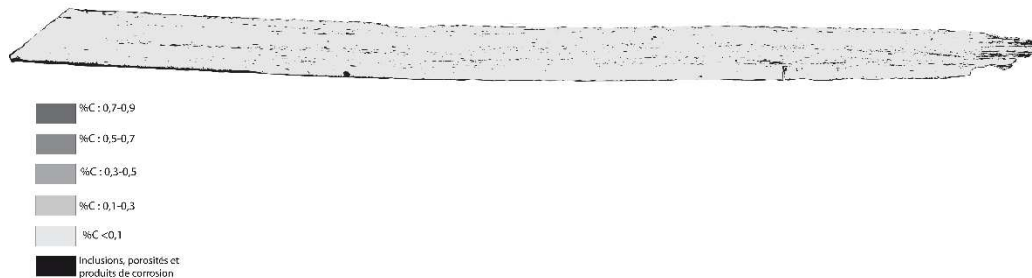
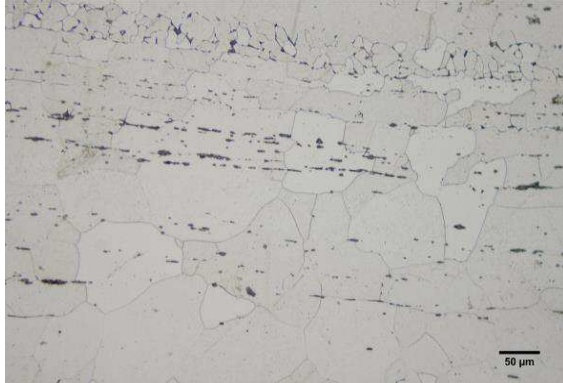


Schéma correspondant



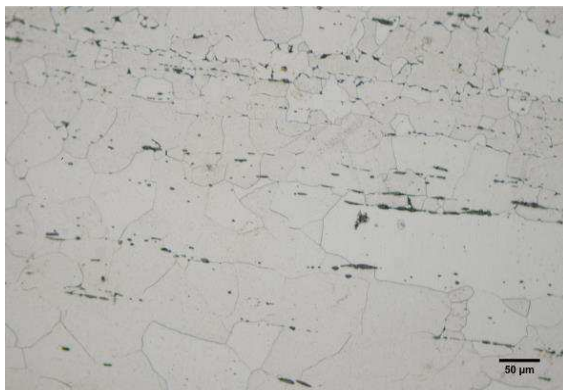
Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



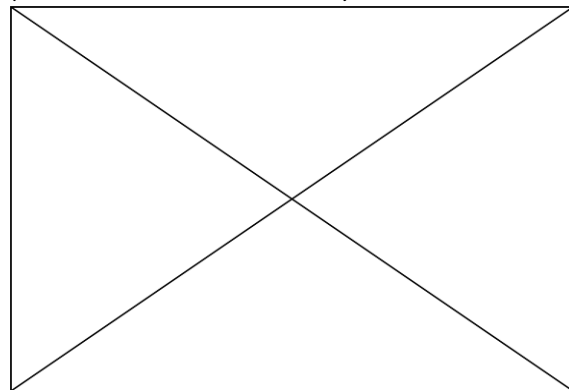
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
Non défini	Non défini

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Non défini	Non défini
Abaque	Non défini	
PROCEDE	Non défini	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Dissier, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon G436_D4

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : G436

Numéro de l'élément d'armure : G436_D

Lieu de conservation : Musée de l'Armée (Paris)

Lieu de découverte :

Description : Cuissard droit d'une paire issue de l'atelier de Valentin Siebenbürger, armurier Nurembergeois. Elle est datée de 1535-1540 (notice du musée de l'Armée).

Datation : 1535-1540 (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Allemagne

Ville : Nuremberg

Élément de l'armure étudié : Cuissard

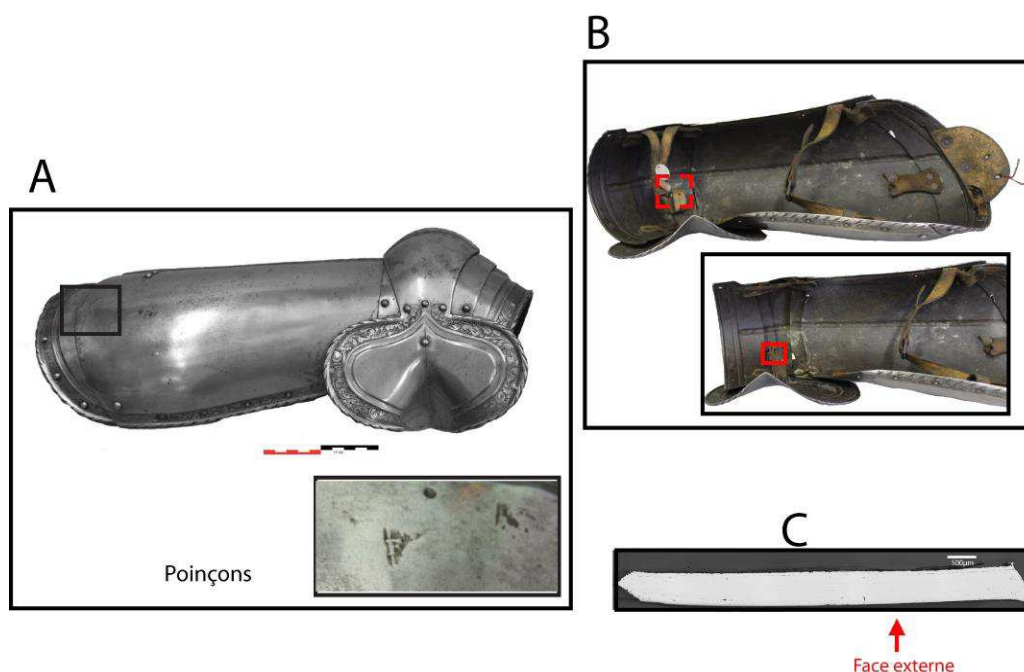
Armurier ou atelier associé : Valentin Siebenbürger

Présence de marque(s) : Oui

Détails de la (ou des) marque(s) : marque de la ville de Nuremberg et de Valentin Siebenbürger

Référence bibliographique :

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé sur la quatrième lame du cuissard

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[50-200] et [>200]	Non résolue	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
0,3	0,06		126 ($\sigma=14$)	Non dosé	Non

Commentaires :

Cet échantillon présente une structure ferritique à taille de grain variable [50 μm -200 μm]. Quelques amas de perlite sont visibles sur une extrémité de l'échantillon

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon

(après attaque au Nital 3%)



Schéma correspondant



	%C : 0,7-0,9
	%C : 0,5-0,7
	%C : 0,3-0,5
	%C : 0,1-0,3
	%C < 0,1
	Inclusions, porosités et produits de corrosion

Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



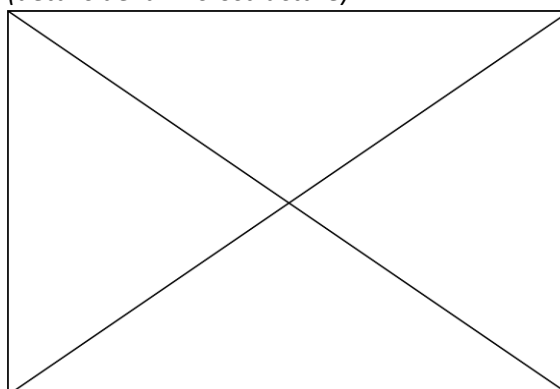
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
5	1 et 4

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Direct	$p(\text{classe1}) < 0,01$ $p(\text{classe4}) = 0,16$
Abaque	Direct	
PROCEDE	Direct	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon G436_D5

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : G436

Numéro de l'élément d'armure : G436_D

Lieu de conservation : Musée de l'Armée (Paris)

Lieu de découverte :

Description : Cuissard droit d'une paire issue de l'atelier de Valentin Siebenbürger, armurier Nurembergeois. Elle est datée de 1535-1540 (notice du musée de l'Armée).

Datation : 1535-1540 (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Allemagne

Ville : Nuremberg

Élément de l'armure étudié : Cuissard

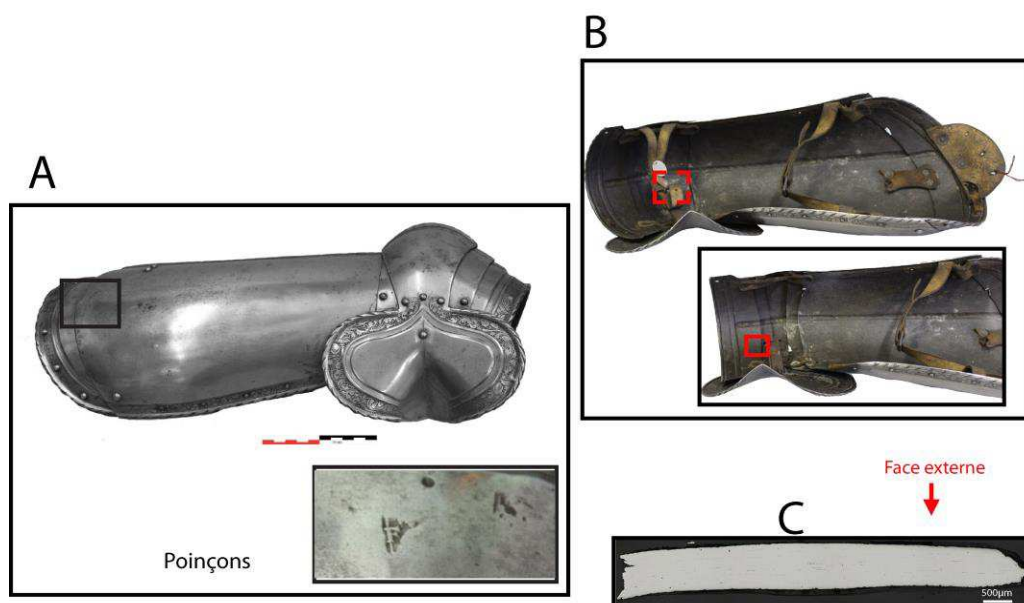
Armurier ou atelier associé : Valentin Siebenbürger

Présence de marque(s) : Oui

Détails de la (ou des) marque(s) : marque de la ville de Nuremberg et de Valentin Siebenbürger

Référence bibliographique :

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé sur la cinquième lame du cuissard

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[<50]	Lamellaire	Oui	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
0,4	>0,3		328 ($\sigma=133$)	Non dosé	Oui

Commentaires :

Cet échantillon présente une structure de trempe très hétérogène, comprenant martensite et bainite, ferrite, mais aussi de la perlite lamellaire.

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon (après attaque au Nital 3%)

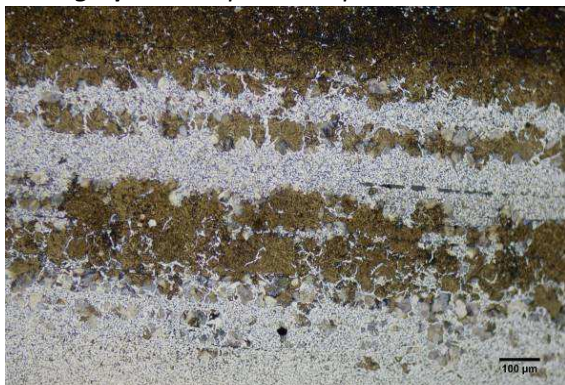


Schéma correspondant

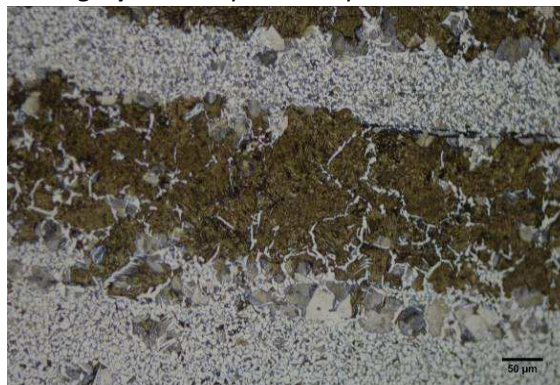


	%C : 0,7-0,9
	%C : 0,5-0,7
	%C : 0,3-0,5
	%C : 0,1-0,3
	%C < 0,1
	Inclusions, porosités et produits de corrosion

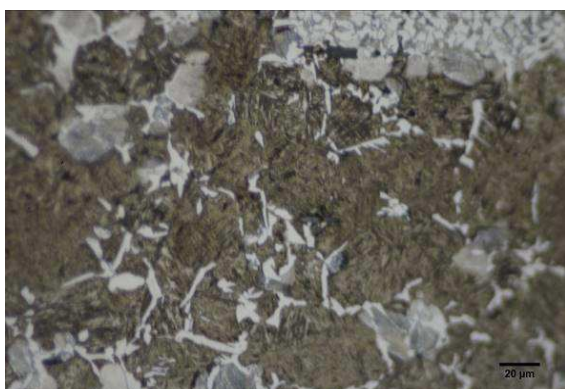
Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



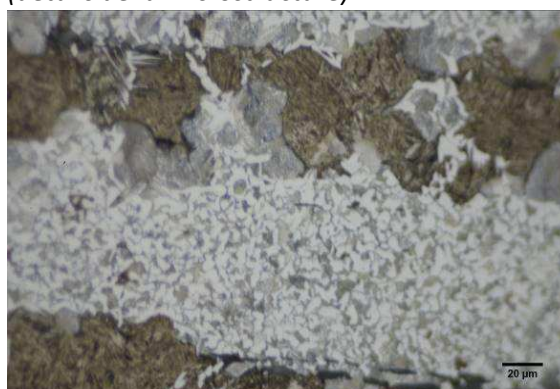
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
6	1,2,3

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Direct	<0,01
Abaque	Direct	
PROCEDE	Direct	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon 9301912_1_ech1

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : 9301912_1

Numéro de l'élément d'armure : 9301912_1

Lieu de conservation : Musée Dobrée (Nantes)

Lieu de découverte :

Description : Cette pièce est un plastron busqué avec arrêt de lance. Elle peut être décomposée en quatre parties dont le plastron les deux pièces de côtés et la ceinture. Un galon torsadé souligne le pourtour du col et les bras. A noter aussi la spécificité de construction allemande dans les lames d'aisselles mobiles. A la ceinture une sangle postérieure rivetée s'attache à l'opposé à l'aide d'une boucle à ardillon. Le plastron est riveté sous la taille à trois tassettes d'où partent chaque jambe composée chacune de 7 tassettes rivées. Les deux jambes sont reliées par une pièce de cuir faisant office de protection interne. (Notice du Musée Dobrée)

Datation : vers 1540 (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Allemagne

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Tassette

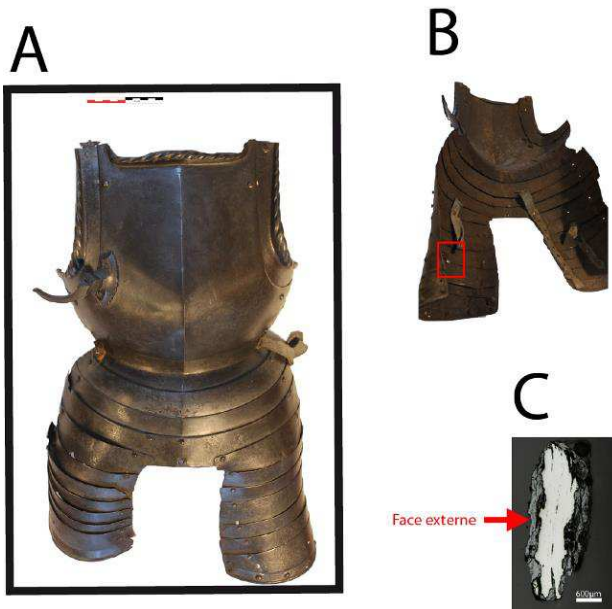
Armurier ou atelier associé : Indéterminé

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique :

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé sur une des tassettes de la jambe gauche

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
Ind	Lamellaire	Non	Non	Oui	Oui

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
1,6	0,59	0,16	229 ($\sigma = 32$)	Non dosé	Non

Commentaires :

Cet échantillon présente la structure d'un acier moyennement carburé (%C*=0,6). Un gradient de teneur en carbone qui s'étend sur toute la surface de l'échantillon est visible.

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

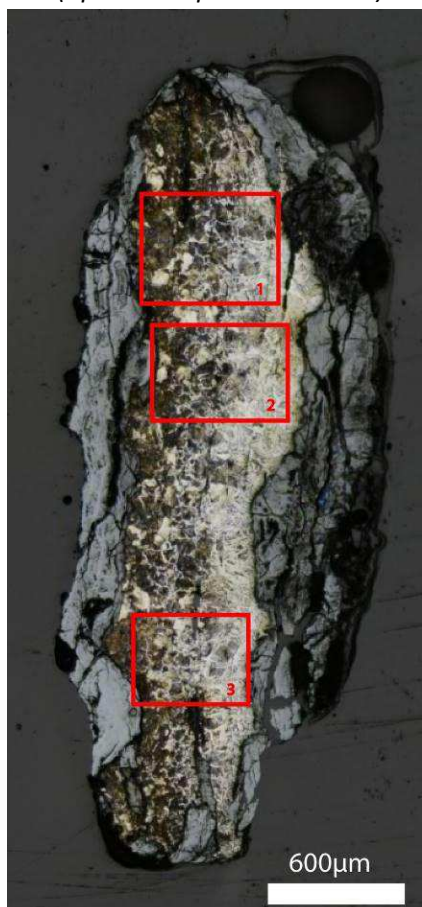
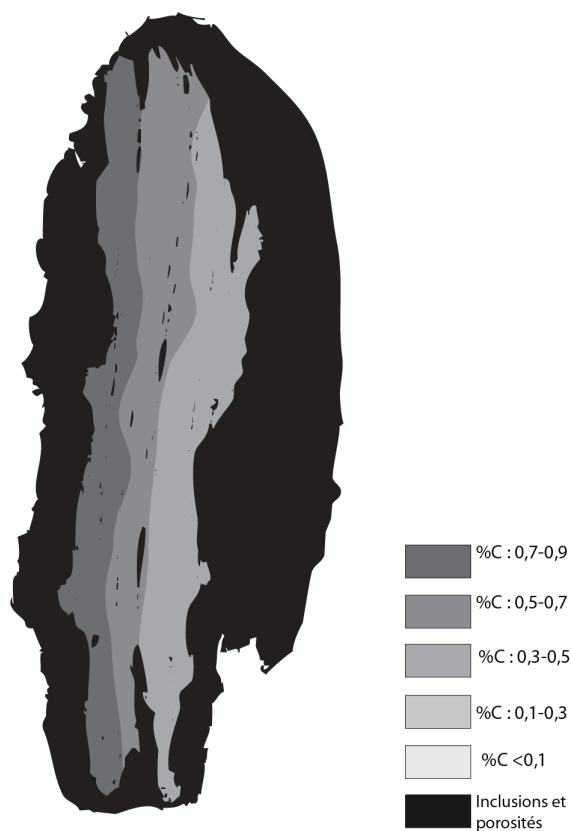


Schéma correspondant



Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



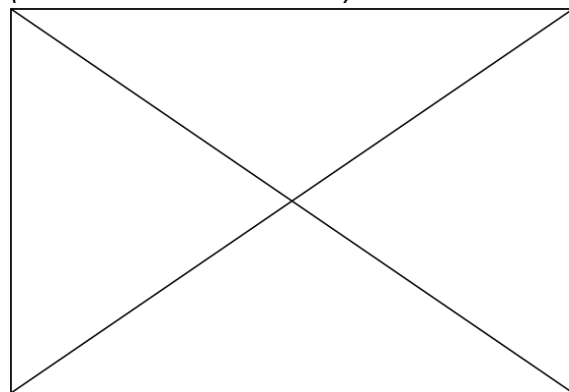
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
4	1,2,4

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Direct	<0,01
Abaque	Direct	
PROCEDE	Direct	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon 9301912_1_ech2

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : 9301912_1

Numéro de l'élément d'armure : 9301912_1

Lieu de conservation : Musée Dobrée (Nantes)

Lieu de découverte :

Description : voir échantillon 9301912_1_ech1

Datation : vers 1540 (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Allemagne

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Tassette

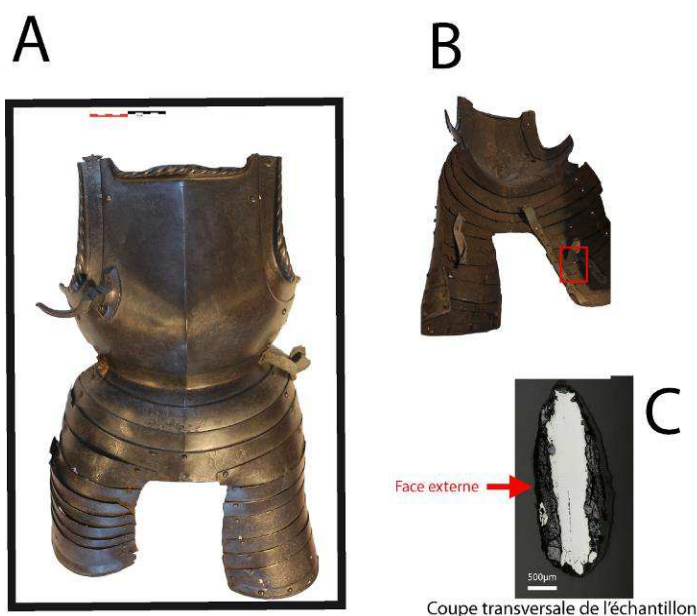
Armurier ou atelier associé : Indéterminé

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique :

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé sur une des tassettes de la jambe droite

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[50-200]	Non résolue	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
1,0	0,06	0,00	196 ($\sigma=16$)	0,2	Non

Commentaires :

Cet échantillon présente une structure entièrement ferritique. La présence de phosphore a été mise en évidence dans le métal à hauteur de 0,2%mass. Il s'agit donc d'un fer phosphoreux.

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

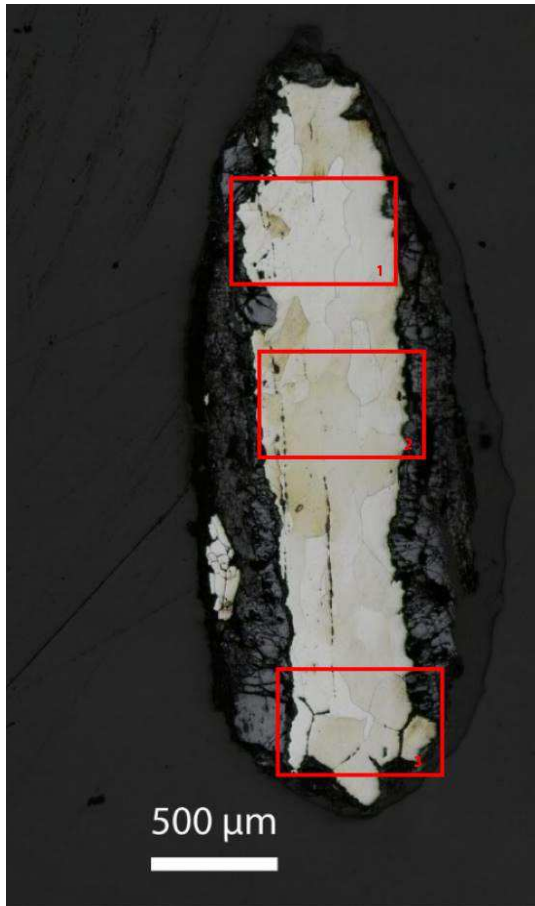
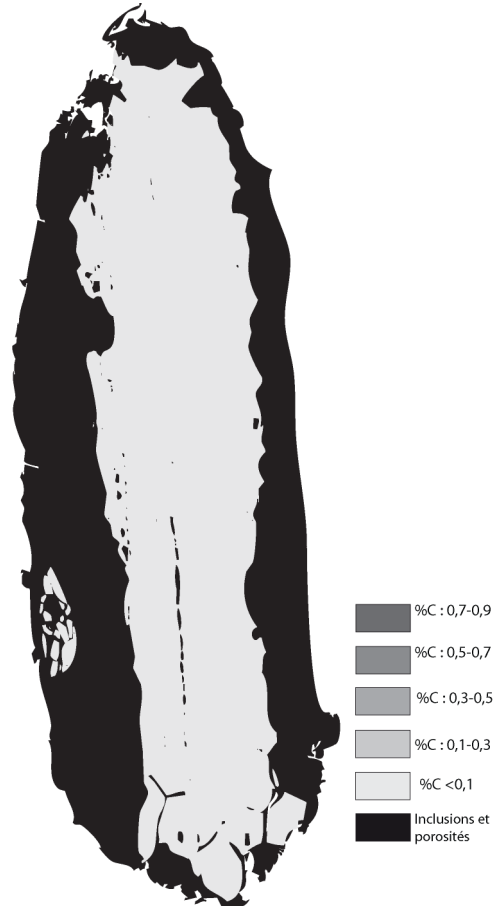


Schéma correspondant



Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



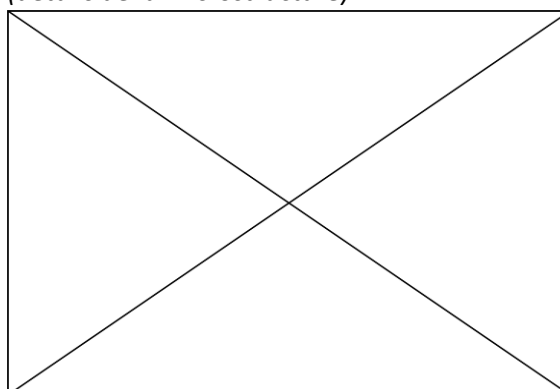
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
4	2,3

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Direct	$p(\text{classe2}) < 0,01$ $p(\text{classe3}) = 0,07$
Abaque	Direct	
PROCEDE	Direct	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon 9301895-2

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : 9301895-2

Numéro de l'élément d'armure : 9301895-2

Lieu de conservation : Musée Dobrée (Nantes)

Lieu de découverte :

Description : Elément de bras d'armure. Pièce fragmentaire faite de 4 plates courbes, deux de ces plates ont un pourtour dessinant une pointe médiane (Notice du Musée Dobrée)

Datation : XVe siècle (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Italie

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Indéterminé

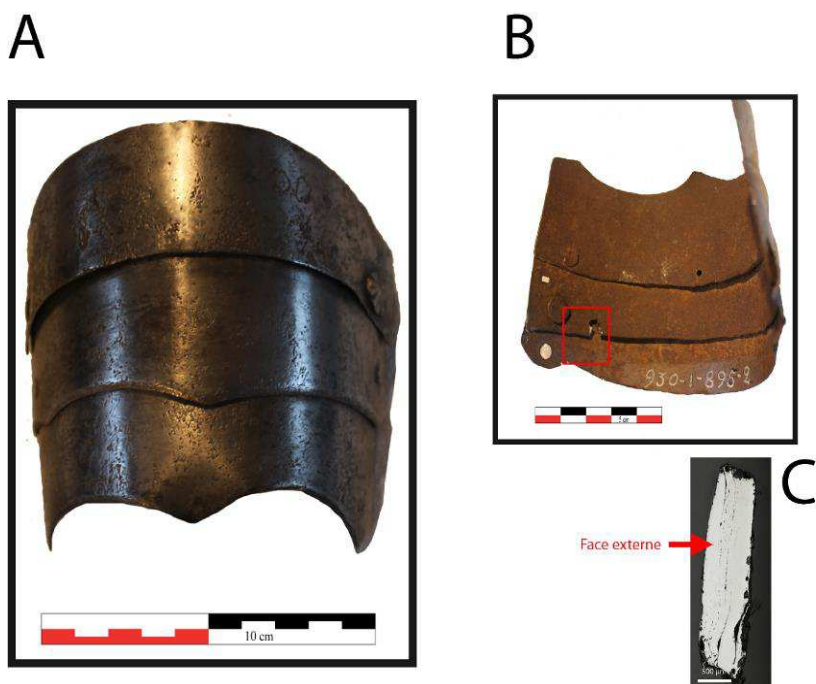
Armurier ou atelier associé : Indéterminé

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique :

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé sur la deuxième lame de la pièce.

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[<50]	Non résolue	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
1,5	0,15	0,07	200 ($\sigma=14$)	Non dosé	Non

Commentaires :

Cet échantillon présente la structure d'un acier faiblement carburé (%C* < 0,2) faiblement hétérogène. Ses extrémités présentent des structures plus carburées avec une taille de grains en moyenne plus faible que dans la partie centrale.

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

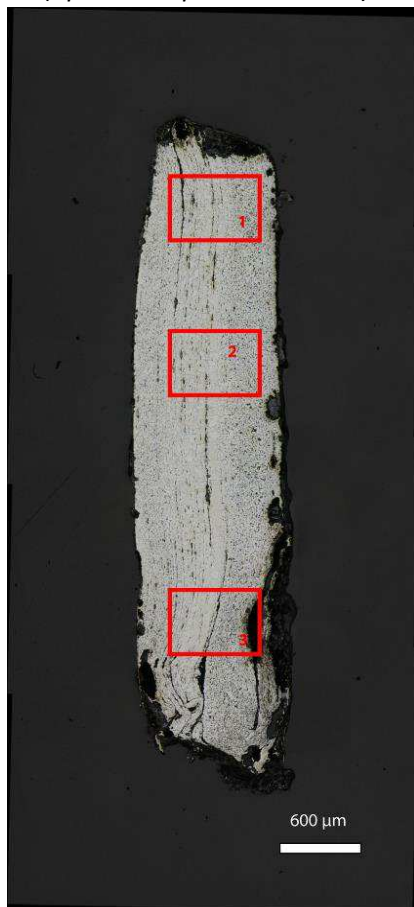
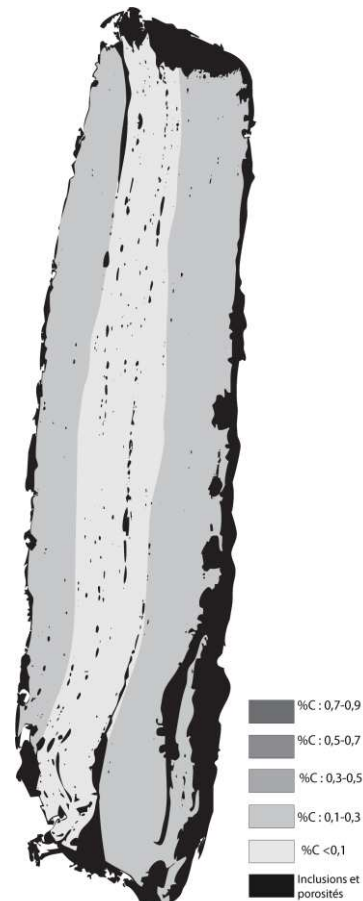
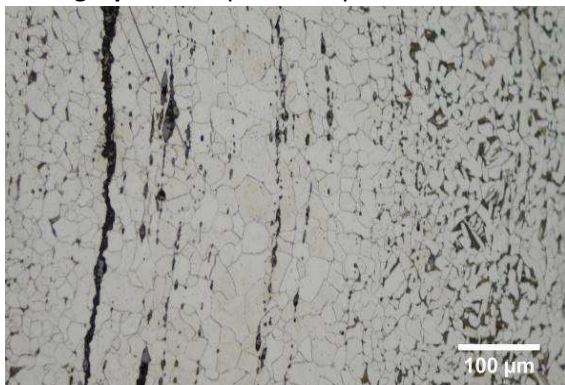


Schéma correspondant



Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



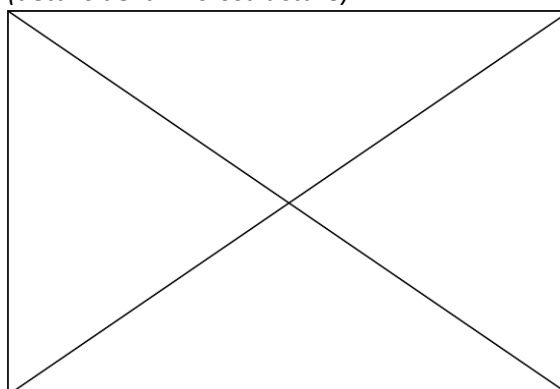
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
6	1

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Direct	0,25
Abaque	Indéterminé	
PROCEDE	Direct	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon 930.1.912.2_T

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : 930 1912 2

Numéro de l'élément d'armure : 930.1.912.2

Lieu de conservation : Musée Dobrée (Nantes)

Lieu de découverte :

Description : Pièce très légère en deux parties rivetées en trois points au dos et à la ceinture. Présence d'une sangle de cuir rivetée à droite, d'une boucle avec ardillon à gauche (Notice du Musée Dobrée).

Datation : XVI^e siècle (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Allemagne

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Dossière

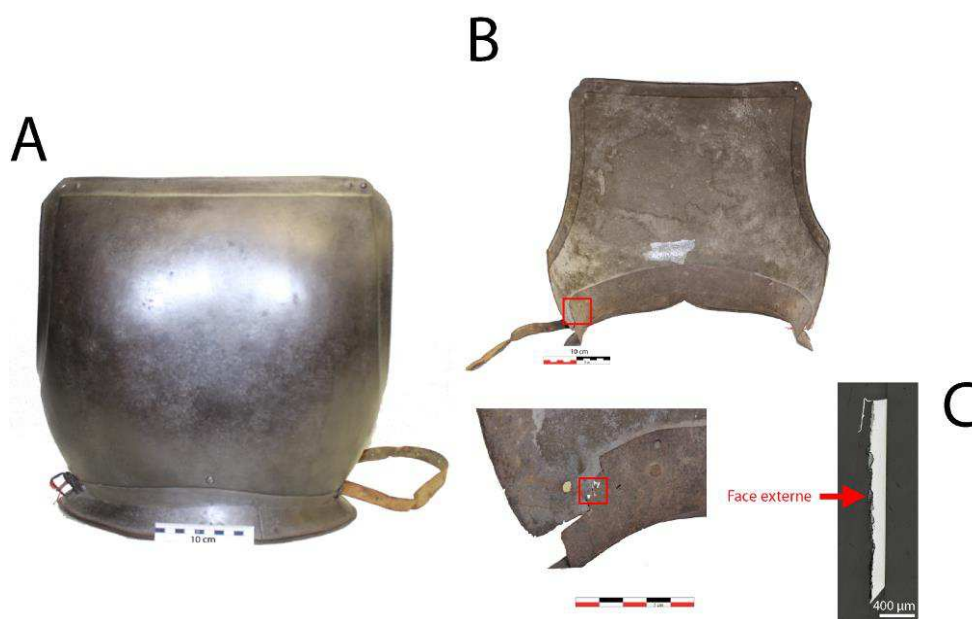
Armurier ou atelier associé : Indéterminé

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique :

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé sur la lame inférieure de la dossière. Il a été observé en coupe transversale et sur une de ces faces latérales

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[<50]	Non résolue	Oui	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
0,4	>0,3	0,00	245 ($\sigma=15$)	Non dosé	Non

Commentaires :

Cet échantillon a été observé en coupe transversale et sur une de ces faces latérales (voir micrographie 4). Il possède une structure très homogène, aciculaire sur la face latérale, suggérant qu'une opération de trempe a eu lieu. Elle a probablement été suivie d'un revenu qui aurait annulé en grande partie les effets de la trempe. Cette hypothèse est notamment étayée par la dureté relativement élevée mesurée pour un acier moyennement carburé (Hv=245)

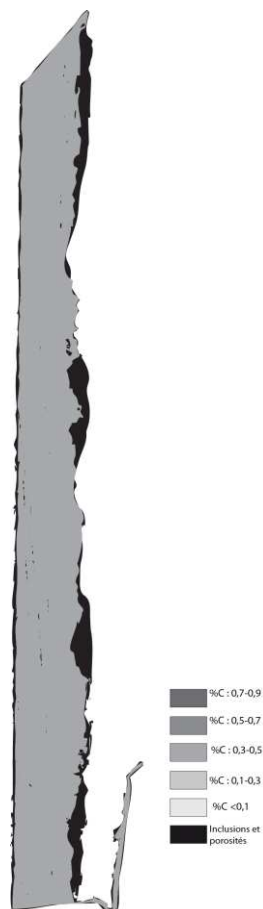
Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon

(après attaque au Nital 3%)



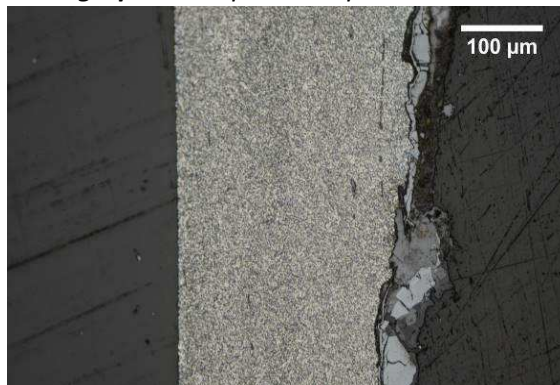
Schéma correspondant



Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
6	1

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Direct	<0,01
Abaque	Direct	
PROCEDE	Direct	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Dissier, 2014)
Non	Oui	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon 895 423

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : 895 423

Numéro de l'élément d'armure : 895 423

Lieu de conservation : Musée Dobrée (Nantes)

Lieu de découverte :

Description : Dossière d'armure dont la typologie rappelle celles des armures réalisées à Nuremberg à la même époque (Notice du Musée Dobrée).

Datation : XVI^e siècle (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Allemagne

Ville : Nuremberg

Élément de l'armure étudié : Dossière

Armurier ou atelier associé : Indéterminé

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique :

Repérage du prélèvement

A



B



C



Face externe

« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé sur le bord gauche de la dossière

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[50-200]	Non résolue	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
0,1	0,06	0,00	155 ($\sigma=11$)	<0,1	Non

Commentaires :

Cet échantillon possède une structure entièrement ferritique

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

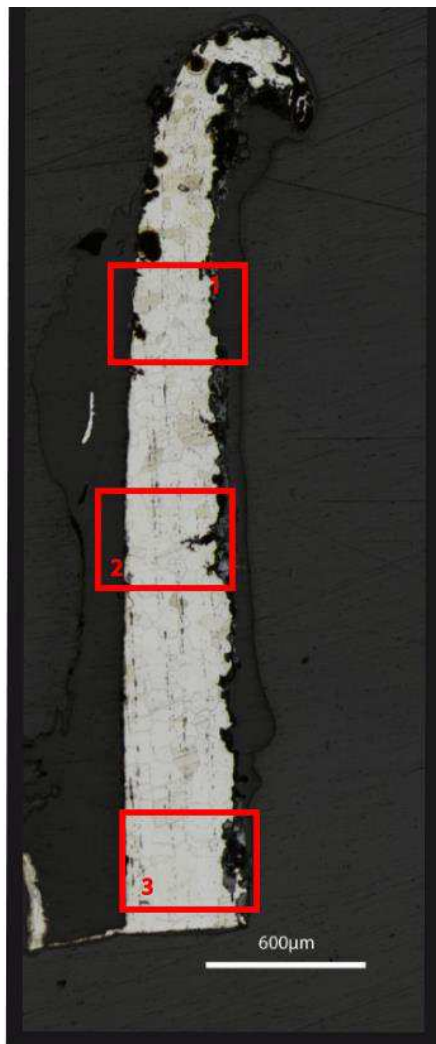
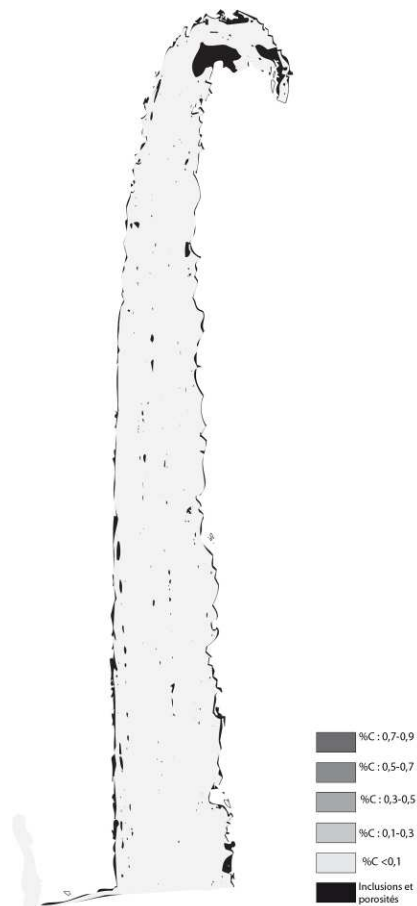
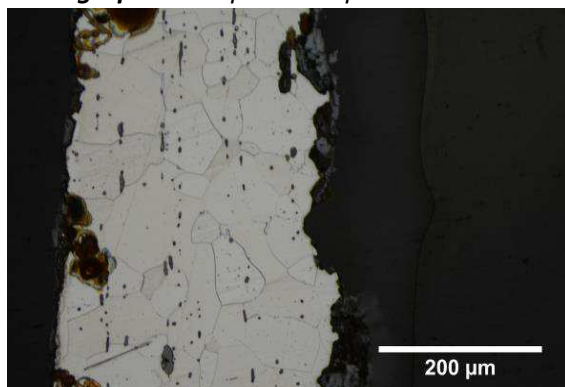


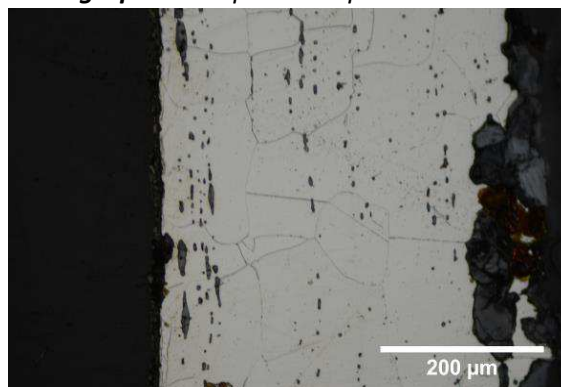
Schéma correspondant



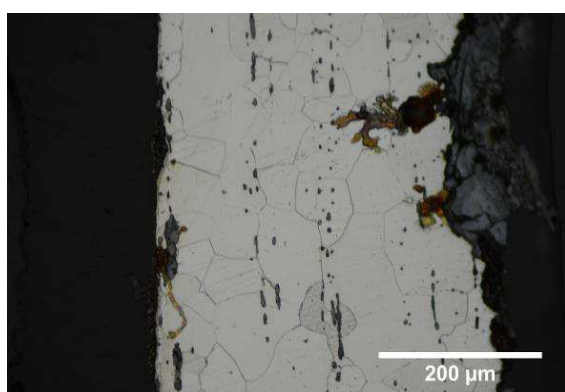
Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



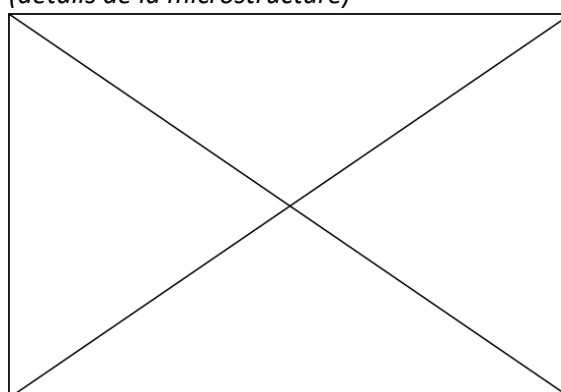
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
3	3

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Indirect	0,99
Abaque	Indirect	
PROCEDE	Indirect	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon 930 1 892 _T

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : 930 1 892

Numéro de l'élément d'armure : 930 1 892

Lieu de conservation : Musée Dobrée (Nantes)

Lieu de découverte :

Description : Cette pièce, un brassard droit, est composée de 9 parties. Une pour le bras trois pour le coude et six pour l'avant bras dont les deux plus importantes sont articulées par charnière et se fermaient à l'aide d'une sangle cuir reliée à boucle avec ardillon (Notice du Musée Dobrée).

Datation : 1460 (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Italie

Ville : Milan

Élément de l'armure étudié : Brassard

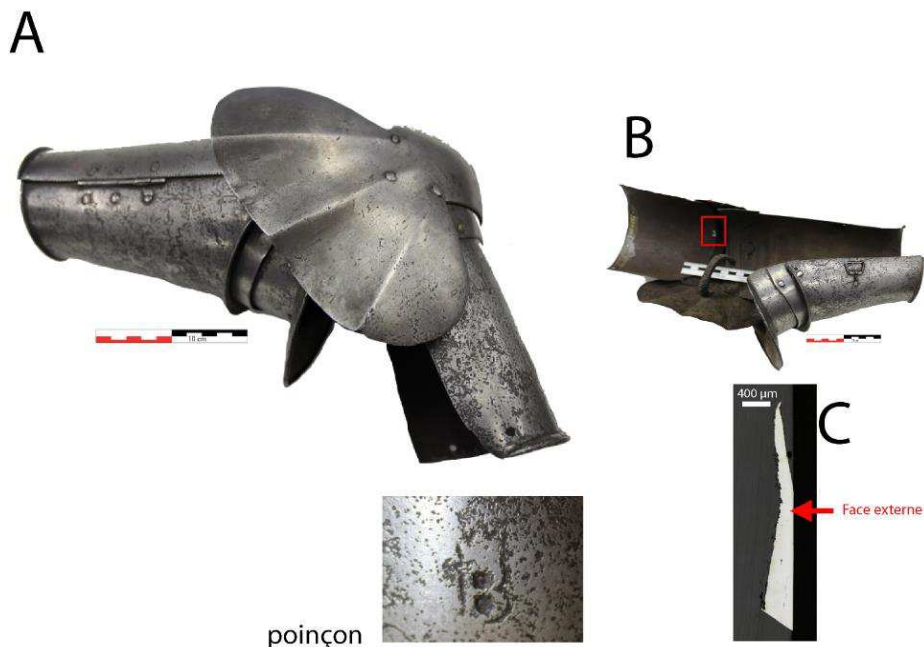
Armurier ou atelier associé : Indéterminé

Présence de marque(s) : Oui

Détails de la (ou des) marque(s) : Poinçon sur l'avant bras : lettre B couronnée

Référence bibliographique :

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé sur la lame supérieure du brassard

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[<50]	Non résolue	Non	Non	Oui	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
0,2	0,48	0,18	180 ($\sigma=21$)	Non dosé	Non

Commentaires :

Cet échantillon présente un gradient de teneur en carbone qui s'étend sur toute la surface de l'échantillon d'environ 0,8% à 0,1% de carbone.

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

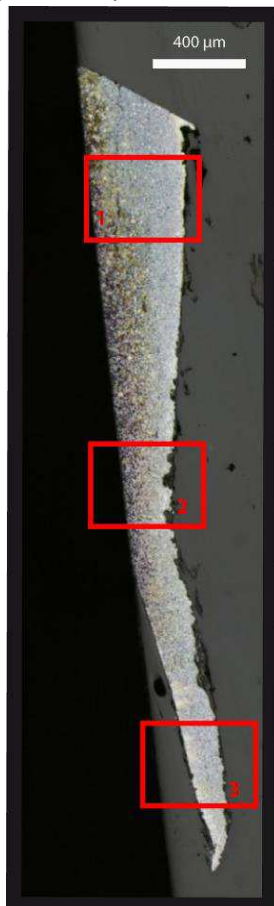
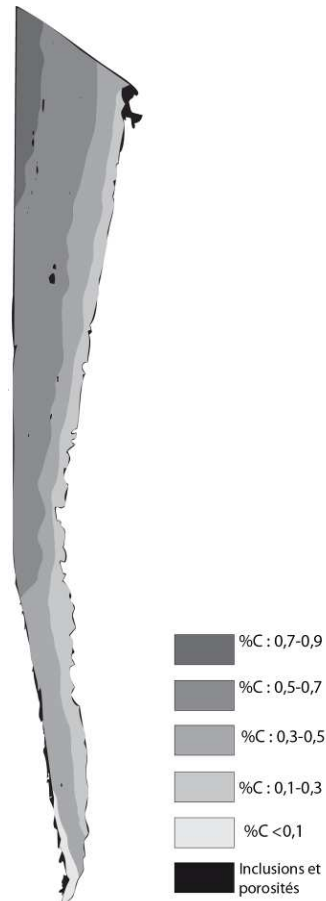
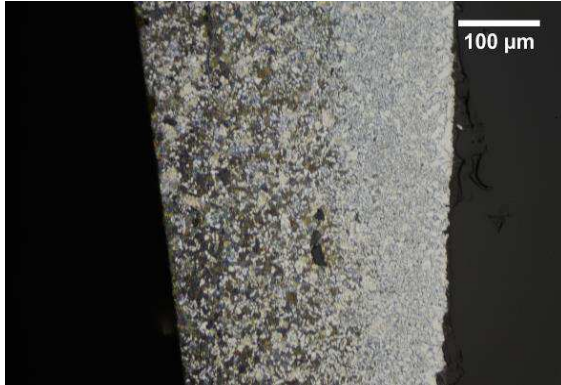


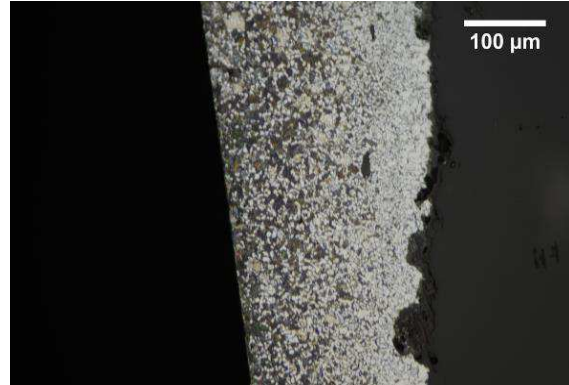
Schéma correspondant



Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



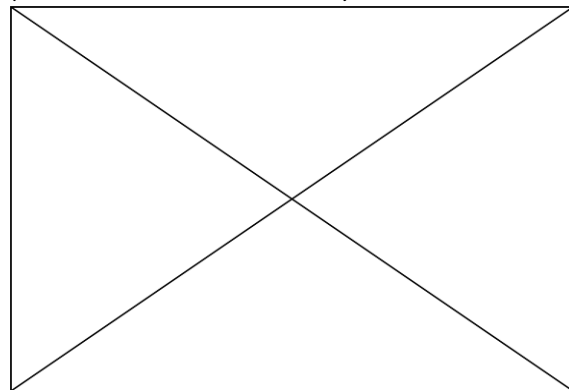
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
2	1

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Direct	0,03
Abaque	Direct	
PROCEDE	Direct	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Oui	Non	Non	Oui	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon 930 1 895 _T

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : 930 1 895

Numéro de l'élément d'armure : 930 1 895

Lieu de conservation : Musée Dobrée (Nantes)

Lieu de découverte :

Description : Cette pièce est composée de 5 parties et a été identifiée par O. Renaudeau comme une cubitière.

Datation : XVe siècle (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Italie

Ville : Milan

Élément de l'armure étudié : Cubitière

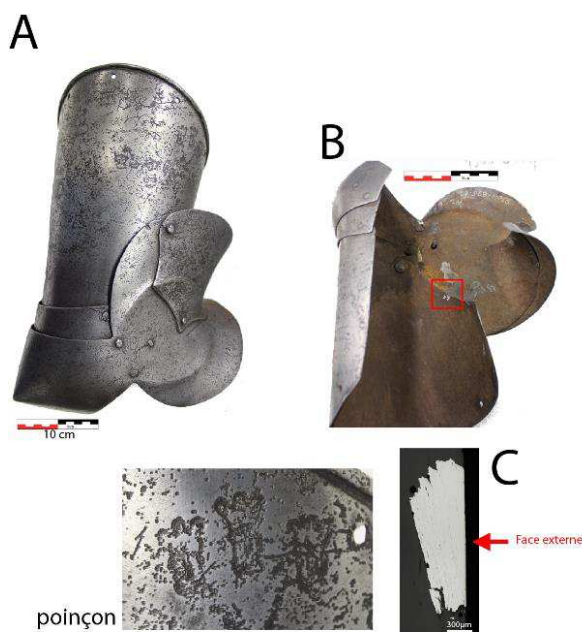
Armurier ou atelier associé : Pier Innocenzo da Faer no (a travaillé pour les Missaglia)

Présence de marque(s) : Oui

Détails de la (ou des) marque(s) : 3 poinçons : trois initiales couronnées (Lettre Y), cette marque pourrait être attribuée à celle de Pier Innocenzo da Faer no, armurier milanais ayant travaillé pour la famille Missaglia

Référence bibliographique :

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé sur la partie centrale de la cubitière

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[<50]	Non résolue	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
0,4	0,15	0,07	146 ($\sigma=23$)	Non dosé	Oui

Commentaires :

Cet échantillon est faiblement hétérogène. Il peut être découpé en trois bandes. Les deux extrémités présentent des structures plus carburées que la partie centrale (autour de 0,2% de carbone), à relier sans doute à l'hétérogénéité du métal utilisé.

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

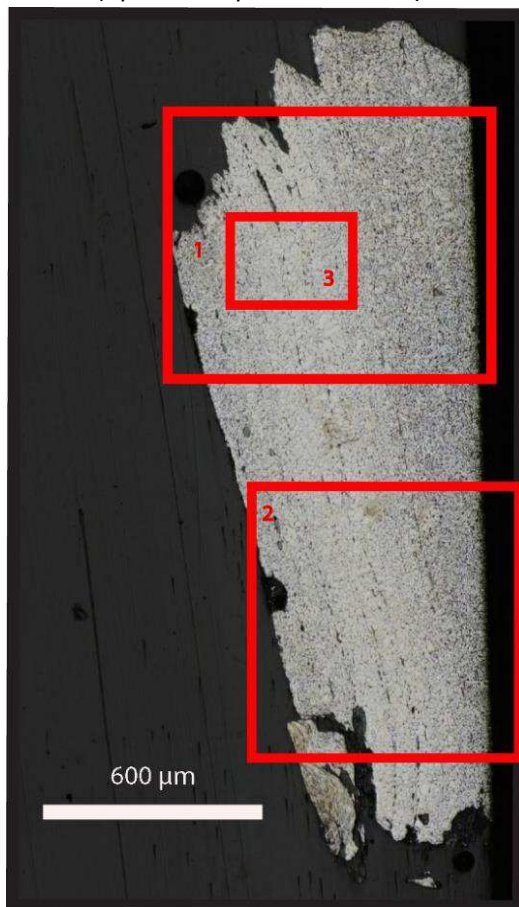
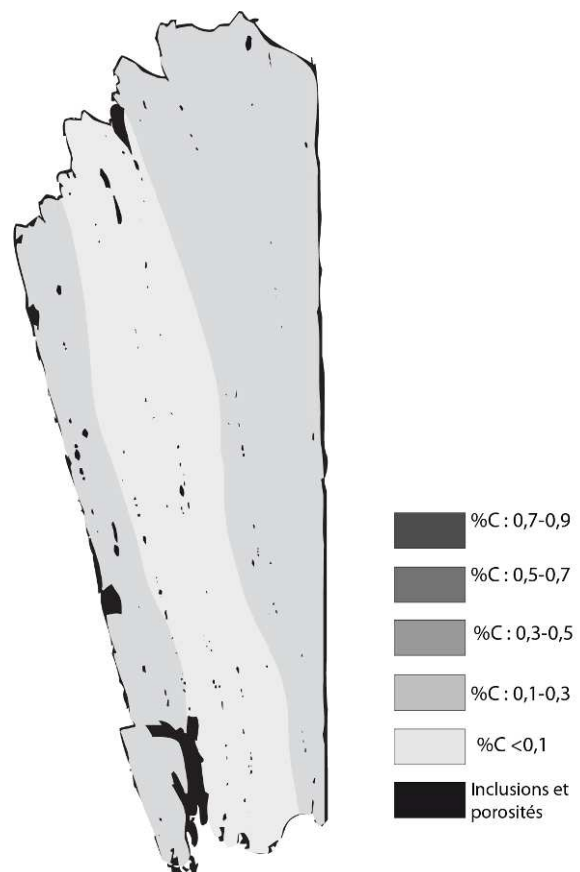


Schéma correspondant



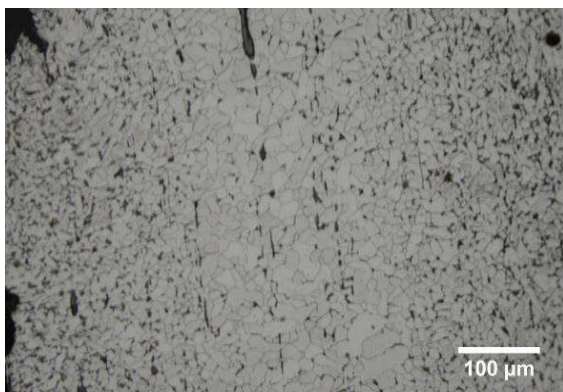
Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



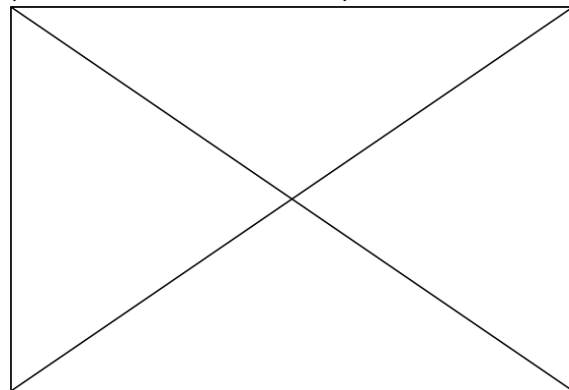
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
3	2

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Indirect	0,98
Abaque	Indéterminé	
PROCEDE	Indirect	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Dissier, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon

930 1 904 _T

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : 930 1 904

Numéro de l'élément d'armure : 930 1 904

Lieu de conservation : Musée Dobrée (Nantes)

Lieu de découverte :

Description : Pièce en trois parties, une pour le poignée refermée et rivetée, une pour le dessus de la main refermée, rivetée et articulée, et une pour les phalanges rivetées et articulée (Notice du Musée Dobrée).

Datation : 1450 (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Italie

Ville : Milan

Élément de l'armure étudié : Gantelet

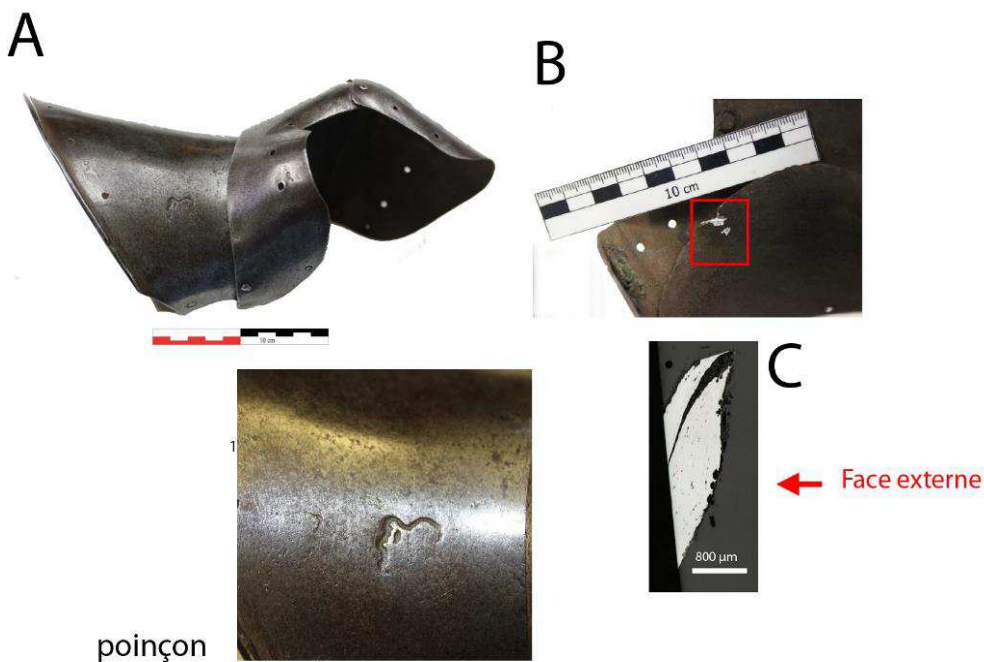
Armurier ou atelier associé : Indéterminé

Présence de marque(s) : Oui

Détails de la (ou des) marque(s) : Un poinçon sur la poignée indéterminé

Référence bibliographique :

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé sur la plaque protégeant le poignet de ce gantelet

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
Ind	Non résolue	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
0,7	0,69	0,13	240 ($\sigma=33$)	Non dosé	Non

Commentaires :

Cet échantillon, fortement carburé (%C*=0,7) présente une faible hétéogénéité en teneur en carbone, la partie centrale étant plus carburée que les extrémités.

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon

(après attaque au Nital 3%)

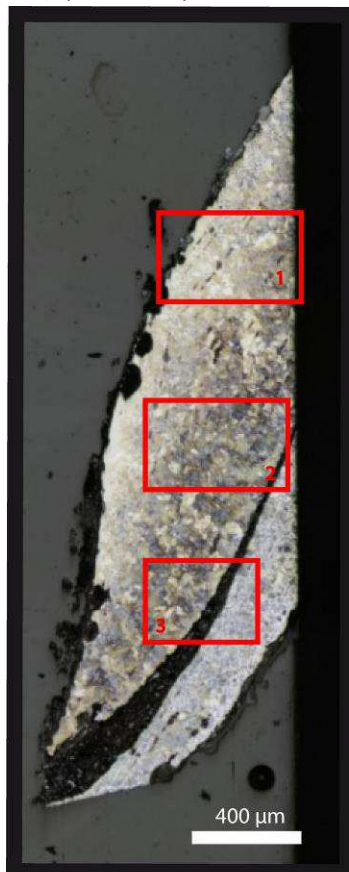
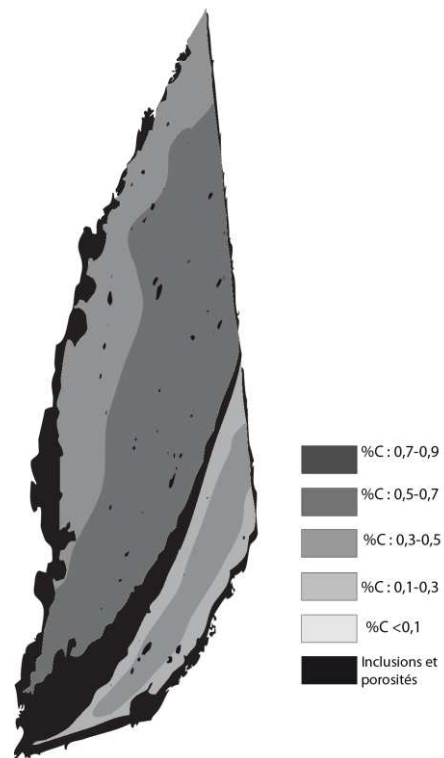
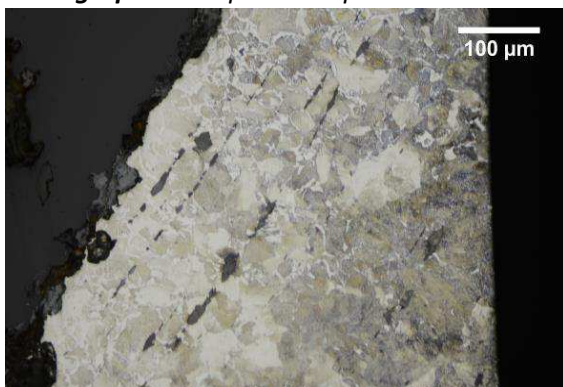


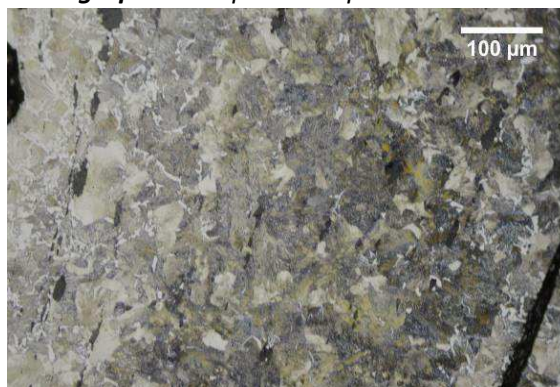
Schéma correspondant



Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



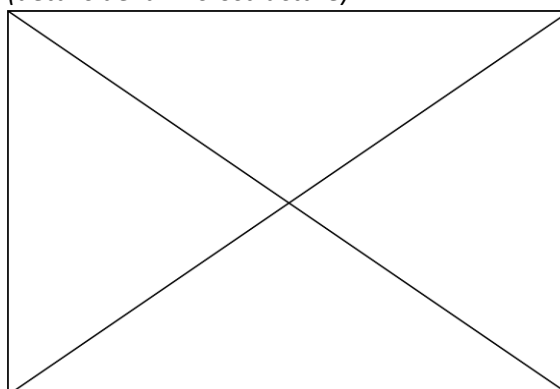
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
4	1

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Direct	0,05
Abaque	Direct	
PROCEDE	Direct	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Oui	Non	Non	Oui	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon

SNI40 1

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : SNI40

Numéro de l'élément d'armure : SNI40

Lieu de conservation : Musée Dobrée (Nantes)

Lieu de découverte :

Description : Gantelet partiellement conservé (faisant paire avec le n° SNI39). Poignet montant formé d'une seule pièce rivetée. Le décor gravé est constitué de bandes garnies de rinceaux stylisés d'inspiration renaissance, avec une bordure galonnée et ornée de rivets servant au maintien du gantelet interne. Le dessus de la main et des doigts est composés de quinze pièces rivetées, les phalanges sont en partie conservées. Modèle qui s'inspire du costume civil (Notice du Musée Dobrée).

Datation : XVIe-XVIIe siècles (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Indéterminée

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Gantelet

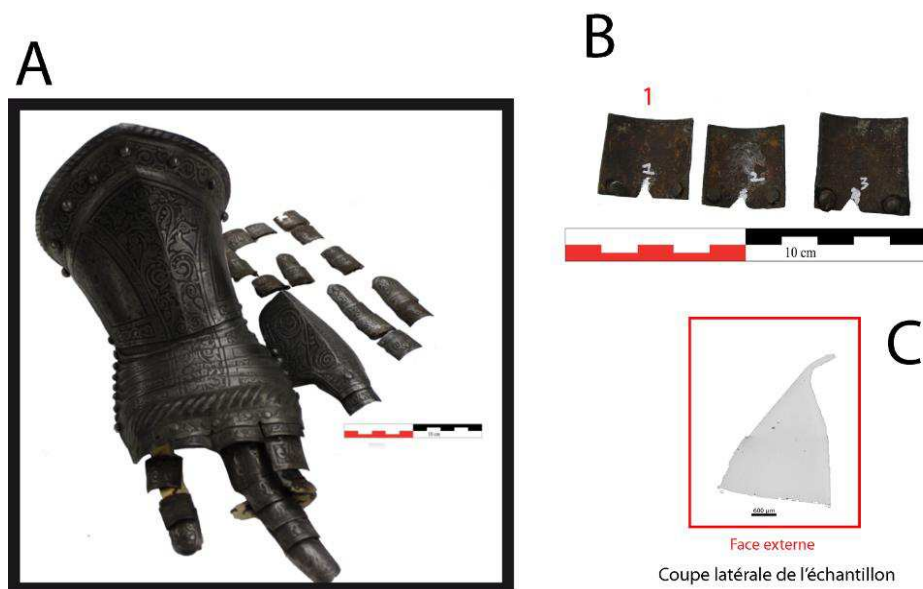
Armurier ou atelier associé : Indéterminé

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique :

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe latérale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé sur une des plaquettes d'un doigt du gantelet en coupe latérale du fait de sa faible taille

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[<50]	Non résolue	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
0,1	0,36	0,11	229 ($\sigma=10$)	Non dosé	Non

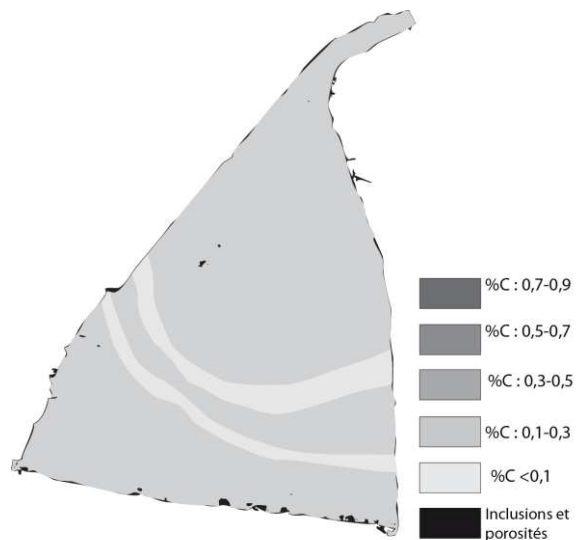
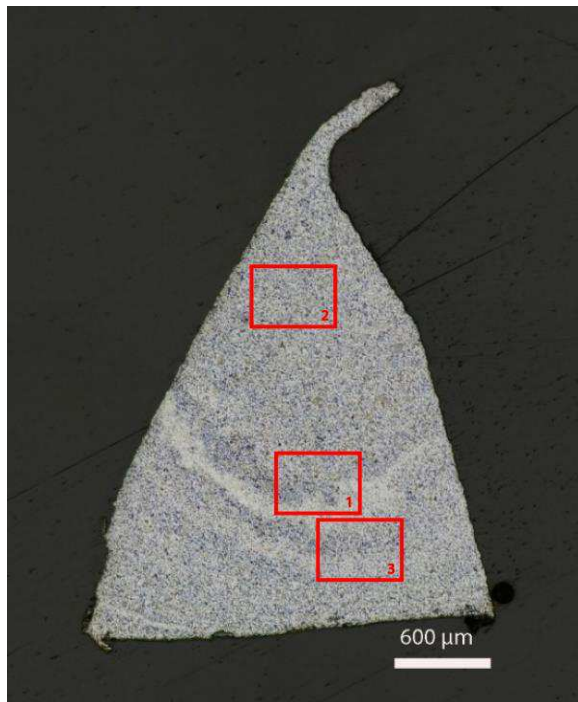
Commentaires :

Cet échantillon présente une structure moyennement carburée homogène, autour de 0,4% de carbone. De fines bandes moins carburées se dégagent par endroit.

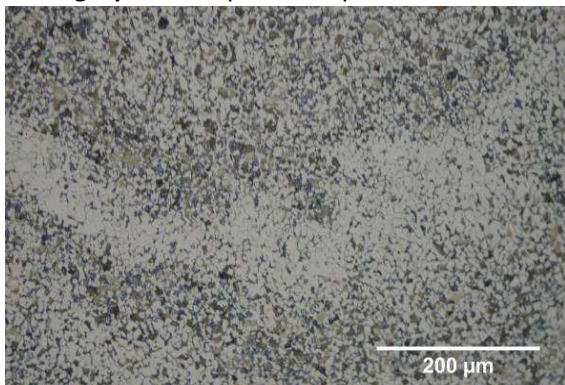
Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

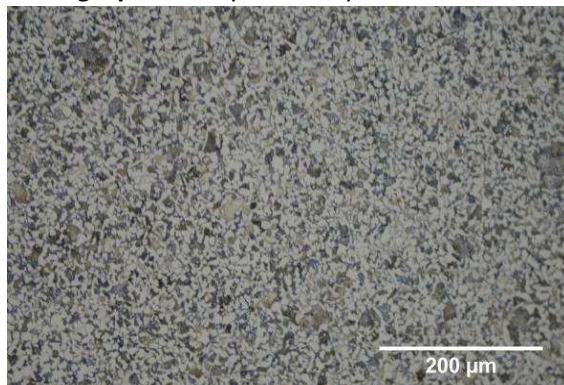
Schéma correspondant



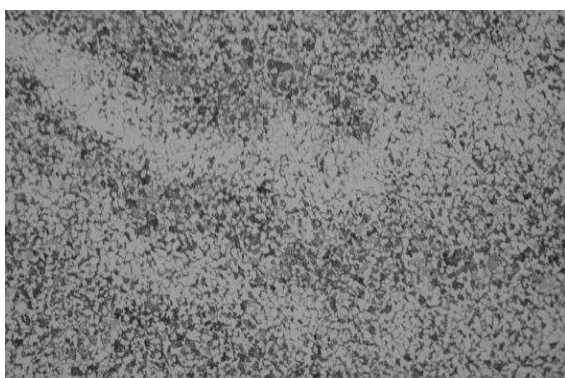
Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



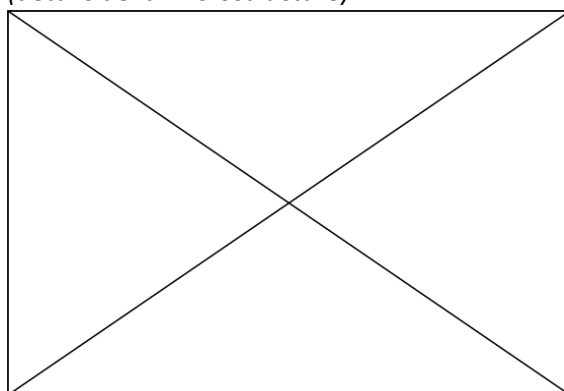
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
Non défini	Non défini

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Non défini	Non défini
Abaque	Non défini	
PROCEDE	Non défini	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon SNI40 3

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : SNI40

Numéro de l'élément d'armure : SNI40

Lieu de conservation : Musée Dobrée (Nantes)

Lieu de découverte :

Description : voir échantillon SNI40 1

Datation : XVIe-XVIIe siècles (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Indéterminée

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Gantelet

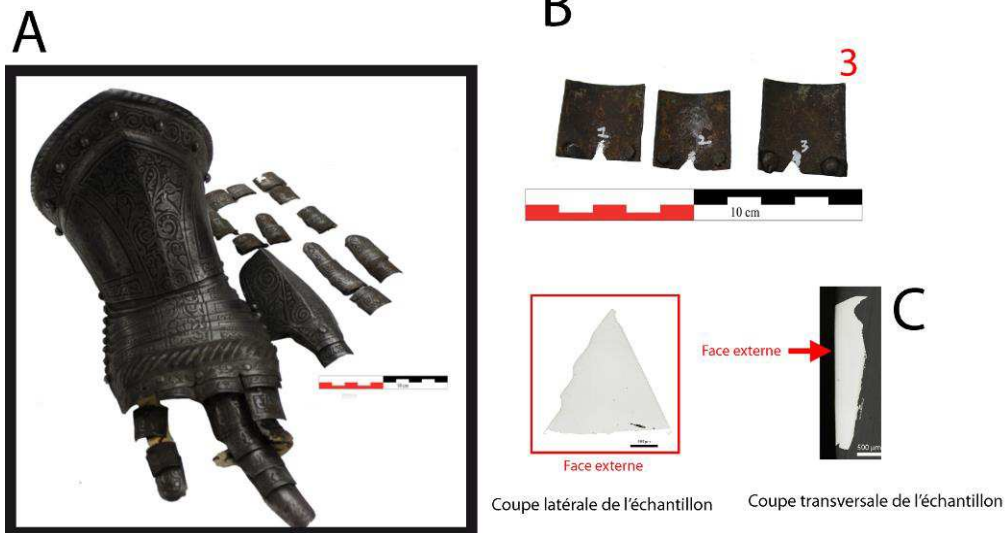
Armurier ou atelier associé : Indéterminé

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique :

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vues en coupe latérale et transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé sur une des plaquettes d'un doigt du gantelet. Il a pu être étudié en coupe latérale et transversale.

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[<50]	Non résolue	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
<0,1	0,40	0,00	216 ($\sigma=18$)	Non dosé	Non

Commentaires :

La structure de cet échantillon moyennement carburé est très homogène. Les grains sont très petits et uniformément écrouis selon la direction de martelage.

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

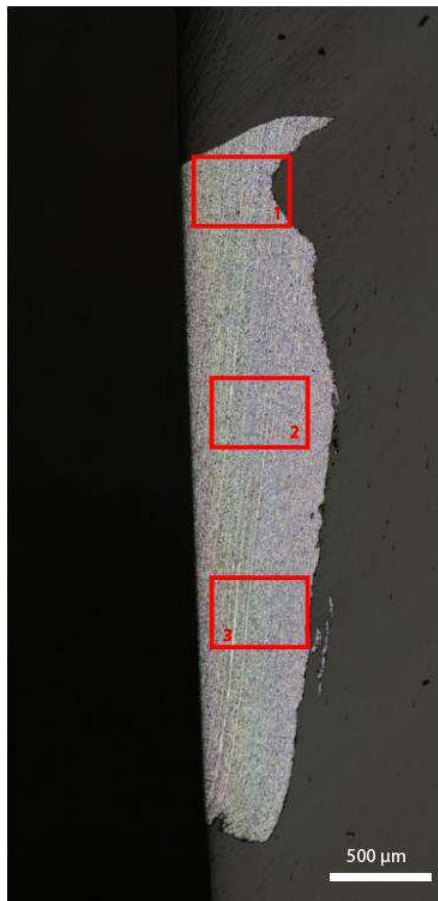
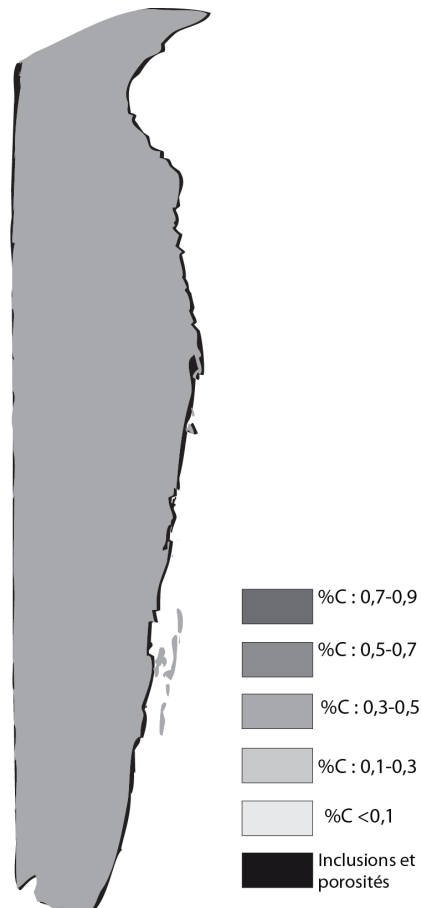
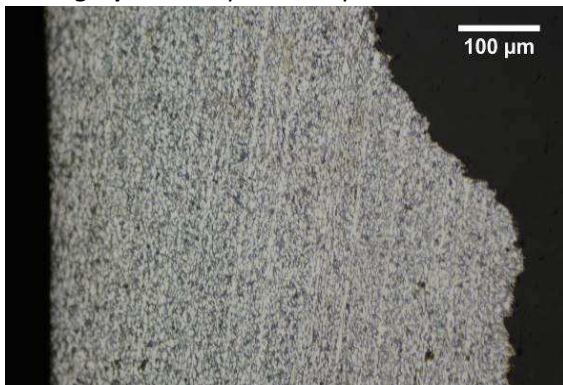


Schéma correspondant



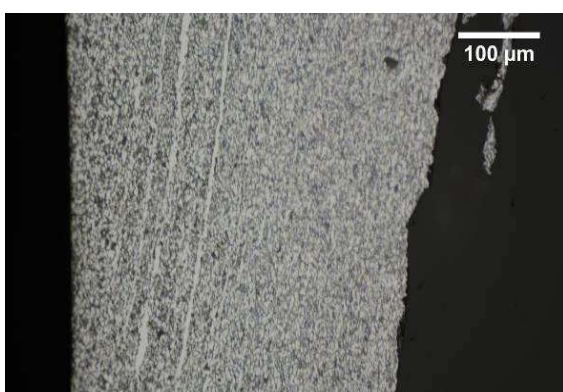
Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



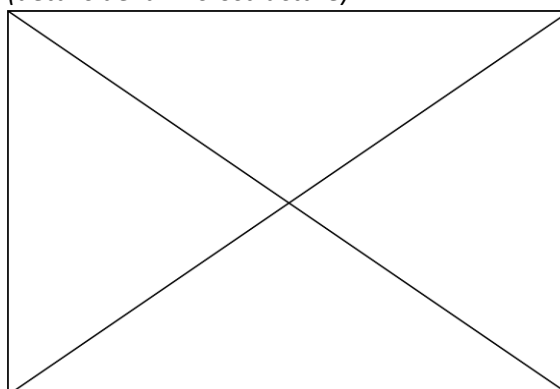
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
Non défini	Non défini

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Non défini	Non défini
Abaque	Non défini	
PROCEDE	Non défini	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon SNI40 2

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : SNI40

Numéro de l'élément d'armure : SNI40

Lieu de conservation : Musée Dobrée (Nantes)

Lieu de découverte :

Description : voir échantillon SNI40 1

Datation : XVIe-XVIIe siècles (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Indéterminée

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Gantelet

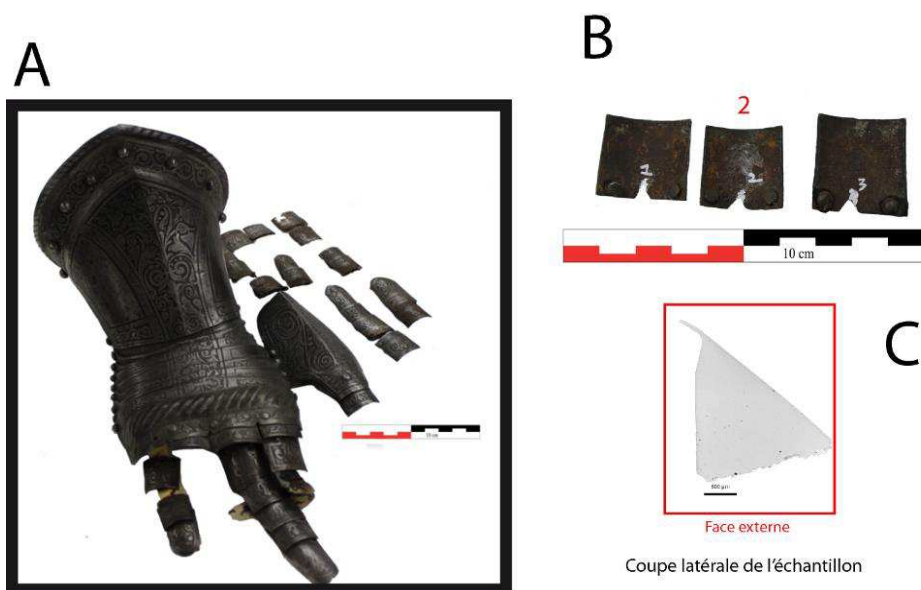
Armurier ou atelier associé : Indéterminé

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique :

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe latérale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé sur une des plaquettes d'un doigt du gantelet en coupe latérale du fait de sa faible taille

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (µm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[<50]	Lamellaire et globulaire	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
0,3	0,39	0,06	224 (σ= 7)	Non dosé	Non

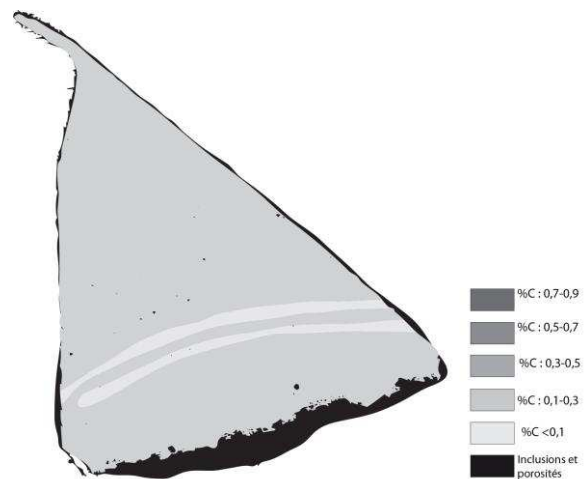
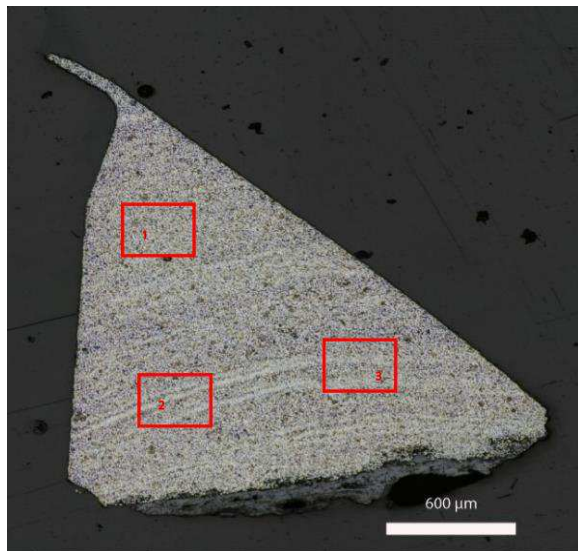
Commentaires :

La structure de cet échantillon moyennement carburé est très homogène. Les grains sont très petits et uniformément écrouis selon la direction de martelage. De fines bandes moins carburées se dégagent par endroit.

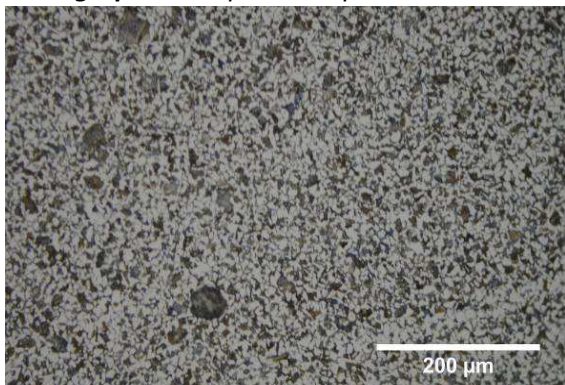
Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

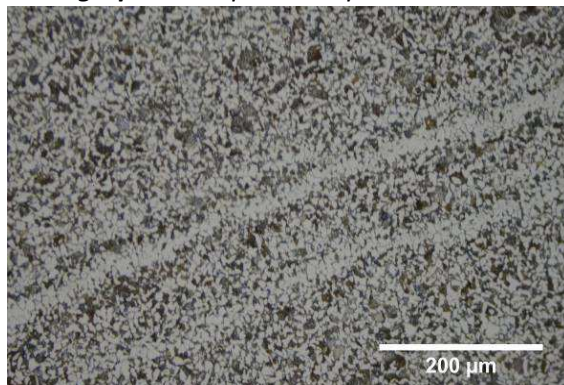
Schéma correspondant



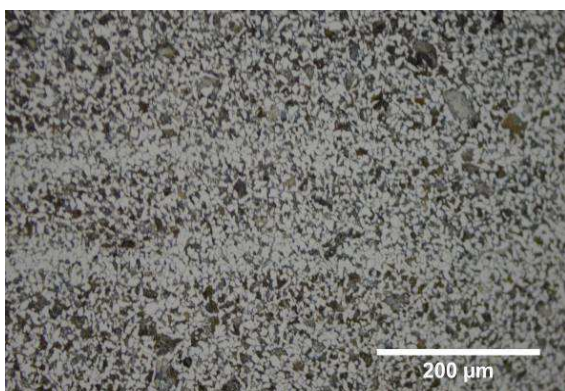
Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



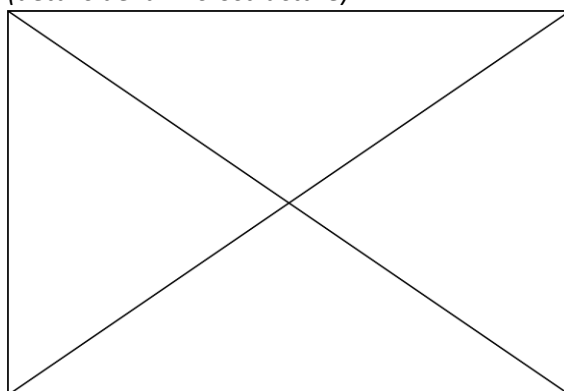
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
Non défini	Non défini

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Non défini	Non défini
Abaque	Non défini	
PROCEDE	Non défini	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon 40/ S.INV_4

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : SNI40

Numéro de l'élément d'armure : SNI40

Lieu de conservation : Musée Dobrée (Nantes)

Lieu de découverte :

Description : voir échantillon SNI40 1

Datation : XVIe-XVIIe siècles (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Indéterminée

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Gantelet

Armurier ou atelier associé : Indéterminé

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique :

Repérage du prélèvement

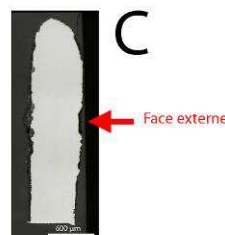
A



B



C



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé sur une des plaques protégeant le poignet de ce gantelet

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[<50]	Non résolue	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
<0,1	0,20	0,00	220 ($\sigma = 6$)	Non dosé	Non

Commentaires :

Cet échantillon présente une structure moyennement aciée homogène, autour de 0,4% de carbone. De fines bandes moins carburées se dégagent par endroit.

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

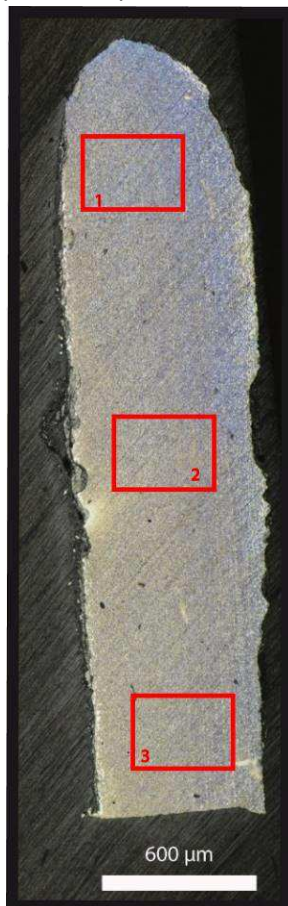
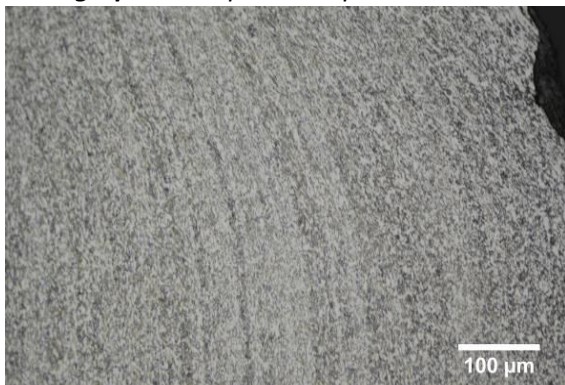


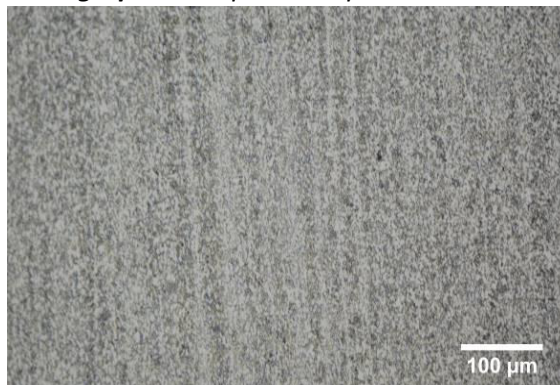
Schéma correspondant



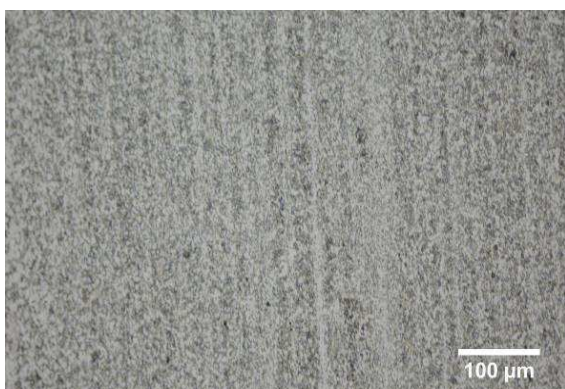
Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



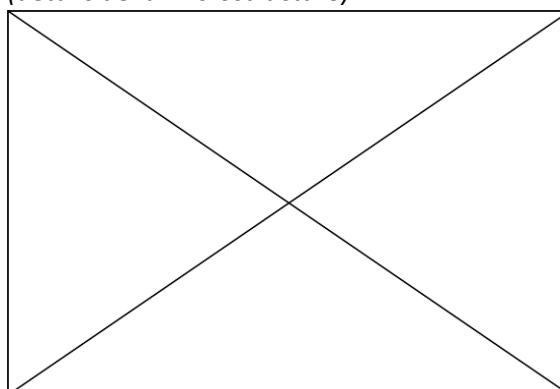
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
Non défini	Non défini

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Non défini	Non défini
Abaque	Non défini	
PROCEDE	Non défini	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon SNI39

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : SNI39

Numéro de l'élément d'armure : SNI39

Lieu de conservation : Musée Dobrée (Nantes)

Lieu de découverte :

Description : Gantelet partiellement conservé (faisant paire avec le n° SNI40). Poignet montant formé d'une seule pièce rivetée. Le décor gravé est constitué de bandes garnies de rinceaux stylisés d'inspiration renaissance, avec une bordure galonnée et ornée de rivets servant au maintien du gantelet interne. Le dessus de la main et des doigts est composés de quinze pièces rivetées, les phalanges sont en partie conservées. Modèle qui s'inspire du costume civil (Notice du Musée Dobrée).

Datation : XVIe-XVIIe siècles (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Indéterminée

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Gantelet

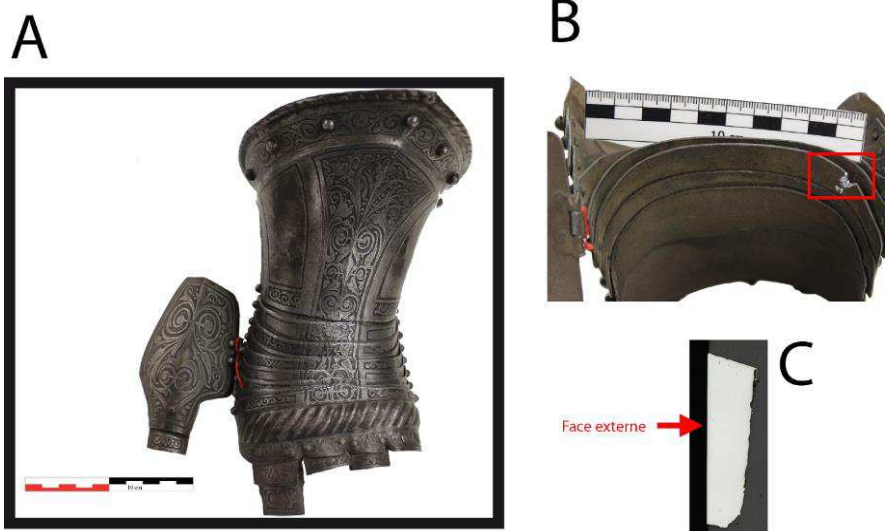
Armurier ou atelier associé : Indéterminé

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique :

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé sur une des plaques protégeant le poignet de ce gantelet

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[<50]	Non résolue	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
<0,1	0,33	0,14	198 ($\sigma=9$)	Non dosé	Non

Commentaires :

La structure de cet échantillon moyennement carburé est très homogène. Les grains sont très petits et uniformément écrouis selon la direction de martelage.

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon

(après attaque au Nital 3%)

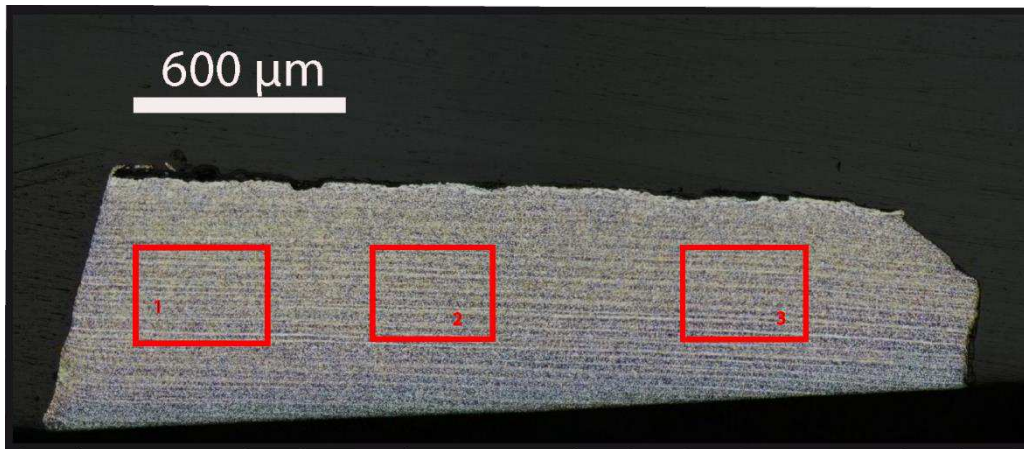
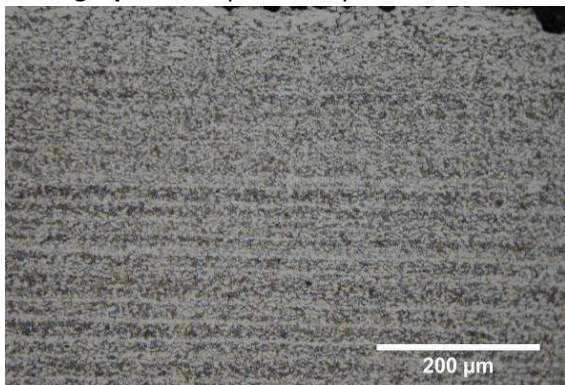


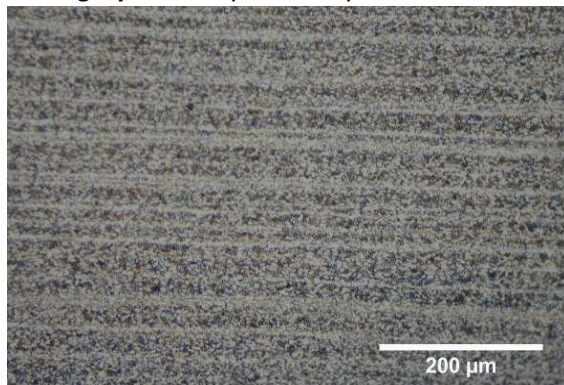
Schéma correspondant



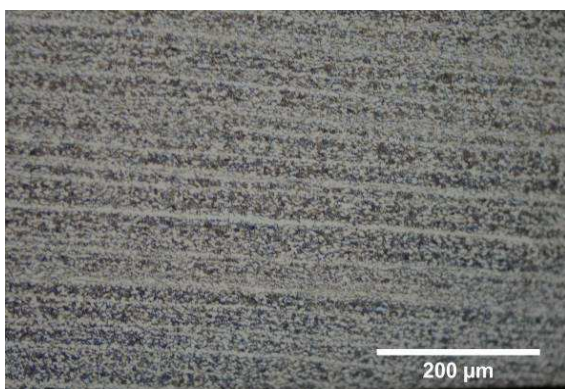
Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



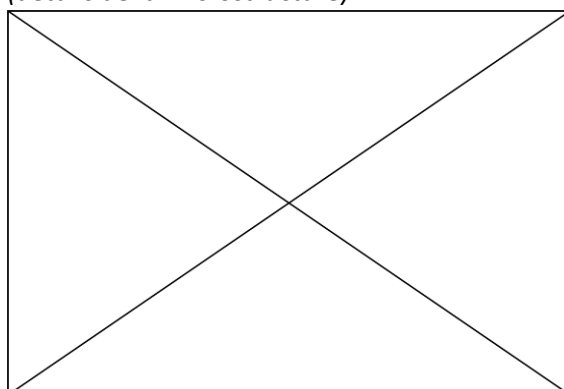
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
Non défini	Non défini

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Non défini	Non défini
Abaque	Non défini	
PROCEDE	Non défini	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon 895415

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : 895415

Numéro de l'élément d'armure : 895415

Lieu de conservation : Musée Dobrée (Nantes)

Lieu de découverte :

Description : Dossière d'armure (Notice du Musée Dobrée).

Datation : XVI^e siècle (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : France

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Dossière

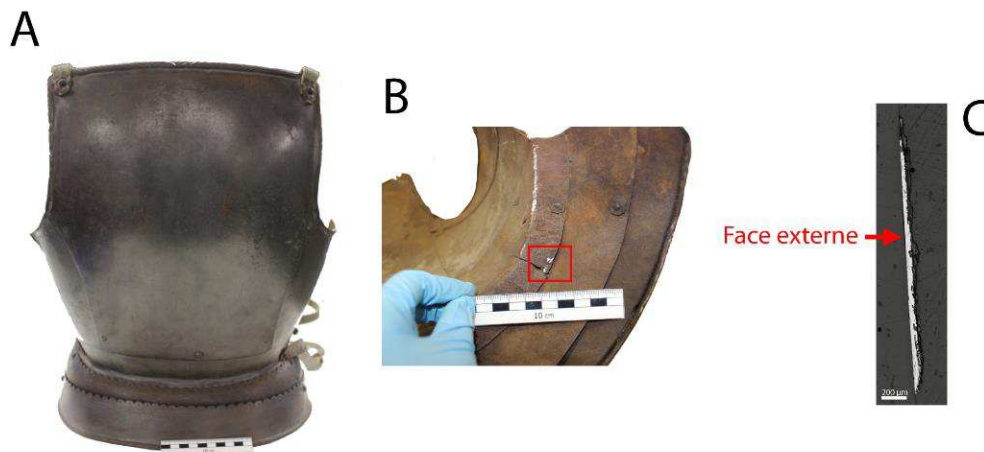
Armurier ou atelier associé : Indéterminé

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique :

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé sur le bord de la première lame inférieure de la dossière

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[50-200]	Non résolue	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
3,0	0,06	0,00	215 ($\sigma = 28$)	0,17	Non

Commentaires :

Cet échantillon possède une structure entièrement ferritique. La présence de phosphore dans le métal a été mise en évidence à hauteur de 0,2%mass. Il s'agit donc d'un fer phosphoreux.

Analyses métallographiques

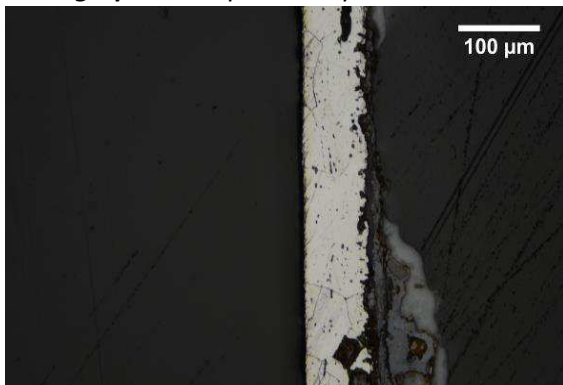
Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)



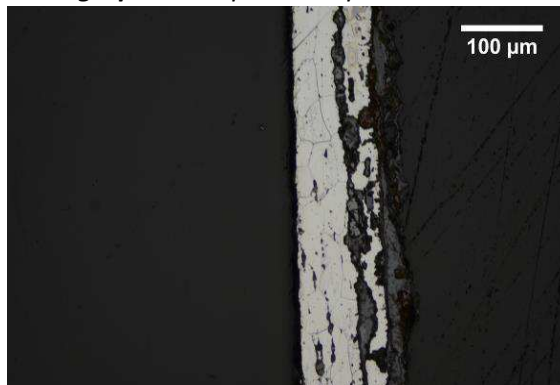
Schéma correspondant



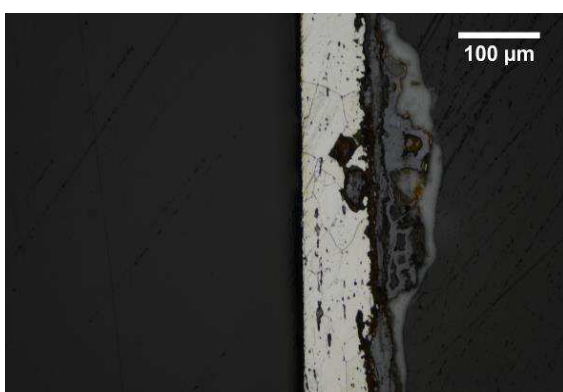
Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



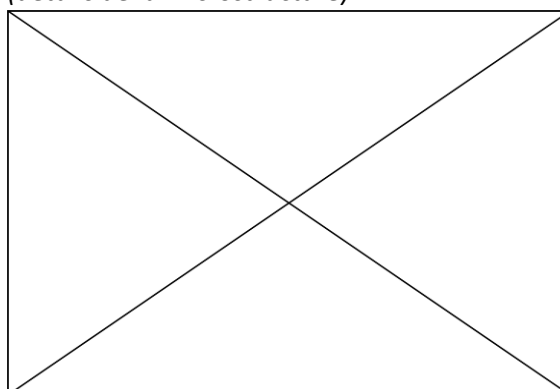
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
3	1,2,3

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Indirect	>0,99
Abaque	Indirect	
PROCEDE	Indirect	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon 930_1_911

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : 930_1_911

Numéro de l'élément d'armure : 930_1_911

Lieu de conservation : Musée Dobrée (Nantes)

Lieu de découverte :

Description : Cuissard d'armure gauche d'une seule pièce travaillé au repoussé et gravé. Un galon de pointe est présent sur la face externe, ainsi qu'un galon de grosses pointes de diamant en travers souligné par un galon gravé d'entrelacs. Les décors sont composés d'une large bande verticale avec arête médiane gravée d'un rinceau végétal. Une boucle privée de son ardillon est rivetée sur le bord externe de la pièce, on note sept trous de rivure (Notice du Musée Dobrée). Ce décor rappelle ceux réalisés à Augsbourg (O. Renaudeau).

Datation : XVI^e siècle (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Allemagne

Ville : Augsbourg

Élément de l'armure étudié : Cuissard

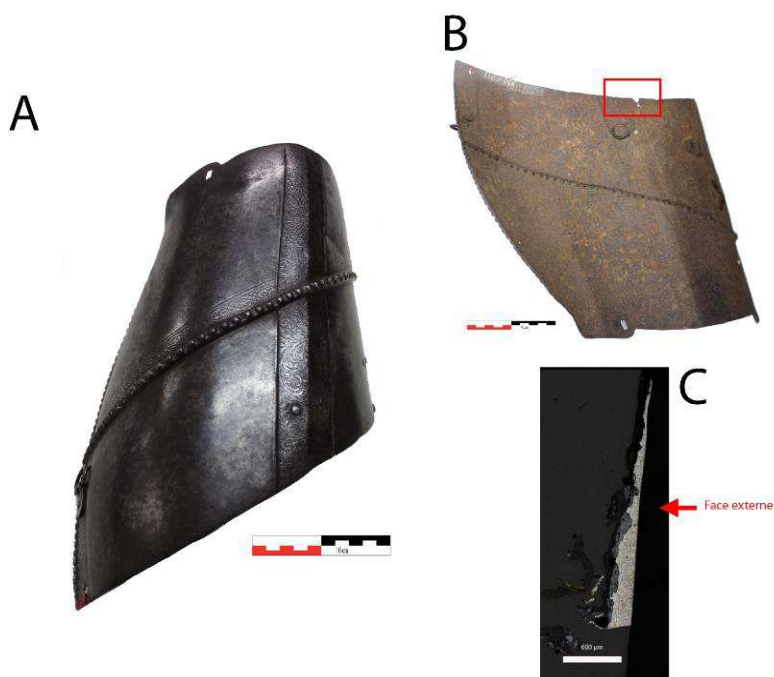
Armurier ou atelier associé : Indéterminé

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique :

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé sur le bord supérieur du cuissard

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[<50]	Non résolue	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
1,7	0,20	0,00	183 ($\sigma=15$)	Non dosé	Non

Commentaires :

Cet échantillon présente la structure d'un acier homogène moyennement carburé (%C*=0,2), les inclusions sont peu nombreuses et de très faible taille (<10 μm)

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

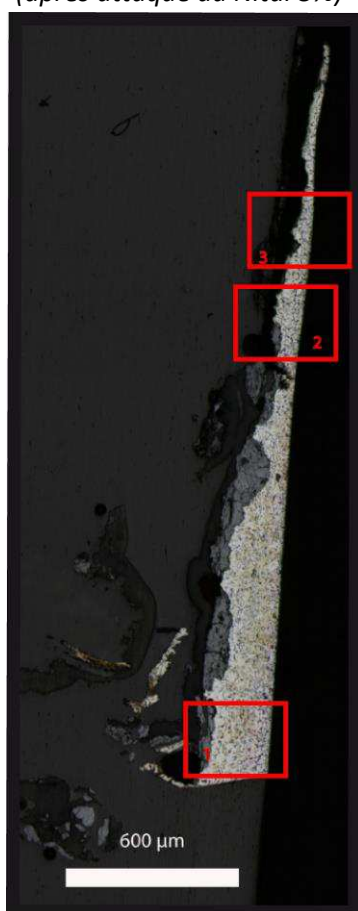
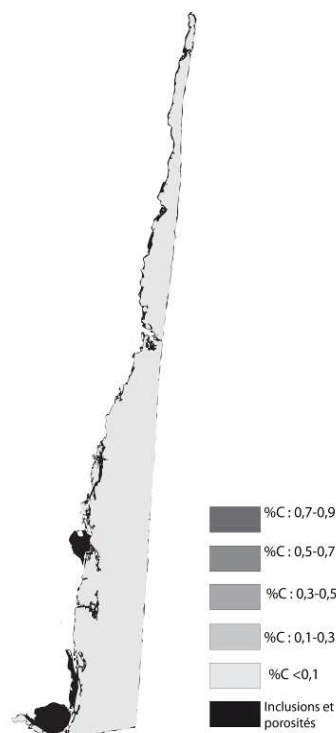


Schéma correspondant



Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



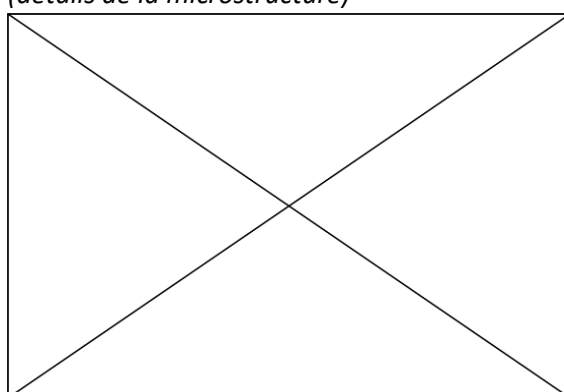
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
3	3

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Direct	<0,01
Abaque	Direct	
PROCEDE	Direct	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Oui	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon 895_414

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : 895_414

Numéro de l'élément d'armure : 895_414

Lieu de conservation : Musée Dobrée (Nantes)

Lieu de découverte :

Description : Gantelet d'armure (Notice du Musée Dobrée).

Datation : XVI^e siècle (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : France

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Gantelet

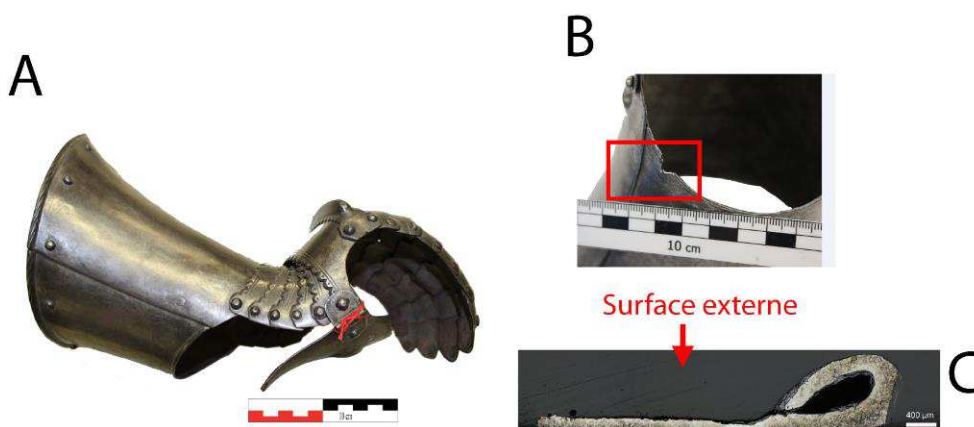
Armurier ou atelier associé : Indéterminé

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique :

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé sur la plaque recouvrant l'intérieur du poignet du gantelet

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
Ind	Non résolue	Oui	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
1,6	>0,30	0,00	328 ($\sigma=11$)	Non dosé	Non

Commentaires :

Cet échantillon est un acier moyennement carburé qui a été trempé. Les inclusions dans le métal sont peu nombreuses.

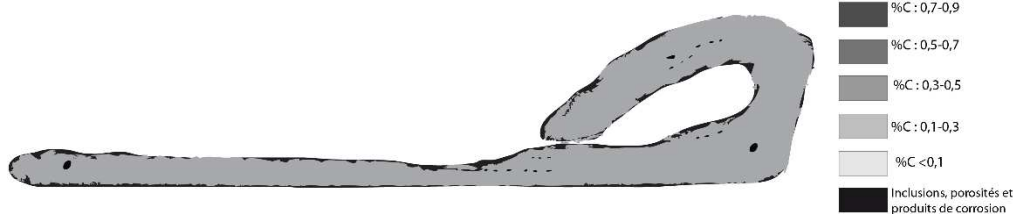
Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon

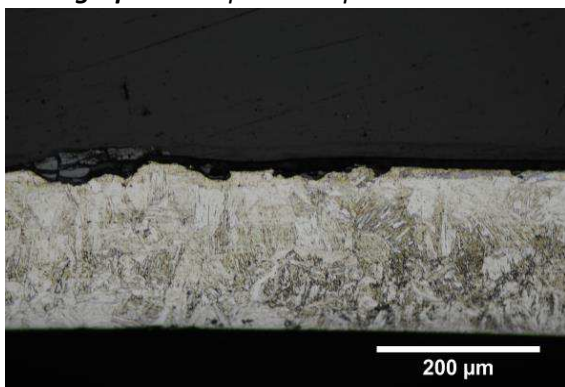
(après attaque au Nital 3%)



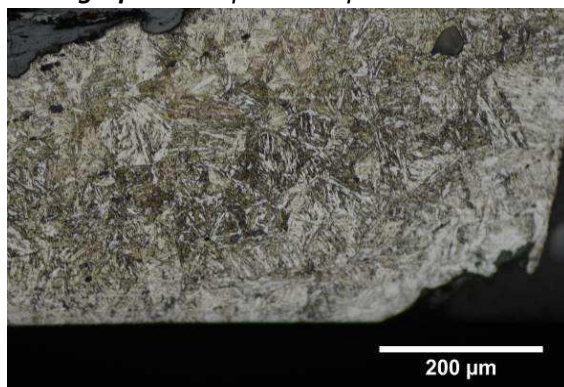
Schéma correspondant



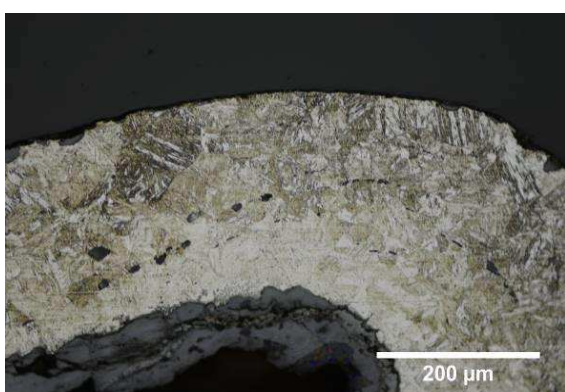
Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



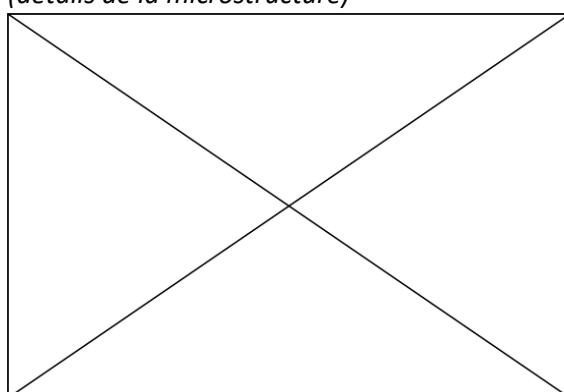
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
5	5

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Direct	<0,01
Abaque	Direct	
PROCEDE	Direct	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon 930.1.891

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : 930.1.891

Numéro de l'élément d'armure : 930.1.891

Lieu de conservation : Musée Dobrée (Nantes)

Lieu de découverte :

Description : Epaulière d'armure qui pourrait avoir été fabriquée en Italie du Nord (d'après O. Renaudeau)

Datation : 1470 (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Italie

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Epaulière

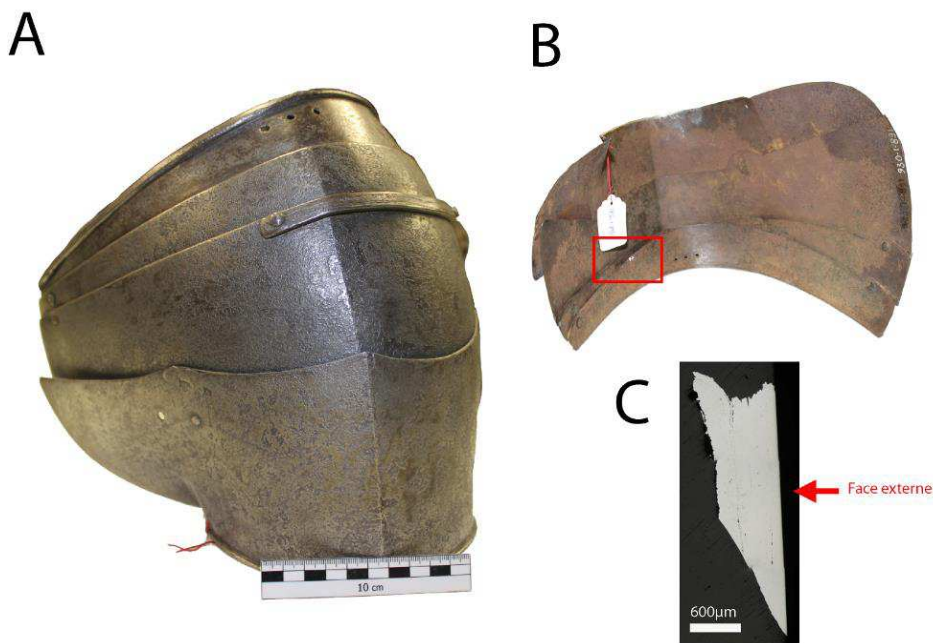
Armurier ou atelier associé : Indéterminé

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique :

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé sur la quatrième lame inférieure de l'épaulière

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[50-200]	Non résolue	Non	Non	Oui	Oui

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
0,4	0,26	0,15	183 ($\sigma=11$)	Non dosé	Non

Commentaires :

Cet échantillon présente un gradient de teneur en carbone qui s'étend sur toute la surface de l'échantillon de 0,5% de carbone à moins de 0,1%.

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

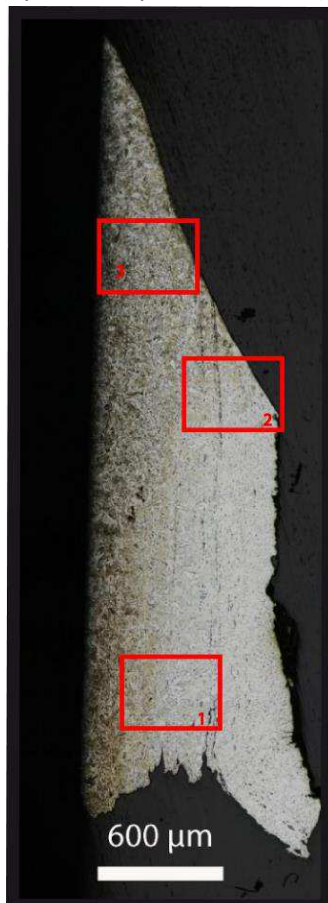
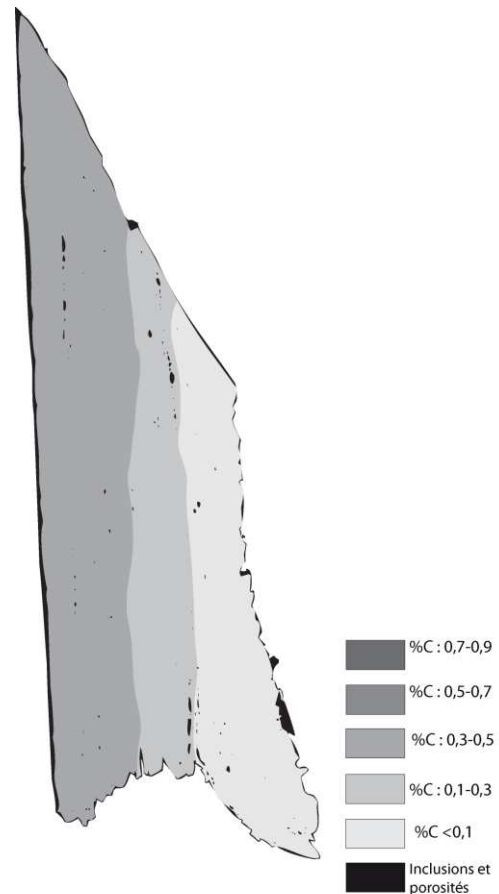
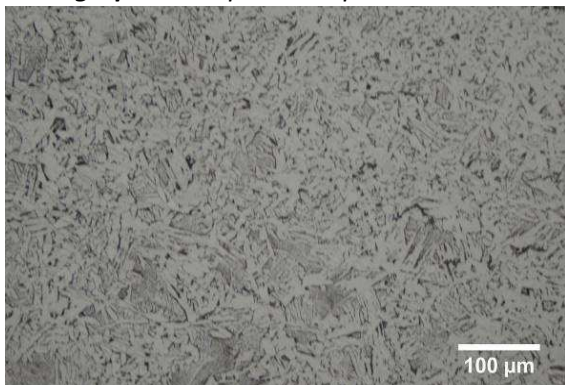


Schéma correspondant



Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



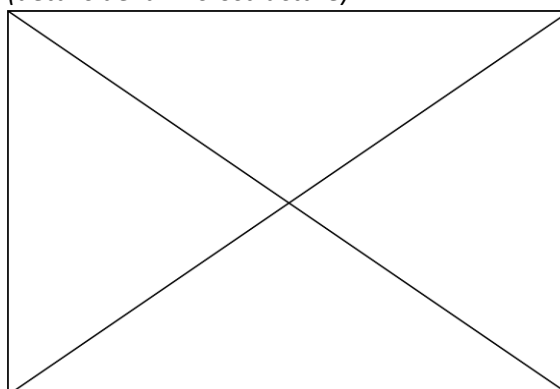
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
4	2

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Direct	0,19
Abaque	Direct	
PROCEDE	Direct	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Oui	Non	Non	Oui	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon 895.4.1.3_1

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : 895.4.1.3

Numéro de l'élément d'armure : 895.4.1.3

Lieu de conservation : Musée Dobrée (Nantes)

Lieu de découverte :

Description : Gantelet d'armure (Notice du Musée Dobrée).

Datation : XVI^e siècle (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : France

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Gantelet

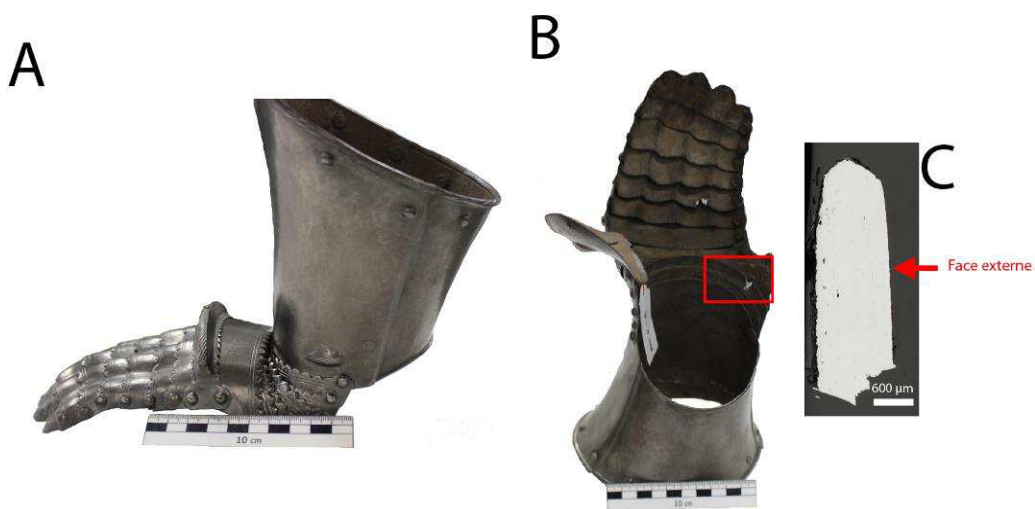
Armurier ou atelier associé : Indéterminé

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique :

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé sur une des plaques protégeant le poignet de ce gantelet.

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
Ind	Non résolue	Oui	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
0,3	>0,30	0,00	470 ($\sigma=56$)	Non dosé	Non

Commentaires :

Cet échantillon présente un faciès typique de trempe sur l'ensemble de sa surface, mélangeant martensite et bainite (micrographies 1 et 2) mais également perlite nodulaire (micrographie 3). Sa teneur en carbone ne peut pas être déterminée précisément par métallographie. Il s'agit toutefois d'un acier moyennement carburé ($\%C > 0,3$ et $\%C < 0,7$)

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

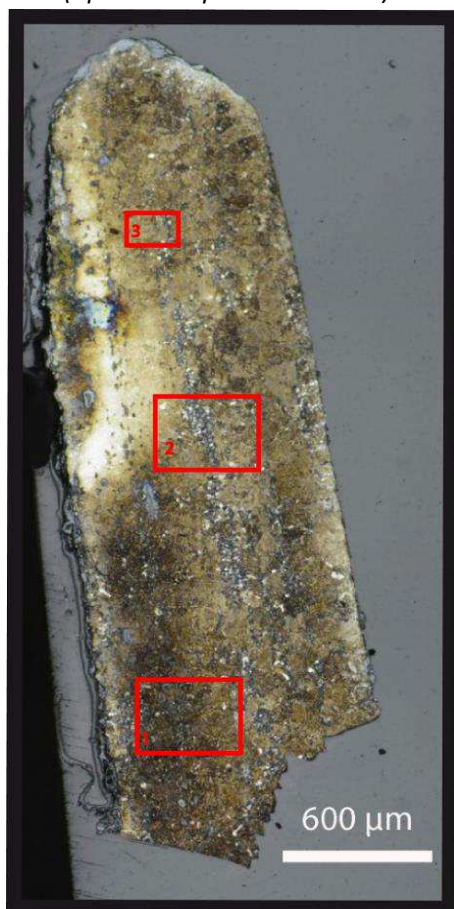
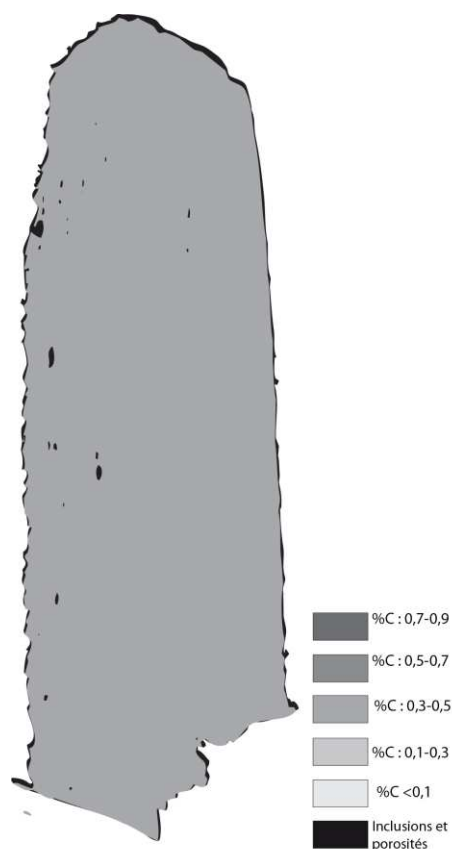
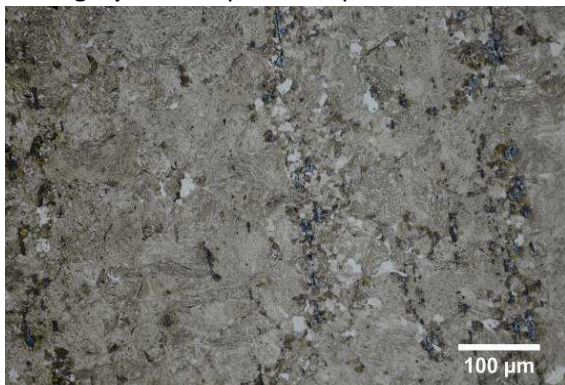


Schéma correspondant



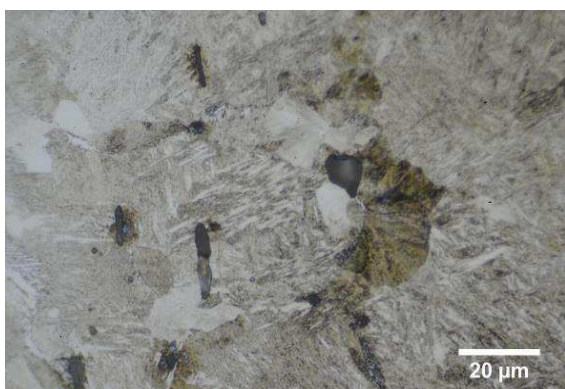
Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



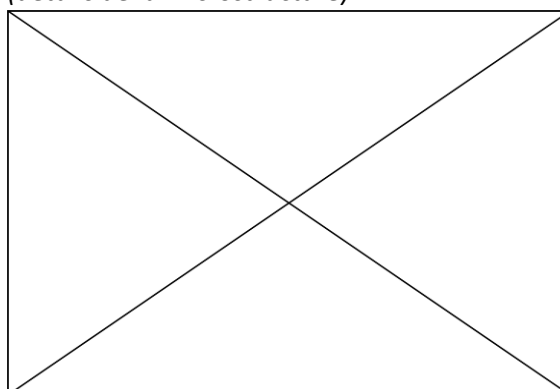
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
3	2

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Direct	<0,01
Abaque	Direct	
PROCEDE	Direct	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon 895.4.1.3_2

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : 895.4.1.3

Numéro de l'élément d'armure : 895.4.1.3

Lieu de conservation : Musée Dobrée (Nantes)

Lieu de découverte :

Description : Gantelet d'armure (Notice du Musée Dobrée).

Datation : XVI^e siècle (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : France

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Gantelet

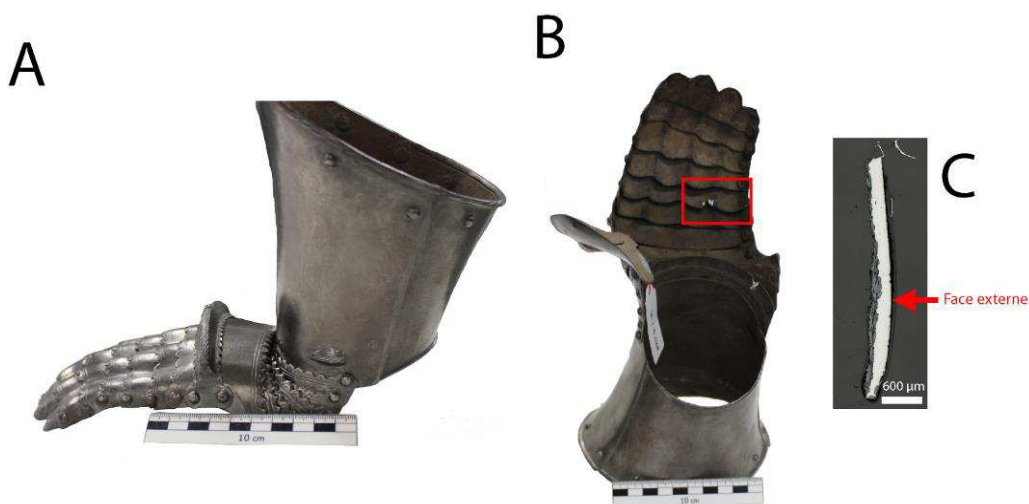
Armurier ou atelier associé : Indéterminé

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique :

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé sur un des doigts du gantelet

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
Ind	Non résolue	Oui	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
0,3	>0,30	0,00	245 ($\sigma=52$)	Non dosé	Non

Commentaires :

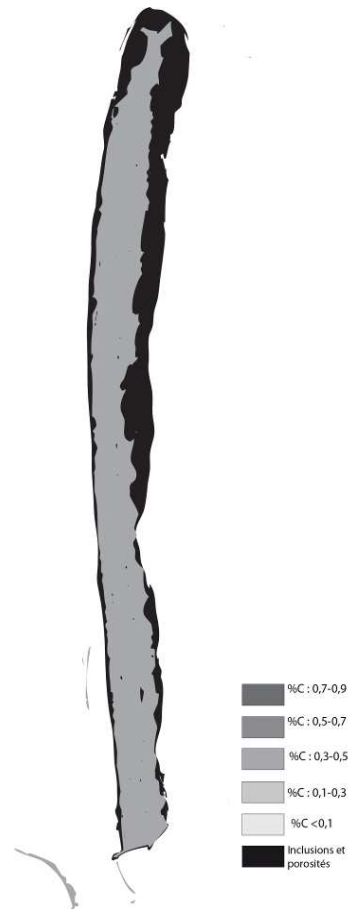
Cet échantillon présente un faciès typique de trempe hétérogène comptant martensite bainite mais aussi de la ferrite. La teneur en carbone ne peut pas être déterminée précisément par métallographie. Il s'agit toutefois d'un acier moyennement carburé (%C>0,3 et %C<0,6)

Analyses métallographiques

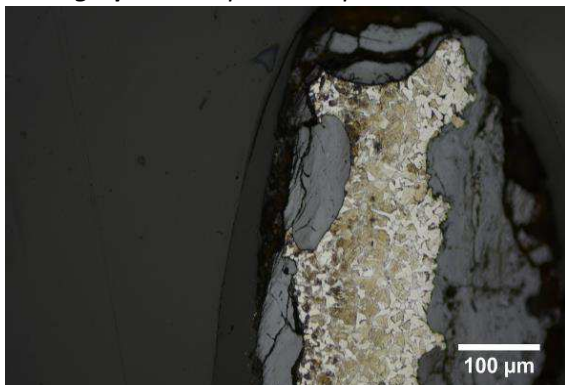
Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)



Schéma correspondant



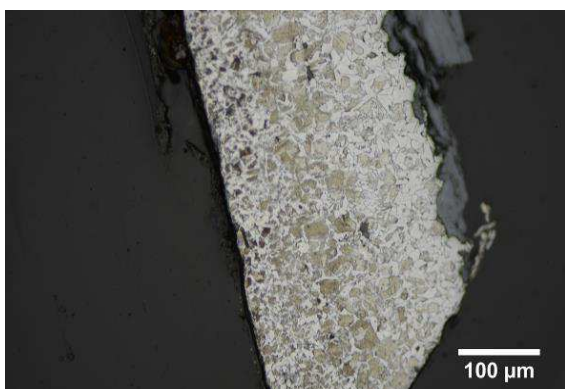
Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



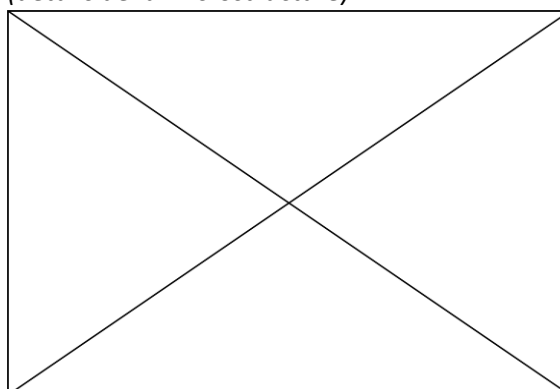
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
2	2

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Direct	<0,01
Abaque	Direct	
PROCEDE	Direct	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon 930.1.898

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : 930.1.898

Numéro de l'élément d'armure : 930.1.898

Lieu de conservation : Musée Dobrée (Nantes)

Lieu de découverte :

Description : Pièce constituée de 8 parties. Le poignet est composé de deux pièces articulées avec charnière moderne qui devaient être rivetées en raison de la présence de 5 trous au brassard d'une part et d'autre part à la doublure interne grâce à 9 rivets au-dessus des dernières phalanges. Le dessus de la main est composé de 6 plates avec bordure supérieure festonnée (Notice du Musée Dobrée).

Datation : Moyen Âge (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : France

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Gantelet

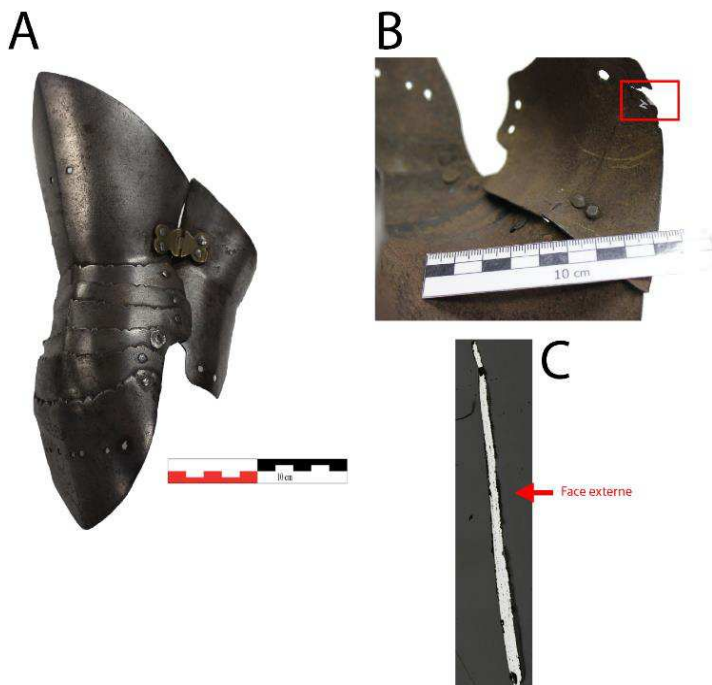
Armurier ou atelier associé : Indéterminé

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique :

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé sur la partie latérale du gantelet protégeant le pouce.

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[<50]	Non résolue	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
1,7	0,19	0,04	192 ($\sigma=20$)	Non dosé	Non

Commentaires :

Cet échantillon présente la structure d'un acier faiblement carburé (%C*=0,2), une fine bande centrale est uniquement constituée de ferrite.

Analyses métallographiques

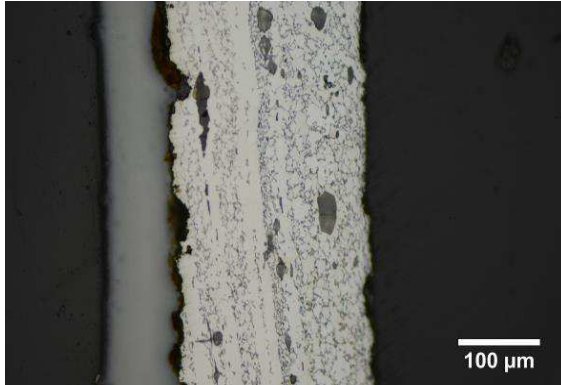
Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)



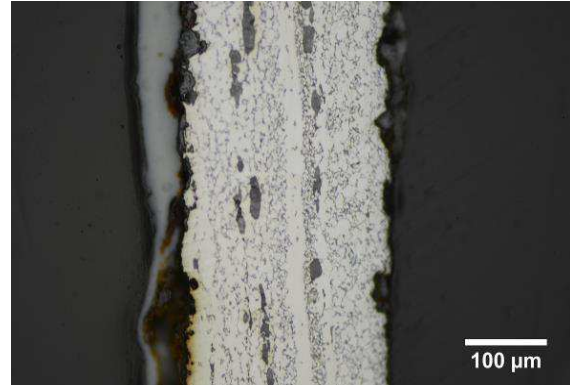
Schéma correspondant



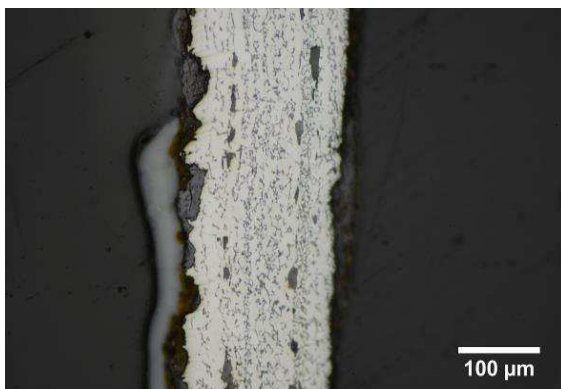
Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



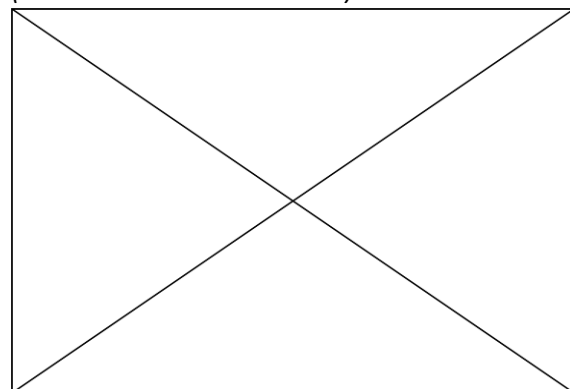
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
4	2

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Indéterminé	0,69
Abaque	Direct	
PROCEDE	Indéterminé	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon 06100607 1

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : 61006607

Numéro de l'élément d'armure : 61006607

Lieu de conservation : Musée lorrain (Nancy)

Lieu de découverte :

Description : Epaulière ou morceau de cuissard qui appartient à une paire (notice du musée Lorrain).

Datation : XVe siècle (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Allemagne

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Epaulière ou cuissard

Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique :

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé sur une des lames de la défense

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[50-200]	Non résolue	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
1,4	0,06	0,00	183 ($\sigma=13$)	<0,1	Non

Commentaires :

Cet échantillon présente une structure ferritique. Quelques amas de perlite sont visibles par endroit.

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

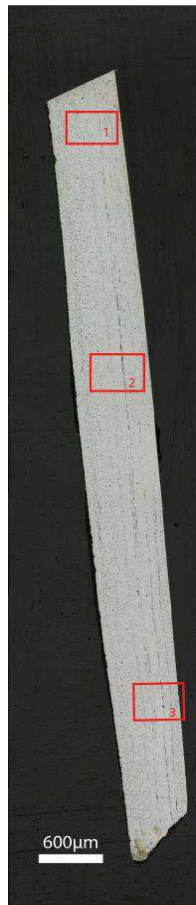
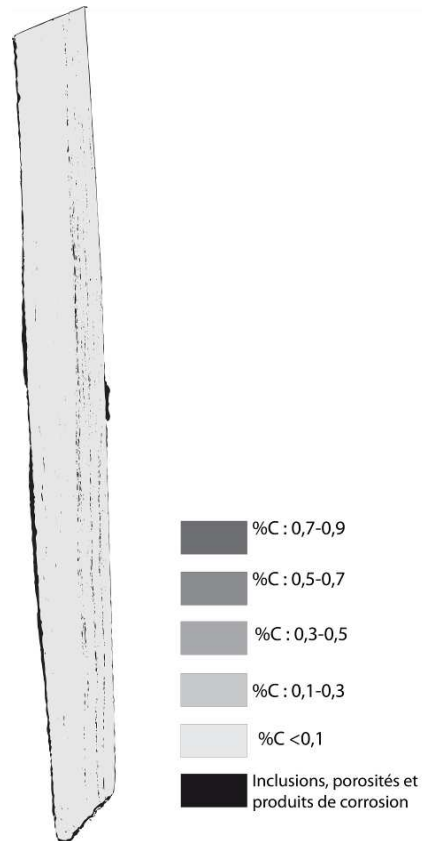
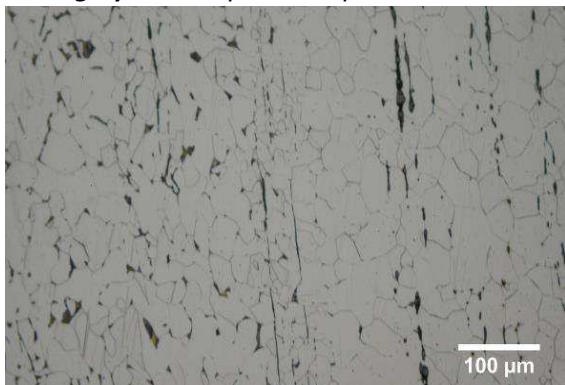


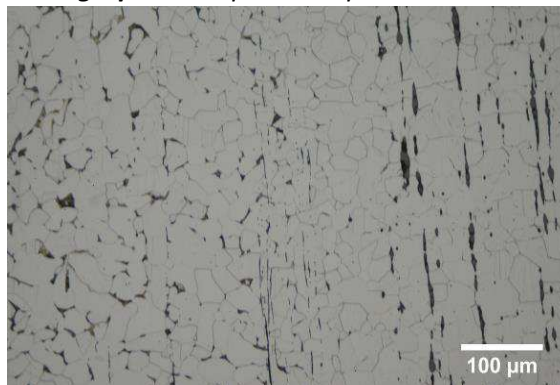
Schéma correspondant



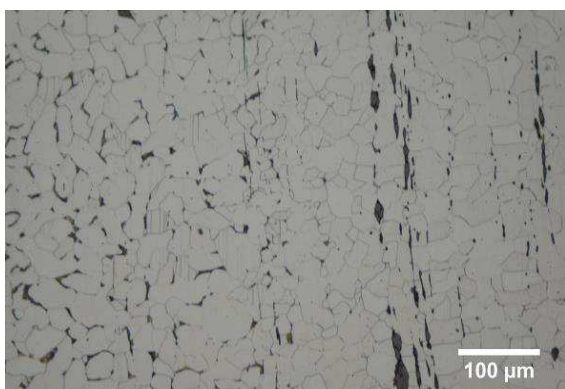
Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



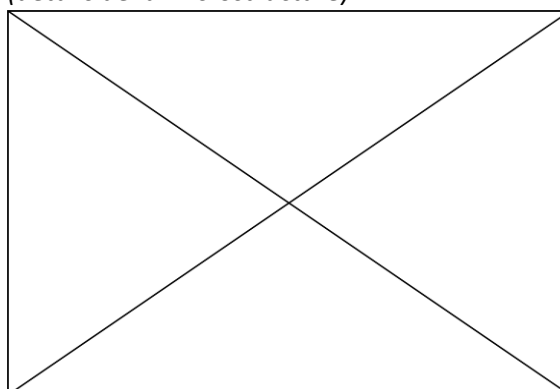
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
2	2

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Indirect	0,94
Abaque	Indéterminé	
PROCEDE	Indirect¹	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

¹ La présence de fortes teneurs en Ti, V et Cr (>1%mass) dans certaines inclusions renforce cette conclusion

Résumé des analyses menées sur l'échantillon 06100607 2.1

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : 61006607

Numéro de l'élément d'armure : 61006607

Lieu de conservation : Musée lorrain (Nancy)

Lieu de découverte :

Description : Epaulière ou morceau de cuissard qui appartient à une paire (notice du musée Lorrain).

Datation : XVe siècle (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Allemagne

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Epaulière ou cuissard

Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique :

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé sur une des lames de la défense. Le prélèvement s'est brisé en deux lors de la découpe. Cet échantillon correspond à la partie supérieure prélevée.

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[<50]	Non résolue	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
1,6	0,13	0,07	203 ($\sigma = 16$)	Non dosé	Non

Commentaires :

Cet échantillon présente la structure d'un acier faiblement carburé légèrement hétérogène en teneur en carbone.

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

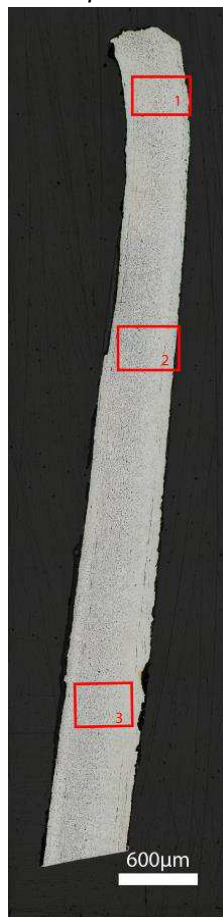
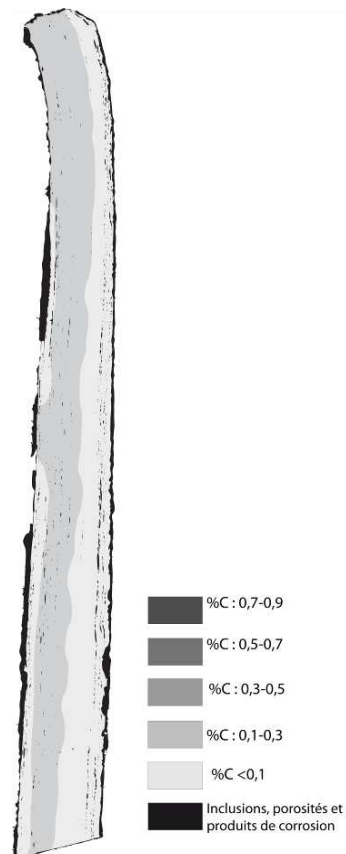
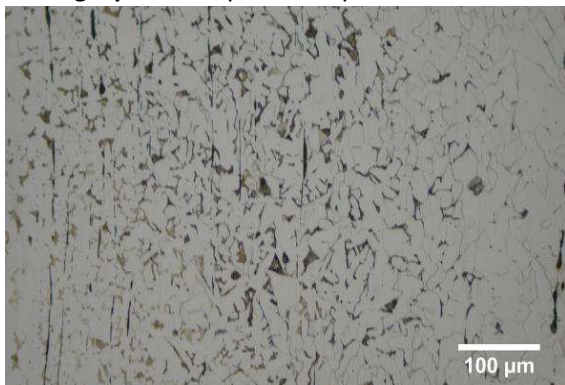


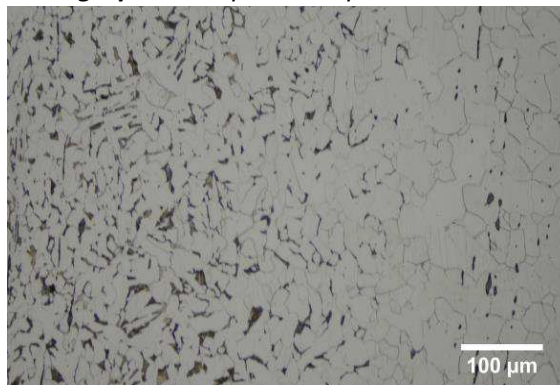
Schéma correspondant



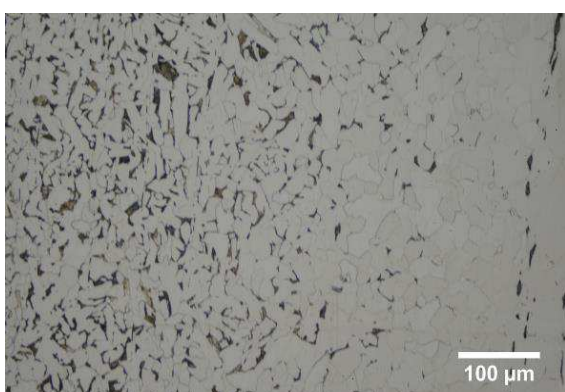
Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



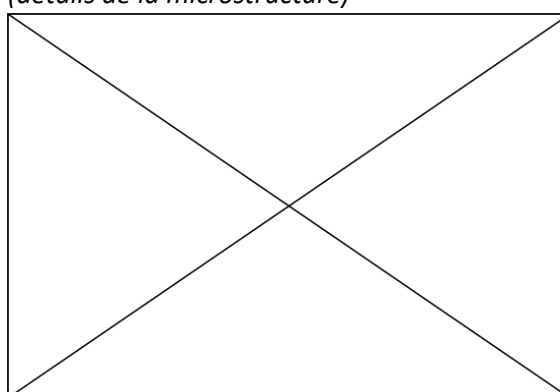
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
4	3

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Indirect	0,83
Abaque	Indéterminé ²	
PROCEDE	Indirect	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

² La présence de fortes teneurs en Ti, V et Cr (>1%mass) dans certaines inclusions renforce cette conclusion

Résumé des analyses menées sur l'échantillon 06100607 2.2

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : 61006607

Numéro de l'élément d'armure : 61006607

Lieu de conservation : Musée lorrain (Nancy)

Lieu de découverte :

Description : Epaulière ou morceau de cuissard qui appartient à une paire (notice du musée Lorrain).

Datation : XVe siècle (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Allemagne

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Epaulière ou cuissard

Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique :

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé sur une des lames de la défense. Le prélèvement s'est brisé en deux lors de la découpe. Cet échantillon correspond à la partie inférieure prélevée.

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[<50]	Non résolue	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
4,9	0,31	0,10	187 ($\sigma=24$)	Non dosé	Non

Commentaires :

Cet échantillon est un acier moyennement carburé légèrement hétérogène en teneur en carbone.

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

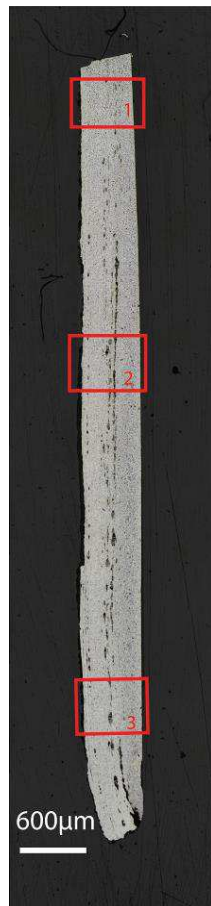
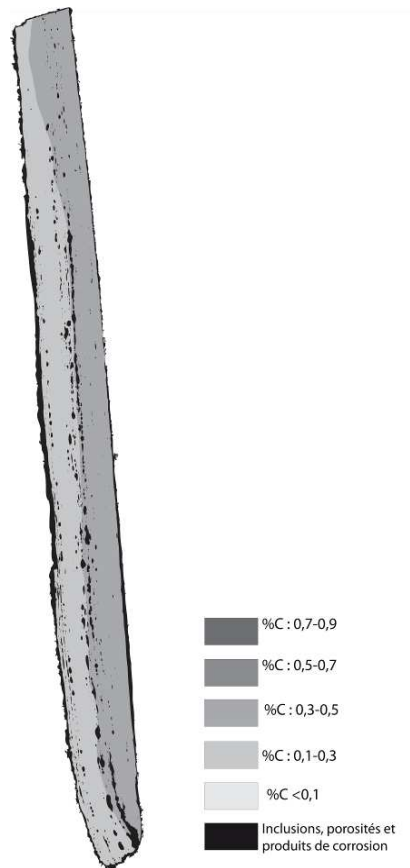
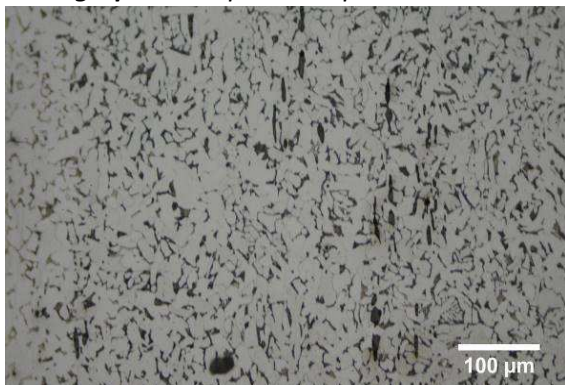


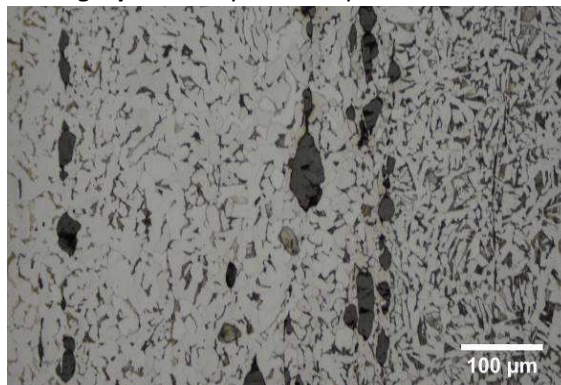
Schéma correspondant



Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



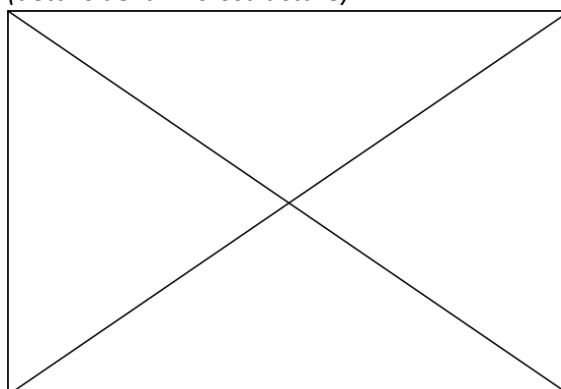
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
5	2

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Indirect	0,97
Abaque	Indirect	
PROCEDE	Indirect³	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

³ La présence de fortes teneurs en Ti, V et Cr (>1%mass) dans certaines inclusions renforce cette conclusion

Résumé des analyses menées sur l'échantillon 06100607 3

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : 61006607

Numéro de l'élément d'armure : 61006607

Lieu de conservation : Musée lorrain (Nancy)

Lieu de découverte :

Description : Epaulière ou morceau de cuissard qui appartient à une paire (notice du musée Lorrain).

Datation : XVe siècle (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Allemagne

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Epaulière ou cuissard

Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique :

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé sur une des lames de la défense

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[50-200]	Non résolue	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
4,3	0,10	0,06	204 ($\sigma=12$)	<0,1	Oui

Commentaires :

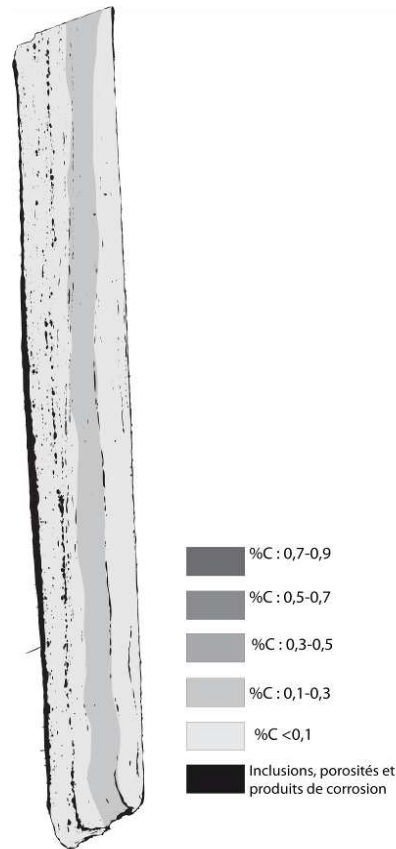
Cet échantillon présente la structure d'un acier faiblement carburé légèrement hétérogène en teneur en carbone. En effet une bande plus carburée est présente en son centre.

Analyses métallographiques

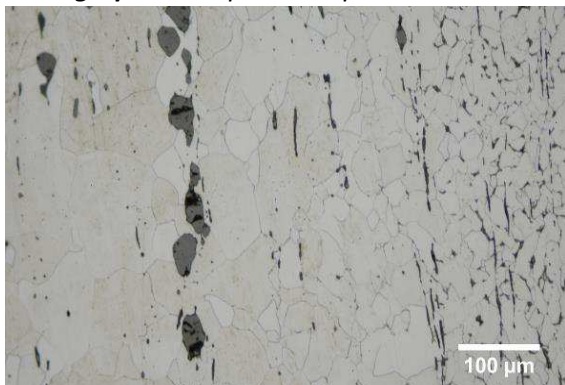
Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)



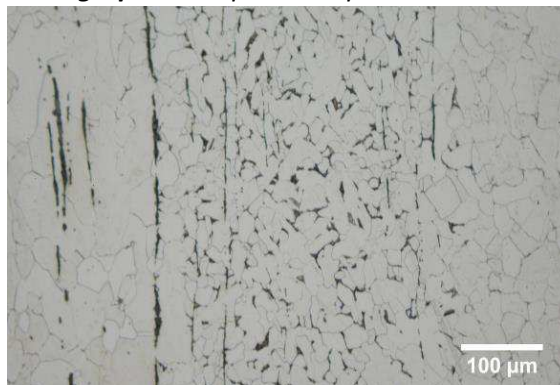
Schéma correspondant



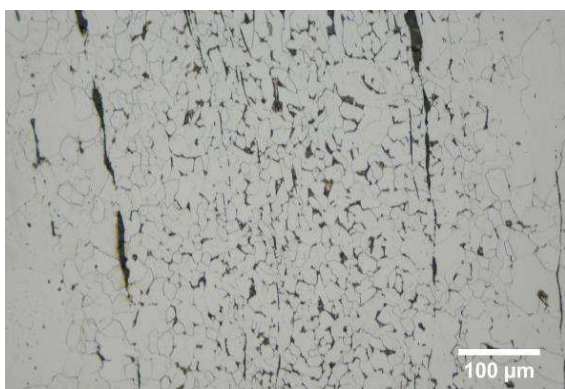
Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



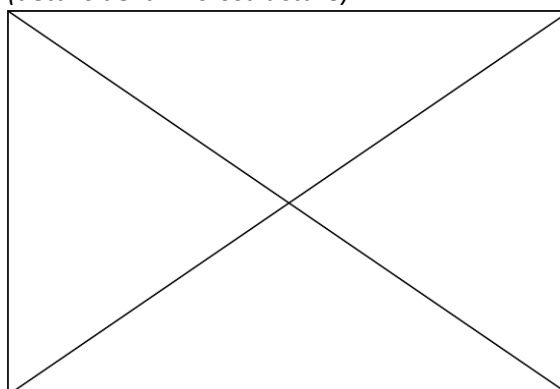
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
4	1

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Indirect	0,94
Abaque	Indéterminé	
PROCEDE	Indirect⁴	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

⁴ La présence de fortes teneurs en Ti, V et Cr (>1%mass) dans certaines inclusions renforce cette conclusion

Résumé des analyses menées sur l'échantillon 6100607 4

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : 61006607

Numéro de l'élément d'armure : 61006607

Lieu de conservation : Musée lorrain (Nancy)

Lieu de découverte :

Description : Epaulière ou morceau de cuissard qui appartient à une paire (notice du musée Lorrain).

Datation : XVe siècle (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Allemagne

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Epaulière ou cuissard

Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique :

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé sur une des lames de la défense

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[50-200]	Non résolue	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
2,3	0,06	0,00	197 ($\sigma=9$)	<0,1	Non

Commentaires :

Cet échantillon présente une structure ferritique.

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

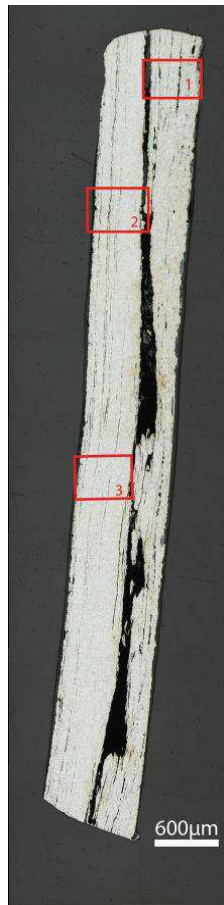
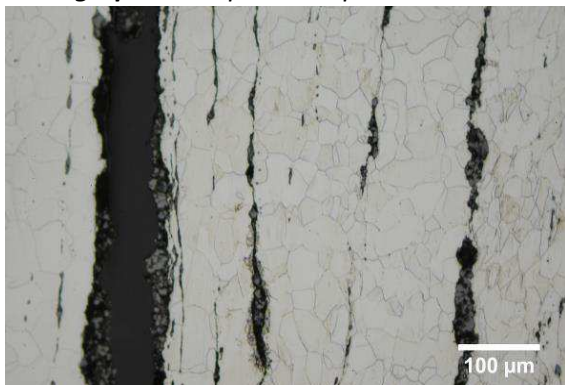


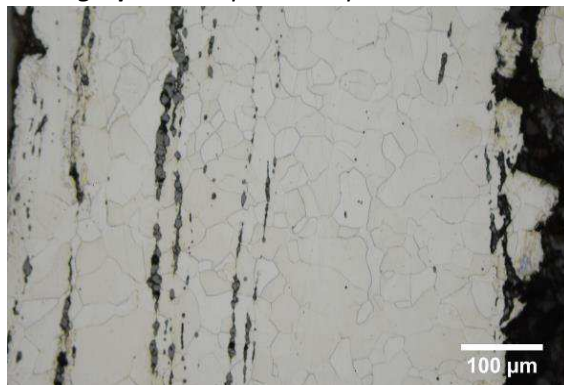
Schéma correspondant



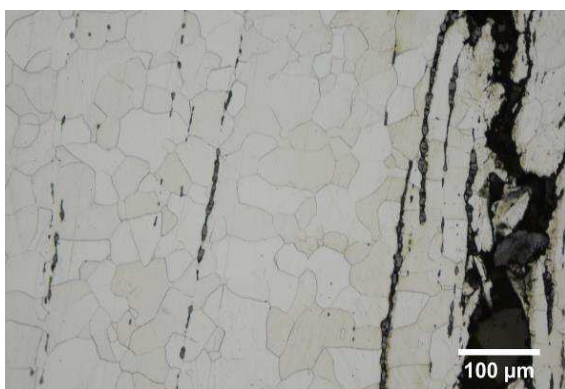
Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



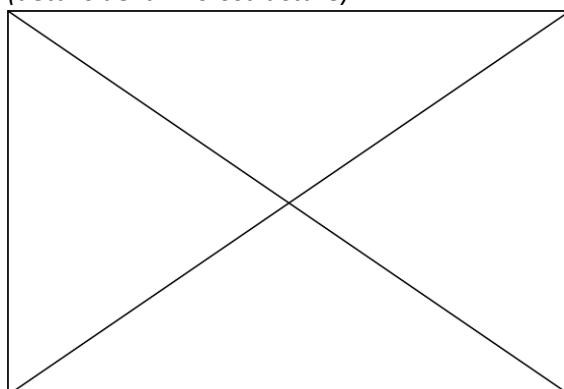
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
5	2

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Indirect	0,89
Abaque	Indéterminé	
PROCEDE	Indirect⁵	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

⁵ La présence de fortes teneurs en Ti, V et Cr (>1%mass) dans certaines inclusions renforce cette conclusion

Résumé des analyses menées sur l'échantillon 061006605 1

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : 61006605

Numéro de l'élément d'armure : 61006605

Lieu de conservation : Musée lorrain (Nancy)

Lieu de découverte :

Description : Epaulière ou morceau de cuissard qui appartient à une paire (notice du musée Lorrain).

Datation : XVe siècle (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Allemagne

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Epaulière ou cuissard

Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique :

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé sur une des lames de la défense

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[<50]	Non résolue	Non	Non	Non	Oui

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
1,6	0,14	0,07	204 ($\sigma=25$)	<0,1	Oui

Commentaires :

Cet échantillon présente la structure d'un acier moyennement carburé légèrement hétérogène en teneur en carbone.

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

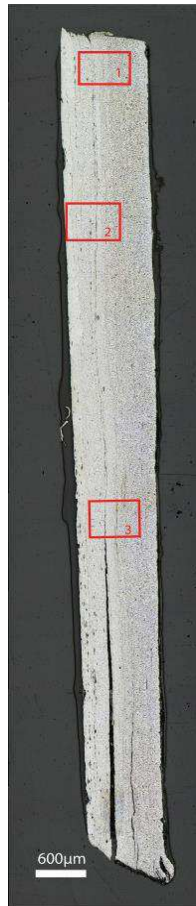
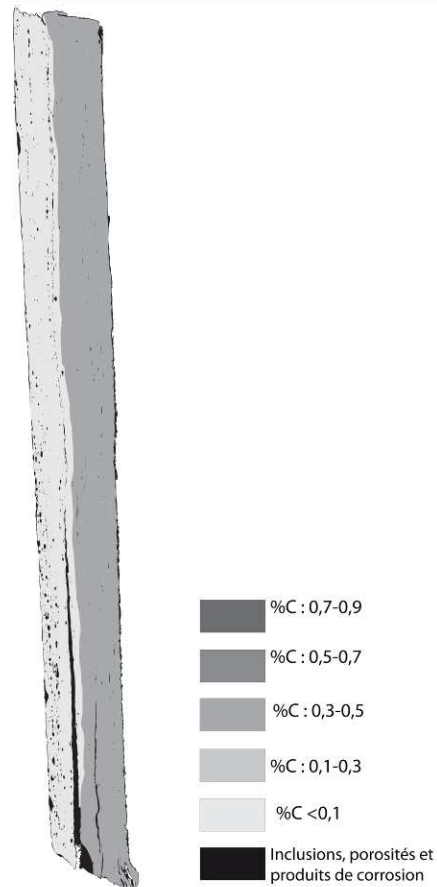
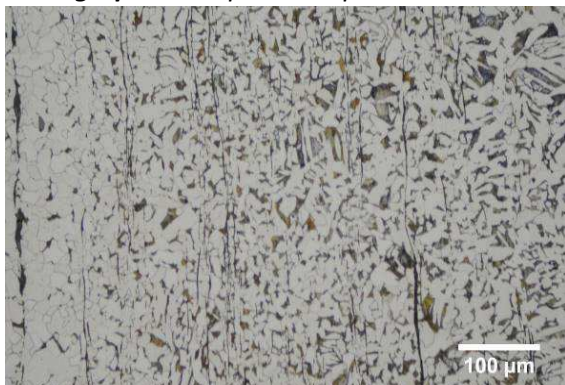


Schéma correspondant



Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



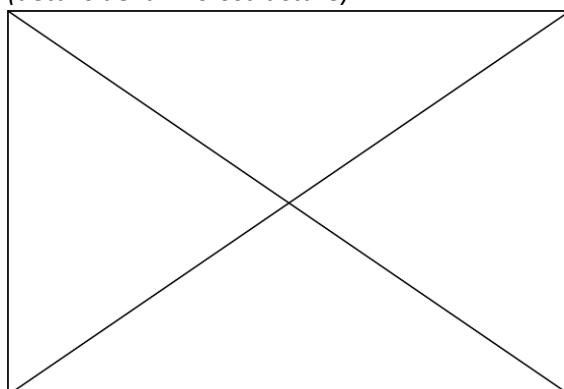
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
4	2

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Indirect	0,88
Abaque	Indéterminé	
PROCEDE	Indirect⁶	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

⁶ La présence de fortes teneurs en Ti, V et Cr (>1%mass) dans certaines inclusions renforce cette conclusion

Résumé des analyses menées sur l'échantillon 061006605 2

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : 61006605

Numéro de l'élément d'armure : 61006605

Lieu de conservation : Musée lorrain (Nancy)

Lieu de découverte :

Description : Epaulière ou morceau de cuissard qui appartient à une paire (notice du musée Lorrain).

Datation : XVe siècle (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Allemagne

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Epaulière ou cuissard

Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique :

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé sur une des lames de la défense

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[50-200]	Non résolue	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
1,2	0,11	0,07	183 ($\sigma=10$)	<0,1	Oui

Commentaires :

Cet échantillon est un acier moyennement carburé légèrement hétérogène en teneur en carbone. En effet les extrémités sont légèrement plus carburées que le centre. Ceci est probablement causé par l'hétérogénéité du lopin de métal utilisé

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

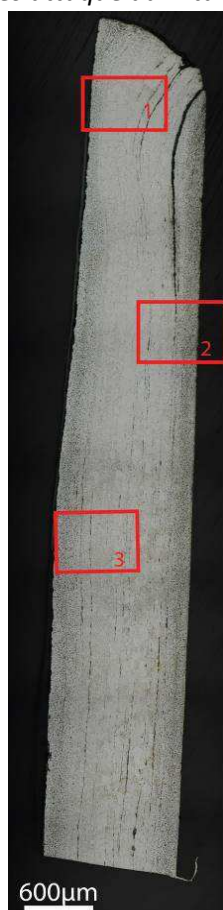
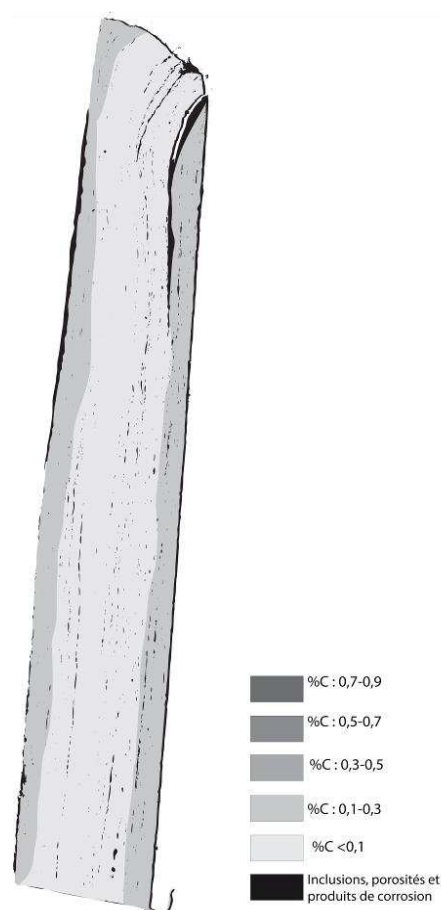
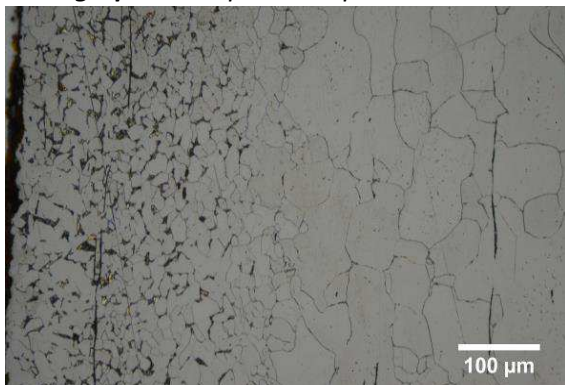


Schéma correspondant



Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



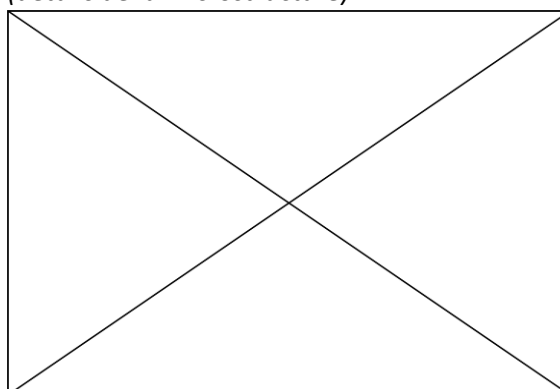
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
5	4

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Indirect	0,97
Abaque	Indéterminé	
PROCEDE	Indirect⁷	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

⁷ La présence de fortes teneurs en Ti, V et Cr (>1%mass) dans certaines inclusions renforce cette conclusion

Résumé des analyses menées sur l'échantillon 061006605 3

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : 61006605

Numéro de l'élément d'armure : 61006605

Lieu de conservation : Musée lorrain (Nancy)

Lieu de découverte :

Description : Epaulière ou morceau de cuissard qui appartient à une paire (notice du musée Lorrain).

Datation : XVe siècle (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Allemagne

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Epaulière ou cuissard

Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique :

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé sur une des lames de la défense

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[<50]	Non résolue	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
2,4	0,11	0,07	198 ($\sigma=24$)	<0,1	Oui

Commentaires :

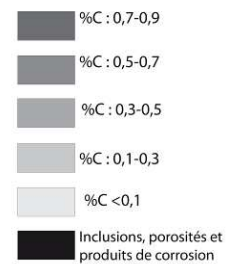
Cet échantillon présente la structure d'un acier moyennement carburé légèrement hétérogène en teneur en carbone. Ceci est probablement causé par l'hétérogénéité du lopin de métal utilisé

Analyses métallographiques

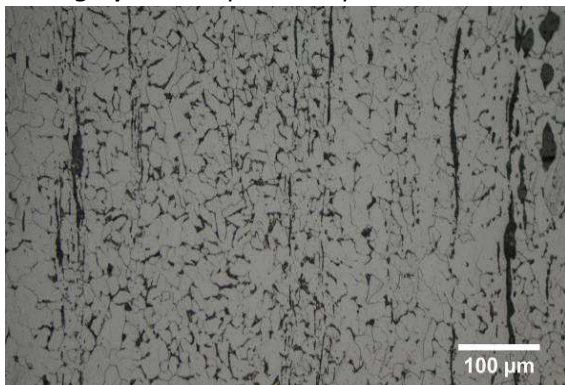
Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)



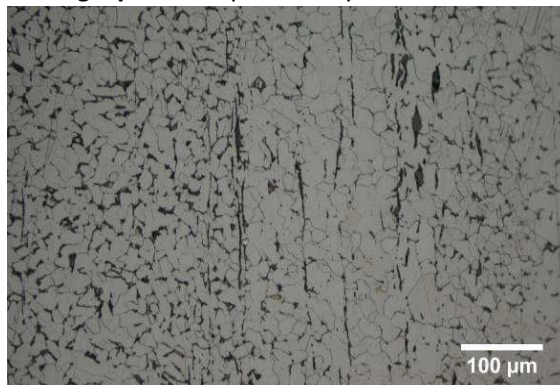
Schéma correspondant



Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



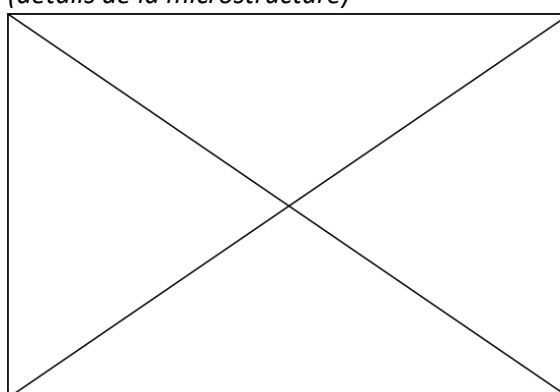
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
4	2

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Indirect	0,88
Abaque	Indéterminé	
PROCEDE	Indirect⁸	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

⁸ La présence de fortes teneurs en Ti, V et Cr (>1%mass) dans certaines inclusions renforce cette conclusion

Résumé des analyses menées sur l'échantillon 061006605 4

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : 61006605

Numéro de l'élément d'armure : 61006605

Lieu de conservation : Musée lorrain (Nancy)

Lieu de découverte :

Description : Epaulière ou morceau de cuissard qui appartient à une paire (notice du musée Lorrain).

Datation : XVe siècle (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Allemagne

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Epaulière ou cuissard

Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique :

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé sur une des lames de la défense

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[50-200]	Non résolue	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
5,1	0,06	0,00	187 ($\sigma=16$)	<0,1	Non

Commentaires :

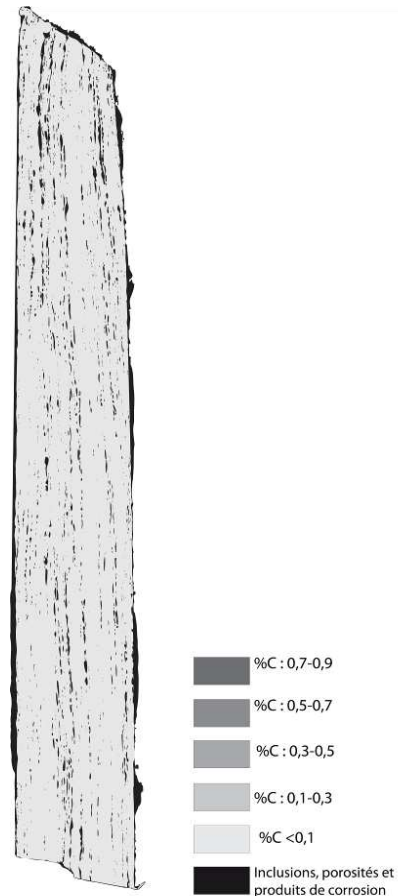
Cet échantillon présente une structure ferritique à taille de grains variable, certains encore déformés selon la direction de martelage. La dureté du métal est plus importante que celle attendue pour ce type de structure.

Analyses métallographiques

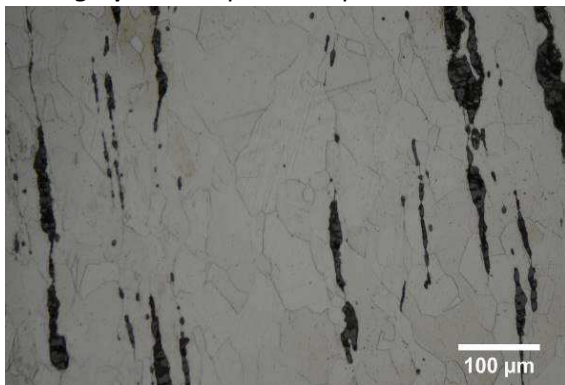
Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)



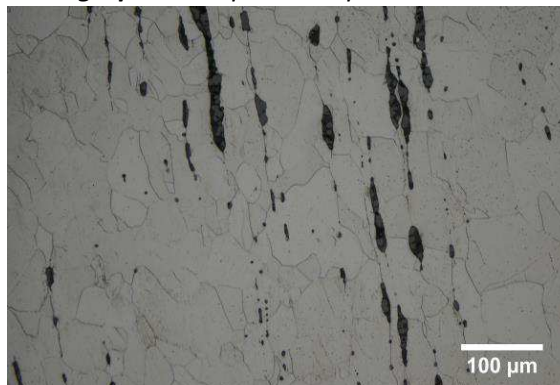
Schéma correspondant



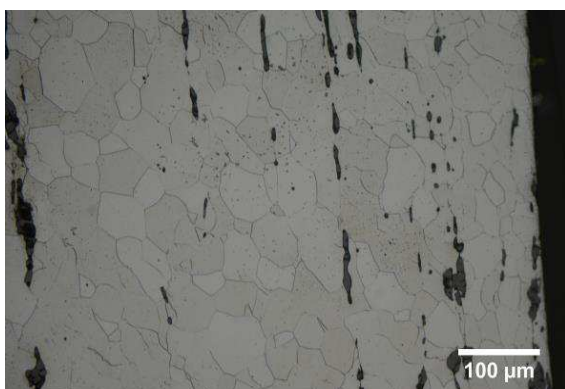
Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



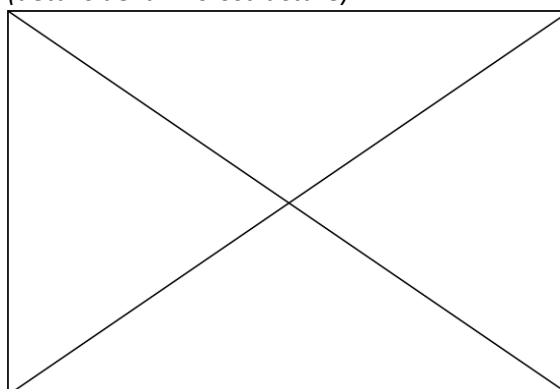
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
2	2

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Indirect	0,97
Abaque	Indirect	
PROCEDE	Indirect⁹	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

⁹ La présence de fortes teneurs en Ti, V et Cr (>1%mass) dans certaines inclusions renforce cette conclusion

Résumé des analyses menées sur l'échantillon 951183

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : 951183

Numéro de l'élément d'armure : 951183

Lieu de conservation : Musée lorrain (Nancy)

Lieu de découverte :

Description : Morion d'homme de pied en fer noirci daté de la 2^{ème} moitié du XVI^e siècle ou le 1^{er} quart du XVII^e siècle, et supposé avoir été fabriqué en Italie du Nord (notice du musée Lorrain)

Datation : 2^{ème} moitié du XVI^e siècle ou le 1^{er} quart du XVII^e siècle (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Italie

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Morion

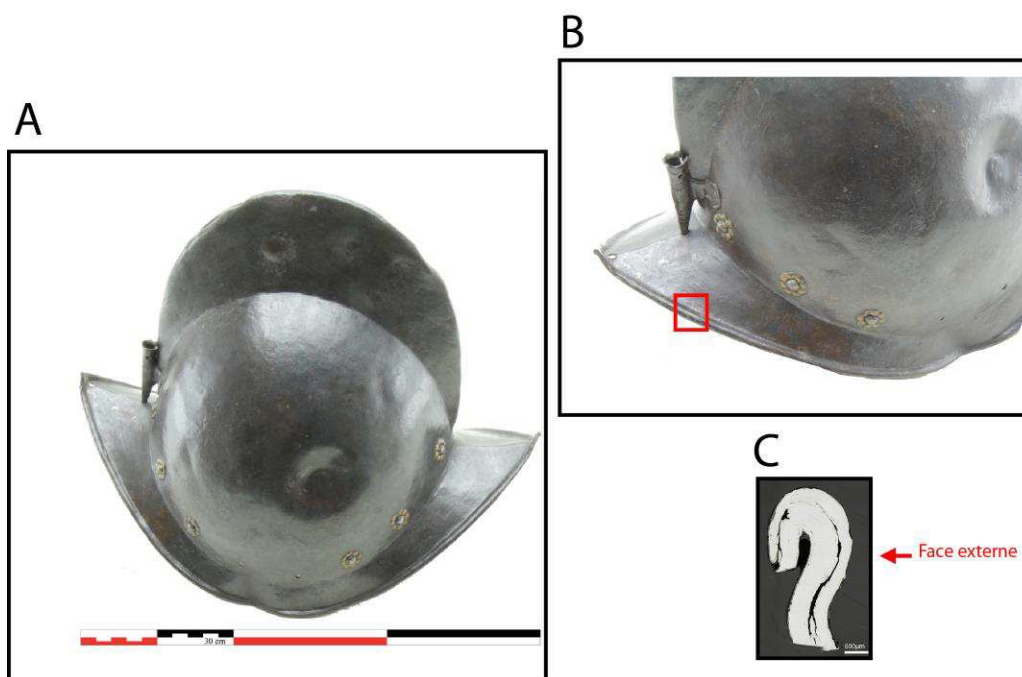
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique :

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé sur le bord inférieur du morion.

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[50-200]	Lamellaire	Non	Non	Non	Oui

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
5,1	0,38	0,06	133 ($\sigma = 11$)	Non dosé	Non

Commentaires :

Cet échantillon présente la structure d'un acier moyennement carburé homogène. Des structures de widmanstätten sont visibles ce qui témoigne d'une surchauffe suivi d'un refroidissement relativement rapide du métal. Une imposante ligne de soudure est visible sur l'échantillon, preuve que le travail d'épuration n'a pas été poussé à son maximum.

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

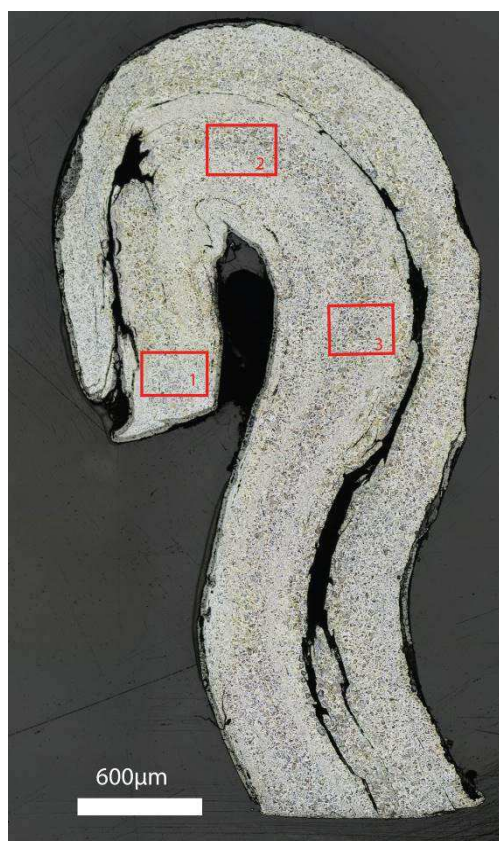
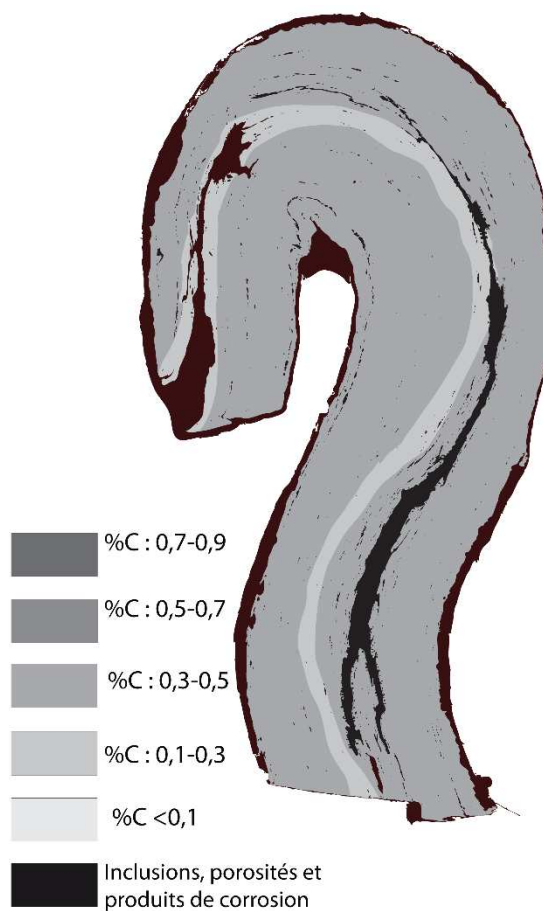
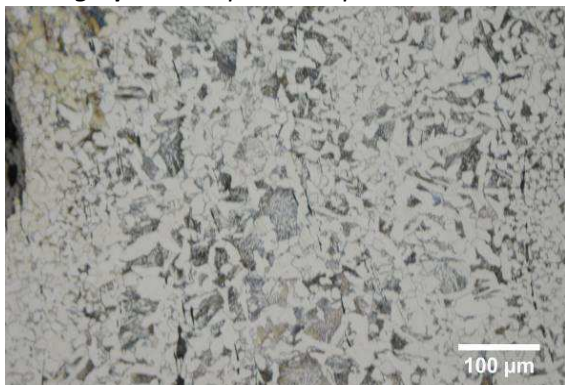


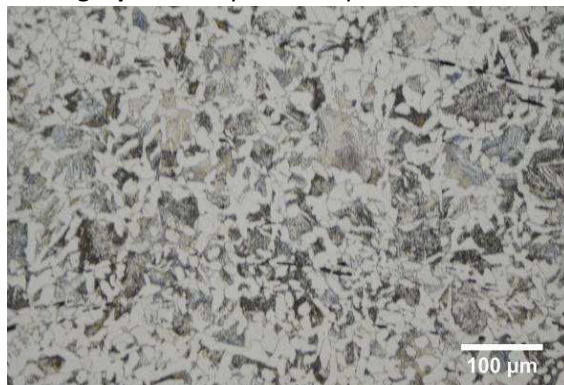
Schéma correspondant



Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



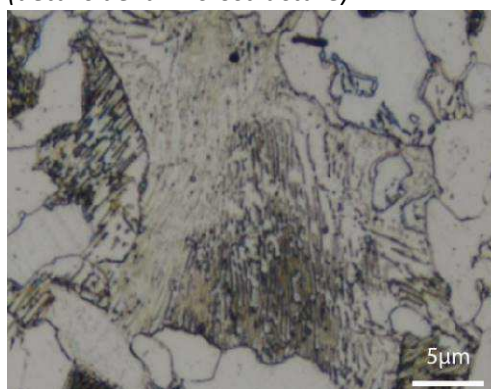
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
5	3

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Direct	<0,01
Abaque	Direct	
PROCEDE	Direct	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon 951180.1

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : 951180.1

Numéro de l'élément d'armure : 951180.1

Lieu de conservation : Musée lorrain (Nancy)

Lieu de découverte :

Description : Armet de type "Maximilien". Arme de cavalerie lourde germanique fabriqué vers 1510-1520 (notice du musée Lorrain).

Datation : 1510-1520 (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Allemagne

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Armet

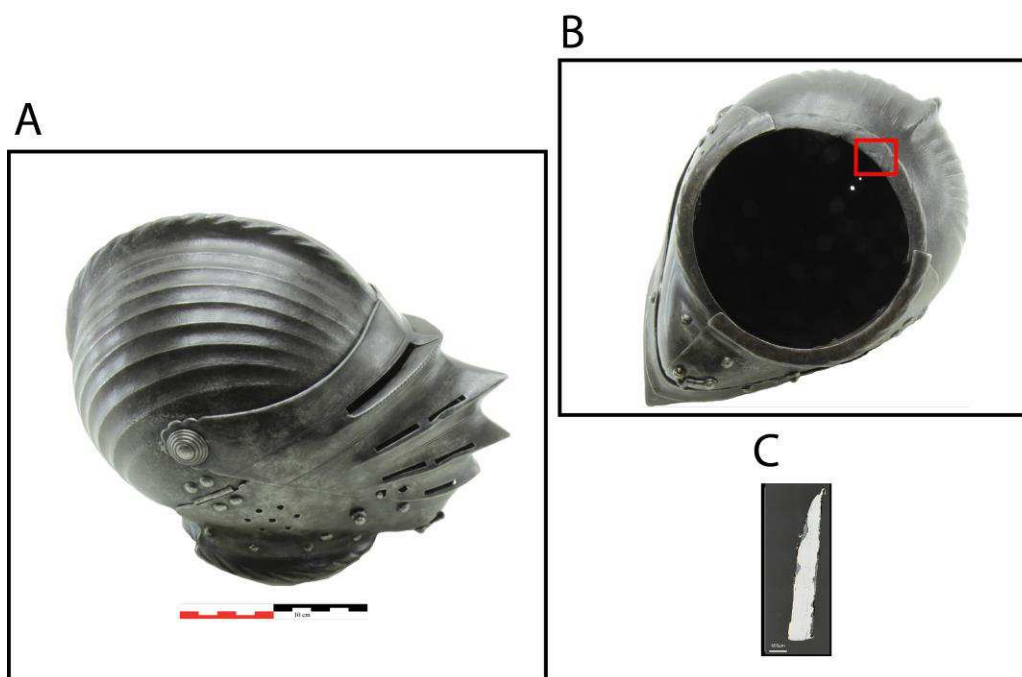
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique :

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé sur un bord de la base du armet

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[>200]	Non résolue	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
0,1	0,12	0,07	118 ($\sigma=14$)	Non dosé	Oui

Commentaires :

Cet échantillon est faiblement carburé. Deux bandes sont discernables de part leur teneur en carbone mais également la taille des grains de ferrite. En effet des grains très larges (>200 μm) sont observés sur la partie gauche de l'échantillon, recouverte d'un cuivrage. C'est sans doute l'application de ce dernier qui a nécessité la chauffe prononcée de cette partie de la tôle, elle-même peut être à l'origine d'une décarburation de surface. Ce dépôt de cuivre, à présent presque invisible sur la pièce, avait sûrement un rôle esthétique. Il peut aussi s'agir d'une préparation préalable à une dorure par amalgame de mercure qui aurait été altérée.

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

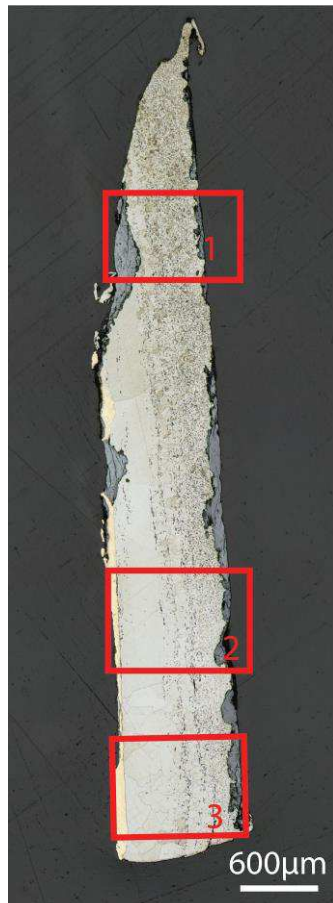
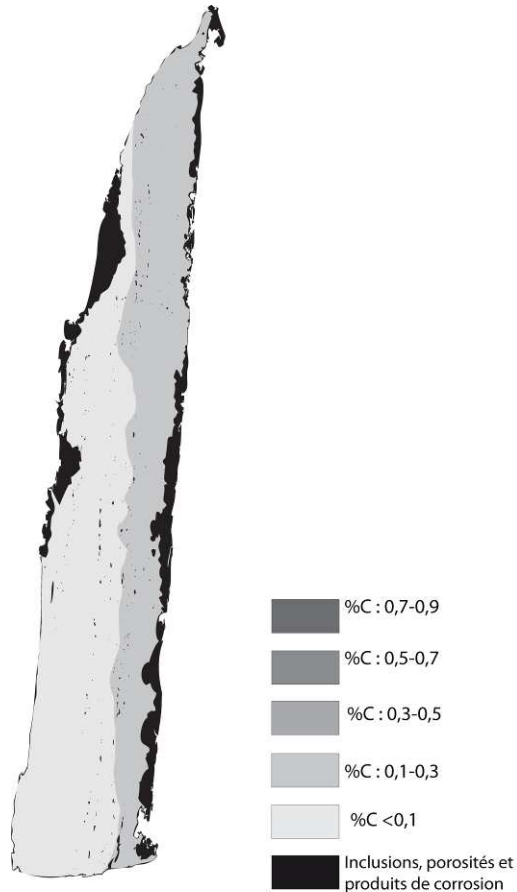
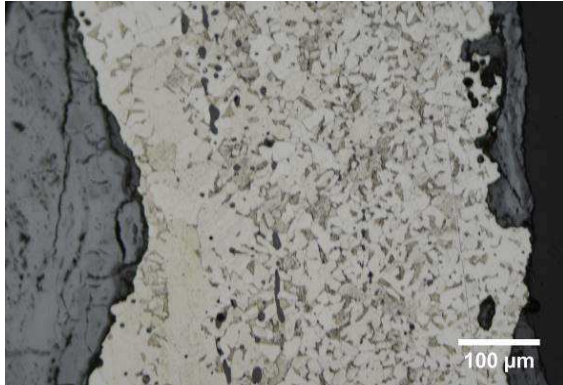


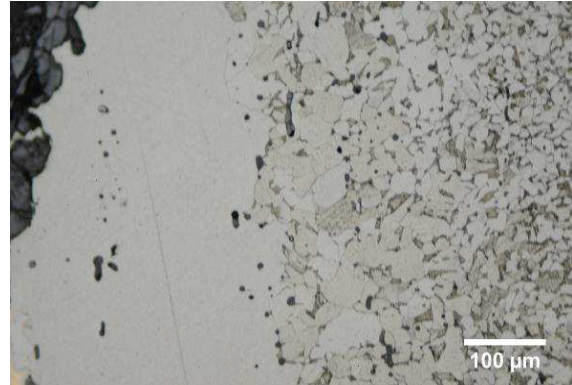
Schéma correspondant



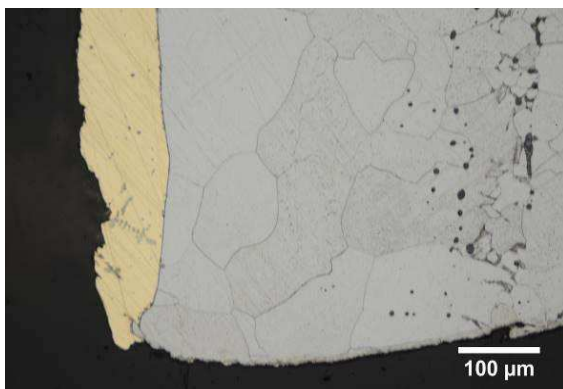
Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



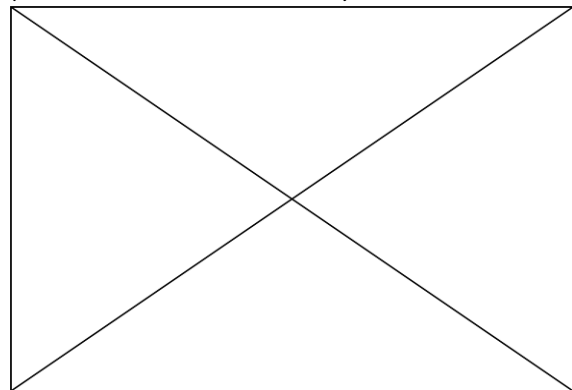
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
4	1

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Direct	0,20
Abaque	Direct	
PROCEDE	Direct	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Oui	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon 951182

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : 951182

Numéro de l'élément d'armure : 951182

Lieu de conservation : Musée lorrain (Nancy)

Lieu de découverte :

Description : Grand bacinet de la fin du XIV^e siècle, en fer noirci de timbre ovoïde ; mezail projeté en avant en forme de bec percé de fentes horizontales pour la vue et de trous pour la respiration. Pièce fabriquée vers 1380-1420 (notice du musée Lorrain).

Datation : 1380-1420 (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Indéterminée

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Bassinet à mezail

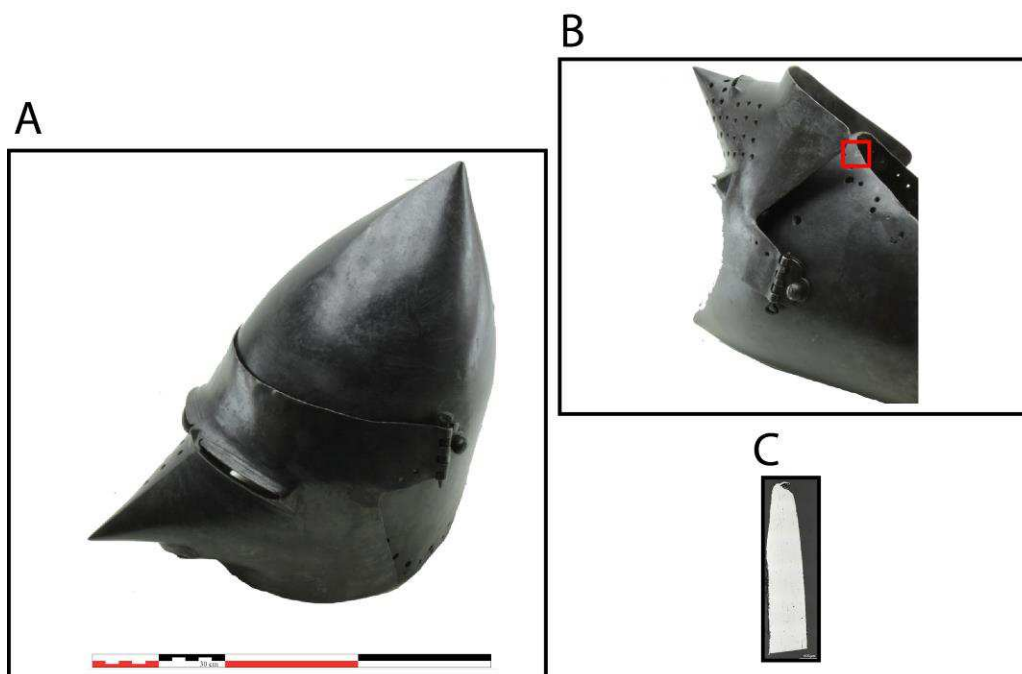
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique :

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé sur un bord du timbre du bacinet.

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
Ind	Lamellaire et globulaire	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
0,4	0,47	0,10	147 ($\sigma=16$)	Non dosé	Non

Commentaires :

Cet échantillon présente la structure d'un acier moyennement carburé relativement homogène. La perlite, globulaire par endroit témoigne qu'un recuit a été opéré.

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

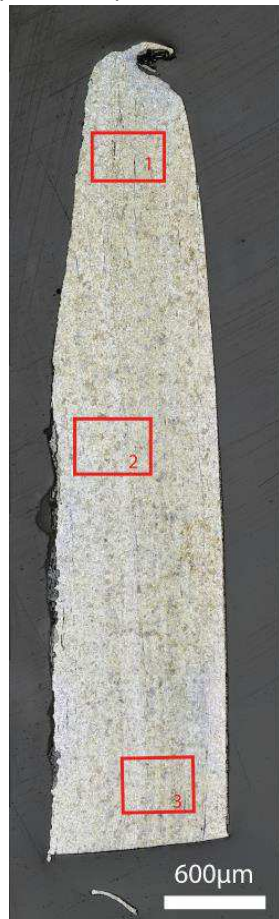
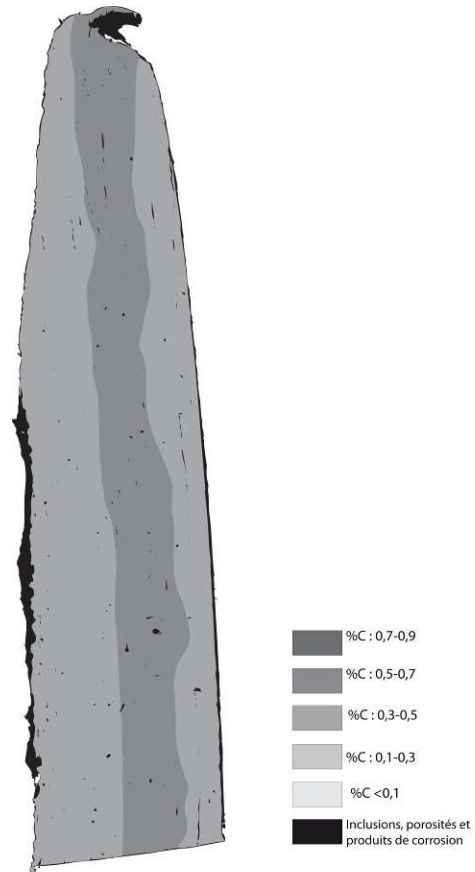


Schéma correspondant



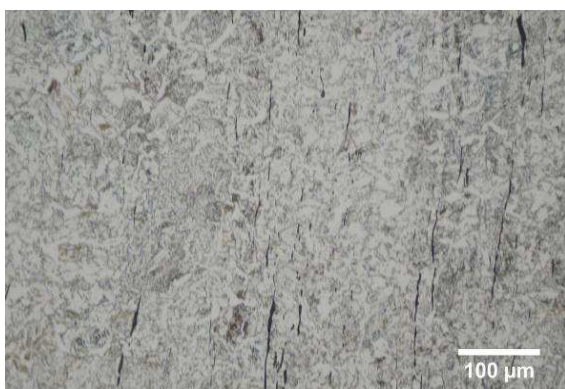
Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



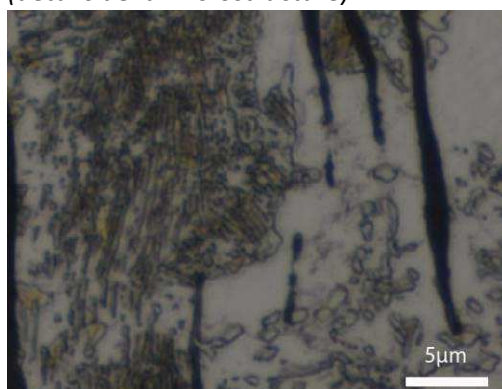
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
7	1,2

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Indéterminé	$p(\text{classe1})=0,54$ $p(\text{classe2})=0,41$
Abaque	Indéterminé	
PROCEDE	Indéterminé	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon 951192.1

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : 951192.1

Numéro de l'élément d'armure : 951192.1

Lieu de conservation : Musée lorrain (Nancy)

Lieu de découverte :

Description : Plastron de cuirassier datée du XVII^e siècle (notice du musée Lorrain).

Datation : XVII^e siècle (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Indéterminée

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Plastron

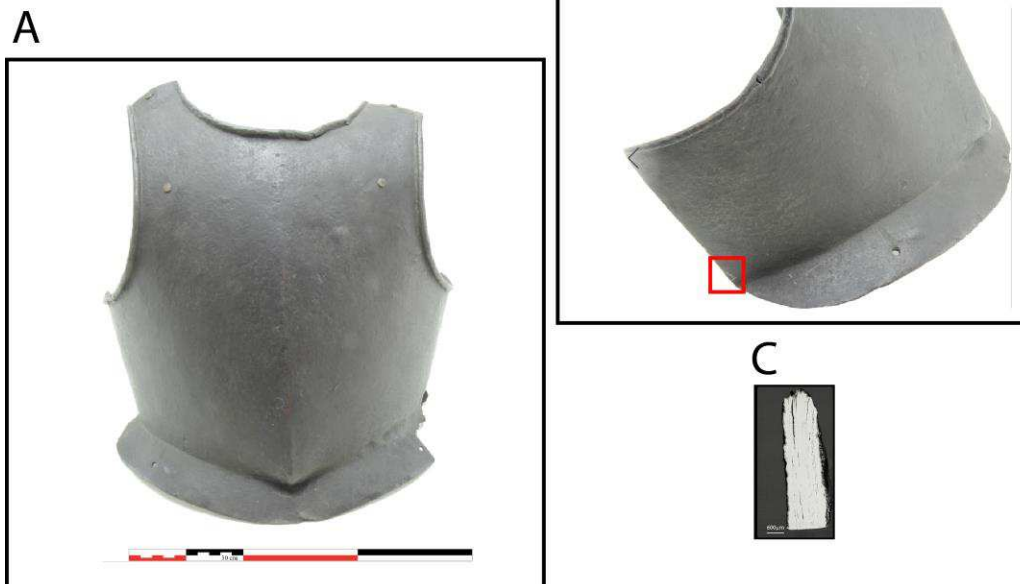
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique :

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé sur le bord droit latéral du plastron

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[50-200]	Non résolue	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
1,5	0,08	0,05	105 ($\sigma=14$)	Non dosé	Non

Commentaires :

Cet échantillon est de nature ferritique. Quelques amas de perlite sont visibles.

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

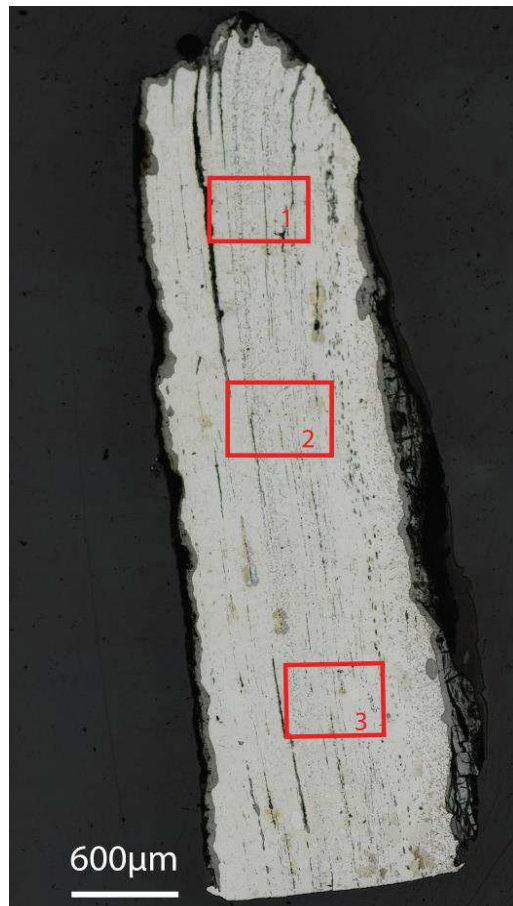
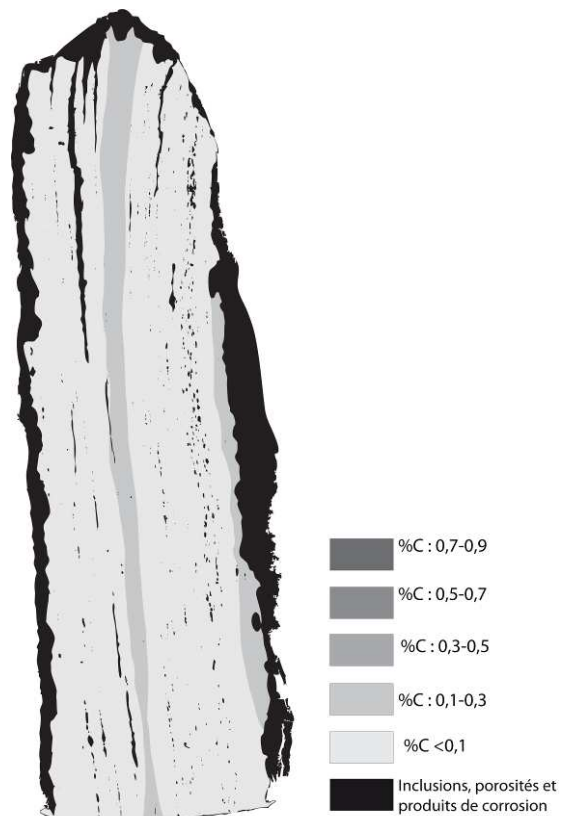
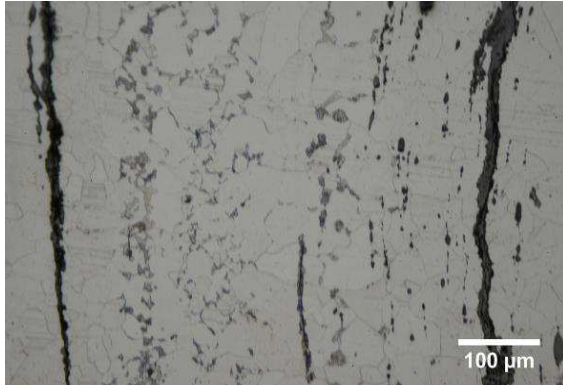


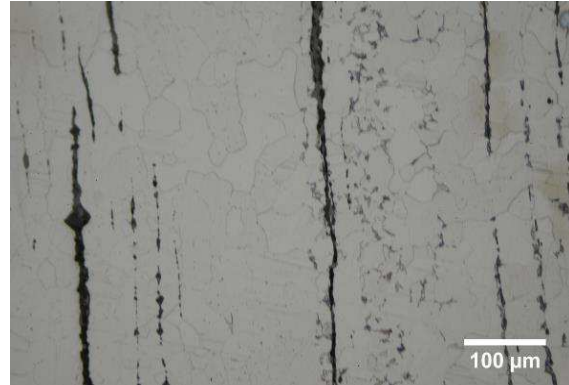
Schéma correspondant



Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



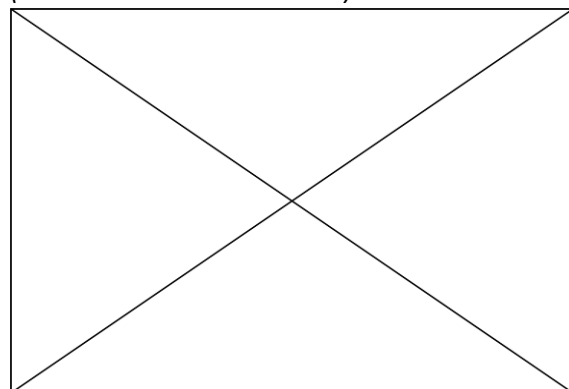
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
6	4

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Direct	0,04
Abaque	Direct	
PROCEDE	Direct	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon 951192.2

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : 951192.2

Numéro de l'élément d'armure : 951192.2

Lieu de conservation : Musée lorrain (Nancy)

Lieu de découverte :

Description : Plastron de cuirassier datée du XVII^e siècle (notice du musée Lorrain).

Datation : XVII^e siècle (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Indéterminée

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Plastron

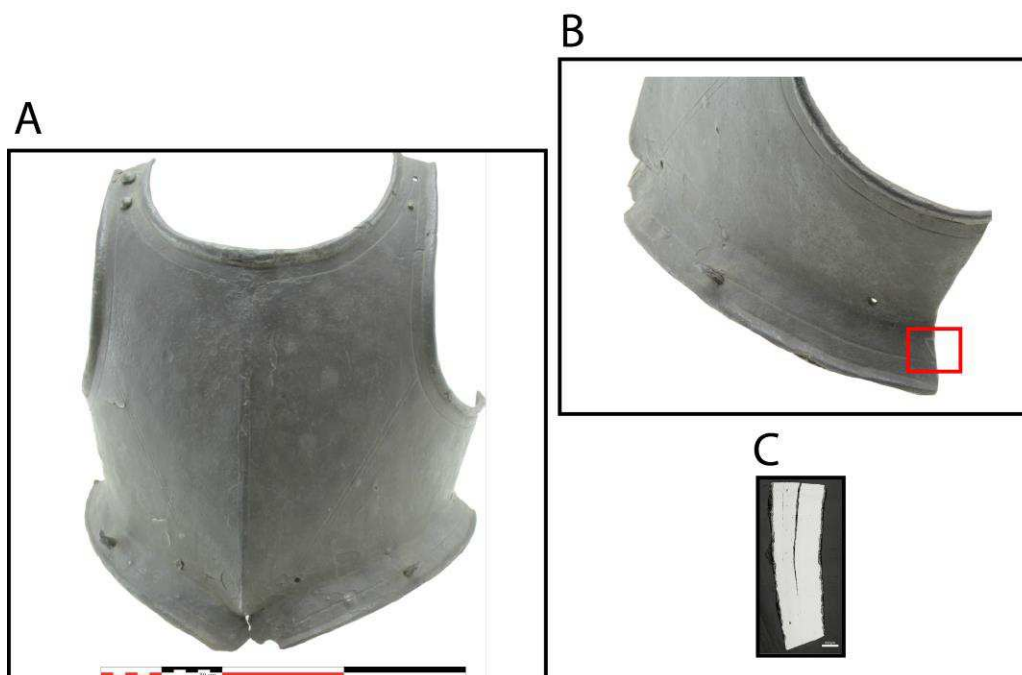
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique :

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé sur le bord droit latéral du plastron

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[<50]	Lamellaire et globulaire	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
0,4	0,30	0,10	138 ($\sigma=13$)	Non dosé	Non

Commentaires :

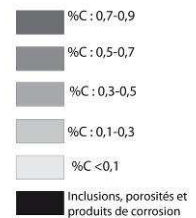
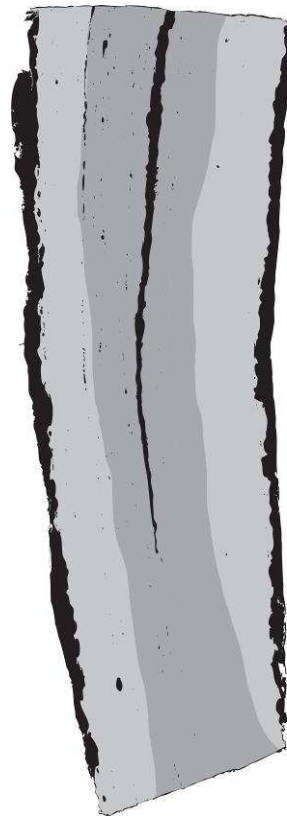
Cet échantillon présente la structure d'un acier moyennement carburé hétérogène en teneur en carbone. La perlite, globulaire par endroit témoigne qu'un recuit a été opéré.

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)



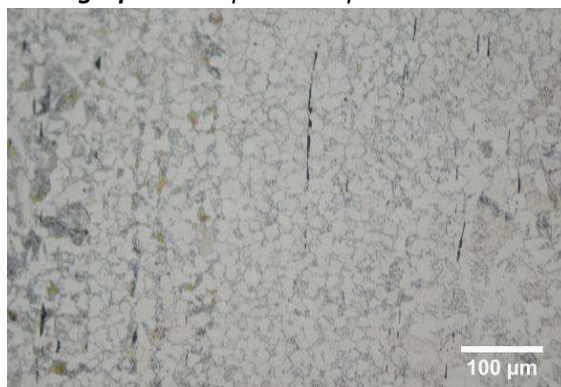
Schéma correspondant



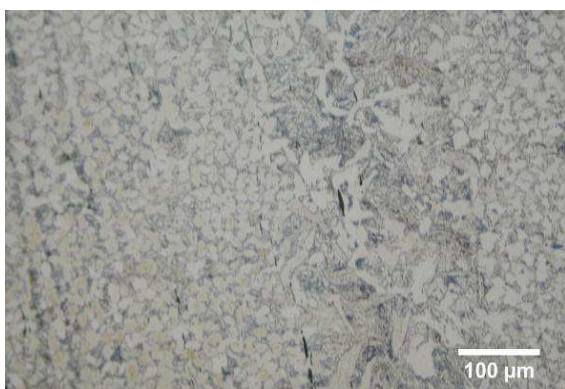
Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



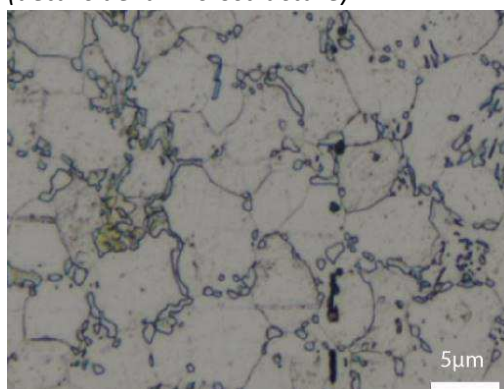
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3% (détails de la microstructure)



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
5	1

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Direct	<0,01
Abaque	Direct	
PROCEDE	Direct	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon

STS_1

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : StS

Numéro de l'élément d'armure : STS_1

Lieu de conservation : Musées de Laval (Laval)

Lieu de découverte :

Description : Cervelière traditionnellement associée à l'armure dite de Sainte Suzanne. Elle serait cependant antérieure au reste de l'ensemble (XIV^e siècle) (O. Renaudeau, 2014)

Datation : première moitié du XIV^e siècle (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Indéterminée

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Cervelière

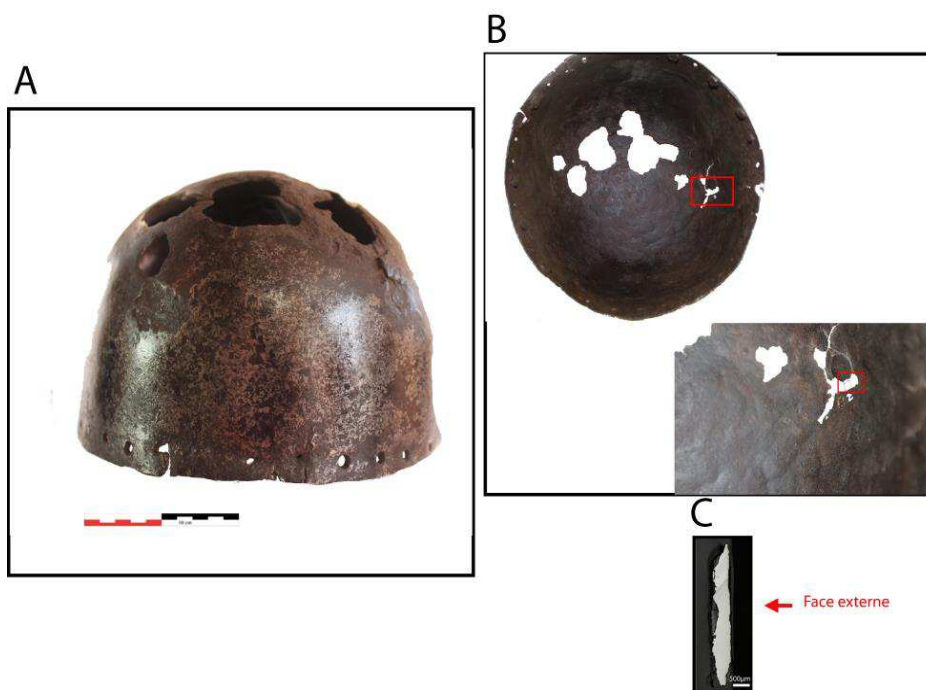
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique : (O. Renaudeau, 2014)

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé un bord endommagé de la cervelière

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
Ind	Globulaire	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
0,2	0,31	0,15	261 ($\sigma=47$)	Non dosé	Non

Commentaires :

Cet échantillon présente la structure d'un acier moyennement carburé à teneur en carbone hétérogène. La perlite de forme globulaire témoigne qu'un recuit du métal a été opéré.

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

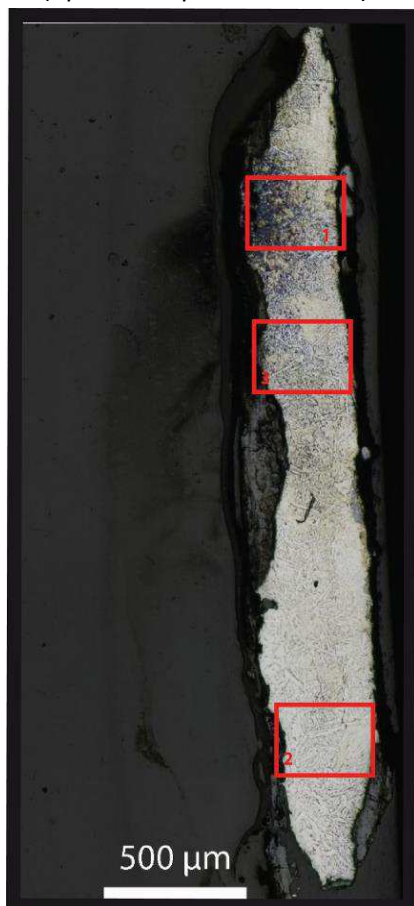
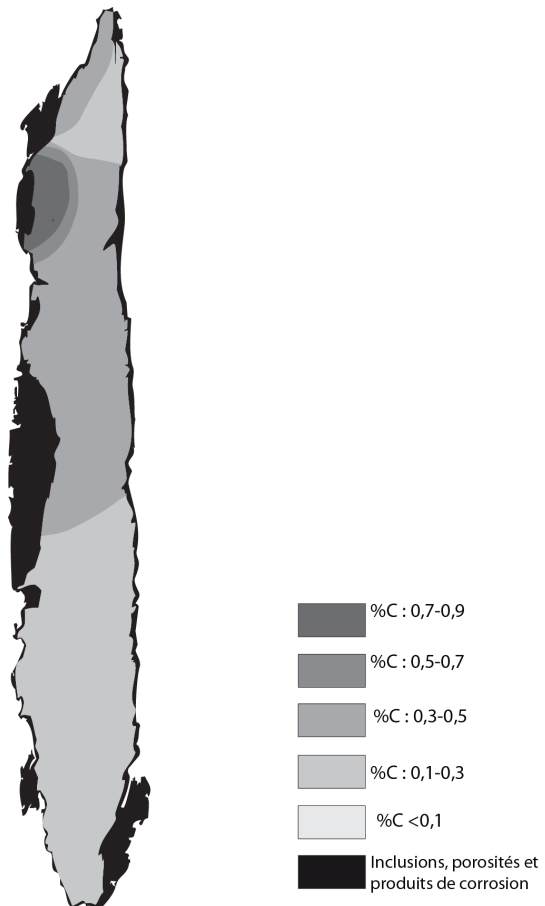
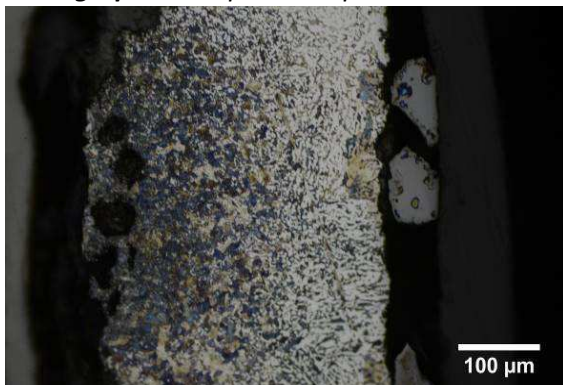


Schéma correspondant



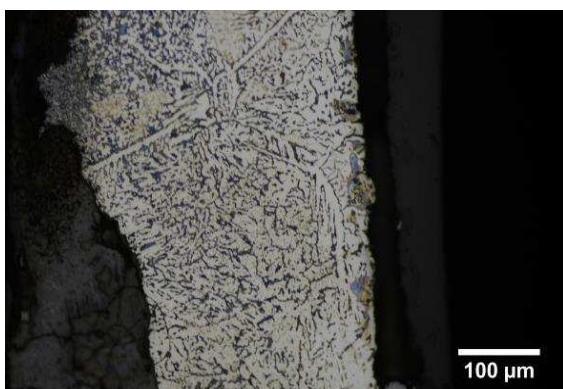
Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



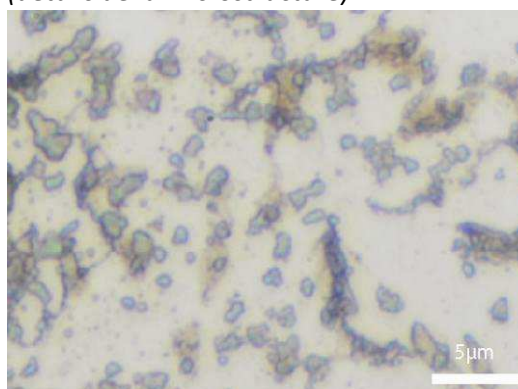
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
Non défini	Non défini

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Non défini	Non défini
Abaque	Non défini	
PROCEDE	Non défini	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon STS_2

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : StS

Numéro de l'élément d'armure : STS_2

Lieu de conservation : Musées de Laval (Laval)

Lieu de découverte :

Description : Cubitière de l'armure dite de Sainte Suzanne. La typologie de cette dernière la rapprocherait des productions italiennes et notamment milanaises du XVe siècle, reconnaissable à la dissymétrie de ses défenses d'épaules et de bras (O. Renaudeau, 2014)

Datation : XVe siècle (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Italie

Ville : Milan

Élément de l'armure étudié : Cubitière

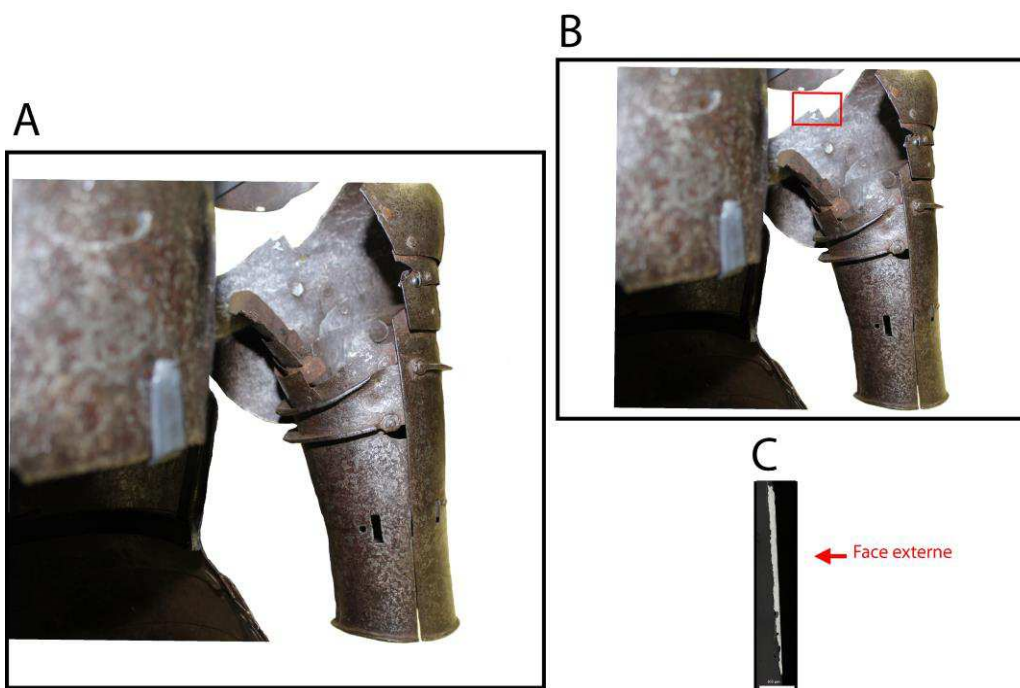
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique : (O. Renaudeau, 2014)

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé sur un bord de la cubitière.

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[>200]	Non résolue	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
1,8	0,06	0,00	148 ($\sigma = 10$)	<0,1	Non

Commentaires :

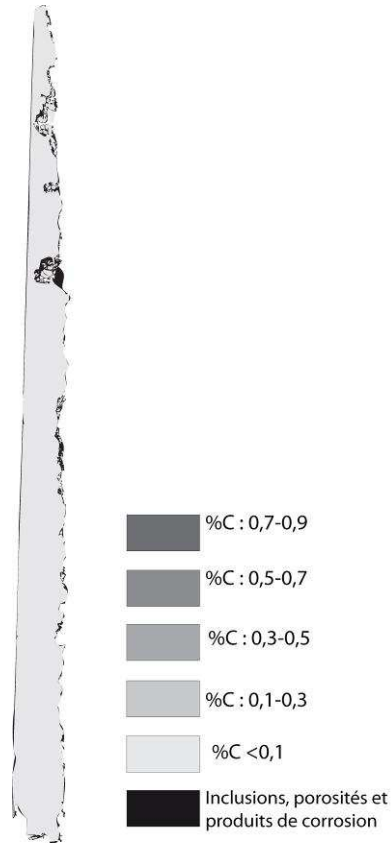
Cet échantillon présente une structure entièrement ferritique. Les grains, pour certains de grande taille (>200 μm) témoignent qu'un recuit du métal a été opéré.

Analyses métallographiques

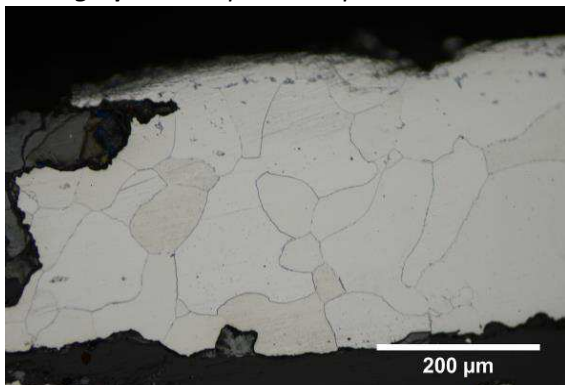
Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)



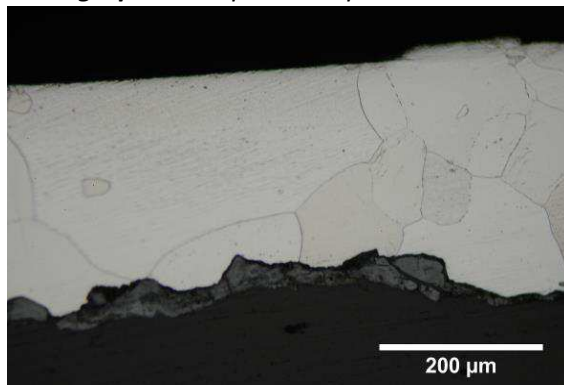
Schéma correspondant



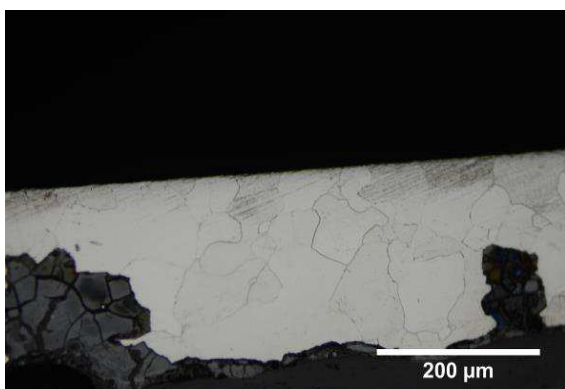
Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



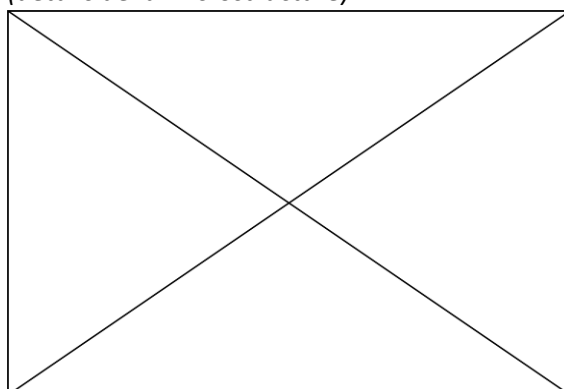
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
Non défini	Non défini

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Non défini	Non défini
Abaque	Non défini	
PROCEDE	Non défini	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon STS_3

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : StS

Numéro de l'élément d'armure : STS_3

Lieu de conservation : Musées de Laval (Laval)

Lieu de découverte :

Description : Plastron de l'armure dite de Sainte Suzanne. La typologie de cette dernière la rapprocherait des productions italiennes et notamment milanaises du XVe siècle, reconnaissable à la dissymétrie de ses défenses d'épaules et de bras (O. Renaudeau, 2014)

Datation : XVe siècle (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Italie

Ville : Milan

Élément de l'armure étudié : Plastron

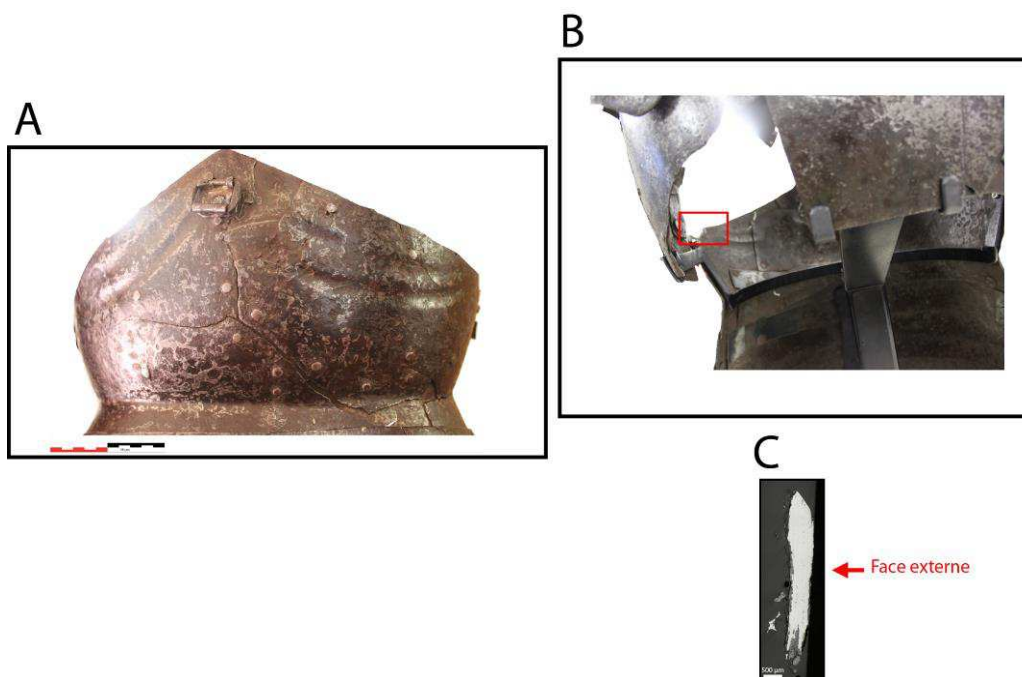
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique : (O. Renaudeau, 2014)

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé sur un bord du plastron

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[50-200]	Lamellaire et globulaire	Non	Non	Oui	Oui

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
1,0	0,54	0,21	172 ($\sigma=40$)	Non dosé	Non

Commentaires :

Cet échantillon présente la structure d'un acier moyennement carburé hétérogène. Un léger gradient de teneur en carbone est visible il court de 0,2 à 0,8%. La perlite est de forme globulaire ou lamellaire épaisse ce qui témoigne qu'un recuit du métal a été opéré

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

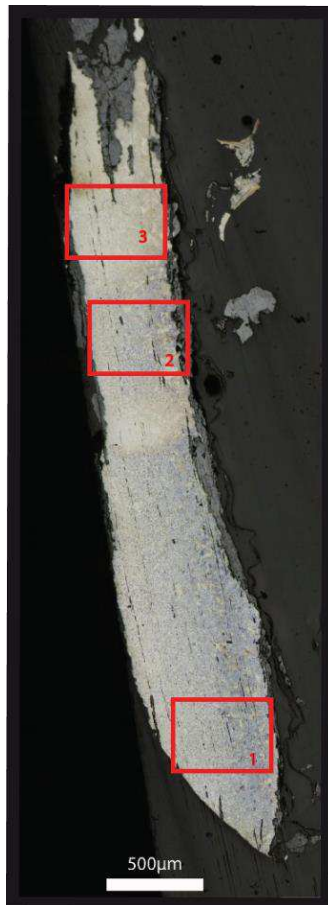
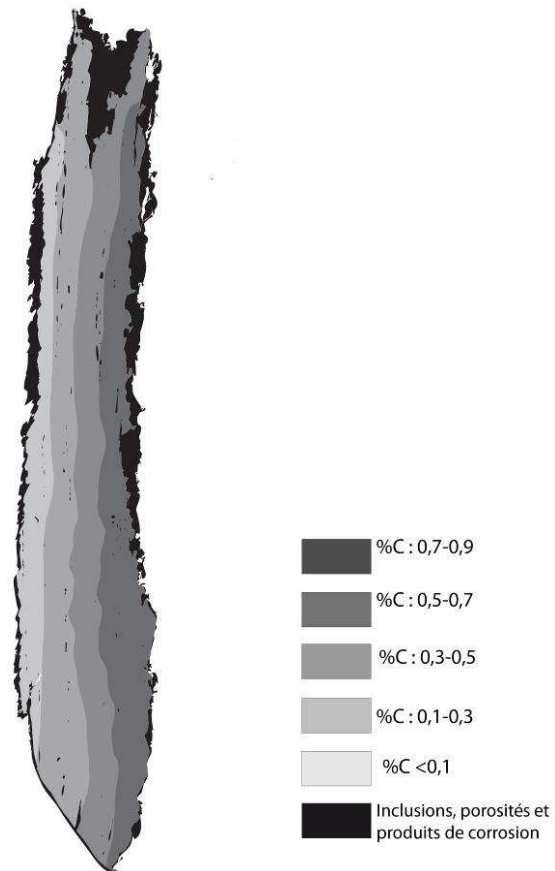
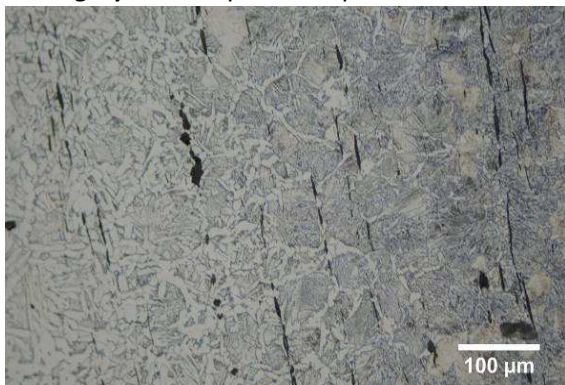


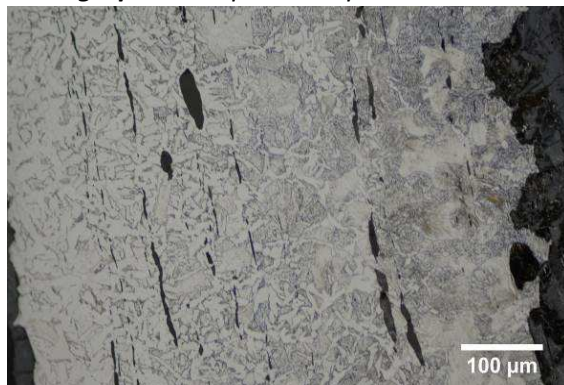
Schéma correspondant



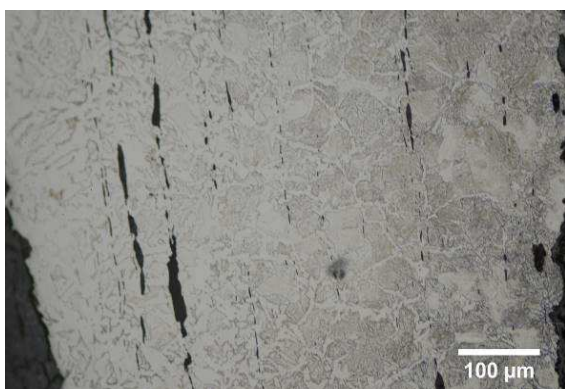
Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



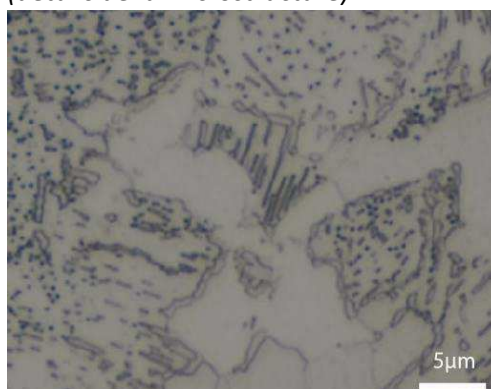
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
6	1,2,4,5

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Direct	0,27
Abaque	Direct	
PROCEDE	Direct	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Oui	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon STS_4

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : StS

Numéro de l'élément d'armure : STS_4

Lieu de conservation : Musées de Laval (Laval)

Lieu de découverte :

Description : Dossière de l'armure dite de Sainte Suzanne. La typologie de cette dernière la rapprocherait des productions italiennes et notamment milanaises du XVe siècle, reconnaissable à la dissymétrie de ses défenses d'épaules et de bras (O. Renaudeau, 2014)

Datation : XVe siècle (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Italie

Ville : Milan

Élément de l'armure étudié : Dossière

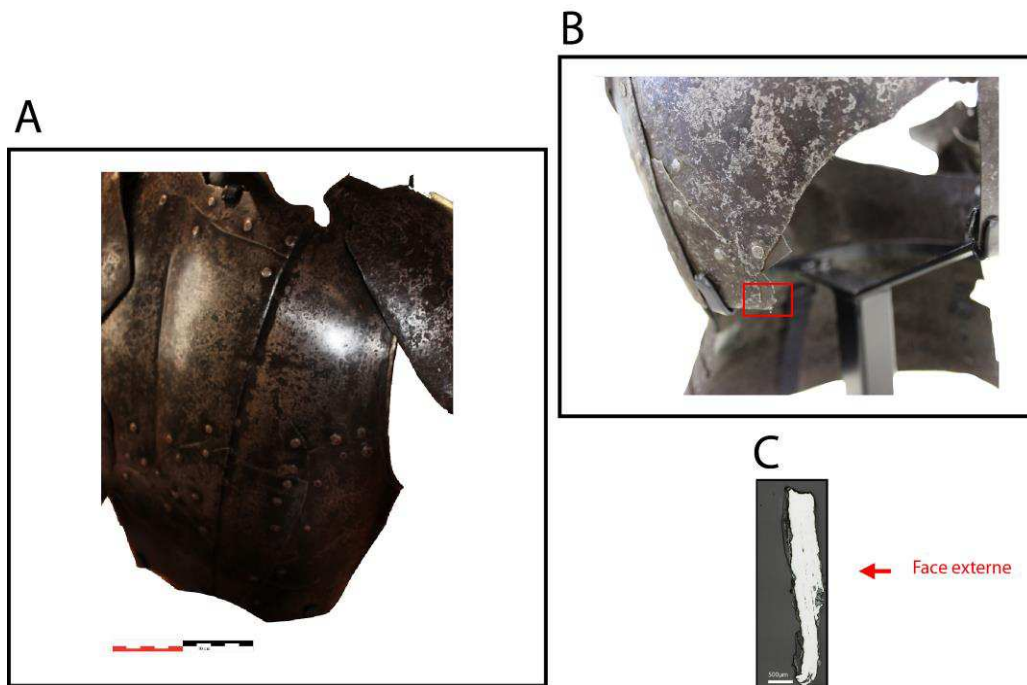
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique : (O. Renaudeau, 2014)

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé sur une la partie latérale gauche de la dossière

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[<50]	Non résolue	Non	Non	Oui	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
1,1	0,54	0,22	219 ($\sigma=55$)	Non dosé	Oui ?

Commentaires :

Cet échantillon présente un gradient de carbone bien net, qui s'étend de 0,8% à 0,1% de carbone.

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

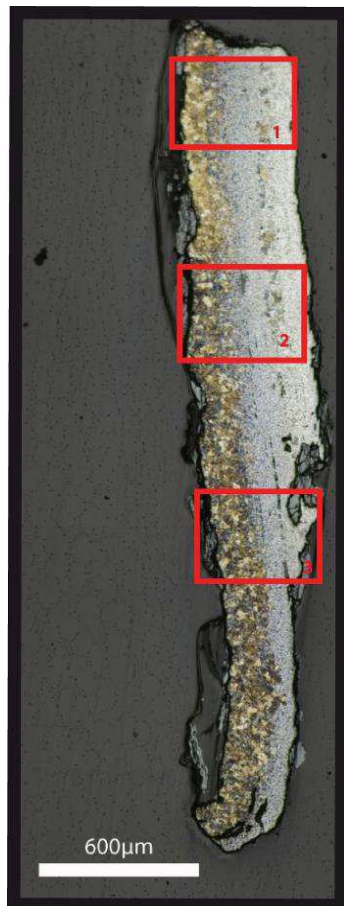
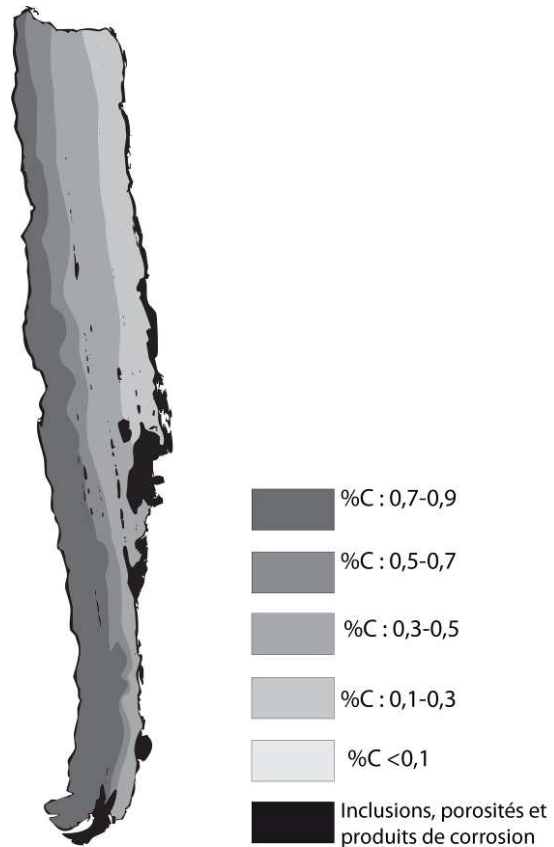
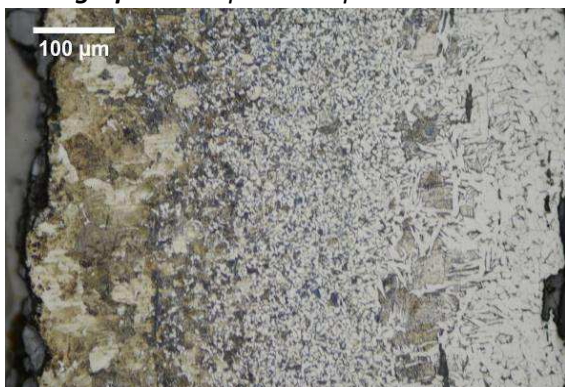


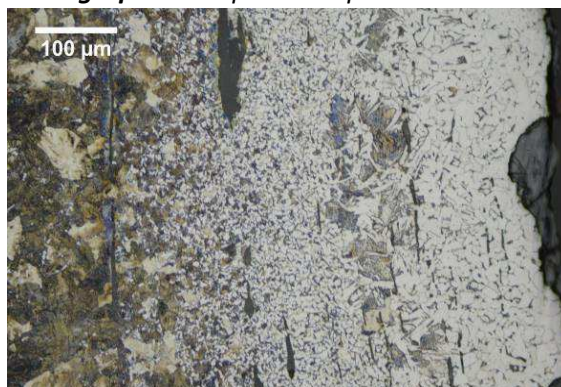
Schéma correspondant



Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



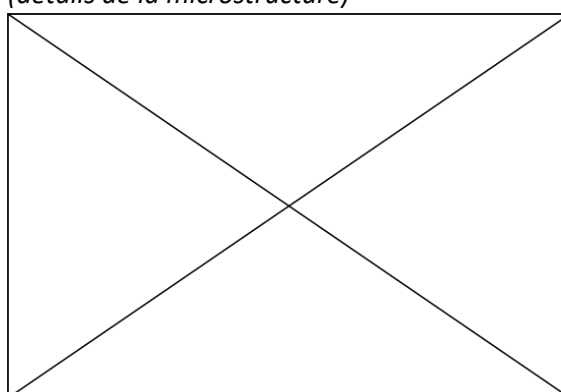
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
5	1,4

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Direct	$p(\text{classe1})=0,5$ $p(\text{classe4})=0,1$
Abaque	Direct	
PROCEDE	Direct	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Oui	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon STS_5

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : StS

Numéro de l'élément d'armure : STS_5

Lieu de conservation : Musées de Laval (Laval)

Lieu de découverte :

Description : Epaulière gauche de l'armure dite de Sainte Suzanne. La typologie de cette dernière la rapprocherait des productions italiennes et notamment milanaises du XVe siècle, reconnaissable à la dissymétrie de ses défenses d'épaules et de bras (O. Renaudeau, 2014)

Datation : XVe siècle (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Italie

Ville : Milan

Élément de l'armure étudié : Epaulière

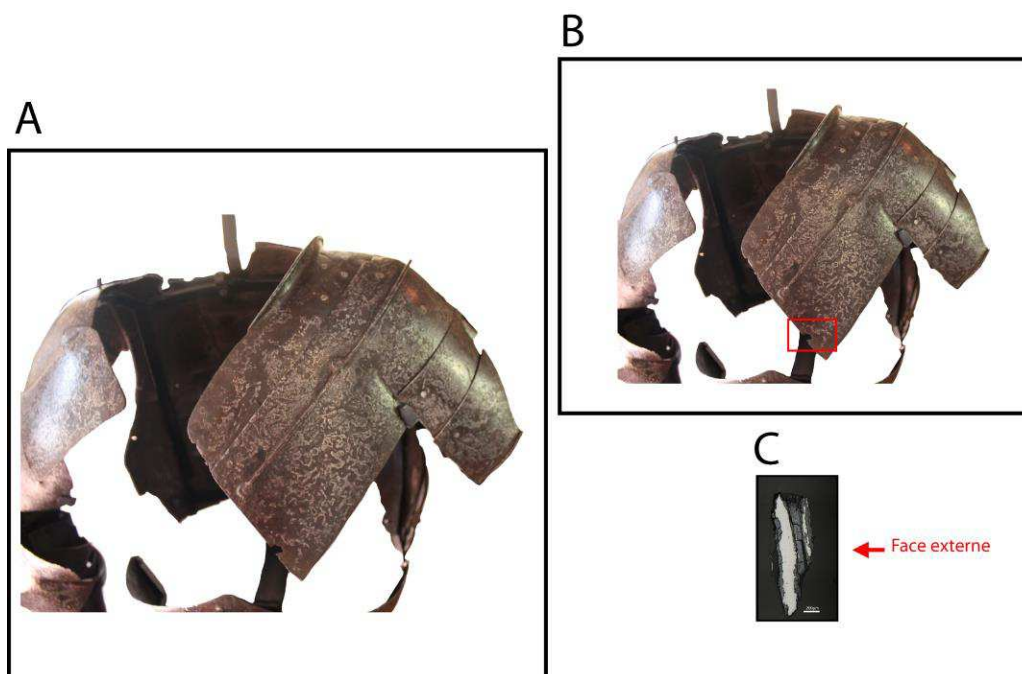
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique : (O. Renaudeau, 2014)

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé sur un bord de l'épaulière gauche

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
Ind	Lamellaire et globulaire	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
1,6	0,40	0,00	191 ($\sigma=13$)	Non dosé	Non

Commentaires :

Cet échantillon présente la structure d'un acier moyennement carburé très homogène, cependant il est à noter qu'il est fortement corrodé. Par conséquent il est possible qu'une partie de l'information relative à la nature du métal ait été perdue. Il porte lui aussi les traces d'un recuit (perlite majoritairement de forme globulaire et parfois lamellaire épaisse).

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

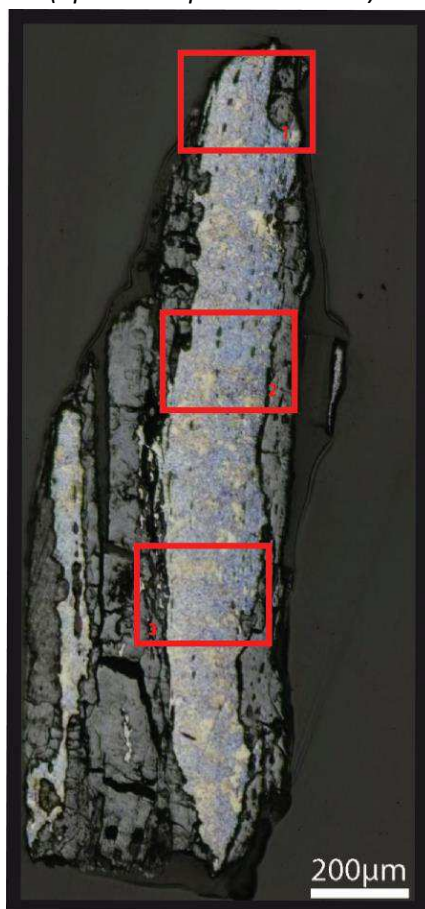


Schéma correspondant

Inclusions, porosités et produits de corrosion

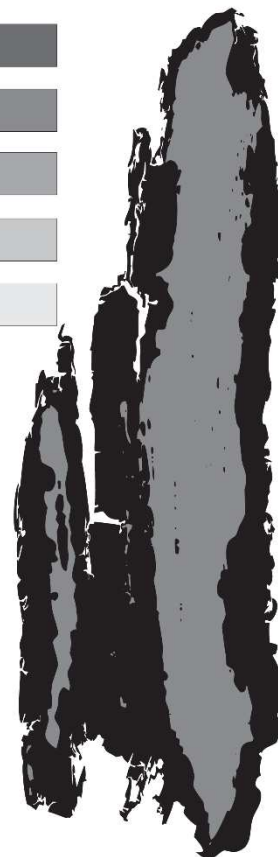
%C : 0,7-0,9

%C : 0,5-0,7

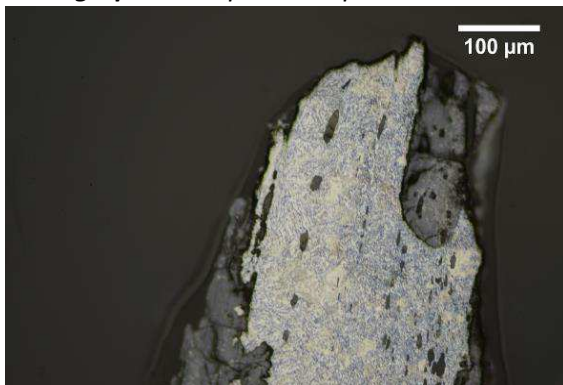
%C : 0,3-0,5

%C : 0,1-0,3

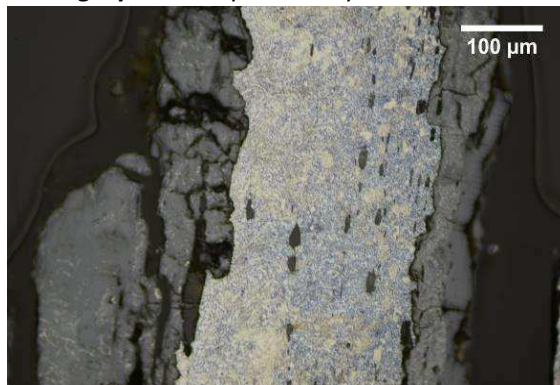
%C <0,1



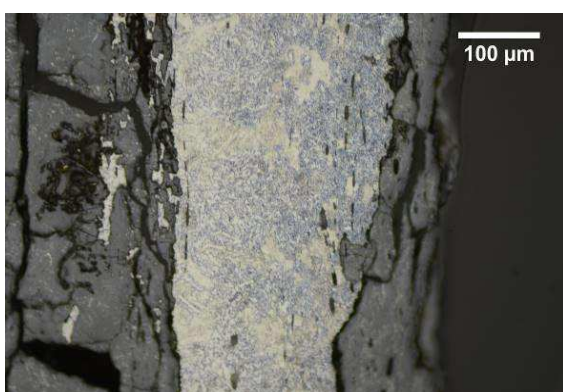
Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



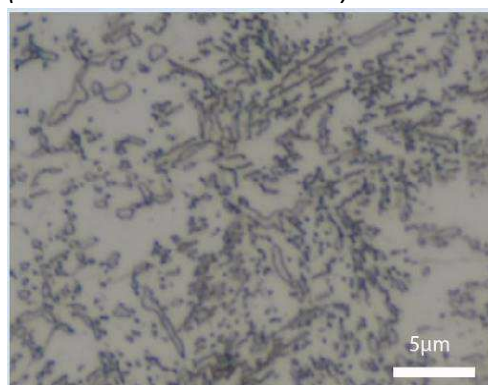
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
6	4

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Indirect	0,94
Abaque	Indirect	
PROCEDE	Indirect	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon STS_6

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : StS

Numéro de l'élément d'armure : STS_4

Lieu de conservation : Musées de Laval (Laval)

Lieu de découverte :

Description : Dossière de l'armure dite de Sainte Suzanne. La typologie de cette dernière la rapprocherait des productions italiennes et notamment milanaises du XVe siècle, reconnaissable à la dissymétrie de ses défenses d'épaules et de bras (O. Renaudeau, 2014)

Datation : XVe siècle (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Italie

Ville : Milan

Élément de l'armure étudié : Dossière

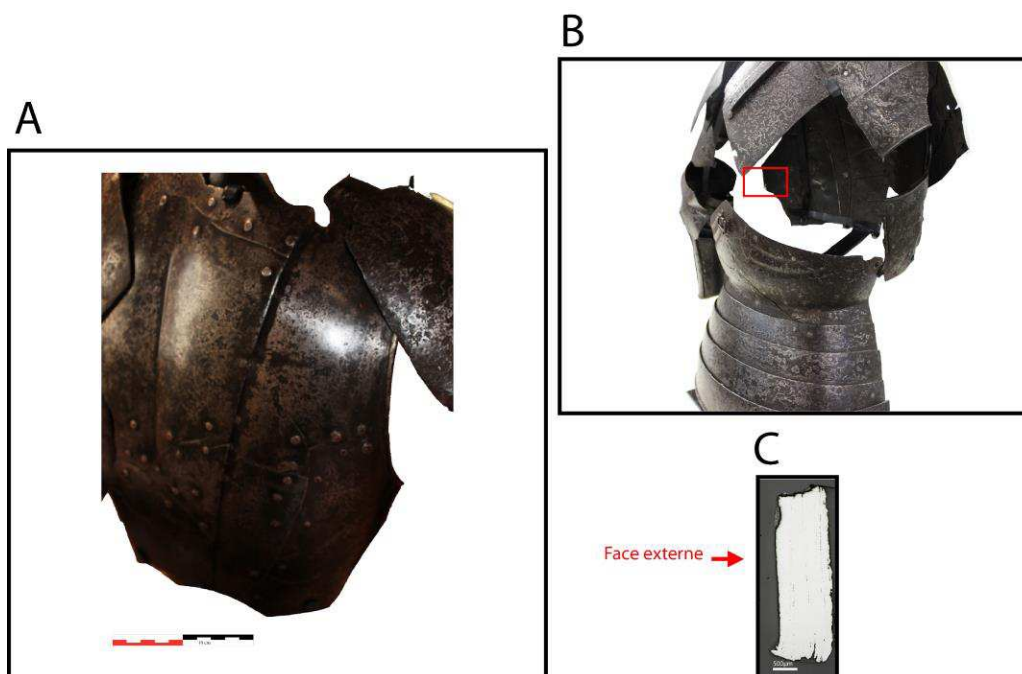
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique : (O. Renaudeau, 2014)

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé sur une la partie latérale droite de la dossière

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[50-200]	Lamellaire	Non	Non	Oui	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
0,5	0,55	0,27	238 ($\sigma = 80$)	Non dosé	Oui

Commentaires :

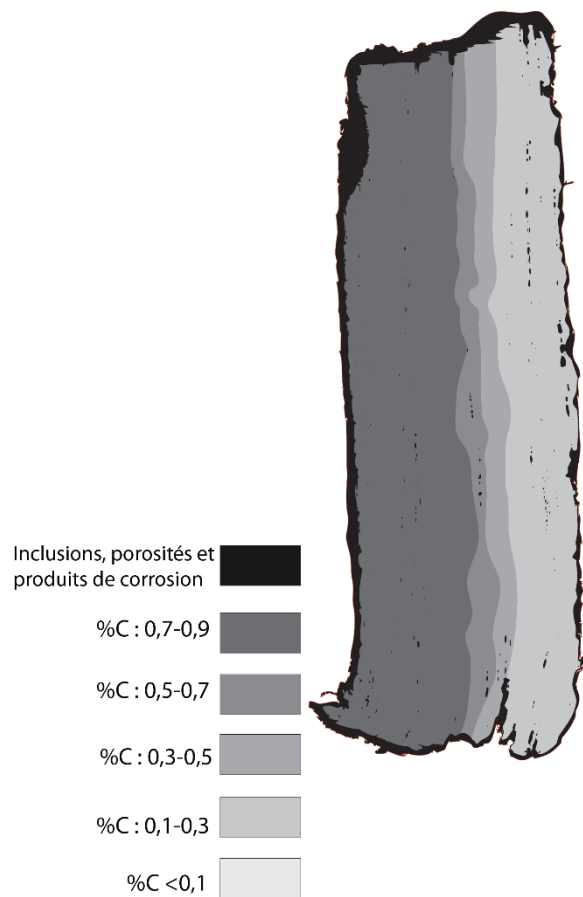
Cet échantillon présente un gradient de teneur en carbone bien net, qui s'étend de 0,8% à 0,1% de carbone.

Analyses métallographiques

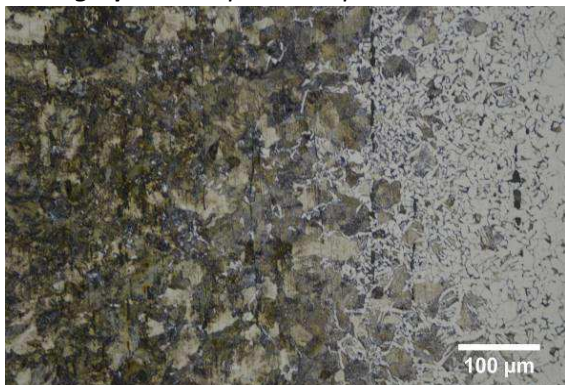
Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)



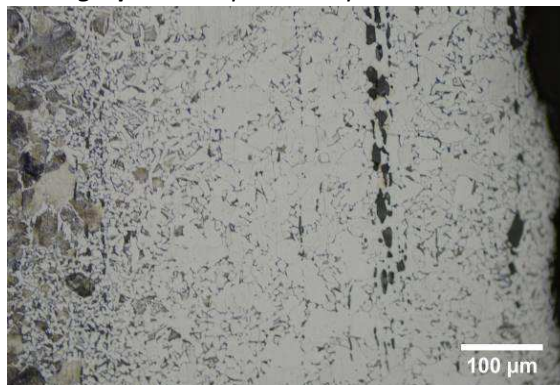
Schéma correspondant



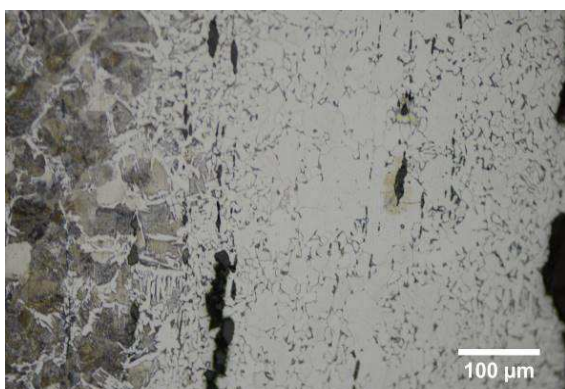
Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



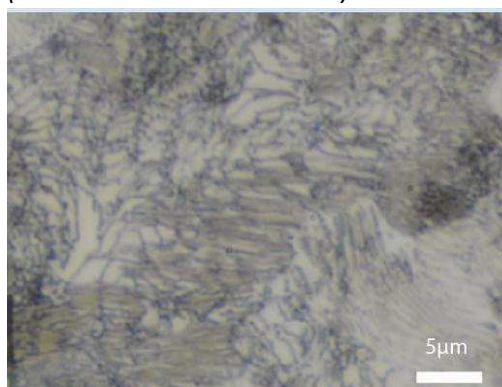
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3% (détails de la microstructure)



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
3	1,2

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Direct et Indéterminé	$p(\text{classe1})=0,15$ $p(\text{classe2})=0,98$
Abaque	Indéterminé	
PROCEDE	Direct et Indéterminé	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Oui	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon STS_7

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : StS

Numéro de l'élément d'armure : STS_7

Lieu de conservation : Musées de Laval (Laval)

Lieu de découverte :

Description : Epaulière droite de l'armure dite de Sainte Suzanne. La typologie de cette dernière la rapprocherait des productions italiennes et notamment milanaises du XVe siècle, reconnaissable à la dissymétrie de ses défenses d'épaules et de bras (O. Renaudeau, 2014)

Datation : XVe siècle (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Italie

Ville : Milan

Élément de l'armure étudié : Epaulière

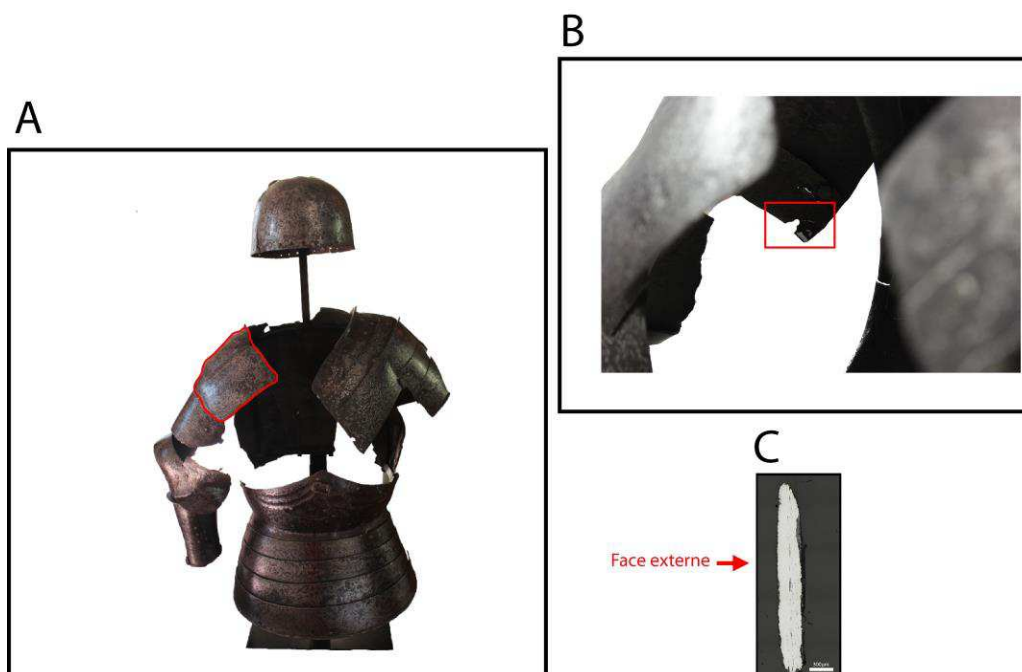
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique : (O. Renaudeau, 2014)

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé sur un bord de l'épaulière droite

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[>200]	Non résolue	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
1,5	0,06	0,00	198 ($\sigma=13$)	<0,1	Non

Commentaires :

Cet échantillon présente une structure ferritique à très bas taux de carbone (%C* < 0,1). La taille des grains est variable mais parfois importante (>100 μm). A noter la dureté très élevée par rapport à celle attendue pour ce type de structure.

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

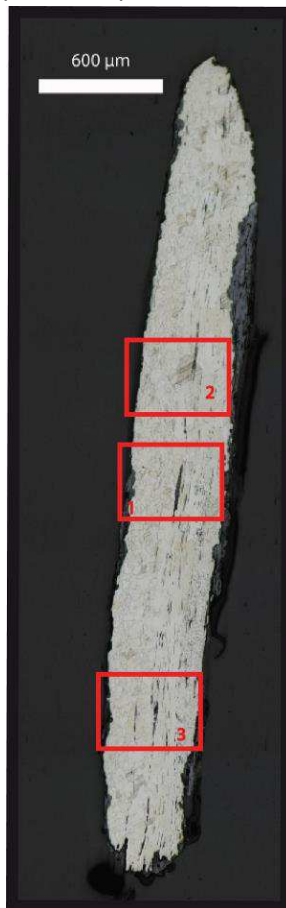
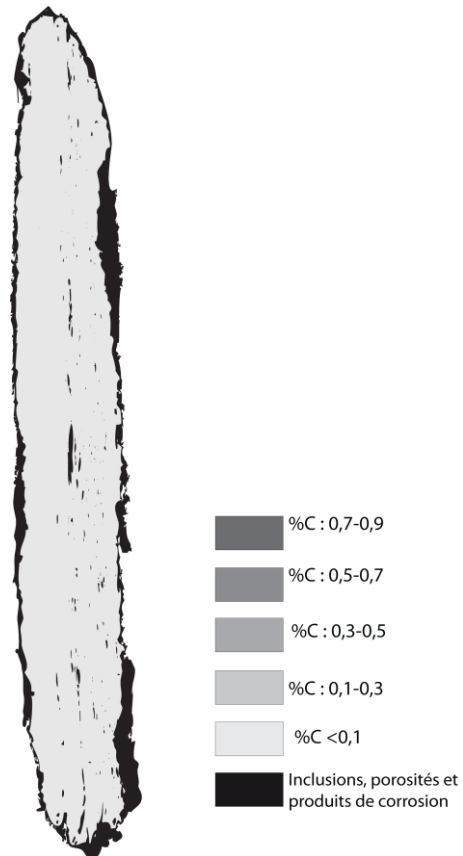
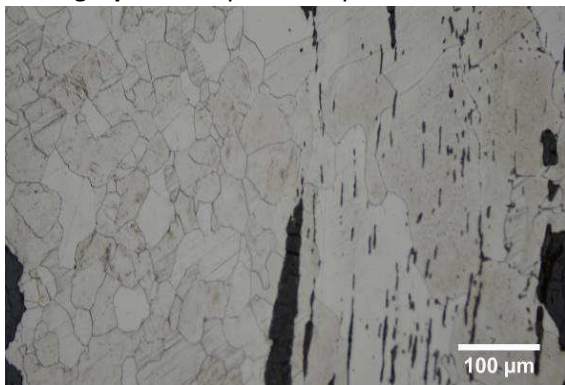


Schéma correspondant



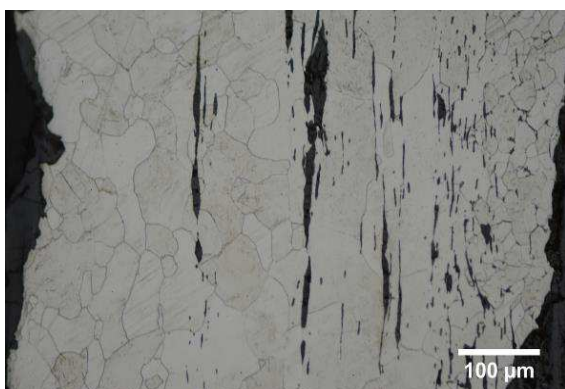
Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



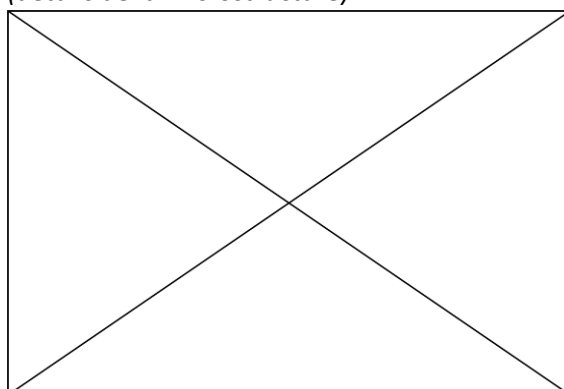
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
3	1

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Direct	<0,01
Abaque	Direct	
PROCEDE	Direct	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Dissier, 2014)
Non	Non	Non	Oui	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon STS_8

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : StS

Numéro de l'élément d'armure : STS_8

Lieu de conservation : Musées de Laval (Laval)

Lieu de découverte :

Description : Arrière bras de l'armure dite de Sainte Suzanne. La typologie de cette dernière la rapprocherait des productions italiennes et notamment milanaises du XVe siècle, reconnaissable à la dissymétrie de ses défenses d'épaules et de bras (O. Renaudeau, 2014)

Datation : XVe siècle (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Italie

Ville : Milan

Élément de l'armure étudié : Arrière bras

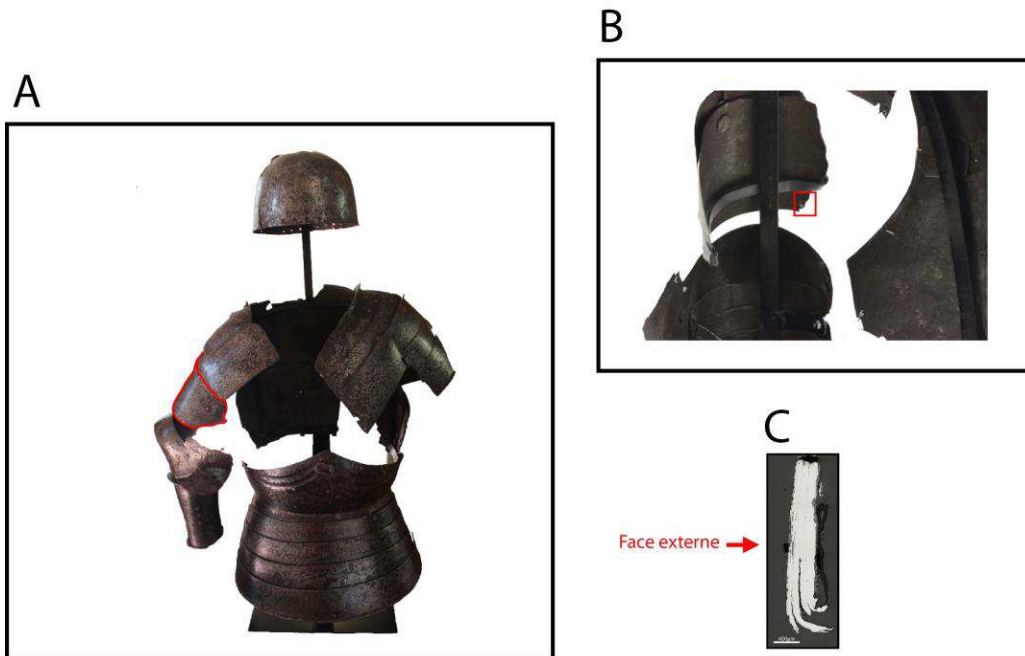
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique : (O. Renaudeau, 2014)

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé sur un bord de l'arrière bras

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
Ind	Lamellaire	Non	Non	Oui	Oui

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
1,8	0,54	0,09	203 ($\sigma=24$)	Non dosé	Non

Commentaires :

La microstructure de cet échantillon consiste en un gradient de teneur en carbone (de 0,6% au bord gauche à 0,4% au bord droit). La ferrite est aciculaire (structure de Widmanstätten).

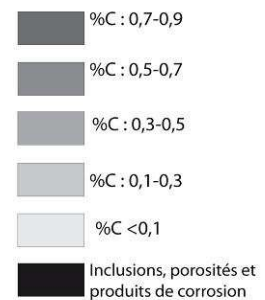
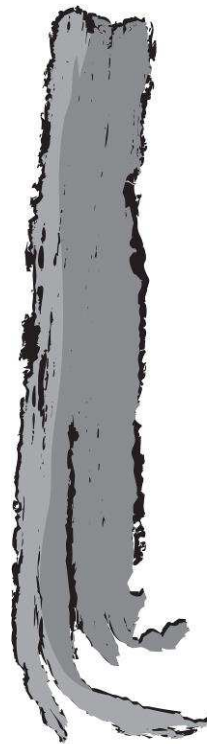
Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon

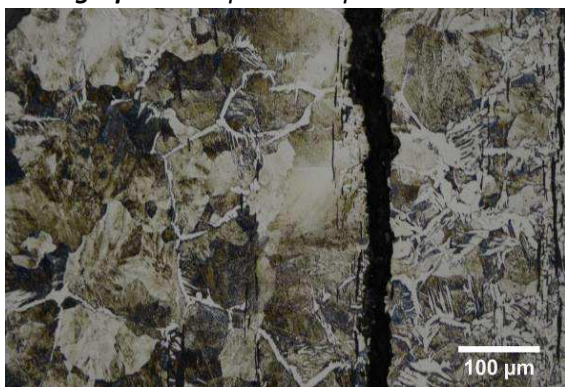
(après attaque au Nital 3%)



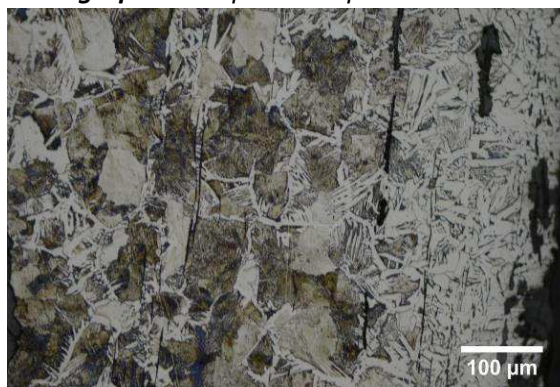
Schéma correspondant



Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



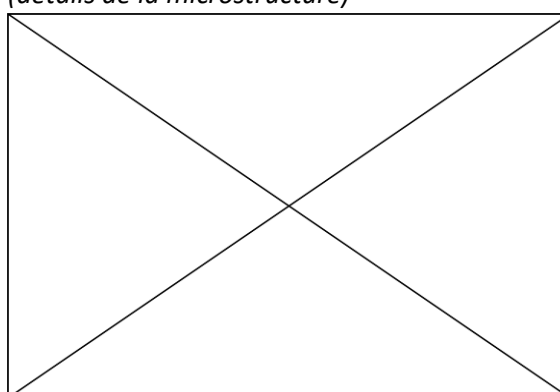
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
2	1

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Direct	<0,01
Abaque	Direct	
PROCEDE	Direct	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Oui	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon STS_9

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : StS

Numéro de l'élément d'armure : STS_9

Lieu de conservation : Musées de Laval (Laval)

Lieu de découverte :

Description : Cervelière traditionnellement associée à l'armure dite de Sainte Suzanne. Elle serait cependant antérieure au reste de l'ensemble (XIV^e siècle) (O. Renaudeau, 2014)

Datation : première moitié du XIV^e siècle (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Indéterminée

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Cervelière

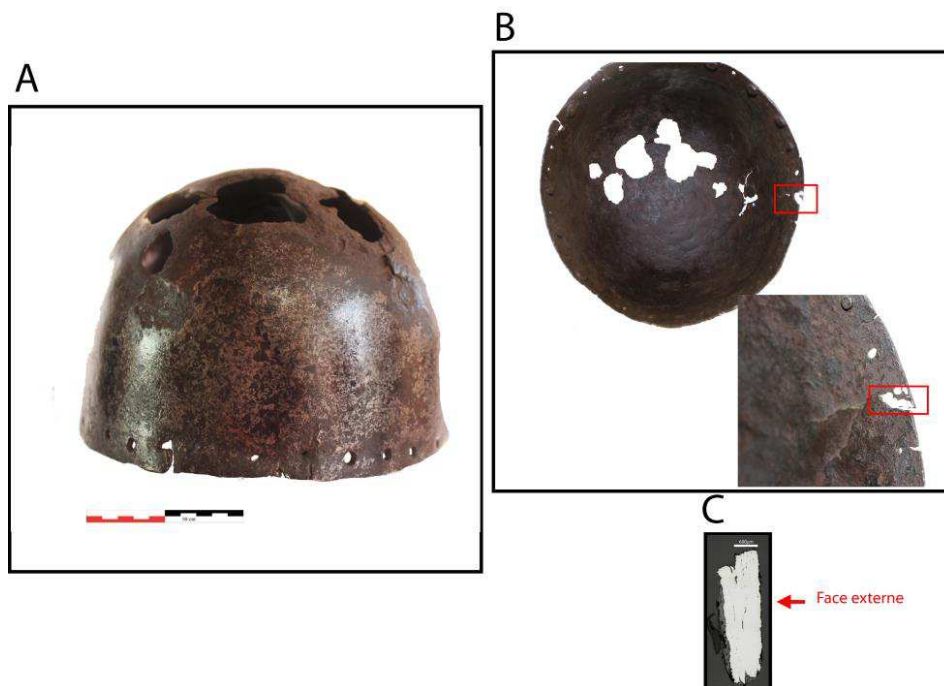
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique : (O. Renaudeau, 2014)

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé sur une bordure de la cervelière

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[>200]	Non résolue	Non	Oui	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
1,5	0,06	0,00	222 ($\sigma=48$)	0,15	Oui

Commentaires :

Cet échantillon peut être décomposé en plusieurs parties. Au centre on trouve une structure ferritique. Aux extrémités du fer phosphoreux à larges grains (>200 μm).

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

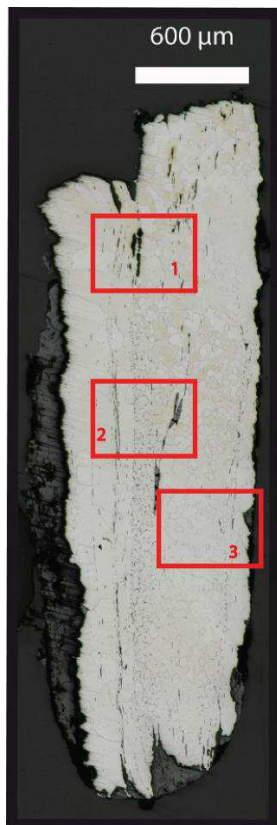
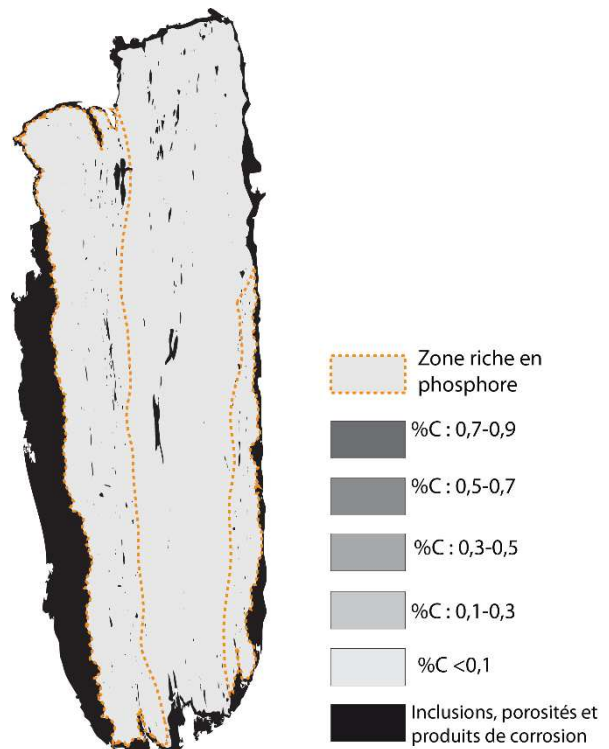


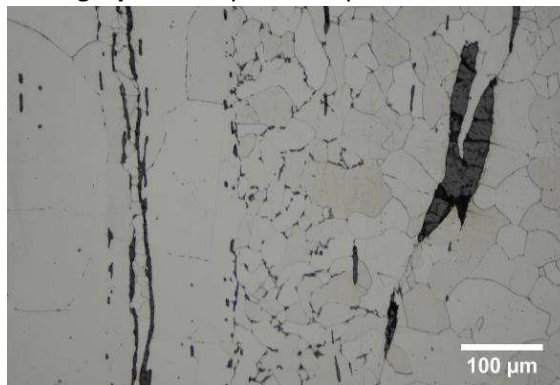
Schéma correspondant



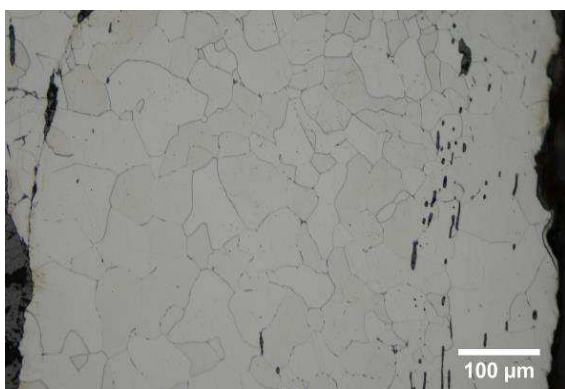
Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



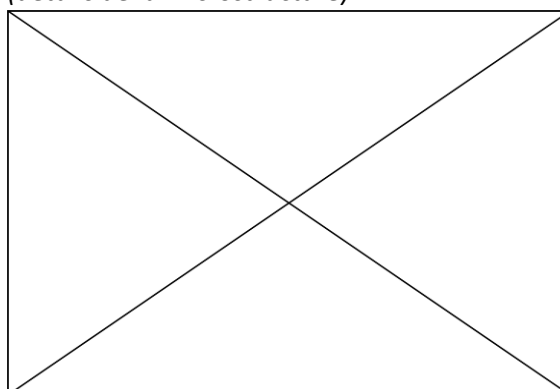
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
3	12,3

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

Procédé		Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Direct et Indirect	$p(\text{classe1}) > 0,99$ $p(\text{classe2}) < 0,01$ $p(\text{classe3}) = 0,97$
Abaque	Direct	
PROCEDE	Direct et Indirect	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon STS_10

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : StS

Numéro de l'élément d'armure : STS_10

Lieu de conservation : Musées de Laval (Laval)

Lieu de découverte :

Description : lame de braconnière de l'armure dite de Sainte Suzanne. La typologie de cette dernière la rapprocherait des productions italiennes et notamment milanaises du XVe siècle, reconnaissable à la dissymétrie de ses défenses d'épaules et de bras (O. Renaudeau, 2014)

Datation : XVe siècle (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Italie

Ville : Milan

Élément de l'armure étudié : Braconnière

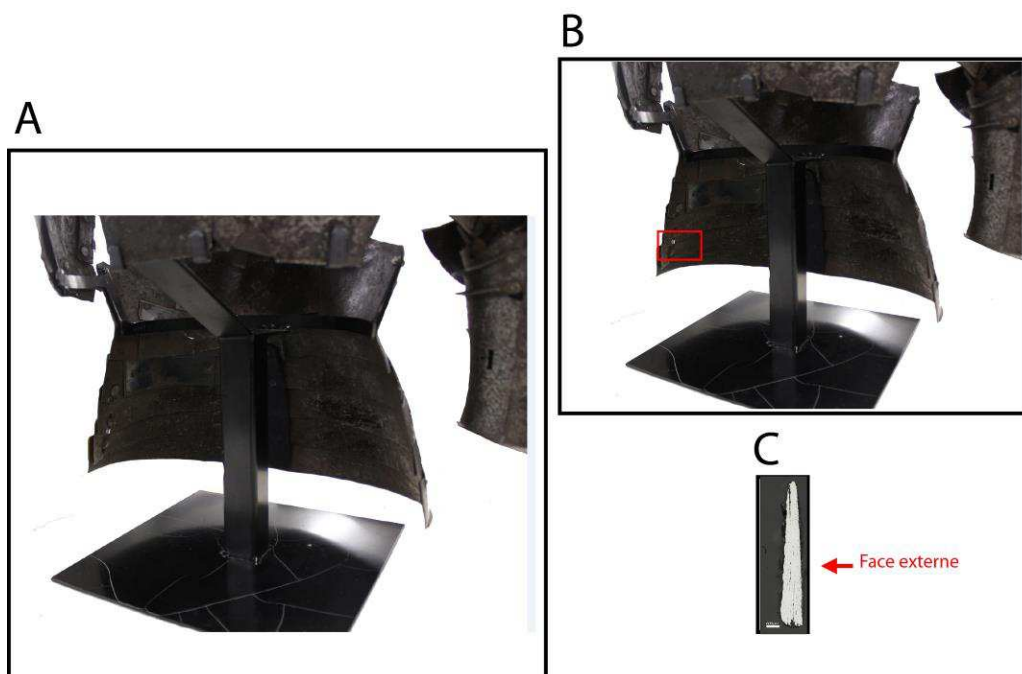
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique : (O. Renaudeau, 2014)

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé sur la 3ème lame de la braconnière

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
Ind	Non résolue	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
0,6	0,80	0,00	327 ($\sigma=26$)	Non dosé	Non

Commentaires :

Cet échantillon présente la structure d'un acier fortement carburé proche de la composition de l'eutectoïde. Les grains sont écrouis ce qui explique la dureté élevée mesurée(>300Hv).

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

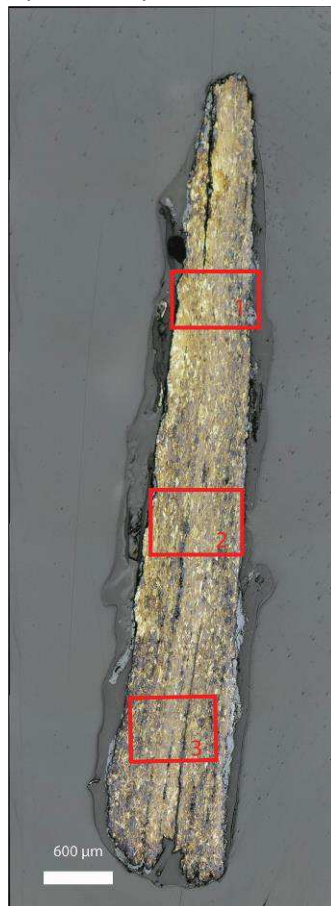
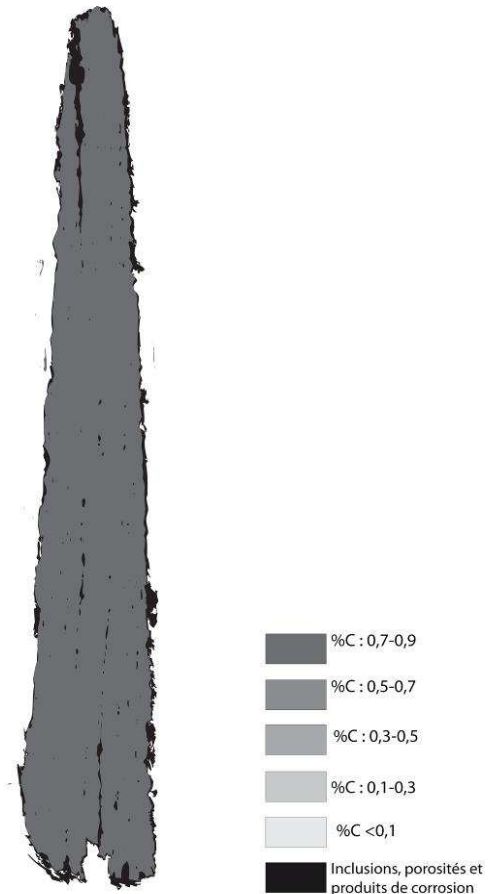
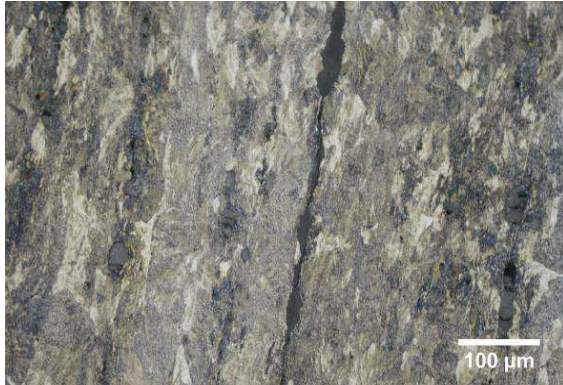


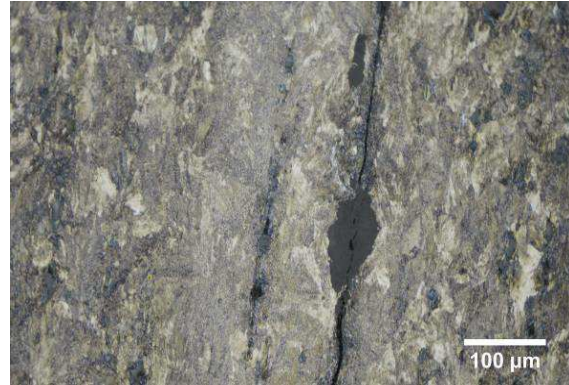
Schéma correspondant



Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



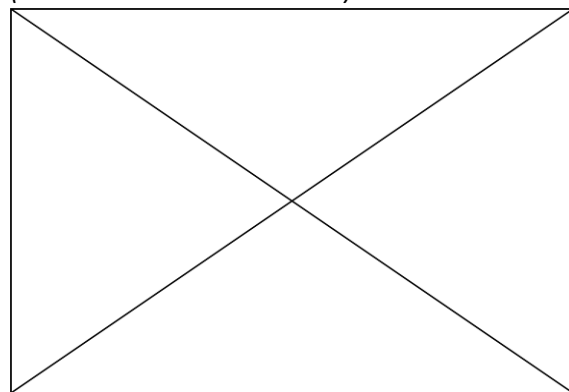
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
3	1

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Direct	0,17
Abaque	Direct	
PROCEDE	Direct	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Oui	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon

STS_11

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : StS

Numéro de l'élément d'armure : STS_4

Lieu de conservation : Musées de Laval (Laval)

Lieu de découverte :

Description : Dossière de l'armure dite de Sainte Suzanne. La typologie de cette dernière la rapprocherait des productions italiennes et notamment milanaises du XVe siècle, reconnaissable à la dissymétrie de ses défenses d'épaules et de bras (O. Renaudeau, 2014)

Datation : XVe siècle (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Italie

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Dossière

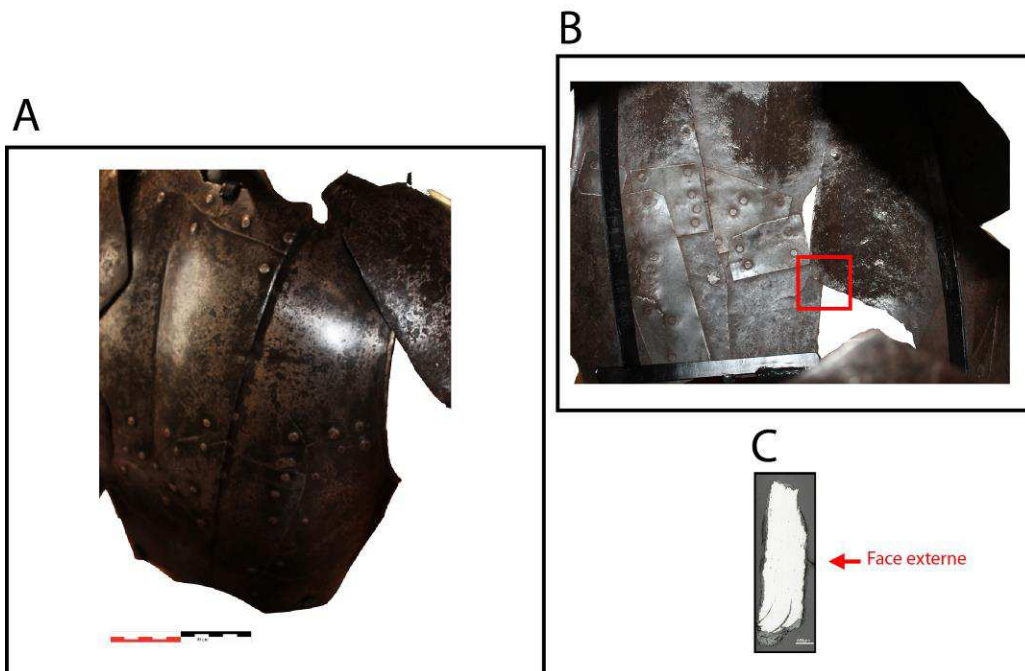
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique : (O. Renaudeau, 2014)

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé sur une la partie centrale de la dossière

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
Ind	Non résolue	Oui	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
0,5	>0,30	0,00	390 ($\sigma=109$)	Non dosé	Non

Commentaires :

Cet échantillon présente la structure d'un acier hétérogène en teneur en carbone. Un faciès typique de structures de trempe (martensite et bainite) est observé au centre, tandis que les extrémités révèlent une structure ferrito perlitique.

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

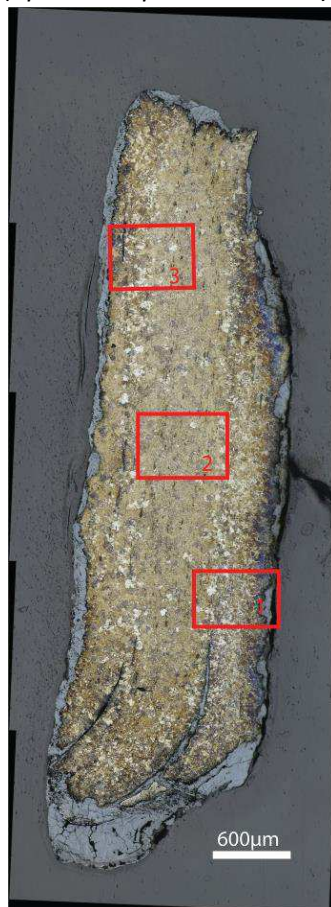
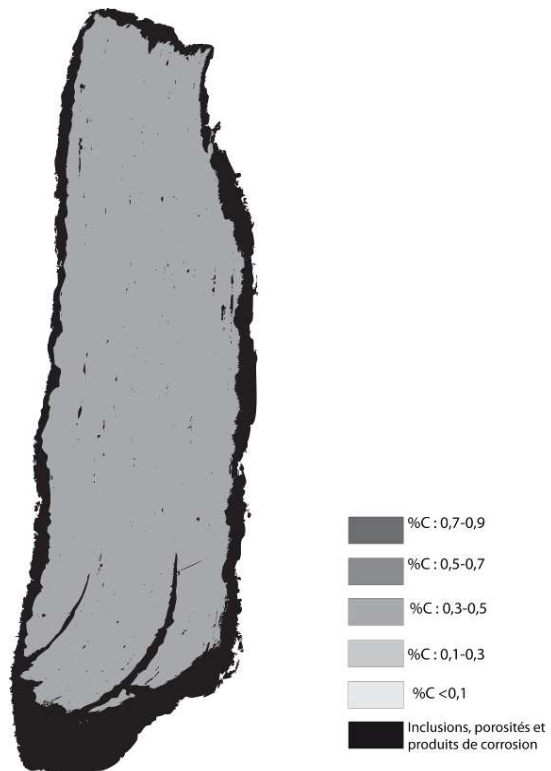
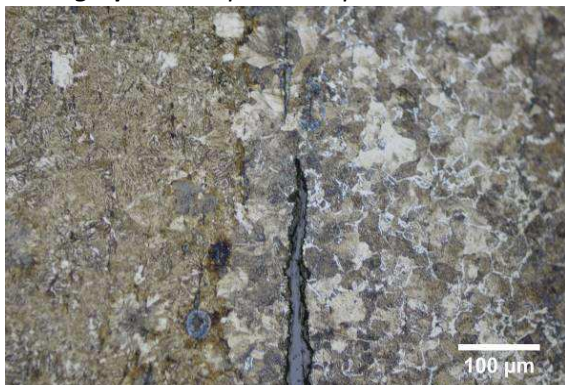


Schéma correspondant



Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
5	1

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Direct	0,13
Abaque	Direct	
PROCEDE	Direct	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon LAM46492

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : PAM

Numéro de l'élément d'armure : PAM

Lieu de conservation : Réserves de l'office du tourisme de Pont à Mousson (Pont à Mousson)

Lieu de découverte :

Description : Casque dont le bassinnet était soudé au crâne par la corrosion, découvert dans les réserves de l'office du tourisme de Pont à Mousson. Deux éléments du mezail sont présents ainsi qu'une tôle en relation avec le couvre nuque. Il a été identifié par O.Renaudeau comme un armet italien daté entre 1450 et 1510 (Notice du LAM)

Datation : entre 1450 et 1510 (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Italie

Ville : Milan

Élément de l'armure étudié : mezail

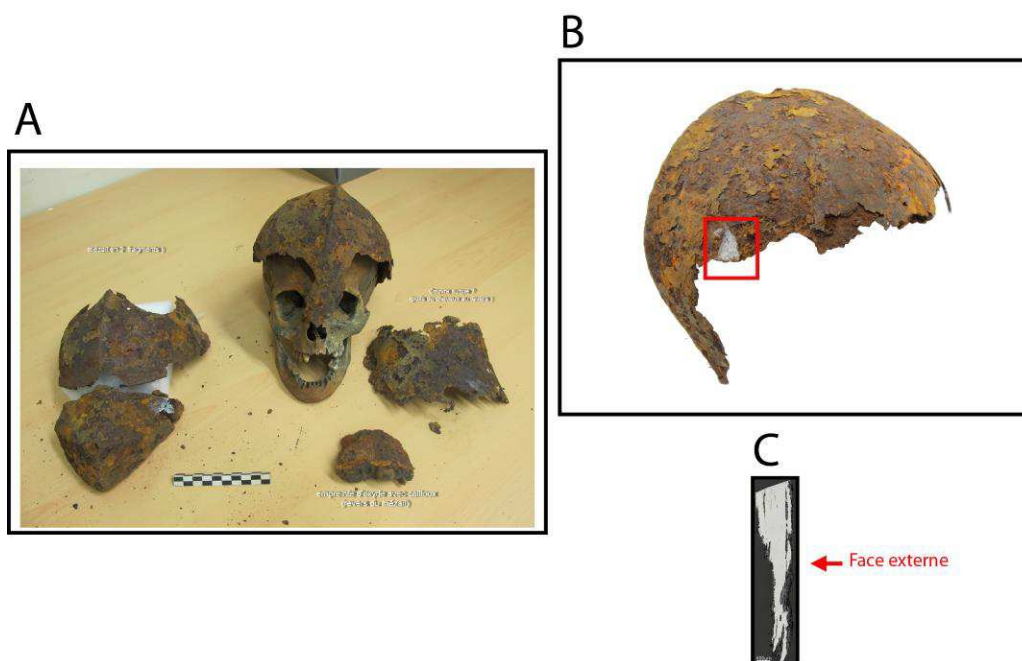
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique :

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé sur le mezaïl.

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[<50]	Lamellaire	Non	Non	Oui	Oui

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
1,5	0,42	0,21	142 ($\sigma = 15$)	Non dosé	Non

Commentaires :

Cet échantillon présente la structure d'un acier moyennement carburé. Un gradient de teneur en carbone s'étend de 0,6 à moins de 0,1%

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon

(après attaque au Nital 3%)

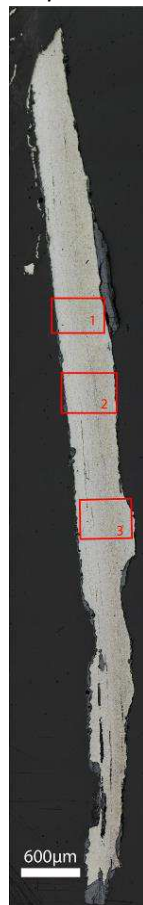
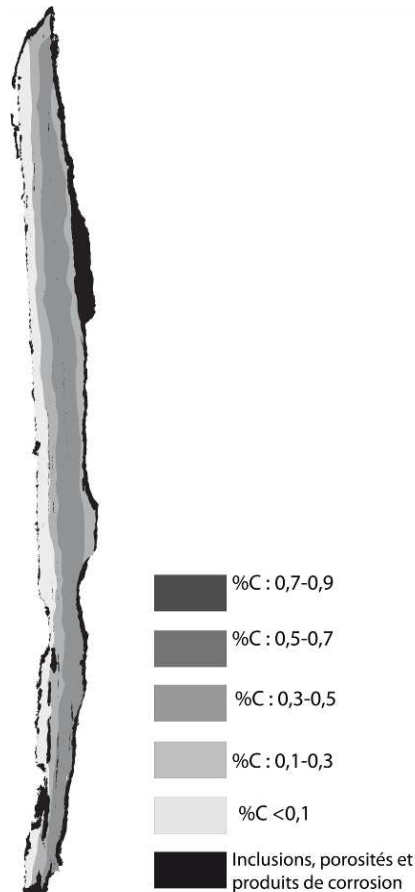
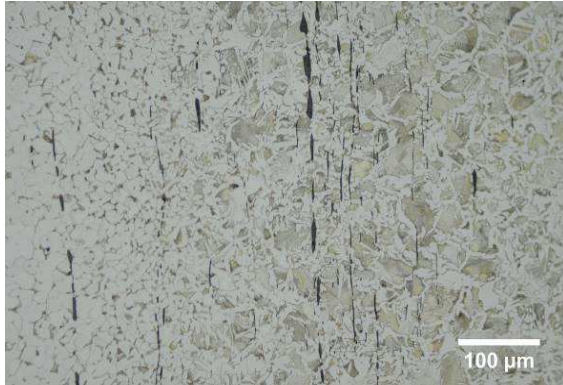


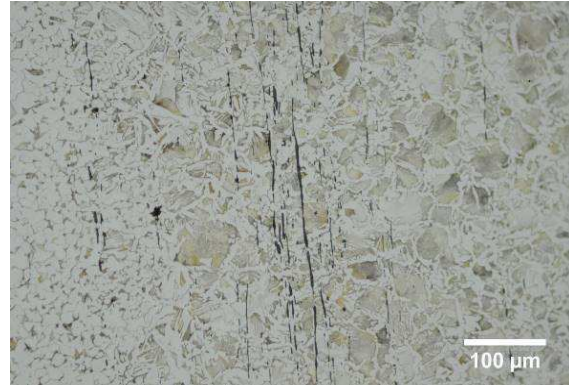
Schéma correspondant



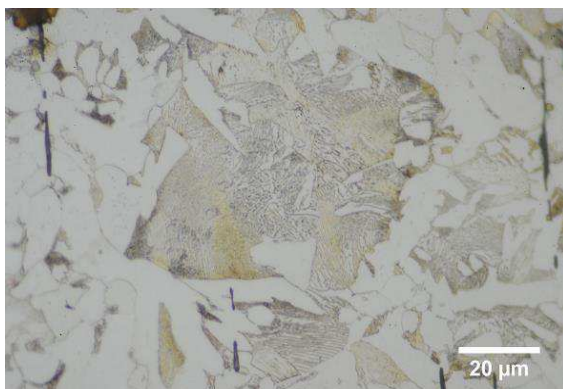
Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



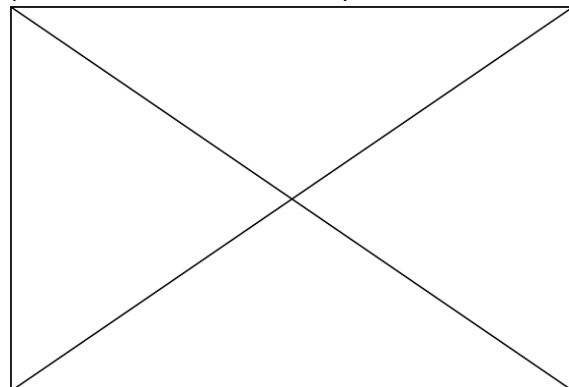
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
3	1

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Direct	<0,01
Abaque	Direct	
PROCEDE	Direct	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Oui	Non	Non	Oui	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon LAM46491_1

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : PAM

Numéro de l'élément d'armure : PAM

Lieu de conservation : Réserves de l'office du tourisme de Pont à Mousson (Pont à Mousson)

Lieu de découverte :

Description : Casque dont le bassinnet était soudé au crâne par la corrosion, découvert dans les réserves de l'office du tourisme de Pont à Mousson. Deux éléments du mézail sont présents ainsi qu'une tôle en relation avec le couvre nuque. Il a été identifié par O.Renaudeau comme un armet italien daté entre 1450 et 1510 (Notice du LAM)

Datation : entre 1450 et 1510 (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Italie

Ville : Milan

Élément de l'armure étudié : bassinnet

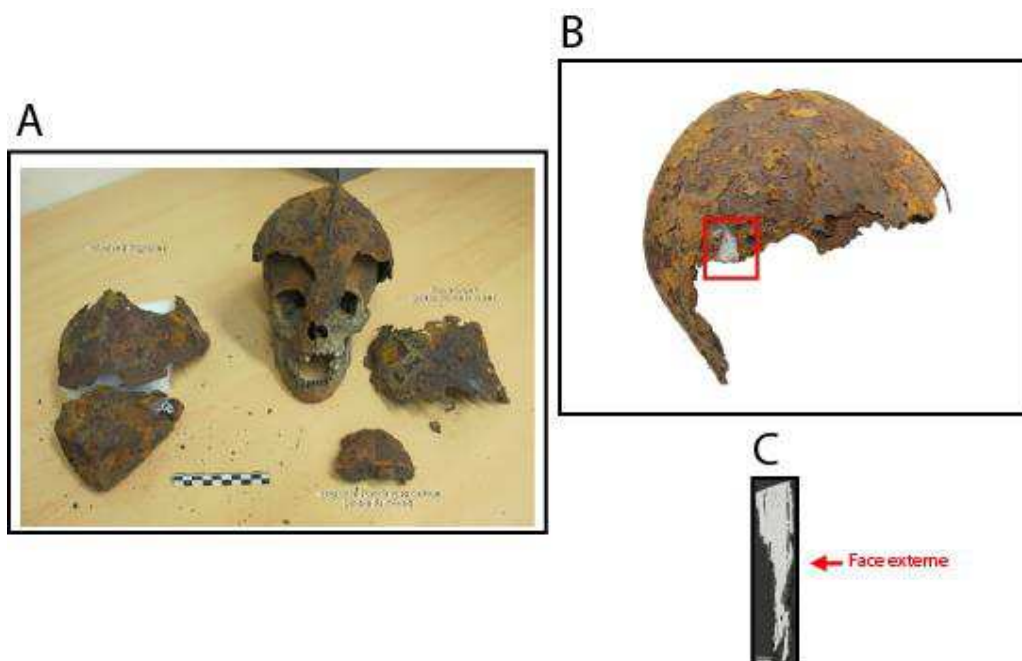
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique :

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé sur un bord du bacinet

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
Ind	Non résolue	Oui	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
2,9	>0,30	0,00	276 ($\sigma=121$)	Non dosé	Non

Commentaires :

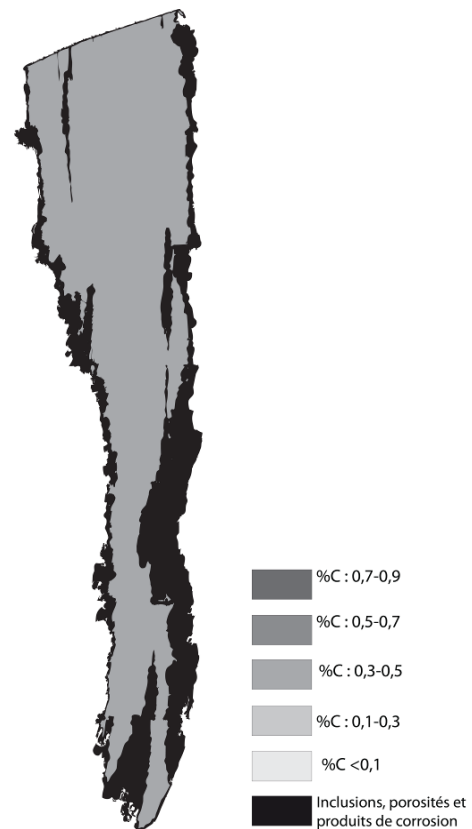
Cet échantillon présente un faciès typique de trempe hétérogène (martensite, bainite ferrite et perlite nodulaire). Elles ne sont observées que sur les zones les plus caburées.

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)



Schéma correspondant



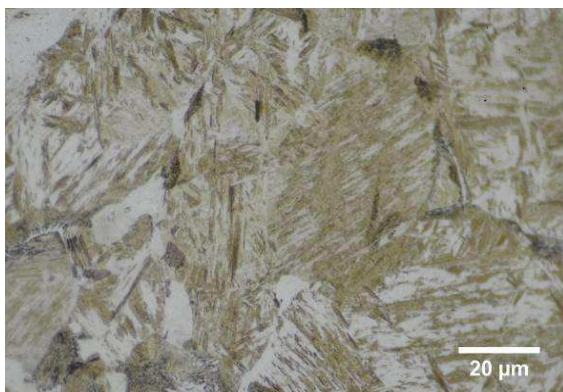
Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



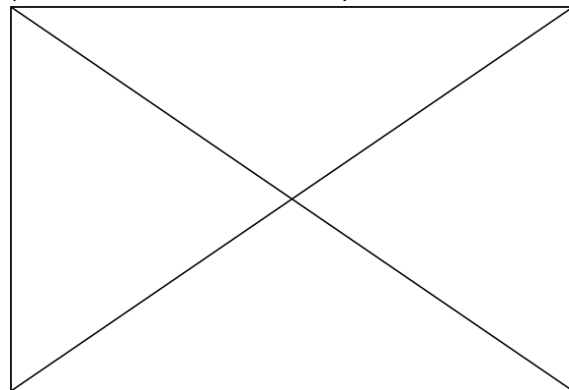
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
4	1

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Direct	<0,01
Abaque	Direct	
PROCEDE	Direct	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Oui	Non	Non	Oui	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon LAM46491_2

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : PAM

Numéro de l'élément d'armure : PAM

Lieu de conservation : Réserves de l'office du tourisme de Pont à Mousson (Pont à Mousson)

Lieu de découverte :

Description : Casque dont le bassinnet était soudé au crâne par la corrosion, découvert dans les réserves de l'office du tourisme de Pont à Mousson. Deux éléments du mézail sont présents ainsi qu'une tôle en relation avec le couvre nuque. Il a été identifié par O. Renaudeau comme un armet italien daté entre 1450 et 1510 (Notice du LAM)

Datation : entre 1450 et 1510 (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Italie

Ville : Milan

Élément de l'armure étudié : bassinnet

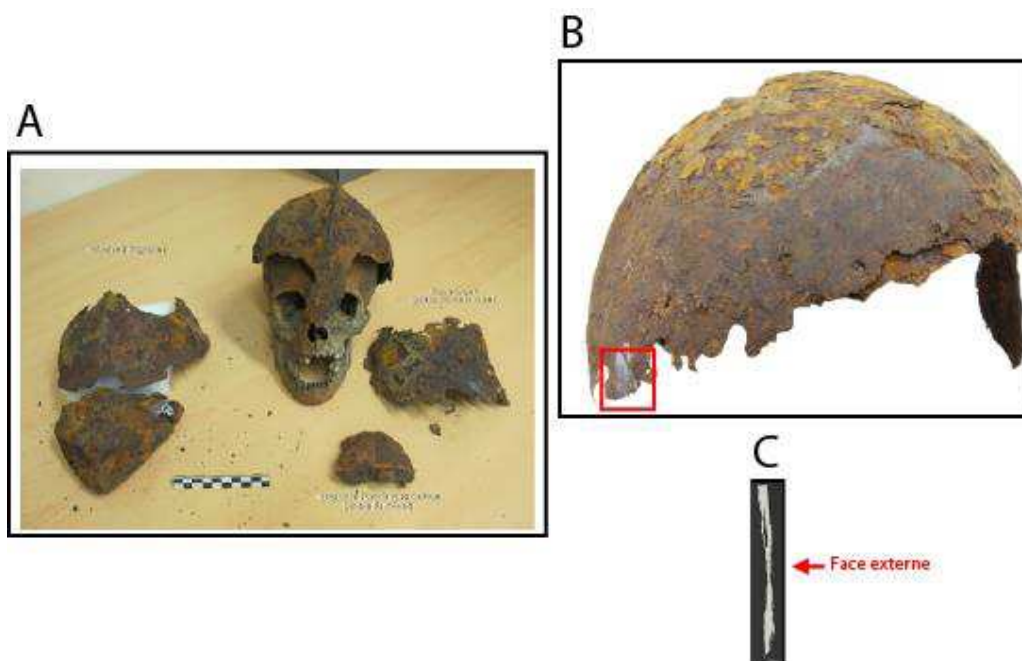
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique :

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé sur un bord du bacinet

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
Ind	Non résolue	Oui	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
8,7	>0,30	0,00	427 ($\sigma=57$)	Non dosé	Non

Commentaires :

Cet échantillon présente un faciès typique de trempe hétérogène (martensite, bainite ferrite et perlite nodulaire). Elles ne sont observées que sur les zones les plus caburées.

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

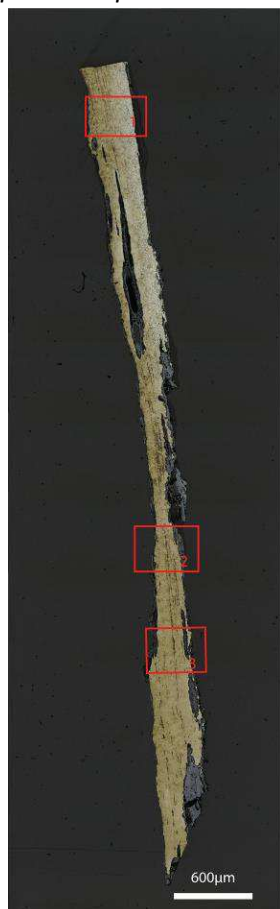
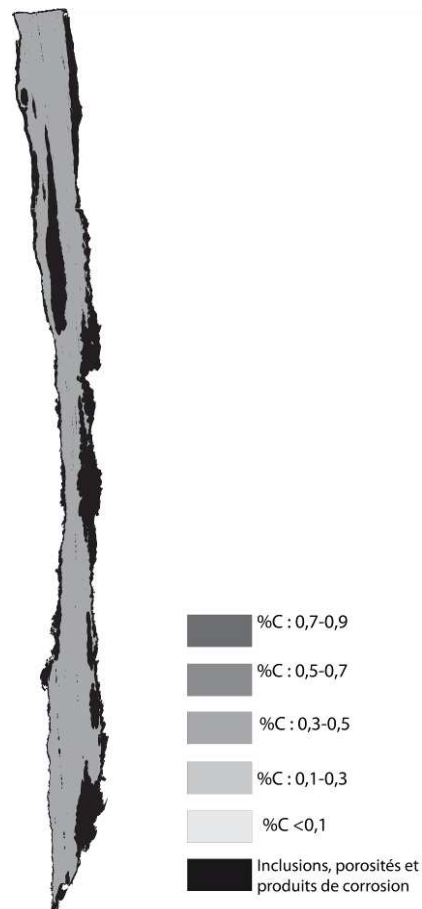


Schéma correspondant



Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



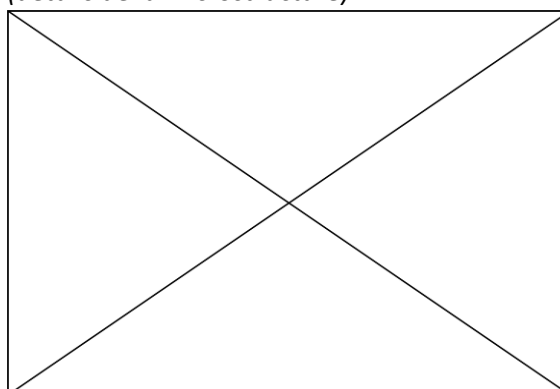
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
3	1,2

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Direct	<0,01
Abaque	Direct	
PROCEDE	Direct	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Oui	Non	Non	Oui	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon n°1 Z8B3-LAM46518

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : Broigne_Mont

Numéro de l'élément d'armure : Broigne_Mont

Lieu de conservation :

Lieu de découverte : Résidence aristocratique de Montbaron (Levroux)

Description : Plaque de courbure assez faible (mais elle a pu être écrasée). 2 trous (0,5 cm de diamètre près des deux angles de l'extrémité étroite) (A. Querrien et al., 2004, P.115). Datée du début du XIII^e siècle, elle est issue du site de Montbaron qui a révélé la présence d'un mobilier métallique varié dont une dizaine de plaques identifiées comme des plaques d'armures ou de broigne. Cette identification a été réalisée grâce à plusieurs critères : leur aspect (matériau, épaisseur et type de corrosion), la position des trous de fixation ainsi que leur forme incurvée (A. Querrien et al., 2004).

Datation : XIII^e siècle (Contexte de découverte archéologique (stratigraphie))

Lieu de fabrication supposé :

Région : Indéterminée

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Plaque de broigne

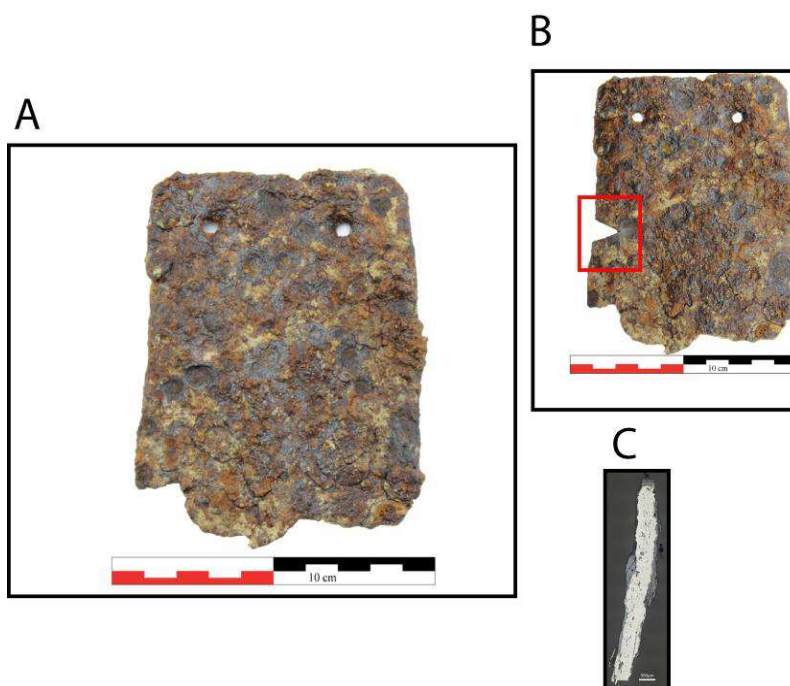
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique : (A. Querrien et al., 2004)

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Le prélèvement a été opéré sur un bord de la plaque

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[50-200]	Non résolue	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
11,6	0,12	0,07	121 ($\sigma=30$)	Non dosé	Non

Commentaires :

Cet échantillon présente la structure d'un acier faiblement carburé hétérogène en teneur en carbone. Les inclusions nombreuses, et parfois très peu déformées témoignent d'une épuration peu poussée du métal par rapport aux autres échantillons du corpus (voir micrographie 1)

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon

(après attaque au Nital 3%)

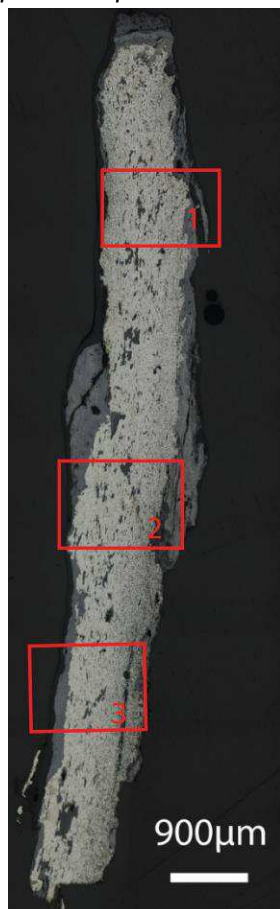
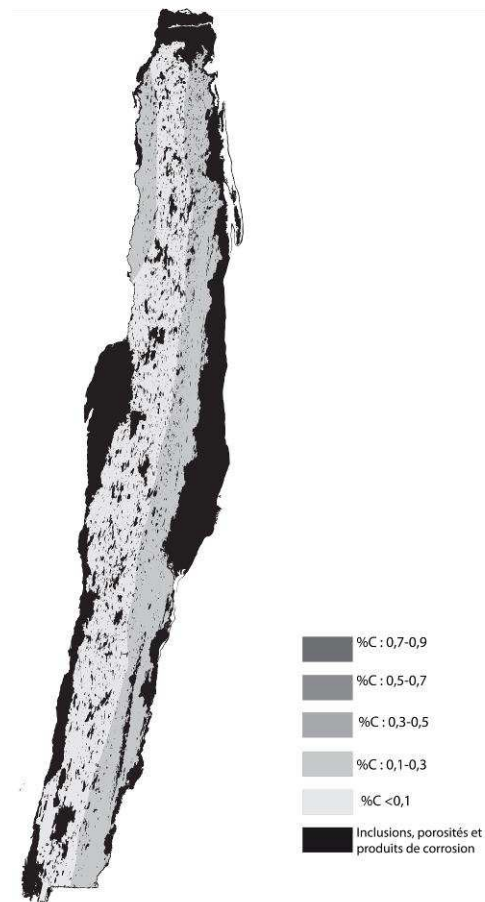
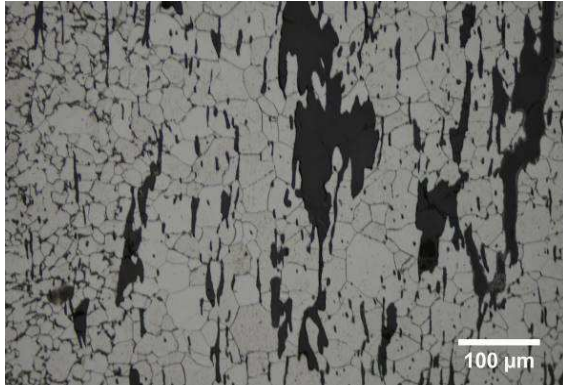


Schéma correspondant



Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



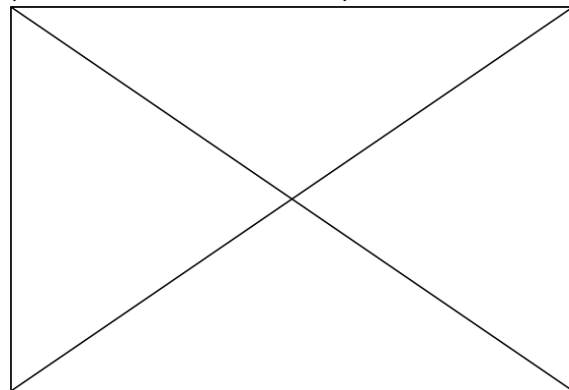
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
4	2

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Direct	0,02
Abaque	Direct	
PROCEDE	Direct	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon n°2 Z8 fossé-LAM46519_1

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : Broigne_Mont

Numéro de l'élément d'armure : Broigne_Mont

Lieu de conservation :

Lieu de découverte : Résidence aristocratique de Montbaron (Levroux)

Description : Cette plaque a reçu un choc qui l'a pliée en son milieu ce qui explique une courbure assez faible. 2 trous (0,4 et 0,6 cm de diamètre aux deux angles de l'extrémité conservée) (A. Querrien et al., 2004, P.115). Datée du début du XIIIe siècle, elle est issue du site de Montbaron qui a révélé la présence d'un mobilier métallique varié dont une dizaine de plaques identifiées comme des plaques d'armures ou de broigne. Cette identification a été réalisée grâce à plusieurs critères : leur aspect (matériau, épaisseur et type de corrosion), la position des trous de fixation ainsi que leur forme incurvée (A. Querrien et al., 2004).

Datation : XIIIe siècle (Contexte de découverte archéologique (stratigraphie))

Lieu de fabrication supposé :

Région : Indéterminée

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Plaque de broigne

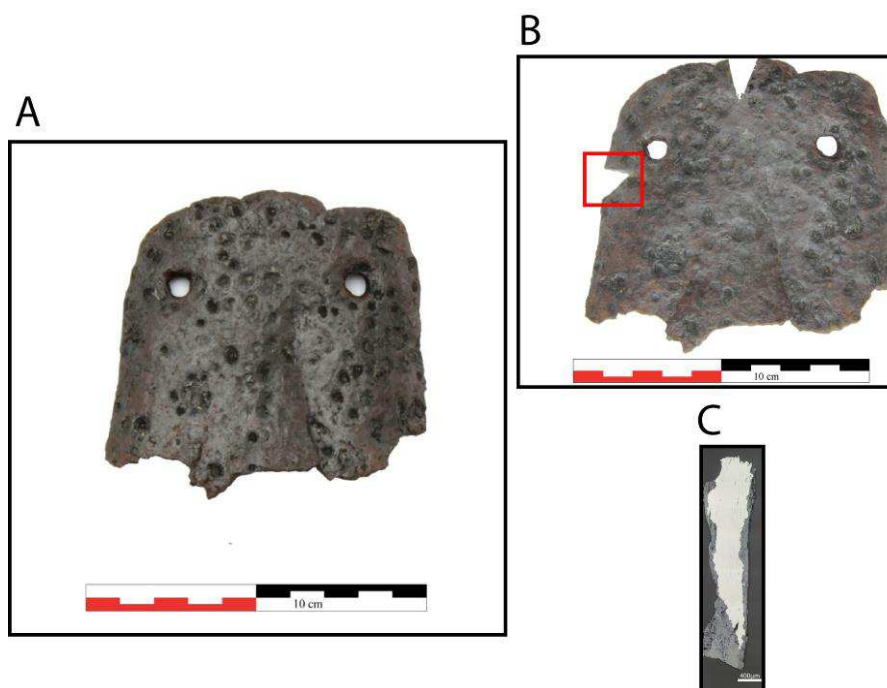
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique : (A. Querrien et al., 2004)

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Le prélèvement a été opéré sur un bord de la plaque

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[50-200]	Non résolue	Non	Oui	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
1,2	0,27	0,16	120 ($\sigma=11$)	Non dosé	Non

Commentaires :

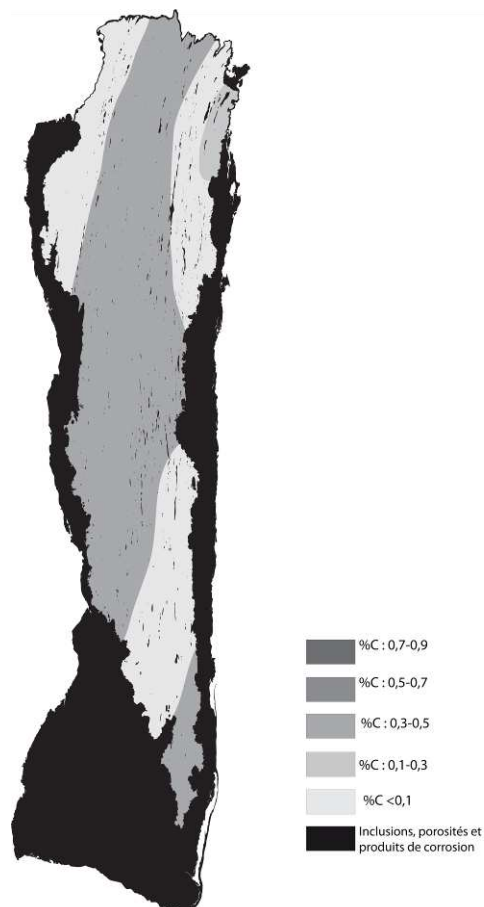
Cet échantillon est un acier faiblement carburé hétérogène en teneur en carbone. Des structures fantômes ont été mises en évidence après attaque au réactif Oberhoffer, ainsi que de nombreuses bandes claires et fines témoignant sans doute de la présence de soudure ou de replis du métal lors de sa mise en forme.

Analyses métallographiques

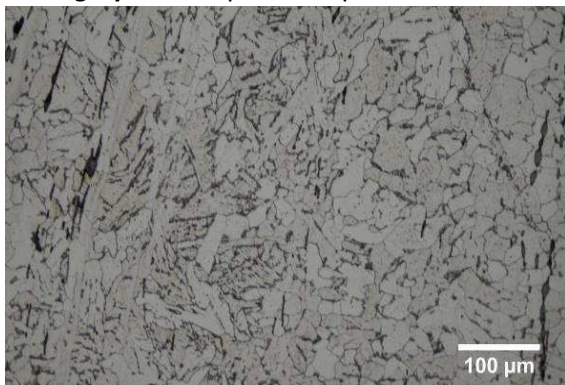
Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)



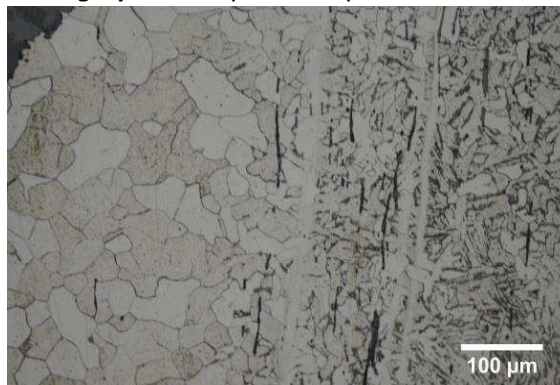
Schéma correspondant



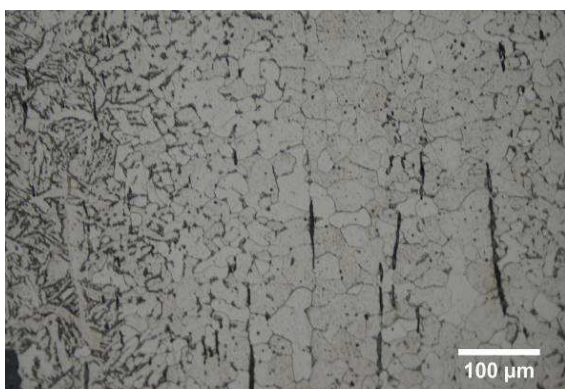
Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



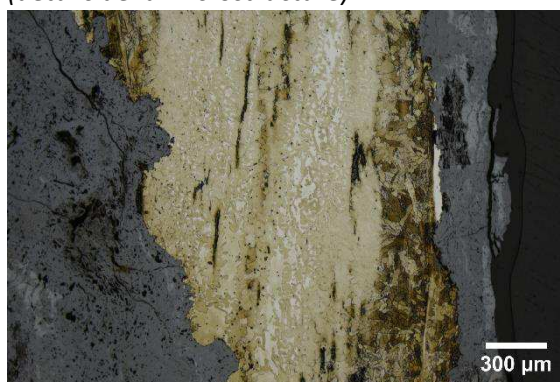
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 4 : Après attaque à l'Oberhoffer (détails de la microstructure)



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
6	4

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Indéterminé	0,59
Abaque	Indéterminé	
PROCEDE	Indéterminé	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Dissier, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon n°2 Z8 fossé-LAM46519_2

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : Broigne_Mont

Numéro de l'élément d'armure : Broigne_Mont

Lieu de conservation :

Lieu de découverte : Résidence aristocratique de Montbaron (Levroux)

Description : Cette plaque a reçu un choc qui l'a pliée en son milieu ce qui explique une courbure assez faible. 2 trous (0,4 et 0,6 cm de diamètre aux deux angles de l'extrémité conservée) (A. Querrien et al., 2004, P.115). Datée du début du XIIIe siècle, elle est issue du site de Montbaron qui a révélé la présence d'un mobilier métallique varié dont une dizaine de plaques identifiées comme des plaques d'armures ou de broigne. Cette identification a été réalisée grâce à plusieurs critères : leur aspect (matériau, épaisseur et type de corrosion), la position des trous de fixation ainsi que leur forme incurvée (A. Querrien et al., 2004).

Datation : XIIIe siècle (Contexte de découverte archéologique (stratigraphie))

Lieu de fabrication supposé :

Région : Indéterminée

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Plaque de broigne

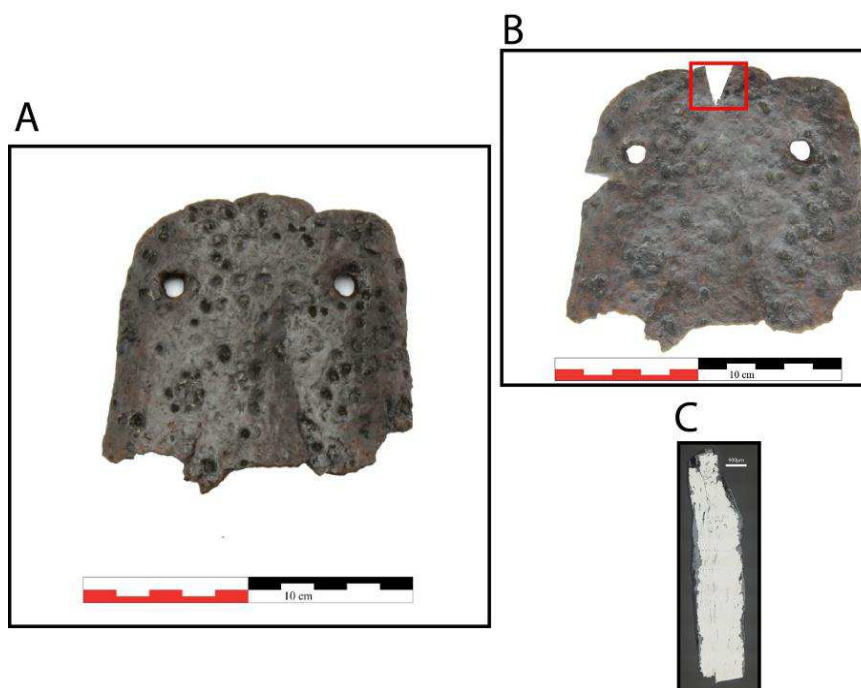
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique : (A. Querrien et al., 2004)

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Le prélèvement a été opéré sur un bord de la plaque

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (µm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[50-200]	Non résolue	Non	Non	Non	Oui

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
2,8	0,09	0,11	108 (σ= 14)	Non dosé	Non

Commentaires :

Cet échantillon présente la structure d'un acier faiblement carburé hétérogène en teneur en carbone. La ferrite est aciculaire par endroit (structures de Widmanstätten). Ces structures témoignent d'une surchauffe suivie d'un refroidissement relativement rapide du métal.

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

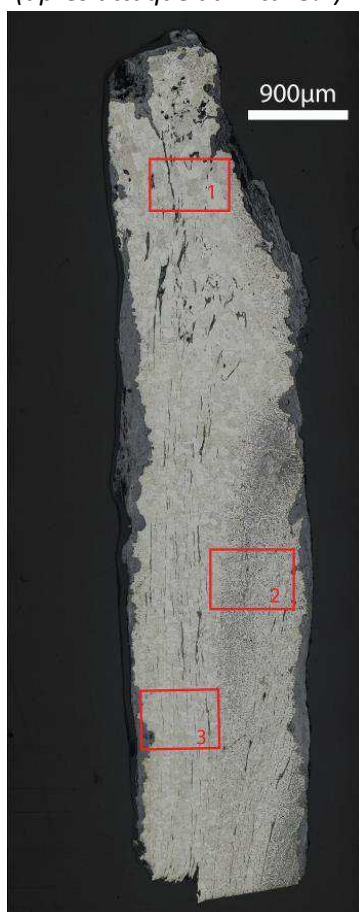
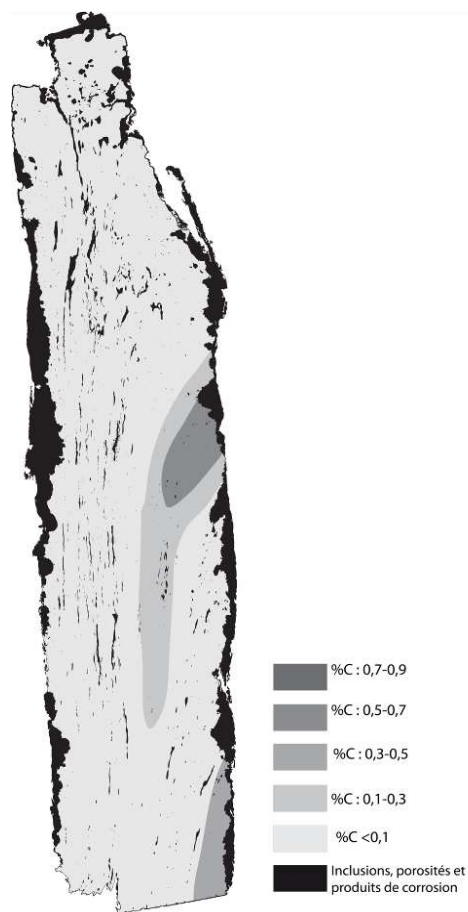
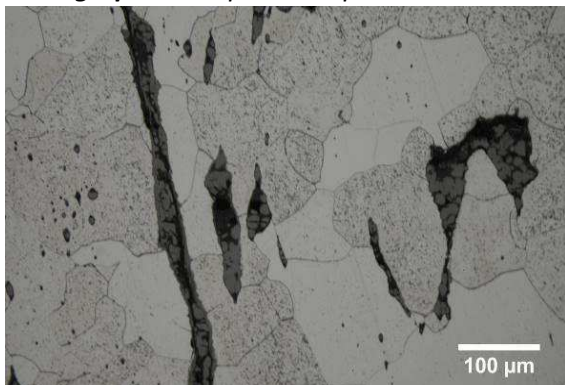


Schéma correspondant



Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



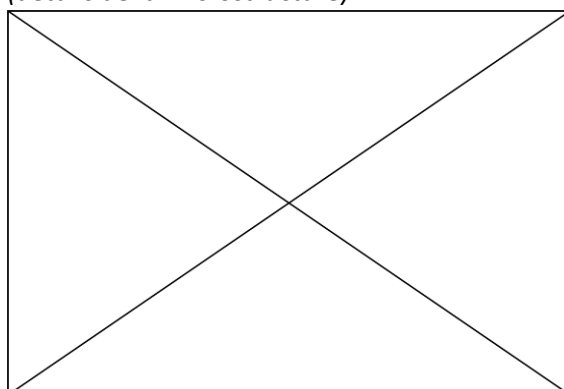
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
5	2,4

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Direct	$p(\text{classe2}) < 0,01$ $p(\text{classe4}) = 0,14$
Abaque	Direct	
PROCEDE	Direct	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon N°3 Z8B4 LAM46520_2

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : Broigne_Mont

Numéro de l'élément d'armure : Broigne_Mont

Lieu de conservation :

Lieu de découverte : Résidence aristocratique de Montbaron (Levroux)

Description : Plaque de courbure faible à son extrémité conservée et importante vers son milieu. 2 trous (0,3 cm de diamètre) (A. Querrien et al., 2004, P.115). Elle est issue du site de Montbaron qui a révélé la présence d'un mobilier métallique varié dont une dizaine de plaques identifiées comme des plaques d'armures ou de broigne. Cette identification a été réalisée grâce à plusieurs critères : leur aspect (matériau, épaisseur et type de corrosion), la position des trous de fixation ainsi que leur forme incurvée (A. Querrien et al., 2004).

Datation : XIIIe siècle (Contexte de découverte archéologique (stratigraphie))

Lieu de fabrication supposé :

Région : Indéterminée

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Plaque de broigne

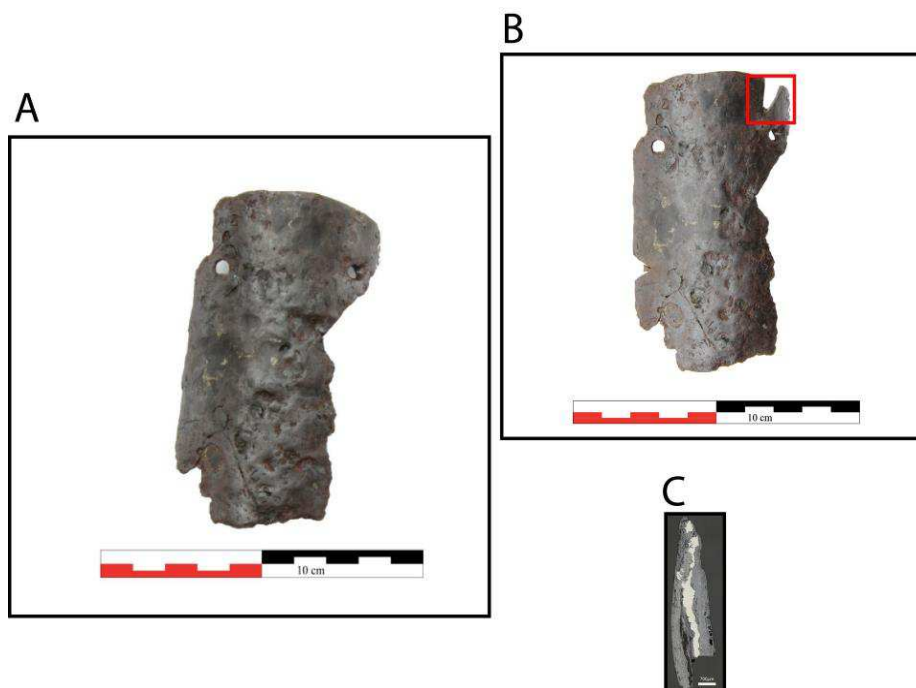
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique : (A. Querrien et al., 2004)

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Le prélèvement a été opéré sur un bord de la plaque

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[50-200]	Non résolue	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
0,6	0,06	0,00	151 ($\sigma=10$)	<0,1	Non

Commentaires :

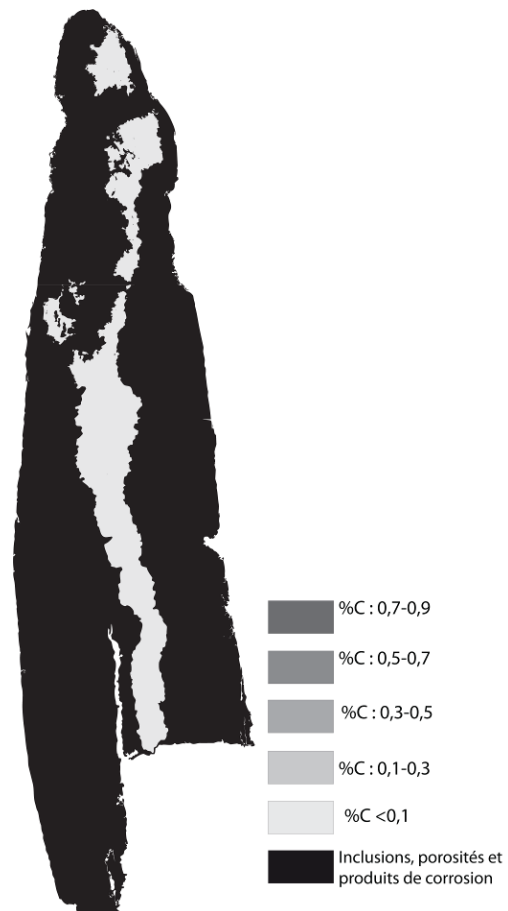
Cet échantillon possède une structure entièrement ferritique. Cependant il est fortement corrodé. Ainsi une grande partie de l'information relative à la structure du métal a été perdue.

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)



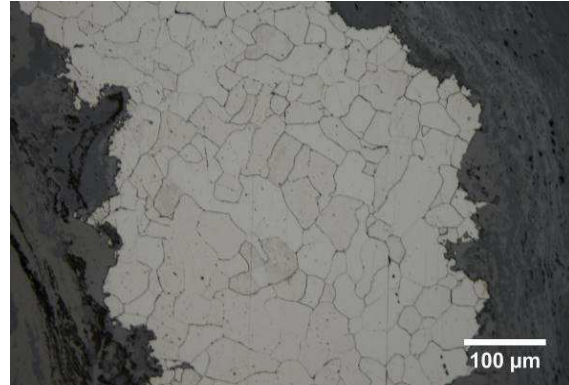
Schéma correspondant



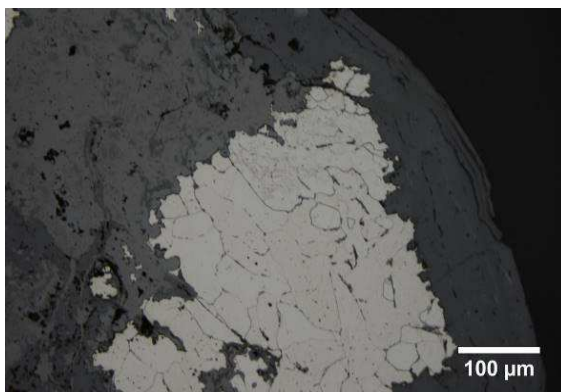
Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



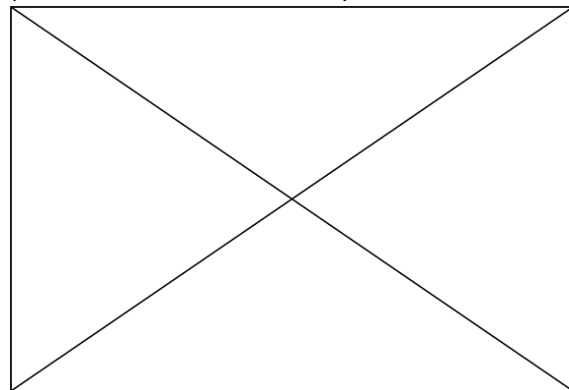
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
3	3

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Direct	<0,01
Abaque	Direct	
PROCEDE	Direct	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon n°4 Z8B4-LAM46521

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : Broigne_Mont

Numéro de l'élément d'armure : Broigne_Mont

Lieu de conservation :

Lieu de découverte : Résidence aristocratique de Montbaron (Levroux)

Description : Plaque de forme trapézoïdale : l'extrémité la plus large et la plus bombée est concave et trois fois plus large que l'autre. Elle pouvait être destinée à protéger un avant-bras droit
4 trous aux angles (0,6 cm de diamètre sur la face externe et 0,7 sur la face interne) (A. Querrien et al., 2004, P.115). Datée du début du XIIIe siècle, elle est issue du site de Montbaron qui a révélé la présence d'un mobilier métallique varié dont une dizaine de plaques identifiées comme des plaques d'armures ou de broigne. Cette identification a été réalisée grâce à plusieurs critères : leur aspect (matériau, épaisseur et type de corrosion), la position des trous de fixation ainsi que leur forme incurvée (A. Querrien et al., 2004).

Datation : XIIIe siècle (Contexte de découverte archéologique (stratigraphie))

Lieu de fabrication supposé :

Région : Indéterminée

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Plaque de broigne

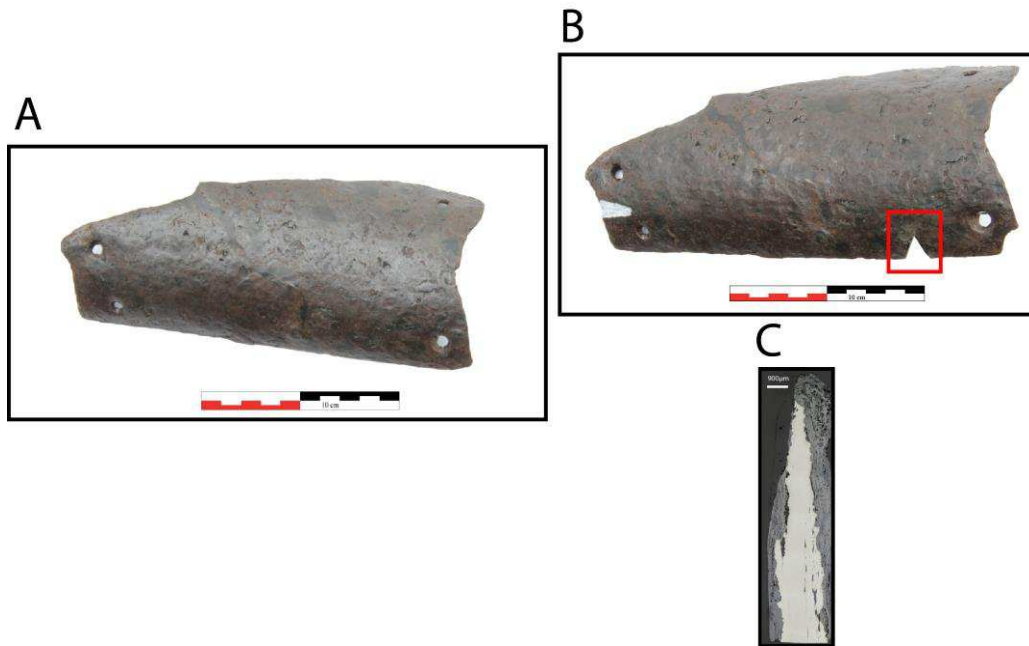
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique : (A. Querrien et al., 2004)

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Le prélèvement a été opéré sur un bord de la plaque

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[50-200]	Non résolue	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
1,5	0,06	0,00	157 ($\sigma=18$)	<0,1	Non

Commentaires :

Cet échantillon possède une structure entièrement ferritique. L'attaque au réactif Nital révèle également la présence de particules sphériques dans les grains ainsi qu'aux joint de grains qui pourraient correspondre à des carbures.

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

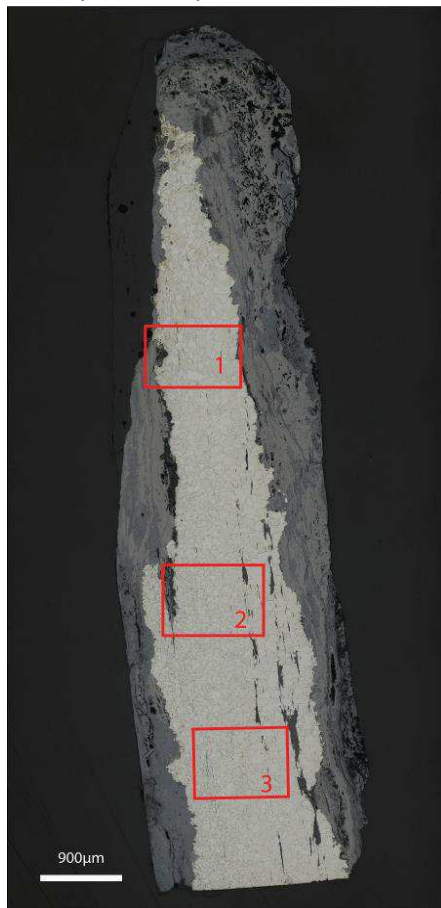
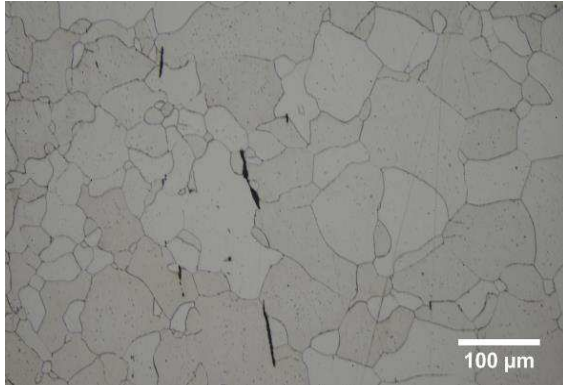


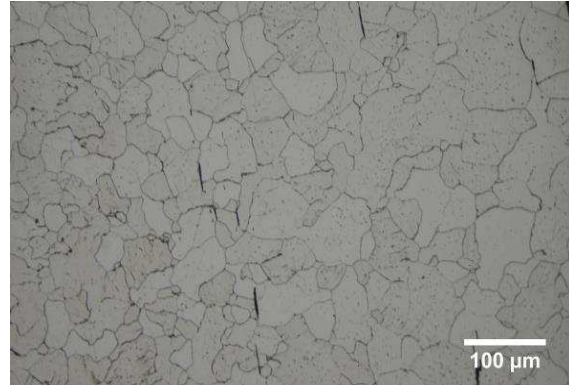
Schéma correspondant



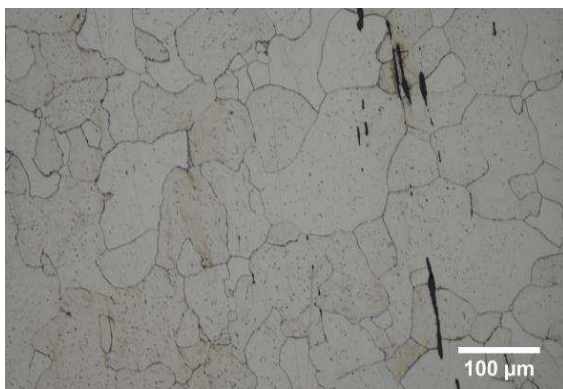
Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



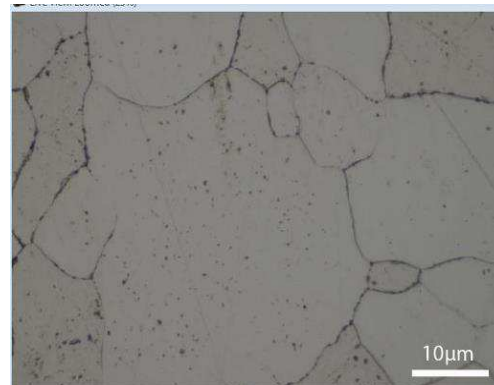
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3% (détails de la microstructure)



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
4	3,4

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Direct	<0,01
Abaque	Direct	
PROCEDE	Direct	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon n°5 Z8 fossé-LAM46523

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : Broigne_Mont

Numéro de l'élément d'armure : Broigne_Mont

Lieu de conservation :

Lieu de découverte : Résidence aristocratique de Montbaron (Levroux)

Description : Plaque informe mais de même type que les précédentes (A. Querrien et al., 2004, P.115). Datée du début du XIIIe siècle, elle est issue du site de Montbaron qui a révélé la présence d'un mobilier métallique varié dont une dizaine de plaques identifiées comme des plaques d'armures ou de broigne. Cette identification a été réalisée grâce à plusieurs critères : leur aspect (matériau, épaisseur et type de corrosion), la position des trous de fixation ainsi que leur forme incurvée (A. Querrien et al., 2004).

Datation : XIIIe siècle (Contexte de découverte archéologique (stratigraphie))

Lieu de fabrication supposé :

Région : Indéterminée

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Plaque de broigne

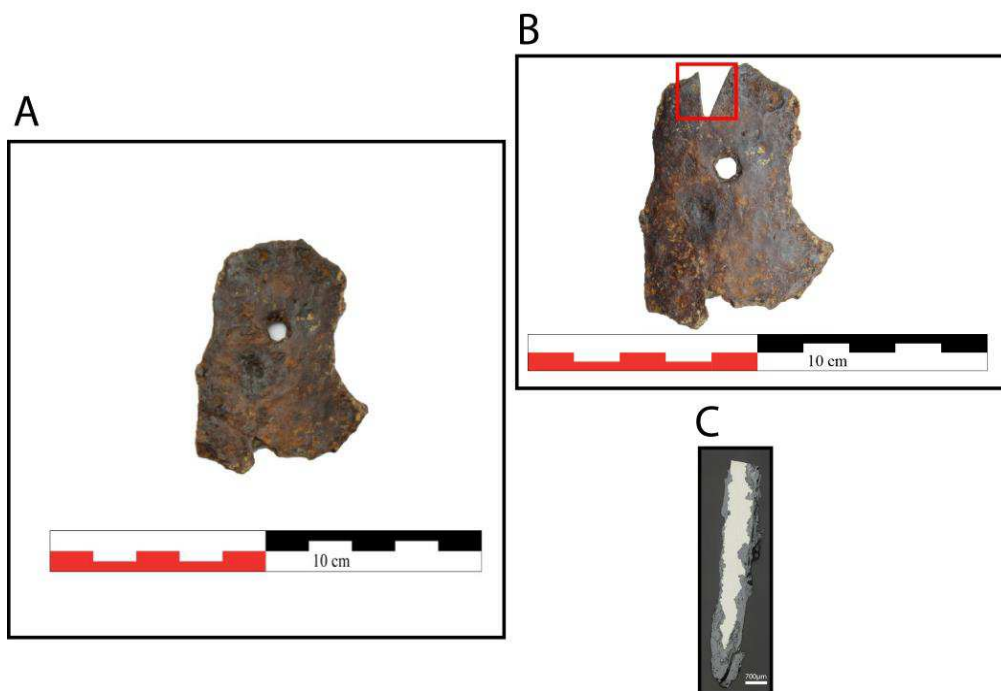
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique : (A. Querrien et al., 2004)

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Le prélèvement a été opéré sur un bord de la plaque

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[50-200]	Non résolue	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
<0,1	0,06	0,00	169 ($\sigma=17$)	0,1	Non

Commentaires :

Cet échantillon possède une structure entièrement ferritique. Aucune structure fantôme n'avait pu être décélée par attaque chimique, toutefois les dosages effectués par EPMA ont attesté la présence de phosphore à hauteur de 0,1%mass en moyenne.

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

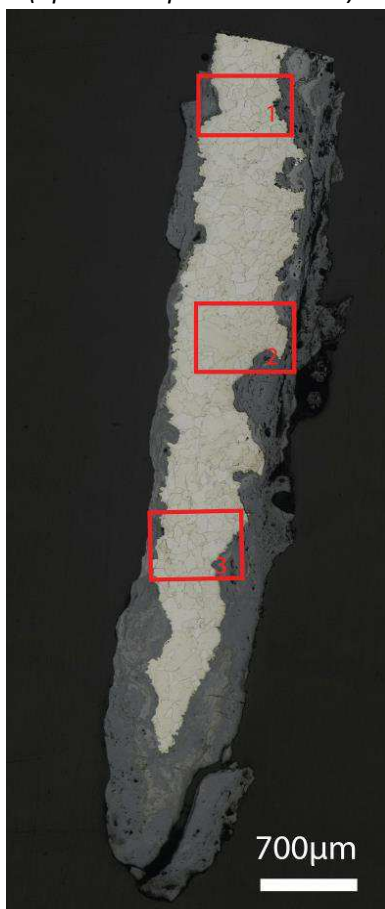


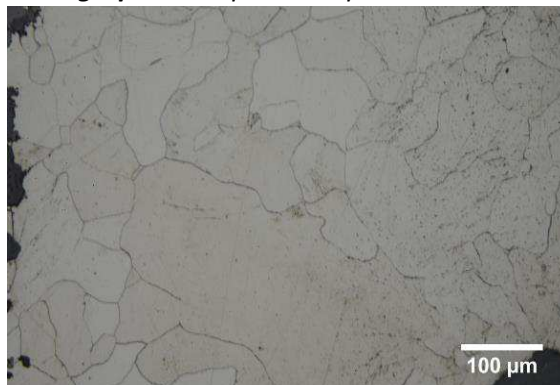
Schéma correspondant



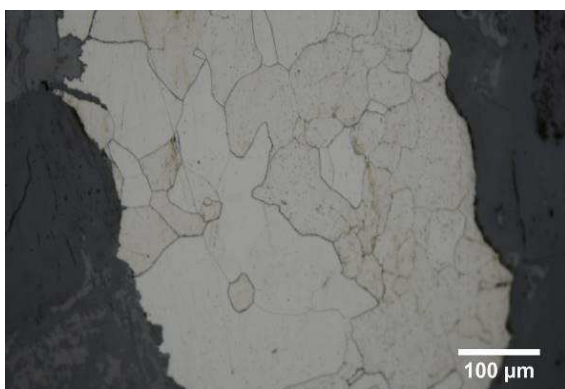
Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



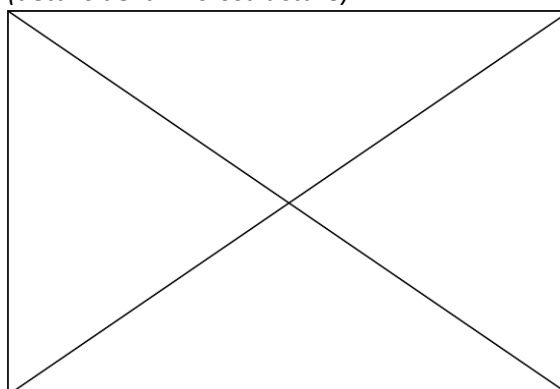
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
3	3

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Direct	0,1
Abaque	Direct	
PROCEDE	Direct	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon n°9 Z8B-LAM46525

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : Broigne_Mont

Numéro de l'élément d'armure : Broigne_Mont

Lieu de conservation :

Lieu de découverte : Résidence aristocratique de Montbaron (Levroux)

Description : Fragment de plate incurvée (A. Querrien et al., 2004, P.115). Datée du début du XIII^e siècle, elle est issue du site de Montbaron qui a révélé la présence d'un mobilier métallique varié dont une dizaine de plaques identifiées comme des plaques d'armures ou de broigne. Cette identification a été réalisée grâce à plusieurs critères : leur aspect (matériau, épaisseur et type de corrosion), la position des trous de fixation ainsi que leur forme incurvée (A. Querrien et al., 2004).

Datation : XIII^e siècle (Contexte de découverte archéologique (stratigraphie))

Lieu de fabrication supposé :

Région : Indéterminée

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Plaque de broigne

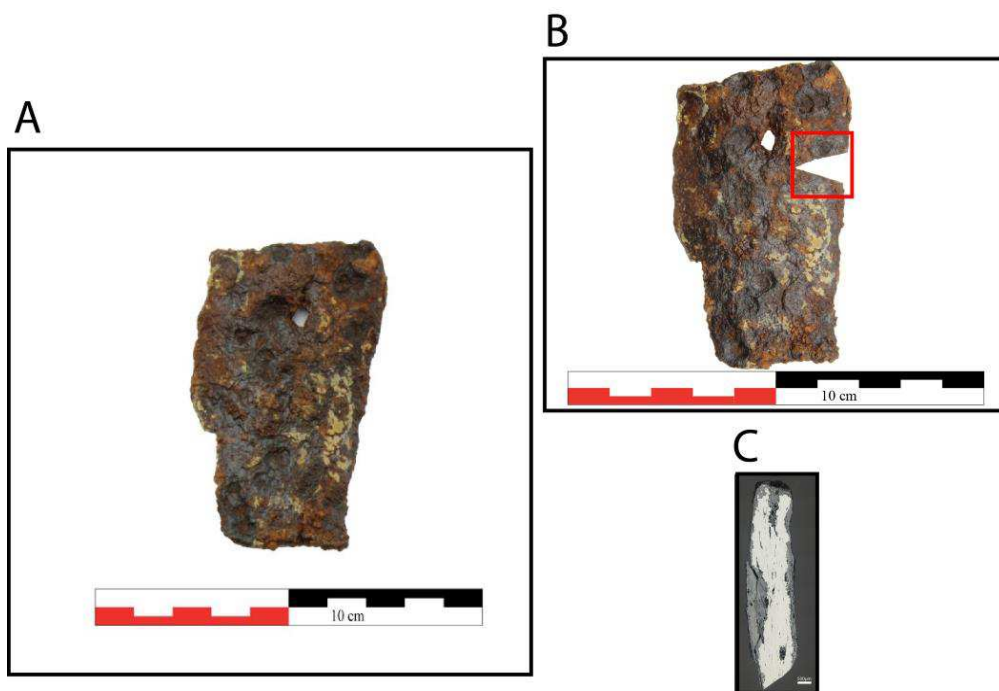
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique : (A. Querrien et al., 2004)

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Le prélèvement a été opéré sur un bord de la plaque

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[50-200]	Non résolue	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
5,0	0,07	0,04	146 ($\sigma=18$)	<0,1	Non

Commentaires :

Cet échantillon présente la structure d'un acier faiblement carburé légèrement hétérogène en teneur en carbone. Les inclusions sont parfois larges et faiblement déformées ce qui témoigne d'une épuration peu poussée du métal par rapport aux autres échantillons du corpus.

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

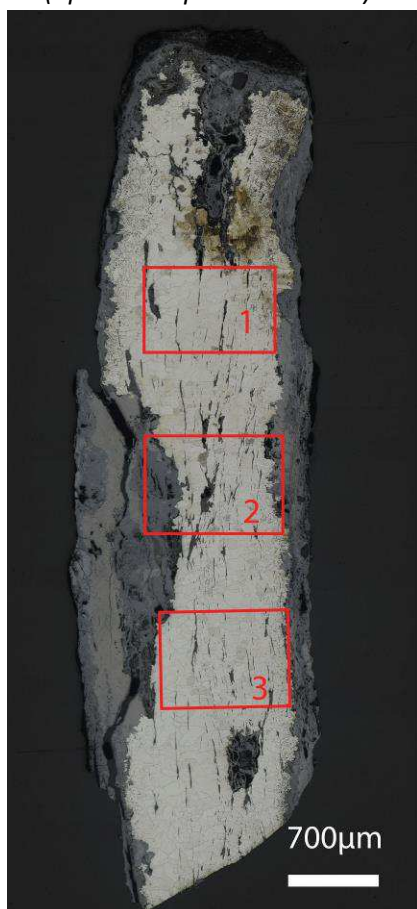
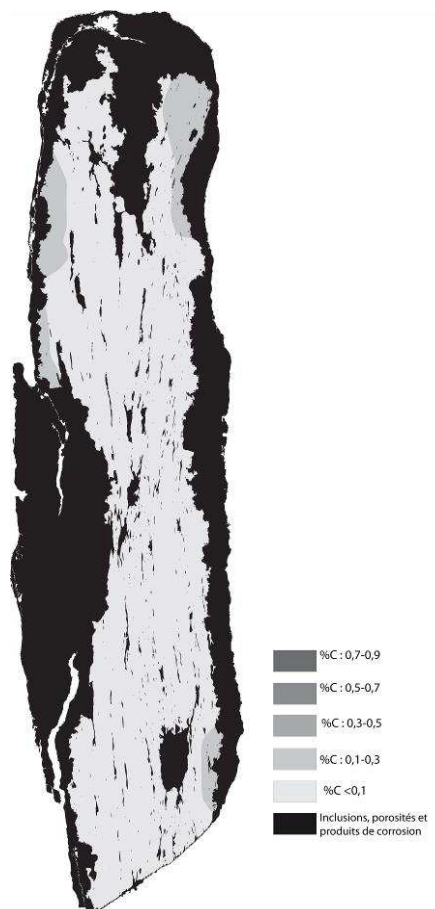
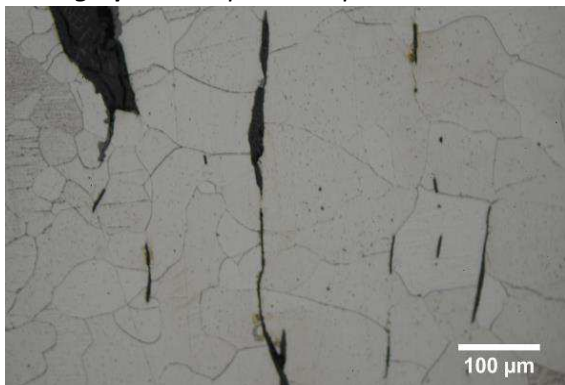


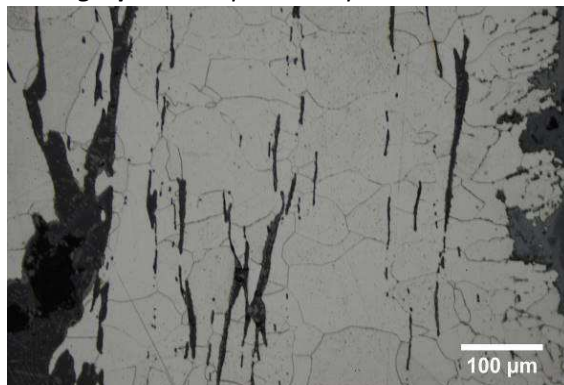
Schéma correspondant



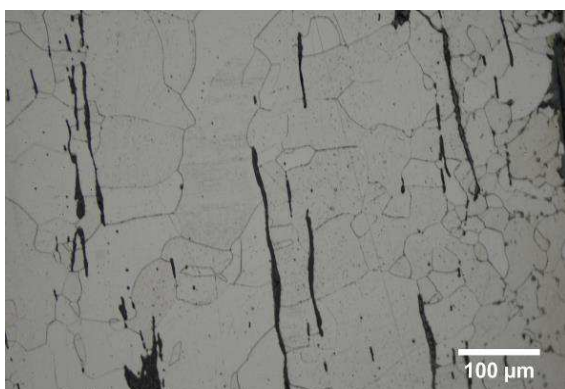
Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



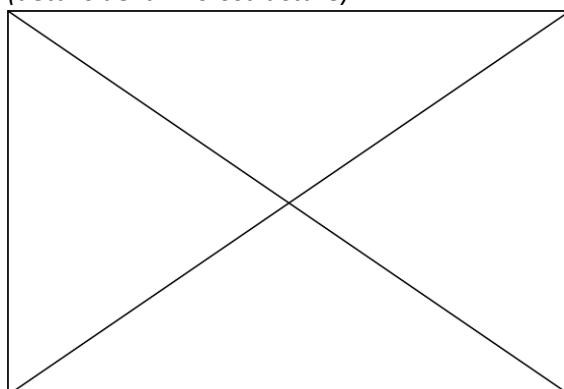
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
3	3

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Direct	<0,01
Abaque	Direct	
PROCEDE	Direct	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Dissier, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon MR 87

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : MR 87

Numéro de l'élément d'armure : MR 87

Lieu de conservation :

Lieu de découverte : Retrouvée sur l'épave du Mary Rose

Description : Armure retrouvée sur l'épave du Mary Rose (A.Williams).

Datation : XVI^e siècle (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Indéterminée

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Indéterminé

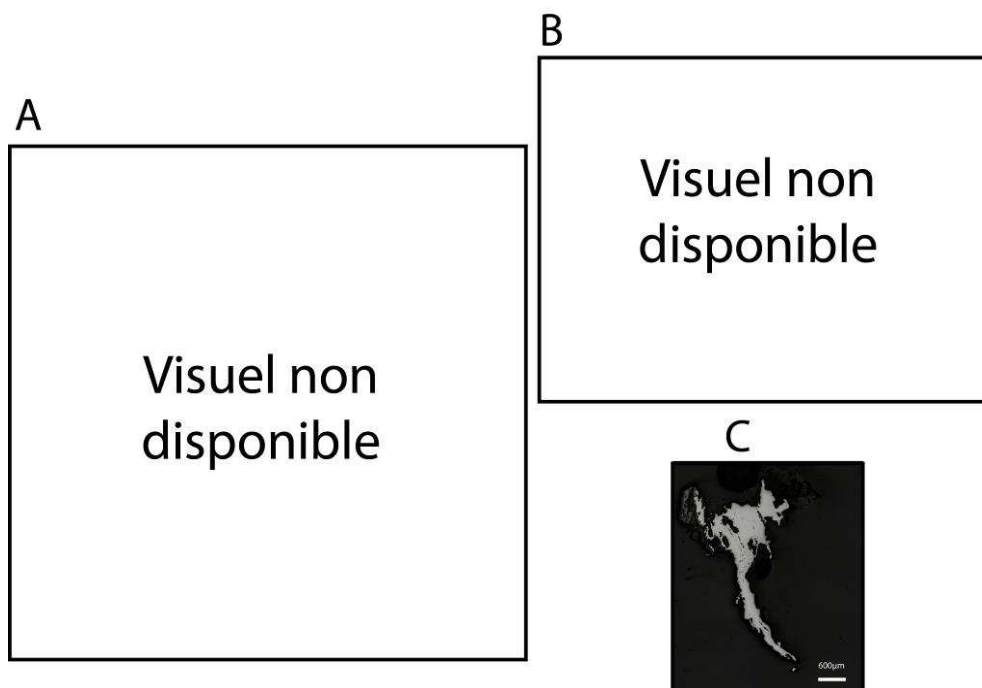
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique :

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé par Alan Williams.

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[50-200]	Non résolue	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
8,8	0,06	0,00	166 ($\sigma=15$)	0,2	Non

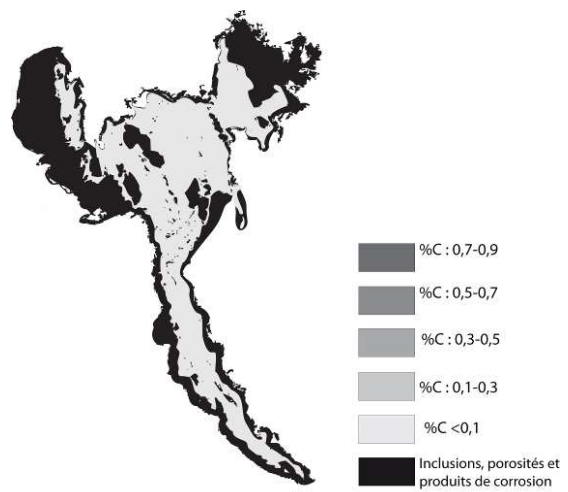
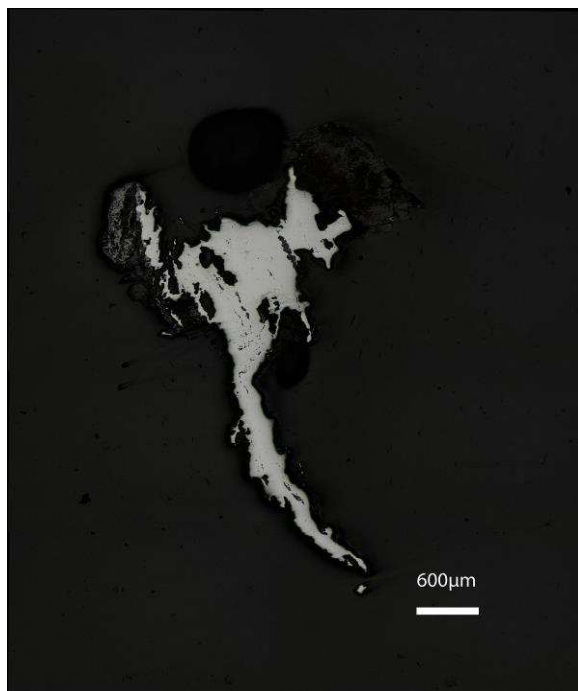
Commentaires :

Cet échantillon possède une structure entièrement ferritique. Il est fortement altéré par la corrosion, ainsi il est possible qu'une partie de l'information contenue dans le métal ait été perdue.

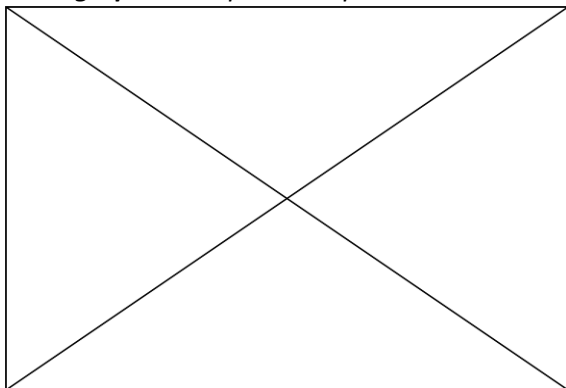
Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

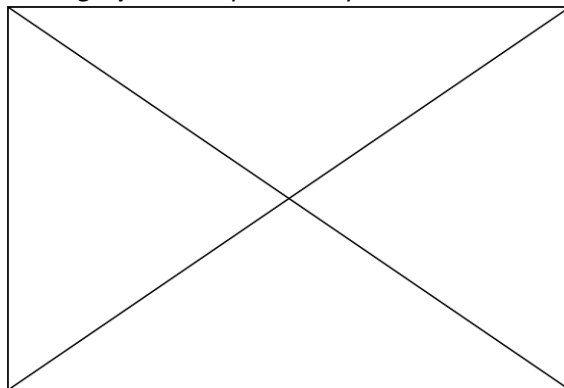
Schéma correspondant



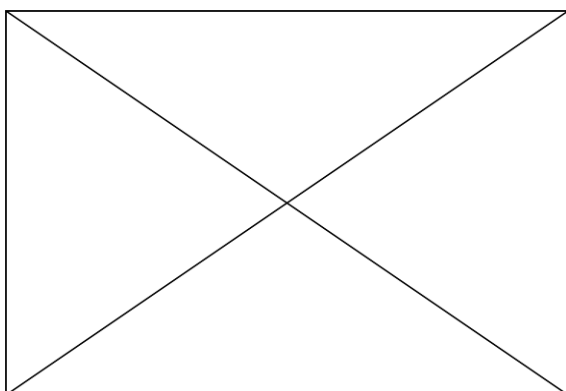
Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



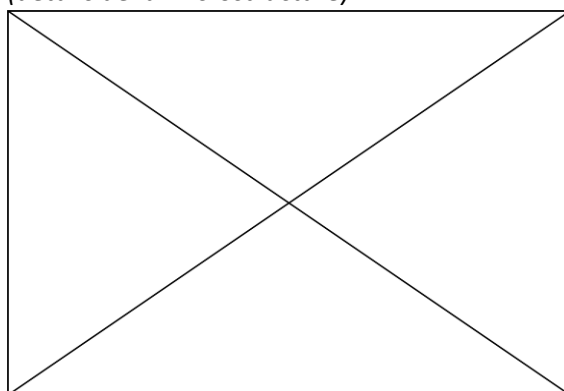
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
3	1,2

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Indirect	$p(\text{classe1})=0,76$ et $p(\text{classe2})>0,99$
Abaque	Indirect	
PROCEDE	Indirect	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon K243

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : K243

Numéro de l'élément d'armure : K243

Lieu de conservation : Royal Dutch Army Museum (Delft)

Lieu de découverte :

Description : Défense de tête de tournois (A.Williams).

Datation : XVe siècle (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Indéterminée

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Défense de tête

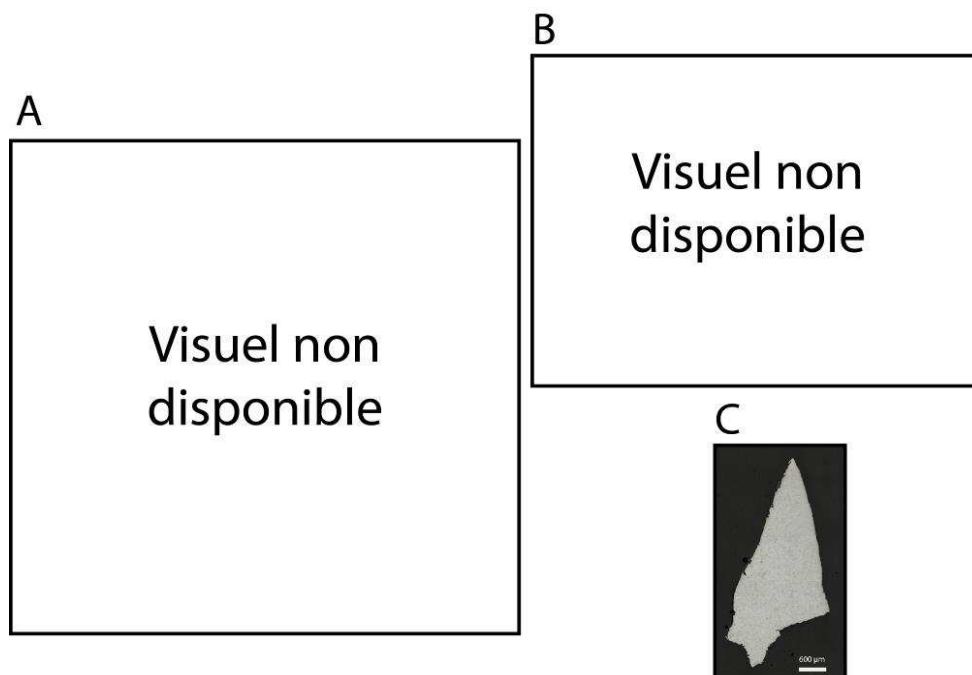
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique :

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé par Alan Williams.

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[50-200]	Non résolue	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
<0,1	0,06	0,00	195 ($\sigma=10$)	<0,1	Non

Commentaires :

Cet échantillon est un acier très faiblement carburé (%C* < 0,1) à faible taille de grains (< 50 μm)

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

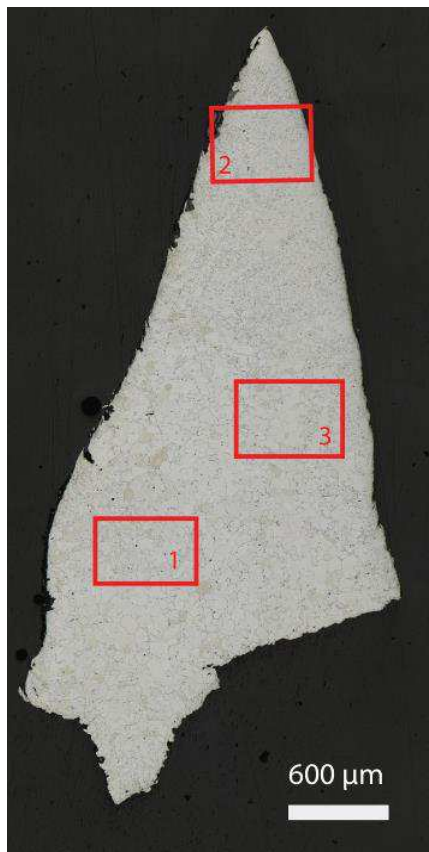
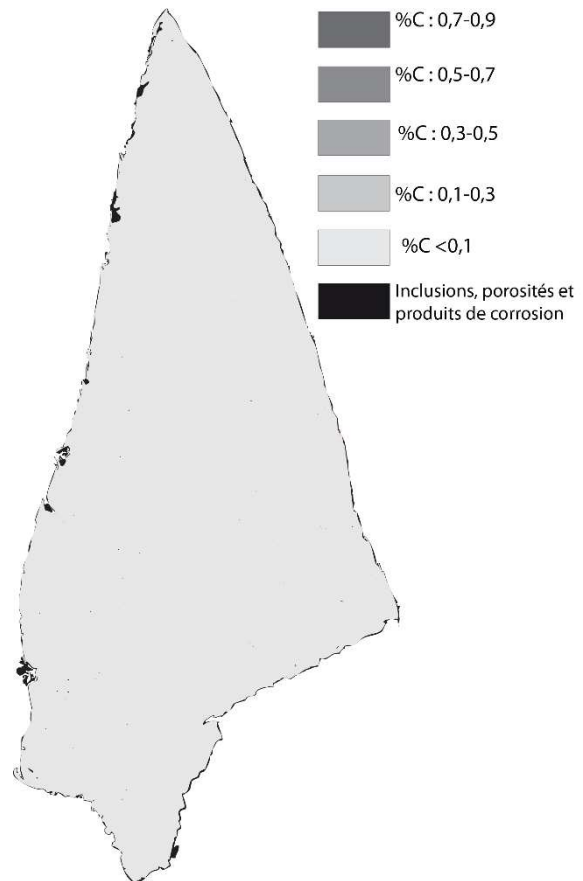
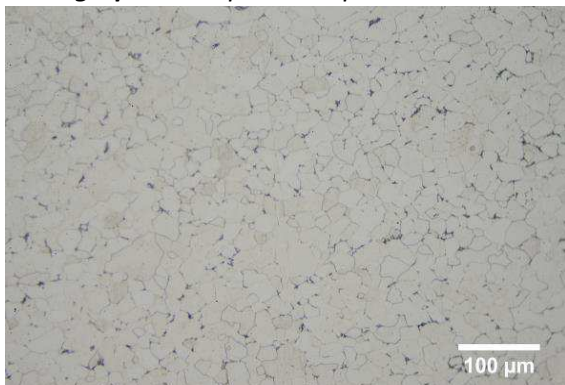


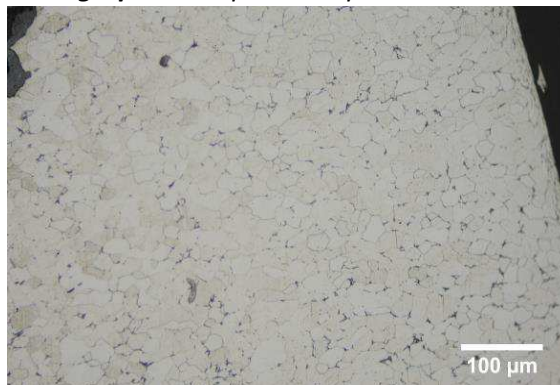
Schéma correspondant



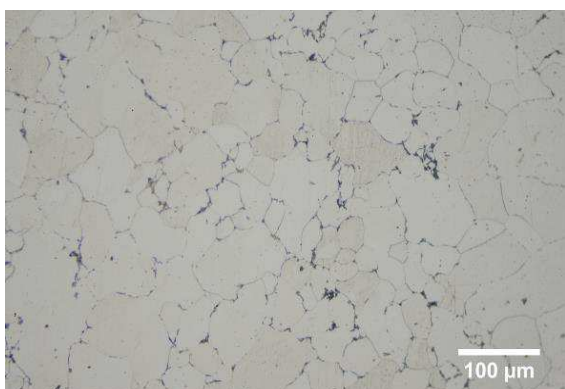
Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



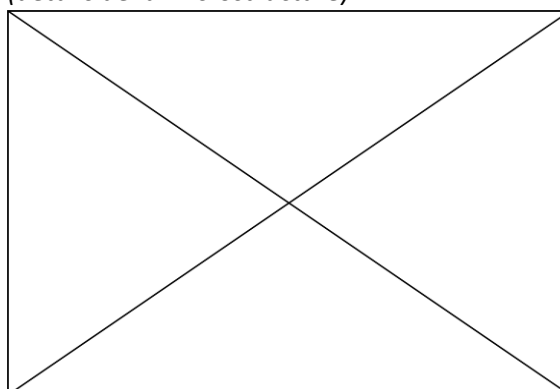
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3% (détails de la microstructure)



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
5	1,2,3,4,5

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

Procédé		Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Indéterminé	$p(\text{classe1}) < 0,01$ $p(\text{classe2}) > 0,99$ $p(\text{classe3}) = 0,02$ $p(\text{classe4}) = 0,97$ $p(\text{classe5}) = 0,80$
Abaque	Indéterminé	
PROCEDE	Indéterminé	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon

771

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : 771

Numéro de l'élément d'armure : 771

Lieu de conservation : Royal Dutch Army Museum (Delft)

Lieu de découverte :

Description : Gantelet issu d'une armure dédiée à l'infanterie du type "Almain rivet" (A.Williams).

Datation : 1500-1510 (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Allemagne

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Gantelet

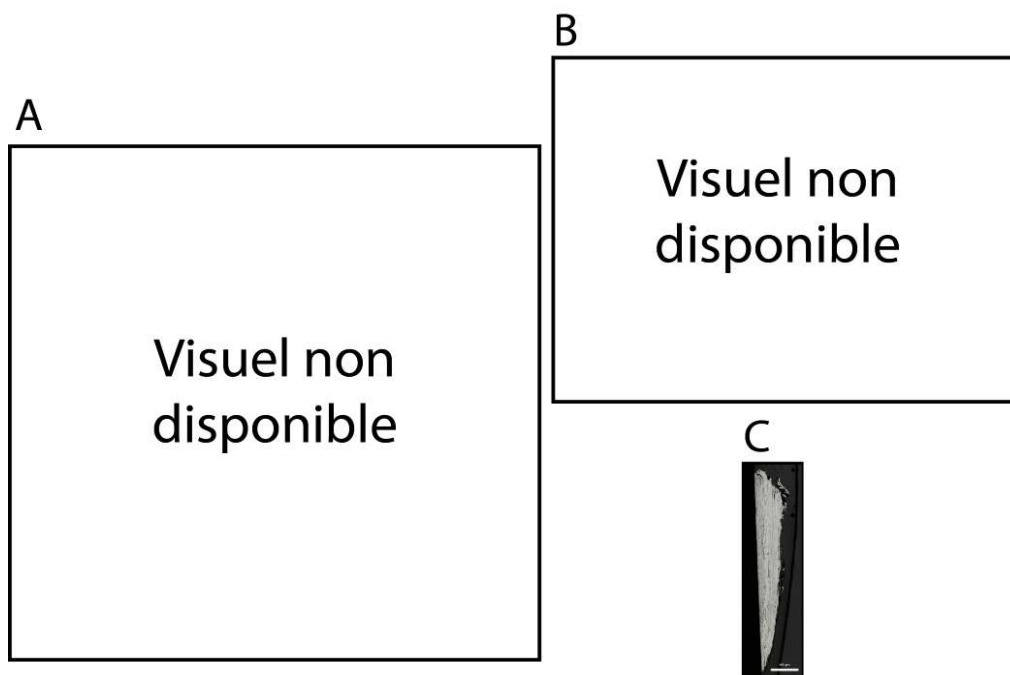
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique :

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé par Alan Williams.

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[<50]	Non résolue	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
3,3	0,09	0,06	187 ($\sigma=21$)	0,13	Non

Commentaires :

Cet échantillon présente la structure d'un acier faiblement carburé (%C*<0,1). Les grains sont fortement déformés selon la direction de martelage.

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

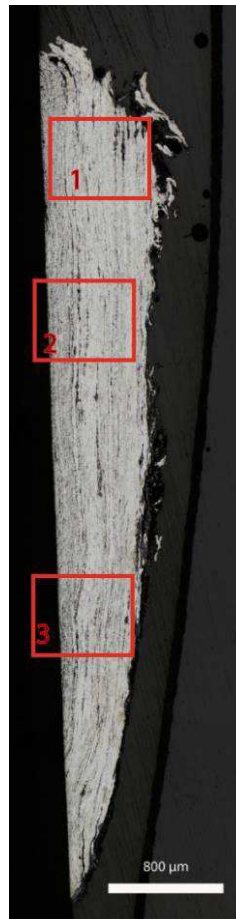
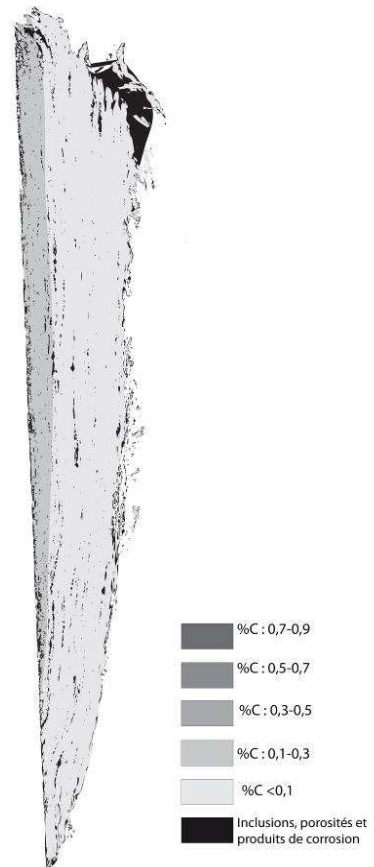
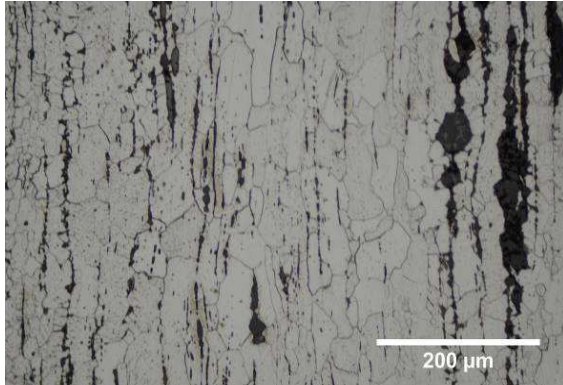


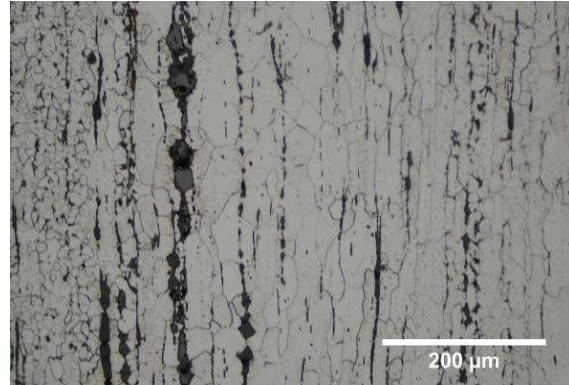
Schéma correspondant



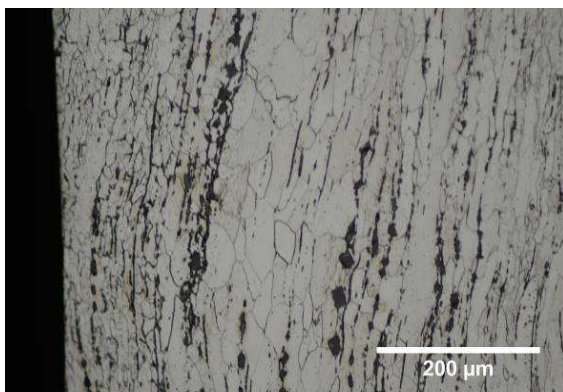
Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



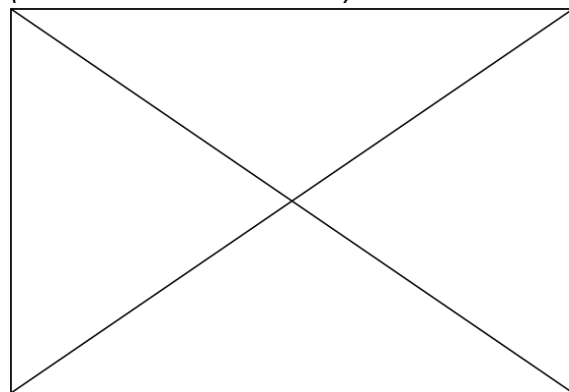
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
3	1,3

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Indirect	$p(\text{classe1}) > 0,99$ $p(\text{classe3}) = 0,99$
Abaque	Indirect	
PROCEDE	Indirect	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon K241

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : K241

Numéro de l'élément d'armure : K241

Lieu de conservation : Royal Dutch Army Museum (Delft)

Lieu de découverte :

Description : Armure d'infanterie (A.Williams)

Datation : 1580 (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Allemagne

Ville : Nuremberg

Élément de l'armure étudié : Indéterminé

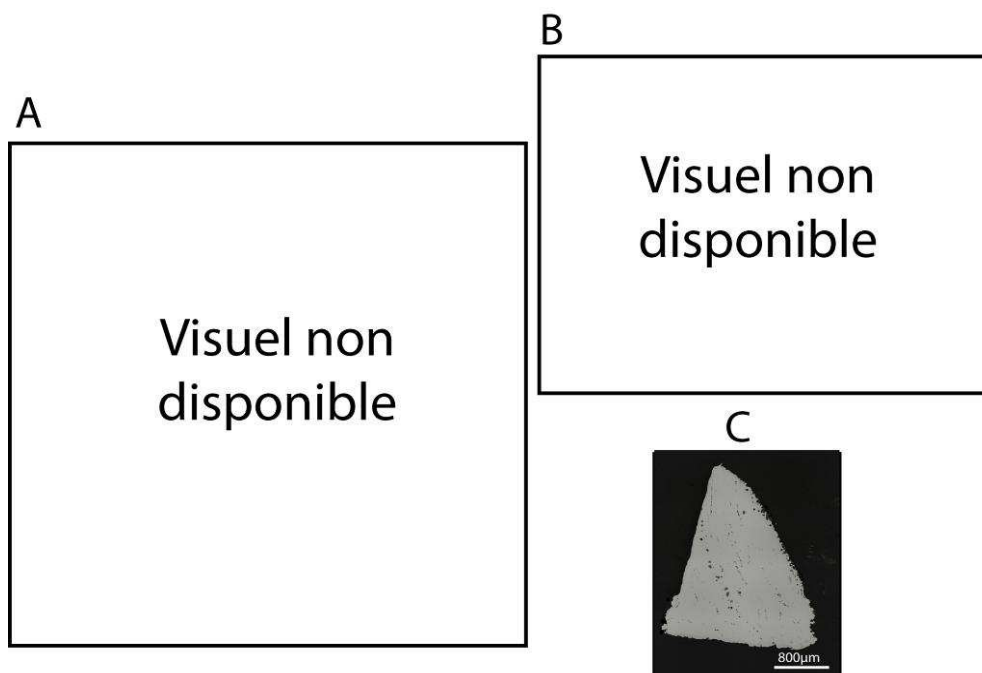
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique :

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé par Alan Williams.

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[<50]	Non résolue	Non	Non	Non	Oui

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
1,3	0,36	0,08	191 ($\sigma = 7$)	Non dosé	Non

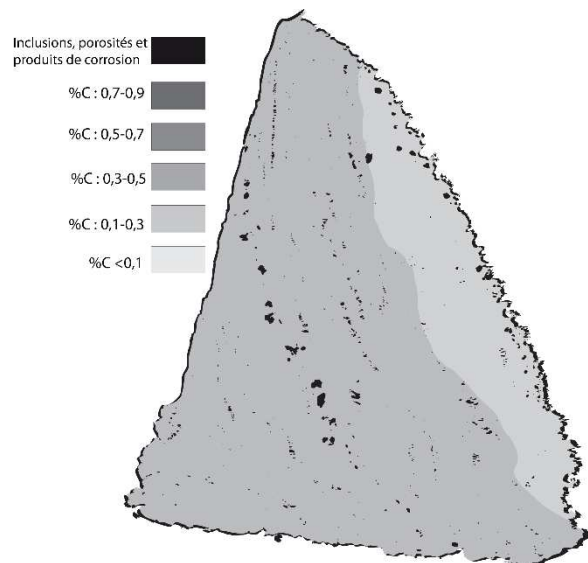
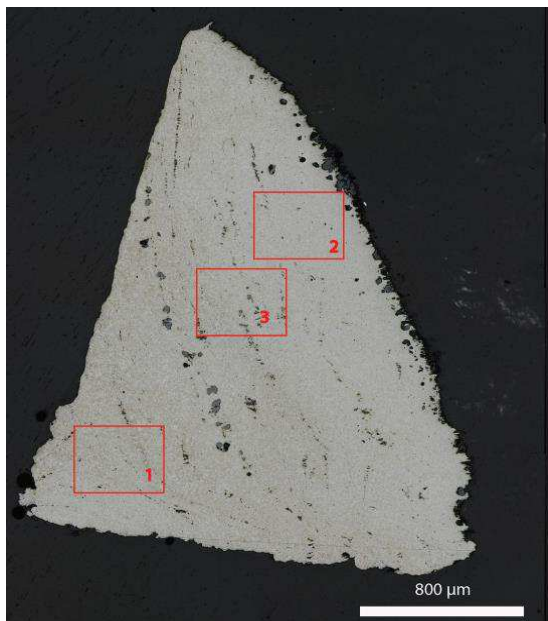
Commentaires :

Cet échantillon présente la structure d'un acier moyennement carburé, homogène sur l'ensemble de sa surface.

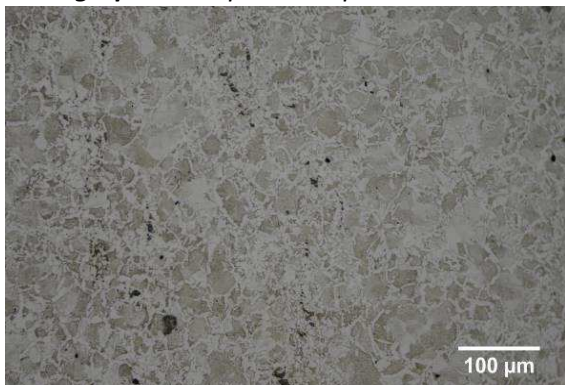
Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

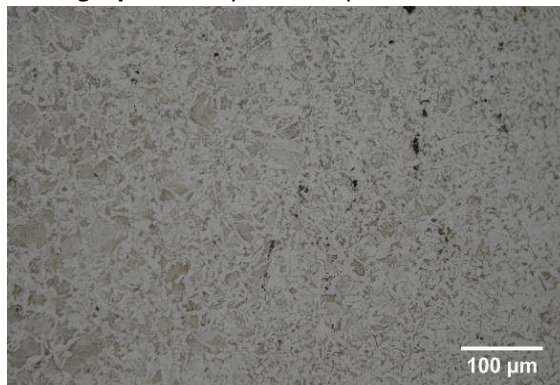
Schéma correspondant



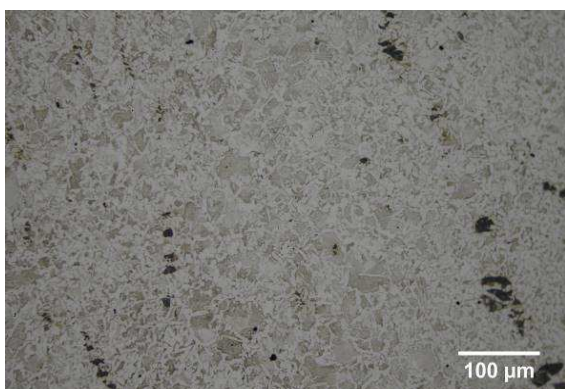
Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



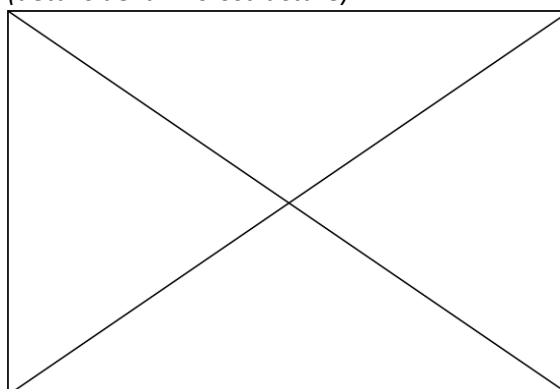
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3% (détails de la microstructure)



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
5	2,3,4,5

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Indirect	> 0,98
Abaque	Indirect	
PROCEDE	Indirect	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Dissier, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon H83

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : H83

Numéro de l'élément d'armure : H83

Lieu de conservation : Royal Dutch Army Museum (Delft)

Lieu de découverte :

Description : Défense de tête (A.Williams)

Datation : fin XVIe siècle (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Indéterminée

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Défense de tête

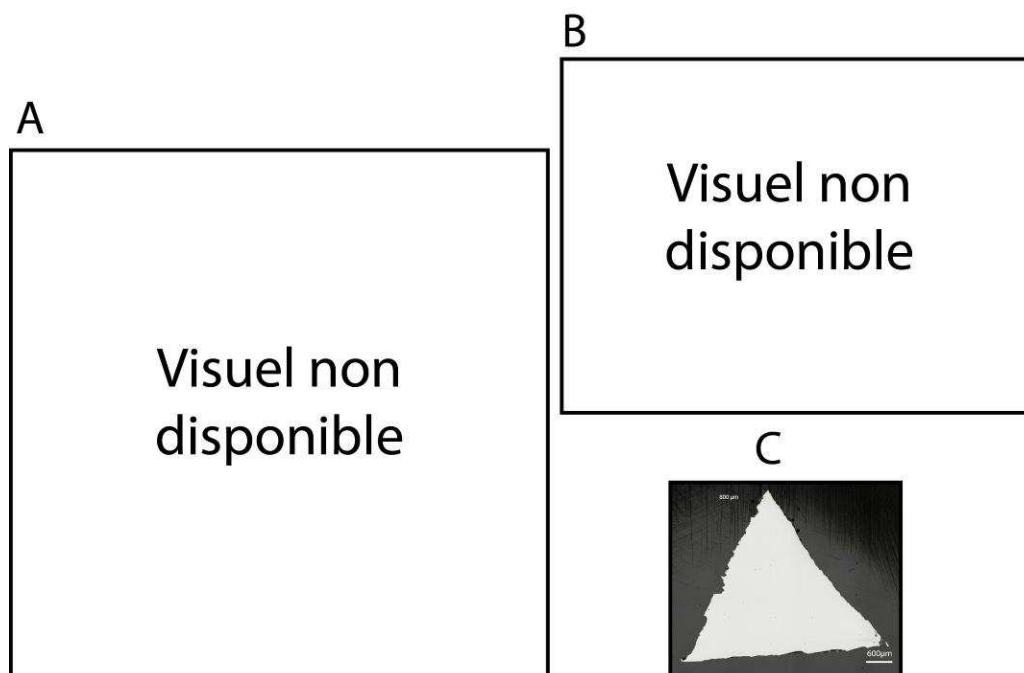
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique :

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé par Alan Williams.

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[50-200]	Non résolue	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
0,1	0,20	0,02	142 ($\sigma=9$)	Non dosé	Non

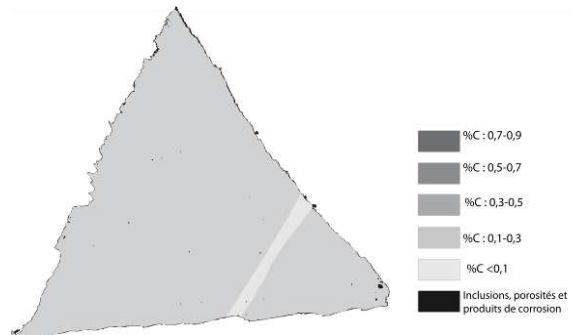
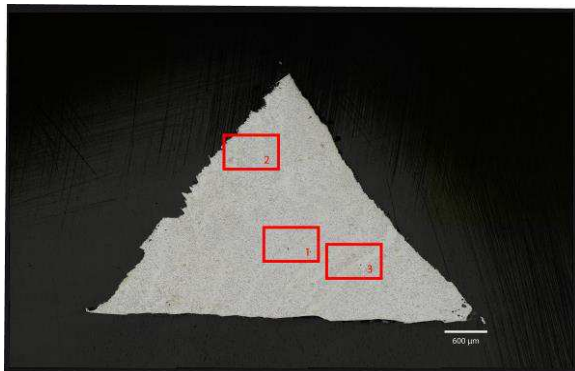
Commentaires :

Cet échantillon présente la structure d'un acier homogène en teneur en carbone, faiblement carburé (%C*=0,2)

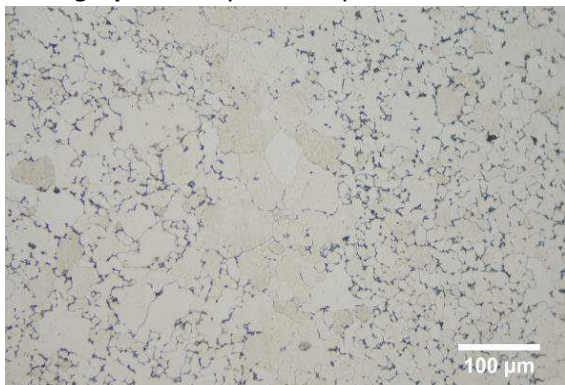
Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

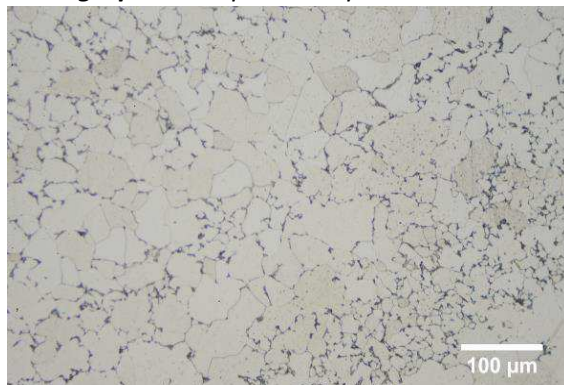
Schéma correspondant



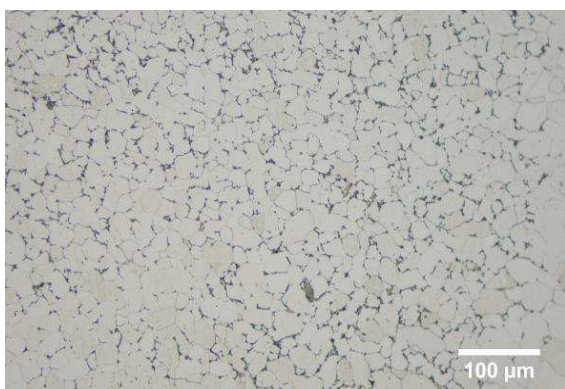
Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



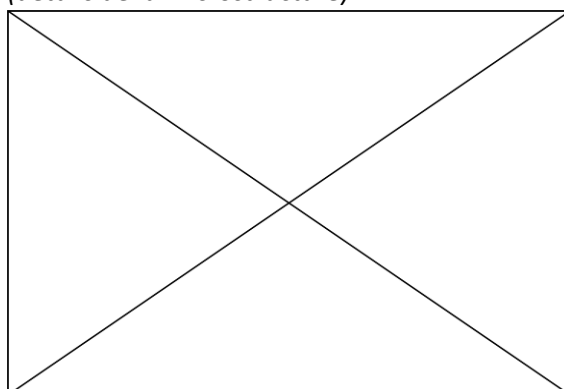
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
Non défini	Non défini

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Non défini	Non défini
Abaque	Non défini	
PROCEDE	Non défini	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon 1341a

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : 1341a

Numéro de l'élément d'armure : 1341a

Lieu de conservation : Royal Dutch Army Museum (Delft)

Lieu de découverte :

Description : Gantelet d'armure (A.Williams)

Datation : début XVIIe siècle (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Indéterminée

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Gantelet

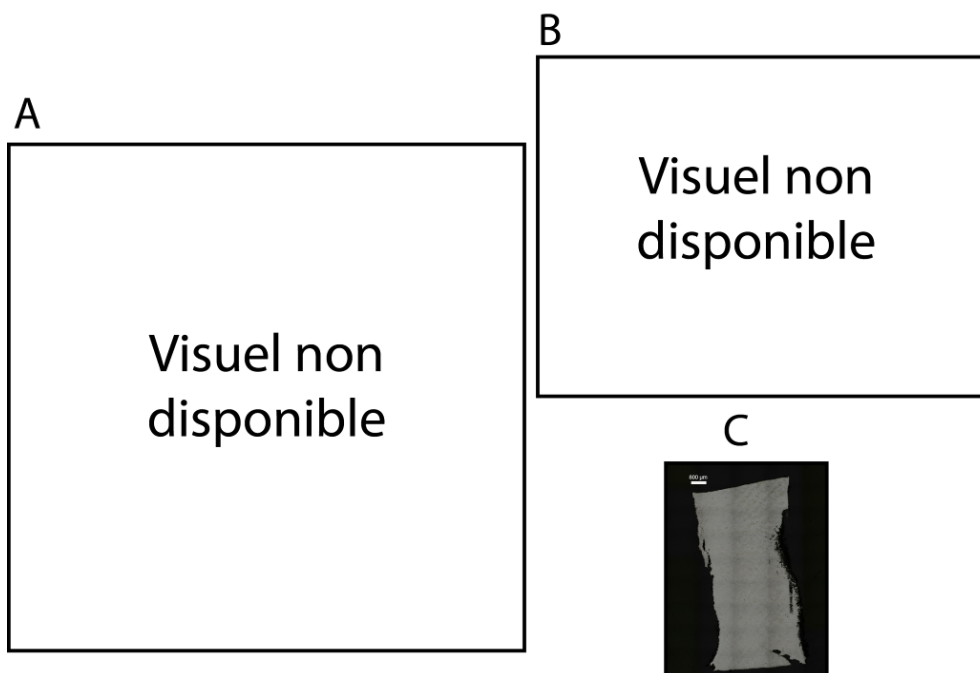
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique :

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé par Alan Williams sur une lame du gantelet

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[50-200]	Non résolue	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
0,4	0,06	0,00	133 ($\sigma = 18$)	Non dosé	Non

Commentaires :

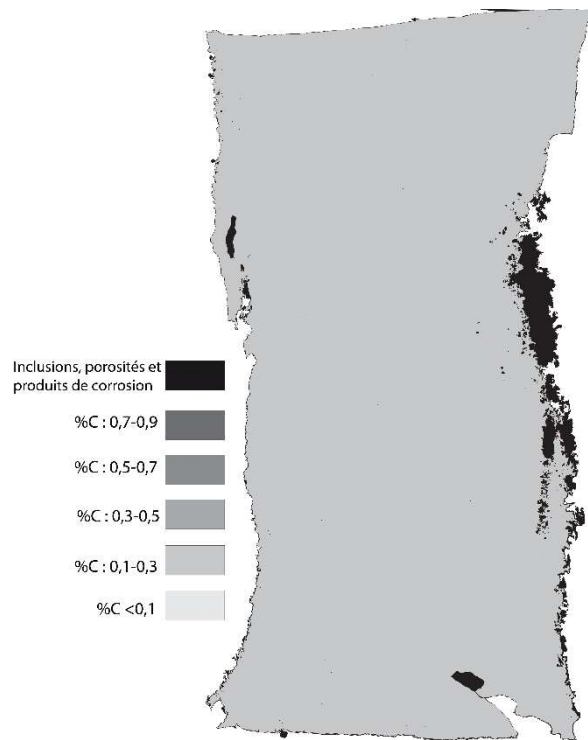
Cet échantillon présente une structure ferritique.

Analyses métallographiques

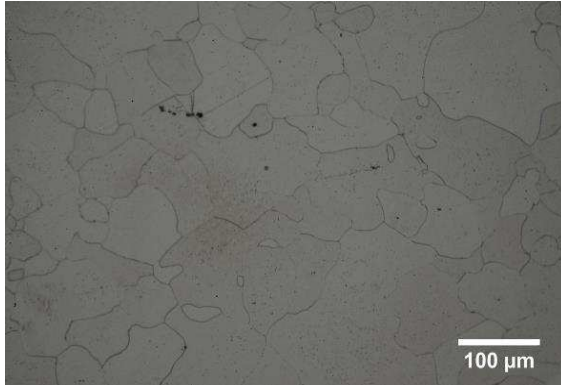
Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)



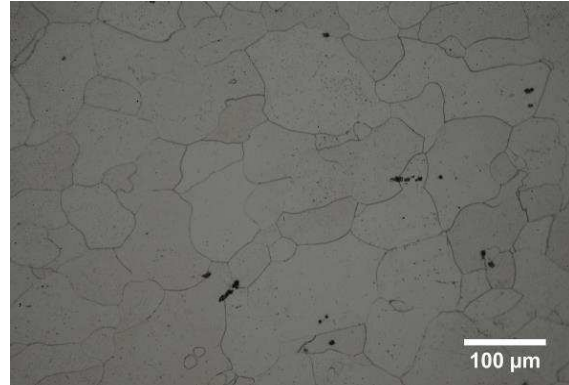
Schéma correspondant



Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



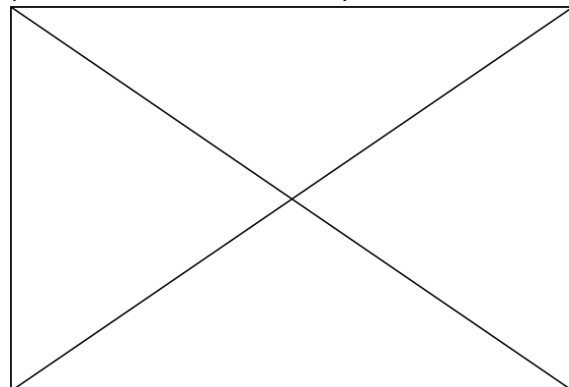
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
Non défini	Non défini

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Non défini	Non défini
Abaque	Non défini	
PROCEDE	Non défini	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Dissier, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon K221

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : K221

Numéro de l'élément d'armure : K221

Lieu de conservation : Royal Dutch Army Museum (Delft)

Lieu de découverte :

Description : Défense de bras d'une armure destinée à l'infanterie (A.Williams)

Datation : début XVIIe siècle (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Indéterminée

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Défense de coude

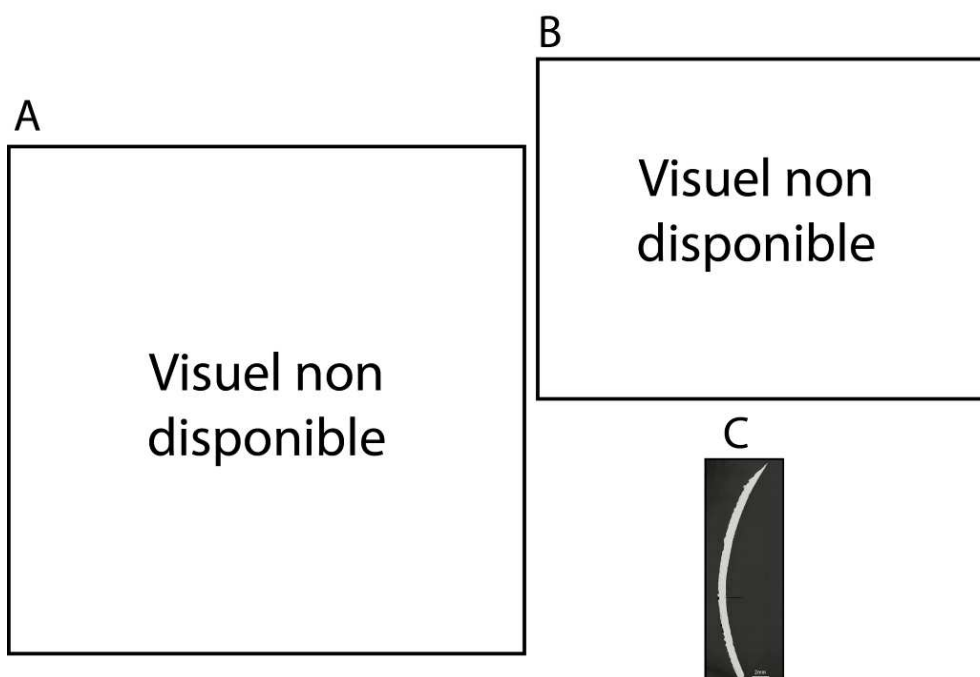
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique :

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé par Alan Williams.

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[50-200]	Non résolue	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
0,6	0,06	0,00	203 ($\sigma=13$)	0,10	Non

Commentaires :

Cet échantillon présente une structure ferritique. Bien qu'aucune structure n'ait été détectée par métallographie, les dosages EPMA ont révélé la présence de phosphore dans le métal à hauteur de 0,1%mass

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

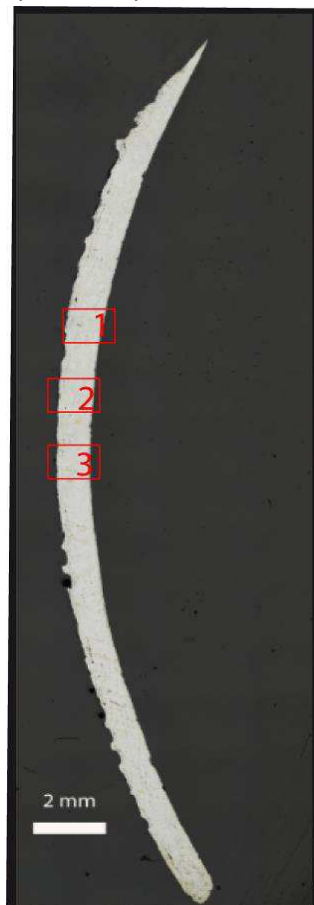
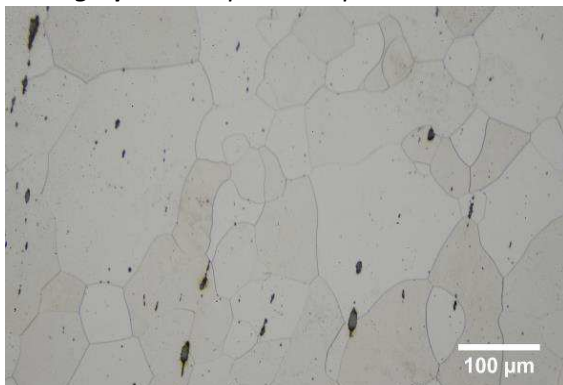


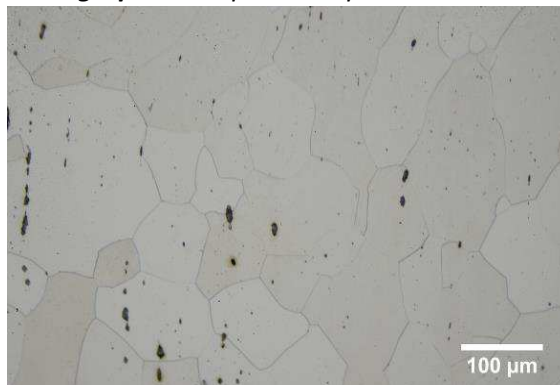
Schéma correspondant



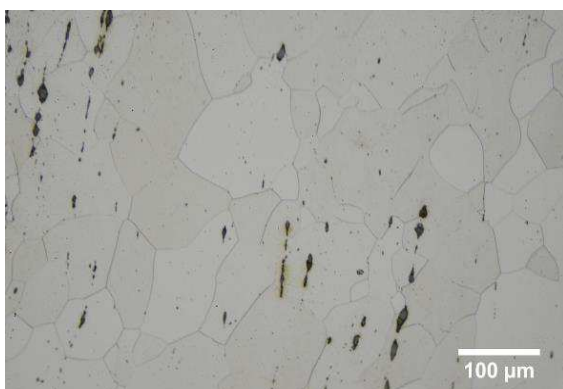
Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



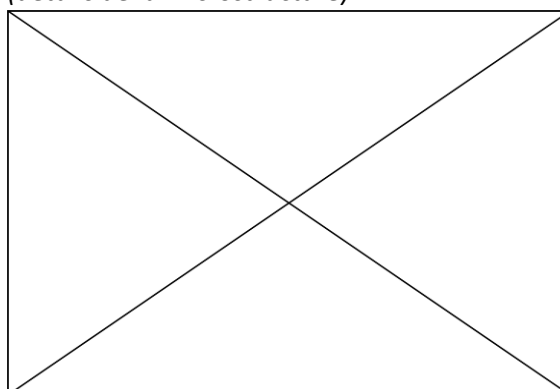
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
Non défini	Non défini

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Non défini	Non défini
Abaque	Non défini	
PROCEDE	Non défini	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon K229a

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : K229a

Numéro de l'élément d'armure : K229a

Lieu de conservation : Royal Dutch Army Museum (Delft)

Lieu de découverte :

Description : Arrière bras d'armure (A.Williams)

Datation : Indéterminée

Lieu de fabrication supposé :

Région : Indéterminée

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Arrière bras

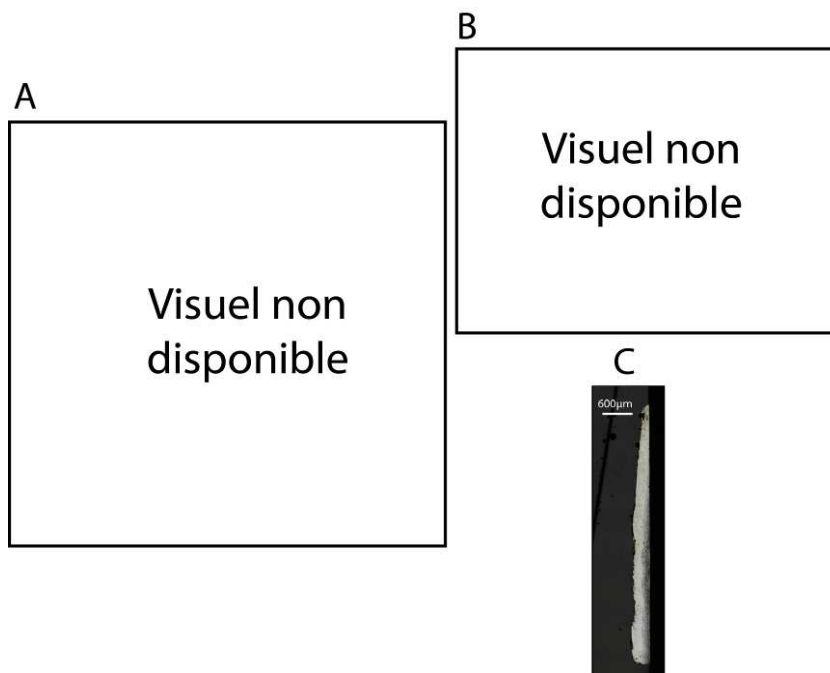
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique :

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé par Alan Williams.

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[50-200]	Globulaire	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
0,2	0,38	0,24	200 ($\sigma=16$)	Non dosé	Oui

Commentaires :

La microstructure de cet échantillon se décompose en deux bandes. La première contient de la ferrite, la seconde des carbures sphériques (perlite globulaire) dispersés dans une matrice de ferrite.

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

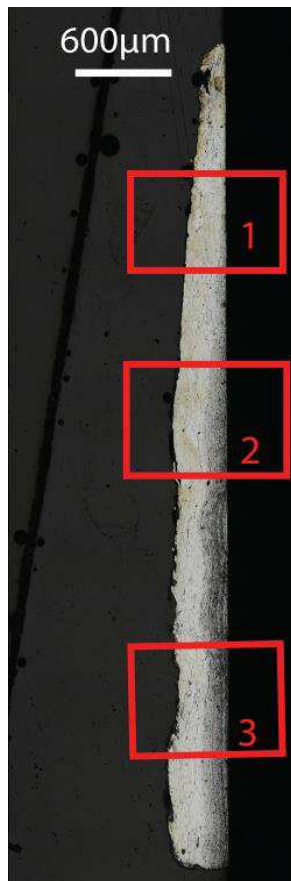
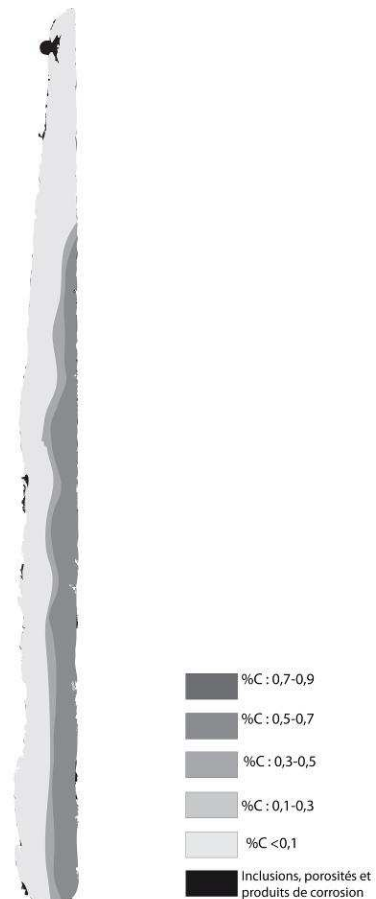


Schéma correspondant



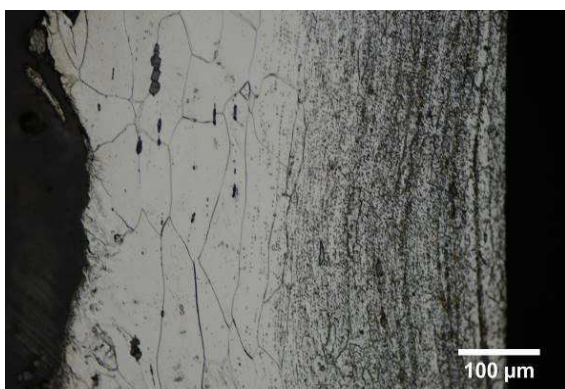
Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



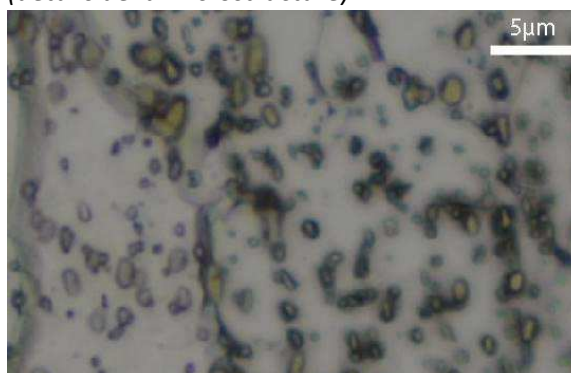
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
5	2,5

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Direct et Indirect	$p(\text{classe2}) < 0,01$ $p(\text{classe5}) = 0,98$
Abaque	classe 2: Direct classe 5: Indirect	
PROCEDE	Direct et Indirect	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon K124

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : K124

Numéro de l'élément d'armure : K124

Lieu de conservation : Royal Dutch Army Museum (Delft)

Lieu de découverte :

Description : Arrière bras d'armure (A.Williams)

Datation : Indéterminée

Lieu de fabrication supposé :

Région : Indéterminée

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Arrière bras

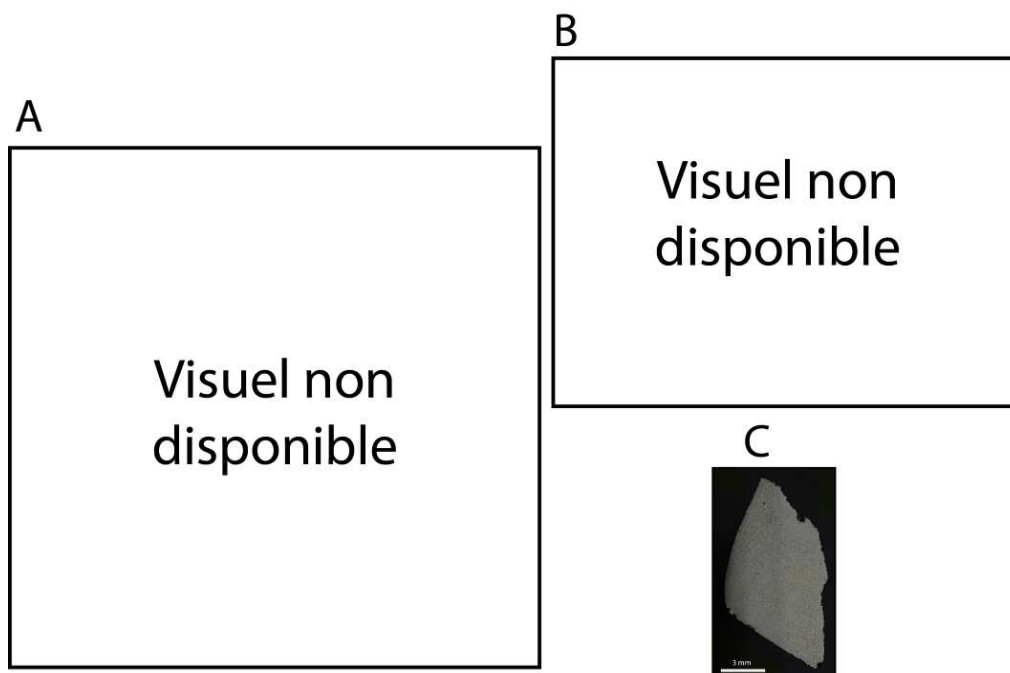
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique :

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé par Alan Williams.

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
Ind	Lamellaire	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
0,1	0,60	0,00	263 ($\sigma=17$)	Non dosé	Non

Commentaires :

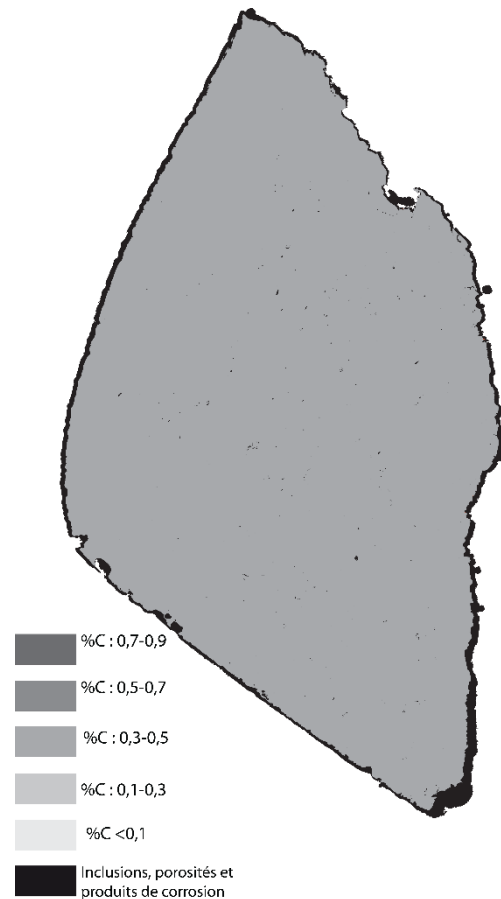
Cet échantillon présente la structure d'un acier homogène fortement carburé (%C*>0,6)

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)



Schéma correspondant



Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
5	2

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Direct	<0,01
Abaque	Direct	
PROCEDE	Direct	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon K31

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : K31

Numéro de l'élément d'armure : K31

Lieu de conservation : Royal Dutch Army Museum (Delft)

Lieu de découverte :

Description : Genouillère d'armure de type maximilien (A.Williams)

Datation : Indéterminée

Lieu de fabrication supposé :

Région : Indéterminée

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Genouillère

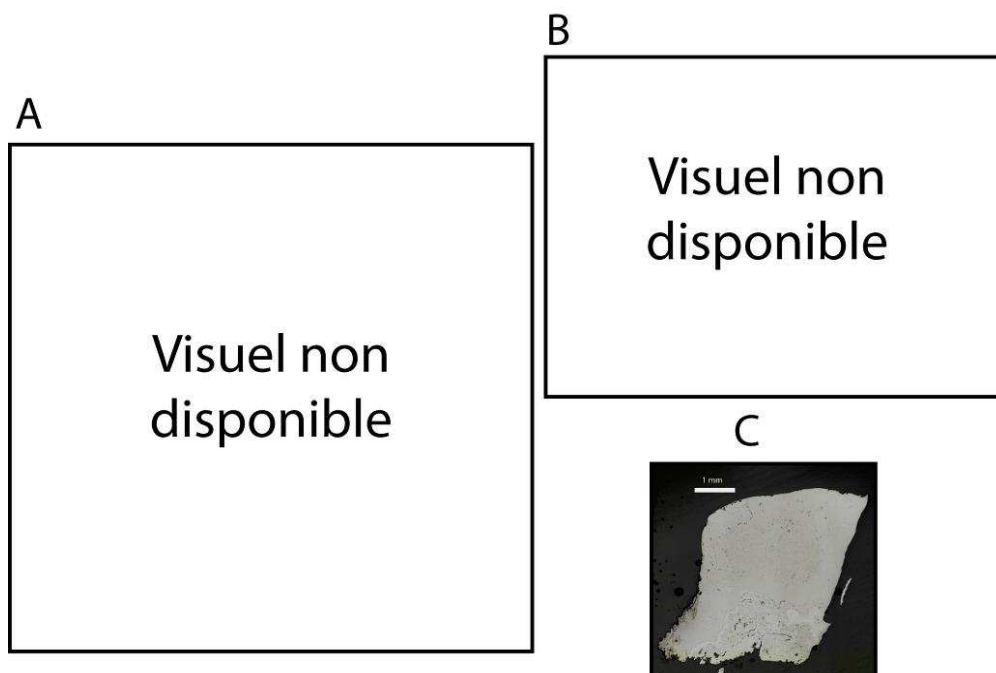
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique :

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé par Alan Williams.

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[<50]	Lamellaire	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
0,9	0,28	0,11	202 ($\sigma=13$)	Non dosé	Non

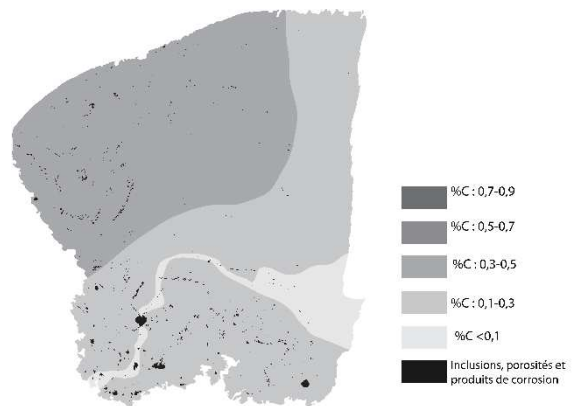
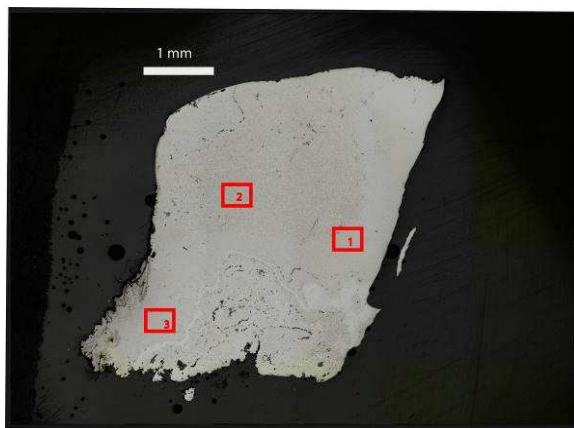
Commentaires :

Cet échantillon présente la structure d'un acier hétérogène en teneur en carbone.

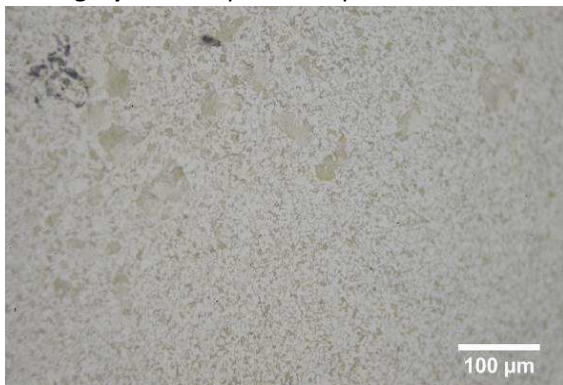
Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

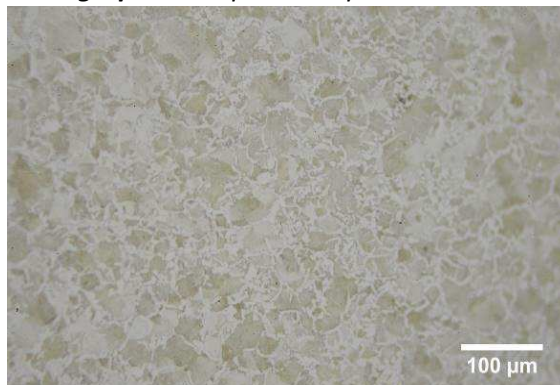
Schéma correspondant



Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
5	2,3,4,5

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Direct	$p(\text{classe2})=0,39$ $p(\text{classe3})< 0,01$ $p(\text{classe4})=0,05$ $p(\text{classe5})< 0,01$
Abaque	Direct	
PROCEDE	Direct	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon 1002-1-9

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : Valenciennes

Numéro de l'élément d'armure : 1002-1-9

Lieu de conservation :

Lieu de découverte : Site archéologique de l'atelier des fondeurs Perdry (Valenciennes)

Description : Plastron appartenant au lot de cuirasses découvert lors des fouilles de l'atelier d'un fondeur (Jacques Perdry) à Valenciennes daté de la première moitié du XVII^e siècle et destiné à la cavalerie légère (P. Korpiun, 2010, p.6)

Datation : XVII^e siècle (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Indéterminée

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Plastron

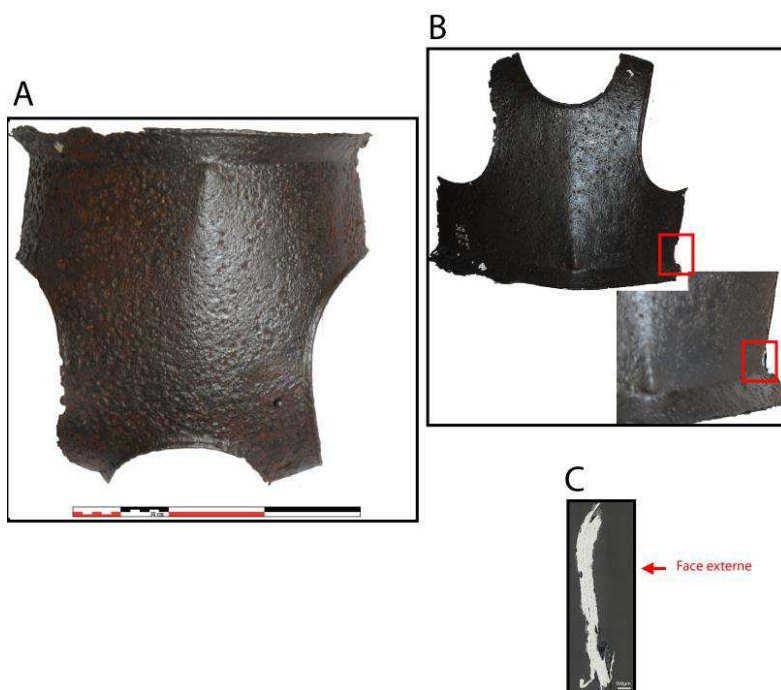
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique : (P. Korpiun, 2010)

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé sur le bord latéral droit du plastron

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[<50]	Non résolue	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
4,6	0,06	0,00	155 ($\sigma=8$)	<0,1	Non

Commentaires :

Cet échantillon présente la structure d'un acier très faiblement carburé. Quelques amas de perlite sont présents par endroit.

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

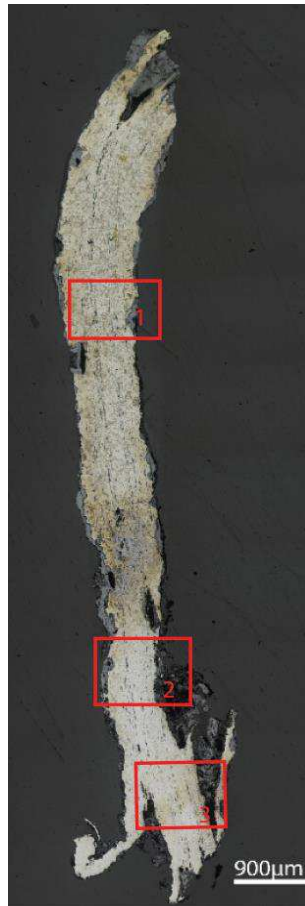
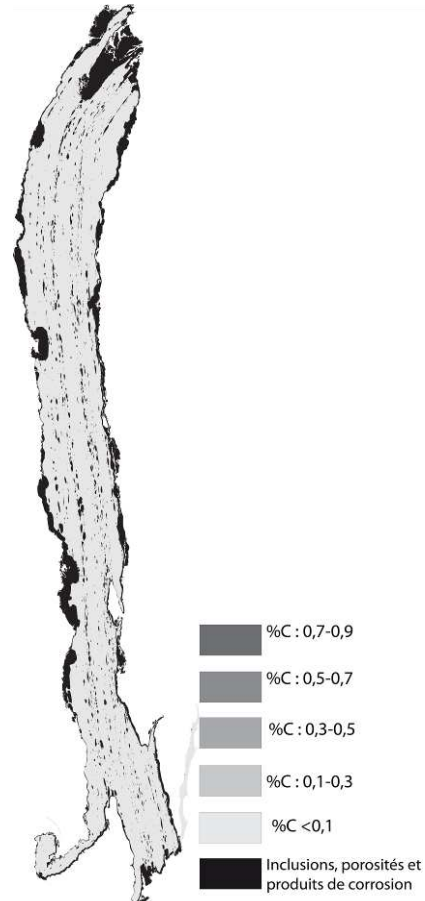
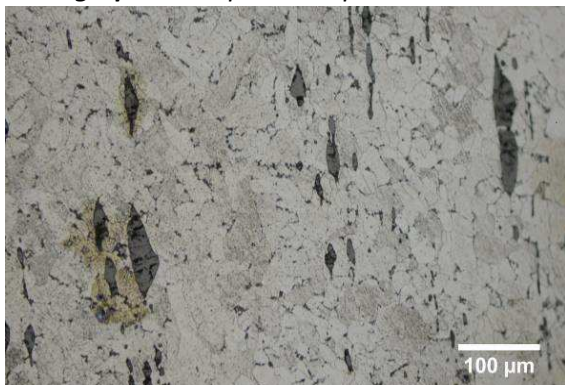


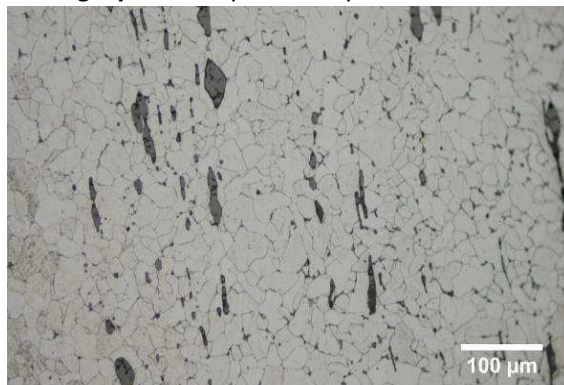
Schéma correspondant



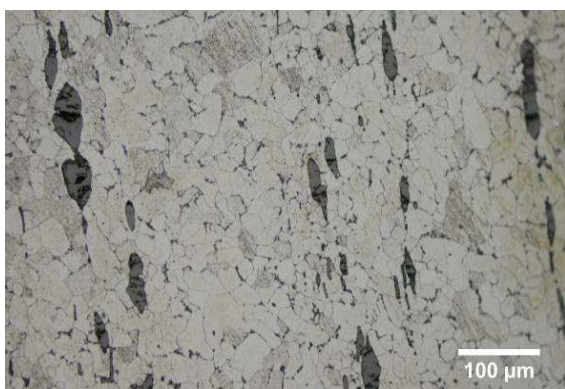
Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



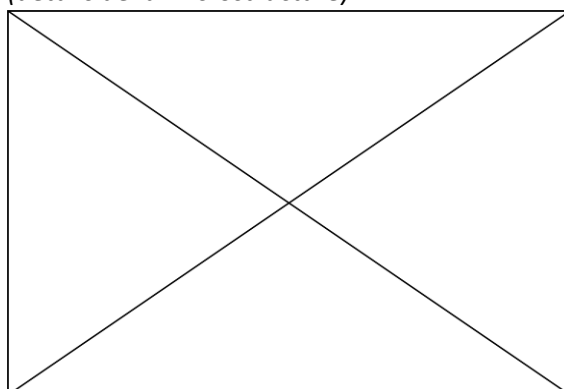
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
6	1

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Indirect	0,95
Abaque	Indéterminé	
PROCEDE	Indirect	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon 1002-4-21

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : Valenciennes

Numéro de l'élément d'armure : 1002-4-21

Lieu de conservation :

Lieu de découverte : Site archéologique de l'atelier des fondeurs Perdry (Valenciennes)

Description : Plastron appartenant au lot de cuirasses découvert lors des fouilles de l'atelier d'un fondeur (Jacques Perdry) à Valenciennes daté de la première moitié du XVII^e siècle et destiné à la cavalerie légère (P. Korpiun, 2010, p.6)

Datation : XVII^e siècle (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Indéterminée

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Plastron

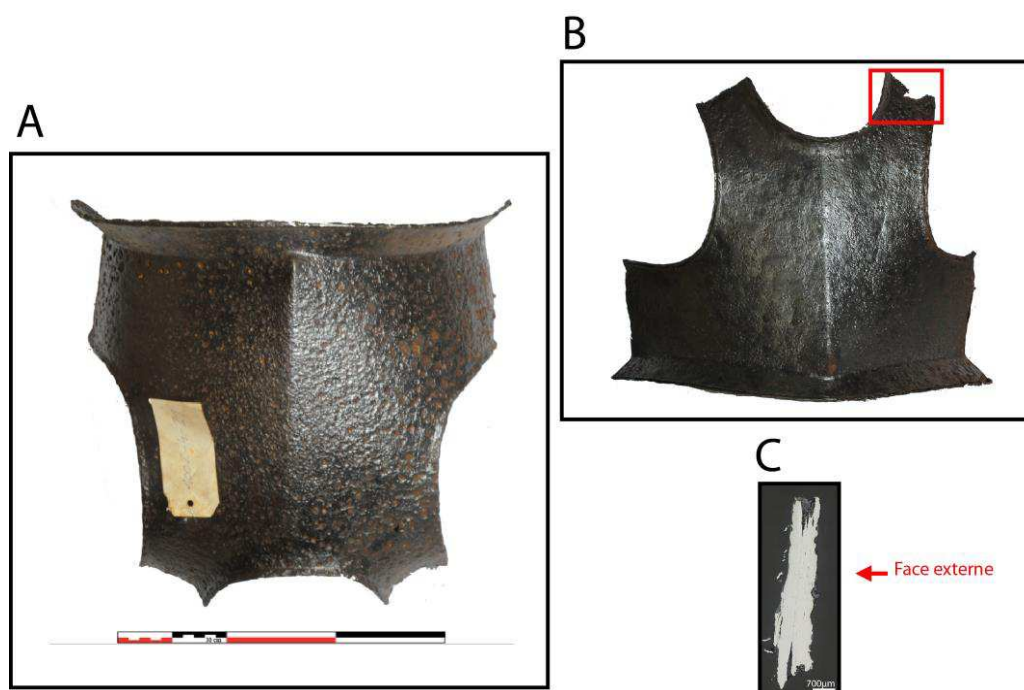
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique : (P. Korpiun, 2010)

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé sur le bord supérieur droit du plastron au niveau de l'épaule.

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[50-200]	Non résolue	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
2,1	0,06	0,00	127 ($\sigma=12$)	Non dosé	Non

Commentaires :

Cet échantillon présente la structure d'un acier très faiblement carburé. Quelques amas de perlite sont présents par endroit.

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

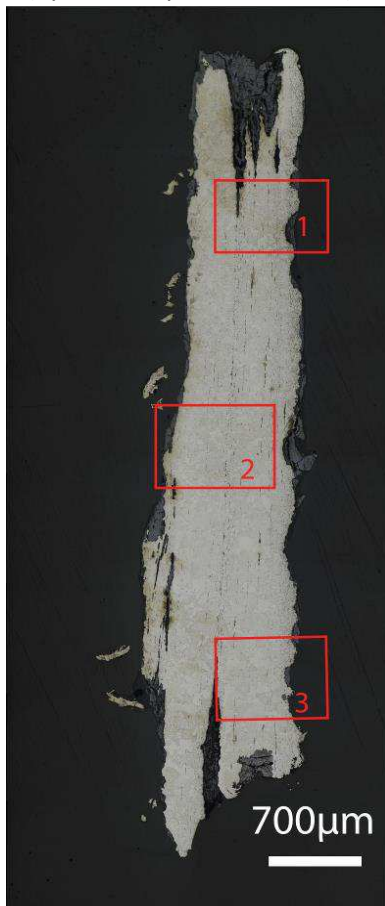
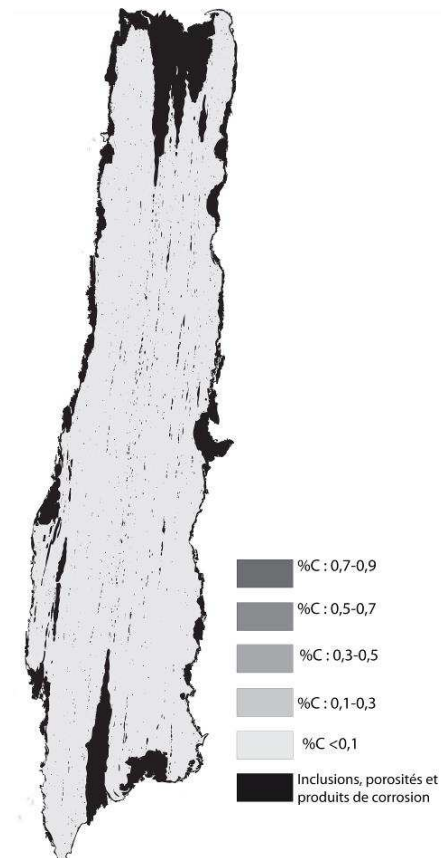


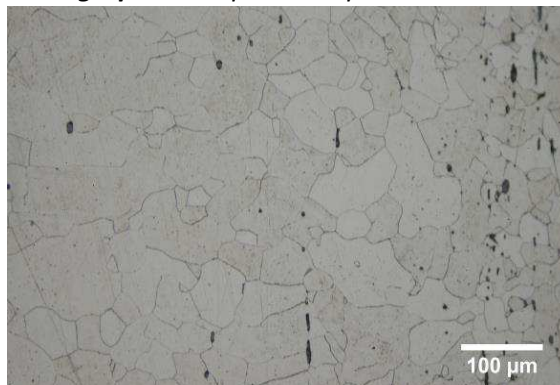
Schéma correspondant



Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



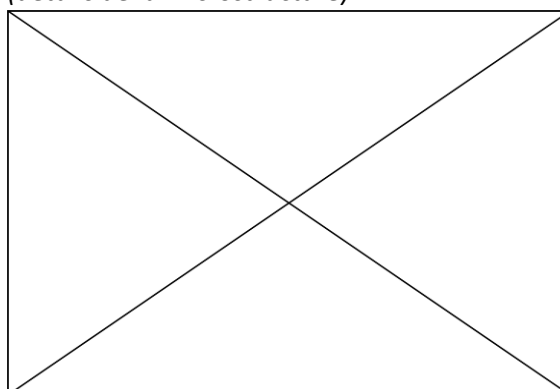
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
4	4

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Indirect	0,96
Abaque	Indirect	
PROCEDE	Indirect	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon 1002-5-16

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : Valenciennes

Numéro de l'élément d'armure : 1002-5-16

Lieu de conservation :

Lieu de découverte : Site archéologique de l'atelier des fondeurs Perdry (Valenciennes)

Description : Plastron appartenant au lot de cuirasses découvert lors des fouilles de l'atelier d'un fondeur (Jacques Perdry) à Valenciennes daté de la première moitié du XVII^e siècle et destiné à la cavalerie légère (P. Korpiun, 2010, p.6)

Datation : XVII^e siècle (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Indéterminée

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Plastron

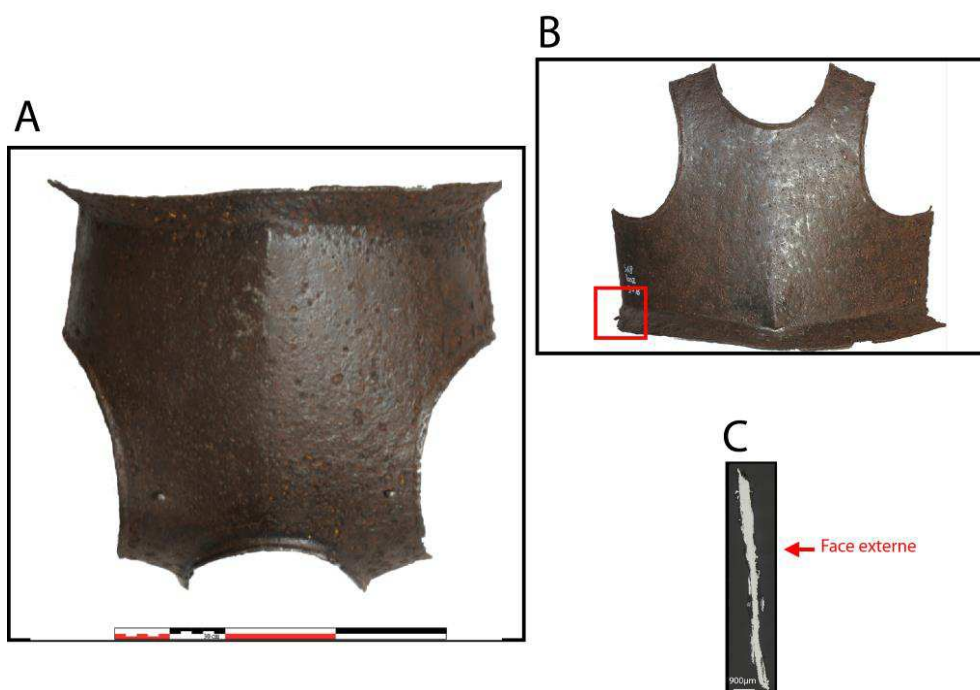
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique : (P. Korpiun, 2010)

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé sur le bord latéral gauche du plastron

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[50-200]	Lamellaire	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
3,5	0,15	0,07	162 ($\sigma=15$)	Non dosé	Non

Commentaires :

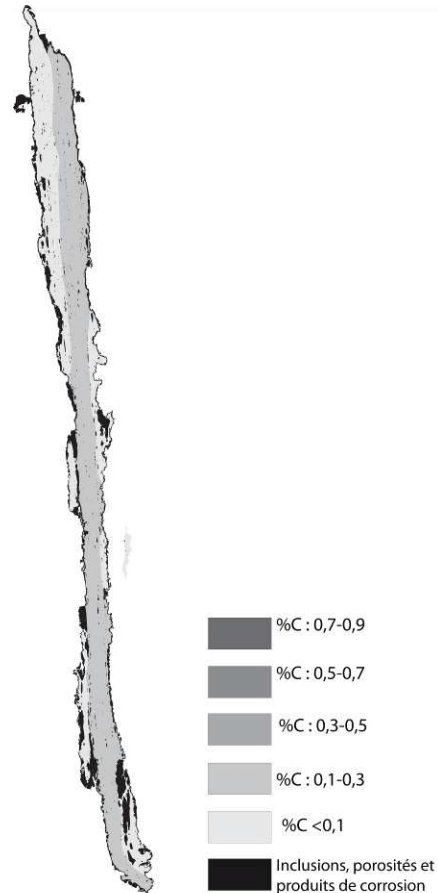
Cet échantillon présente la structure d'un acier faiblement carburé, hétérogène en teneur en carbone.

Analyses métallographiques

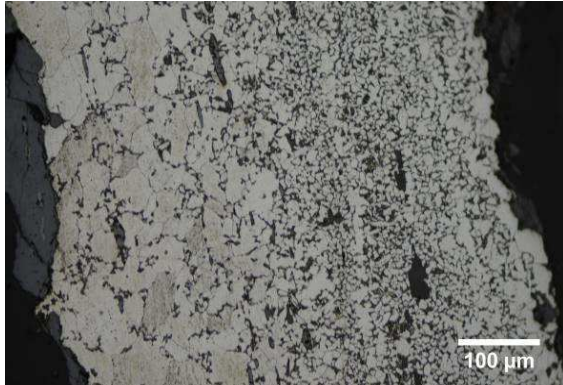
Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)



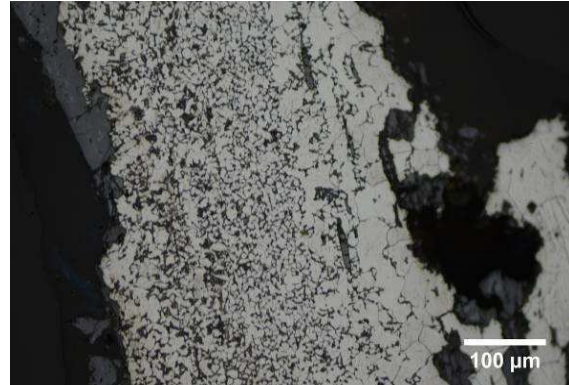
Schéma correspondant



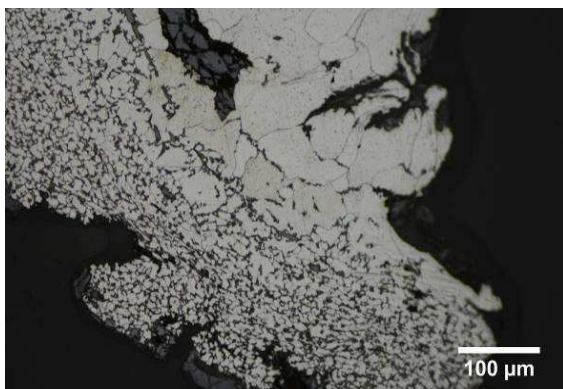
Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



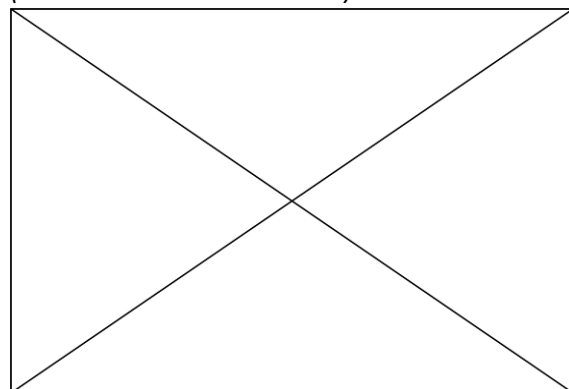
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
4	2

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Direct	0,14
Abaque	Direct	
PROCEDE	Direct	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon 1002-2-18

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : Valenciennes

Numéro de l'élément d'armure : 1002-2-18

Lieu de conservation :

Lieu de découverte : Site archéologique de l'atelier des fondeurs Perdry (Valenciennes)

Description : Plastron appartenant au lot de cuirasses découvert lors des fouilles de l'atelier d'un fondeur (Jacques Perdry) à Valenciennes daté de la première moitié du XVII^e siècle et destiné à la cavalerie légère (P. Korpiun, 2010, p.6)

Datation : XVII^e siècle (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Indéterminée

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Plastron

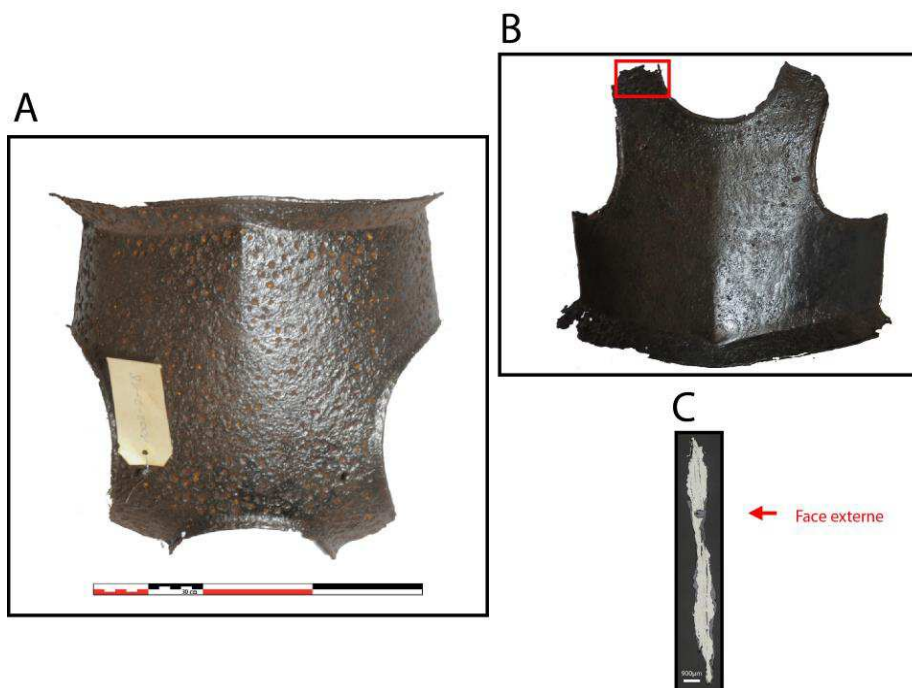
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique : (P. Korpiun, 2010)

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé sur le bord supérieur gauche du plastron au niveau de l'épaule.

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[50-200]	Non résolue	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
4,1	0,06	0,00	117 ($\sigma=24$)	Non dosé	Non

Commentaires :

Cet échantillon présente la structure d'un acier très faiblement carburé.

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

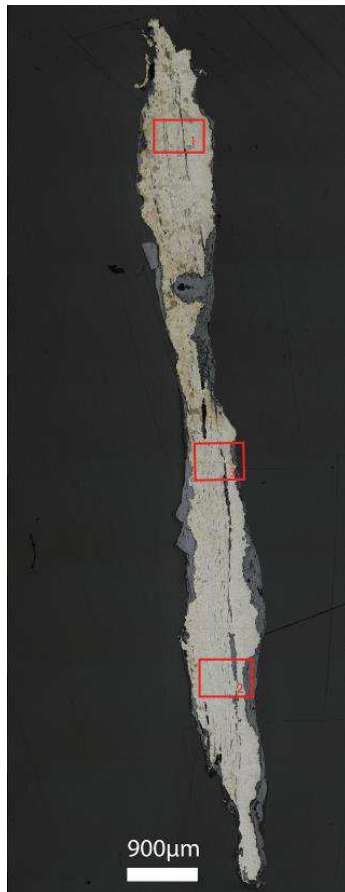
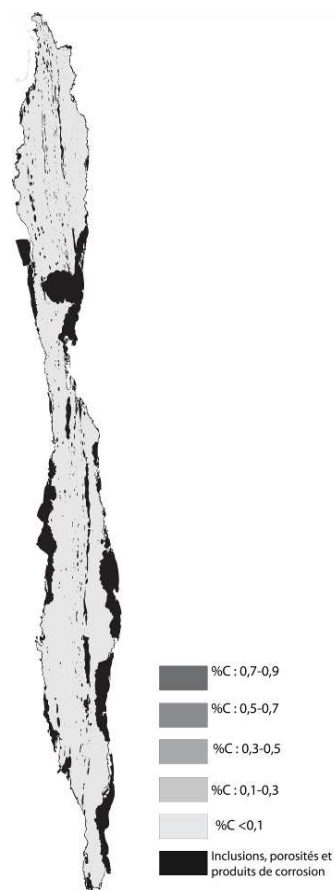
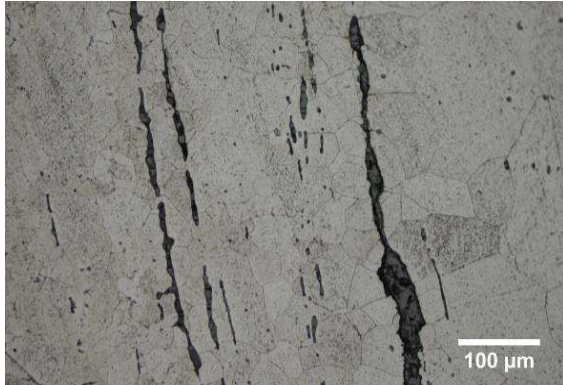


Schéma correspondant



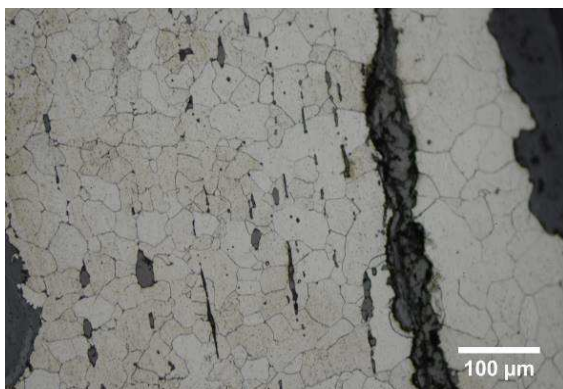
Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



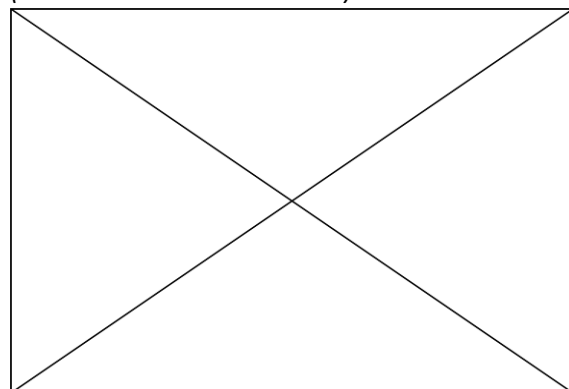
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
4	2

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Indirect	0,97
Abaque	Indéterminé	
PROCEDE	Indirect	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon 1002-14-20

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : Valenciennes

Numéro de l'élément d'armure : 1002-14-20

Lieu de conservation :

Lieu de découverte : Site archéologique de l'atelier des fondeurs Perdry (Valenciennes)

Description : Dossière appartenant au lot de cuirasses découvert lors des fouilles de l'atelier d'un fondeur (Jacques Perdry) à Valenciennes daté de la première moitié du XVII^e siècle et destiné à la cavalerie légère (P. Korpiun, 2010, p.6)

Datation : XVII^e siècle (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Indéterminée

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Dossière

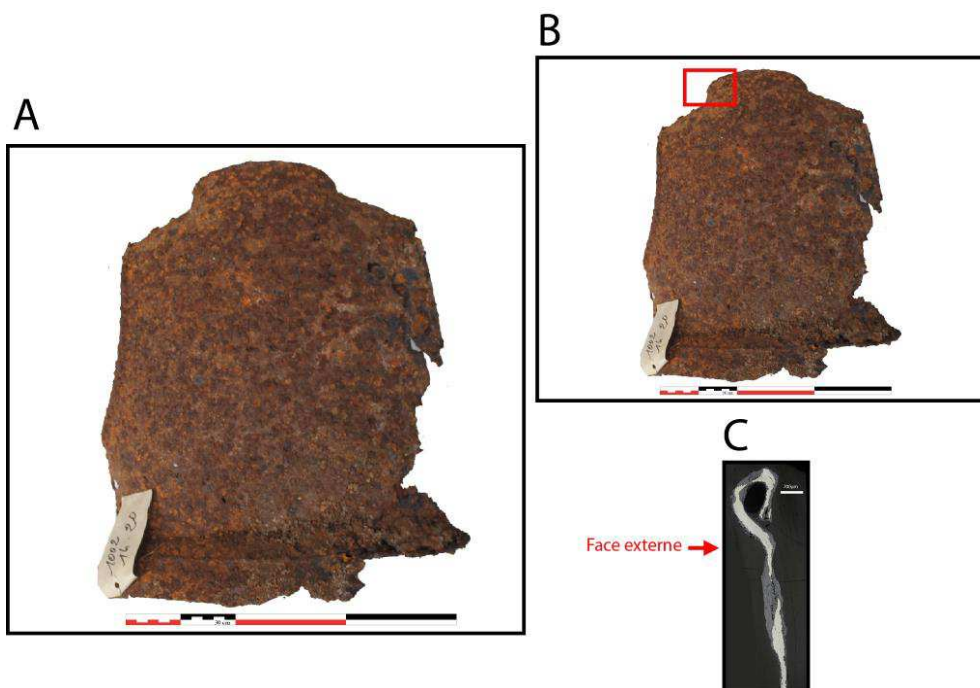
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique : (P. Korpiun, 2010)

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé au niveau du cou de la dossière sur le bord gauche

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[50-200]	Non résolue	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
1,8	0,20	0,00	179 ($\sigma=21$)	0,10	Non

Commentaires :

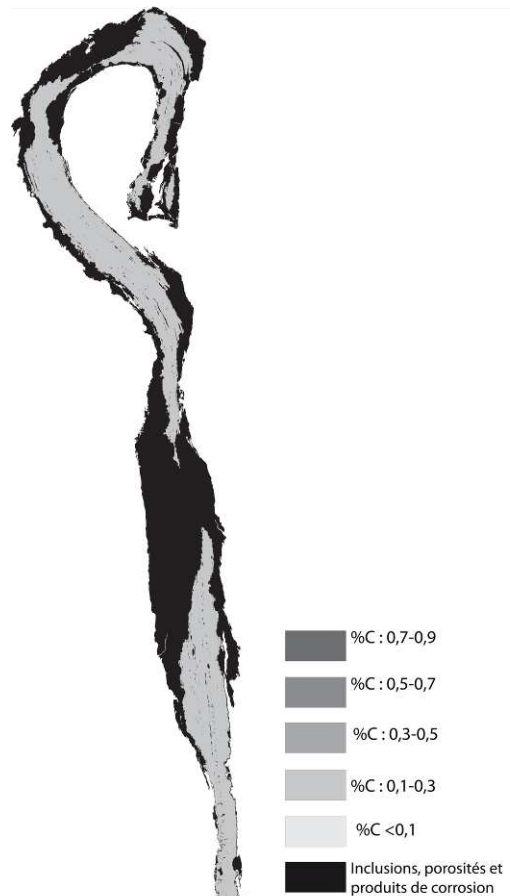
Cet échantillon possède une structure ferritique. Quelques amas de perlite sont présents par endroit. La présence de phosphore ayant été mise en évidence par les dosages dans le métal, il s'agit d'un fer phosphoreux.

Analyses métallographiques

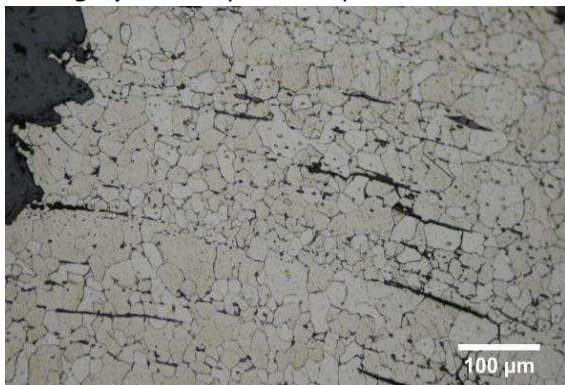
Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)



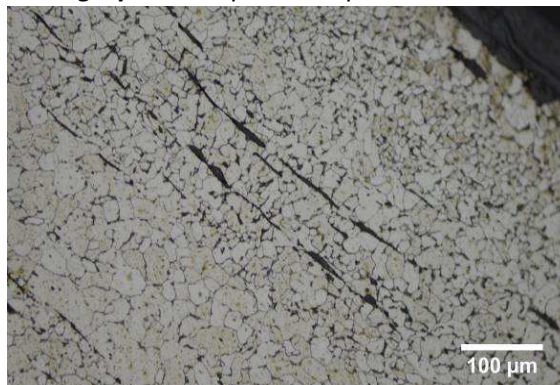
Schéma correspondant



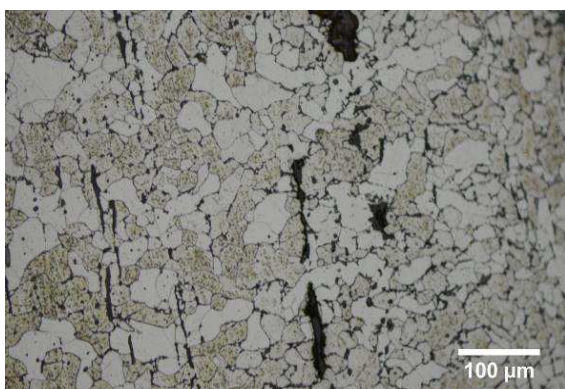
Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



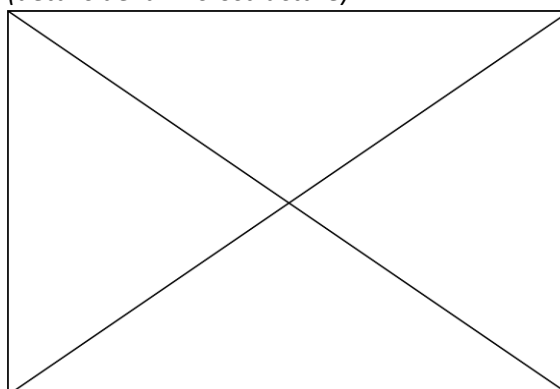
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3% (détails de la microstructure)



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
7	2, 7

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Indirect	$p(\text{classe2}) = 0,5$ et $p(\text{classe7}) = 0,97$
Abaque	Indirect	
PROCEDE	Indirect	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon 1002-18-25

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : Valenciennes

Numéro de l'élément d'armure : 1002-18-25

Lieu de conservation :

Lieu de découverte : Site archéologique de l'atelier des fondeurs Perdry (Valenciennes)

Description : Dossière appartenant au lot de cuirasses découvert lors des fouilles de l'atelier d'un fondeur (Jacques Perdry) à Valenciennes daté de la première moitié du XVII^e siècle et destiné à la cavalerie légère (P. Korpiun, 2010, p.6)

Datation : XVII^e siècle (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Indéterminée

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Dossière

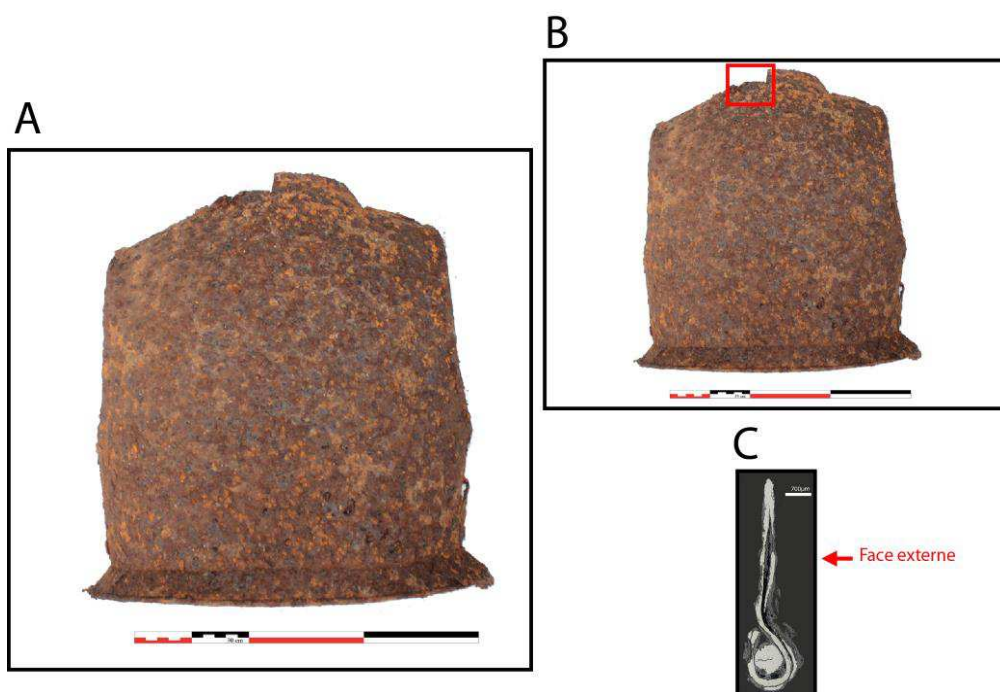
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique : (P. Korpiun, 2010)

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé au niveau du cou de la dossière sur le bord gauche

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[50-200]	Non résolue	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
1,9	0,06	0,00	182 ($\sigma=32$)	0,10	Non

Commentaires :

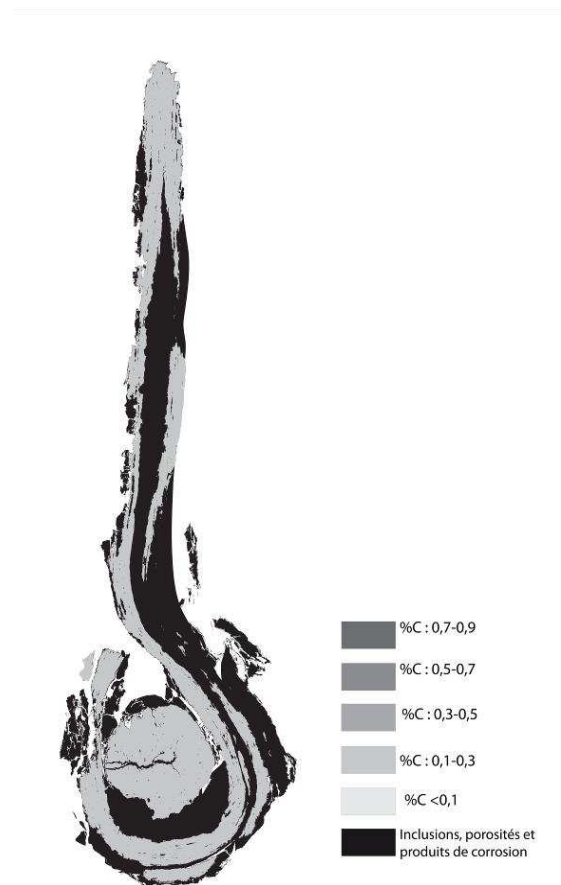
Cet échantillon possède une structure ferritique. Quelques amas de perlite sont présents par endroit. La taille des grains est variable, elle est très faible au niveau du tenon étudié ($<50\mu\text{m}$, voir micrographie 3). Des structures fantômes ont également été mises en évidence. Elles témoignent de la présence de phosphore en solution solide dans le métal.

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)



Schéma correspondant



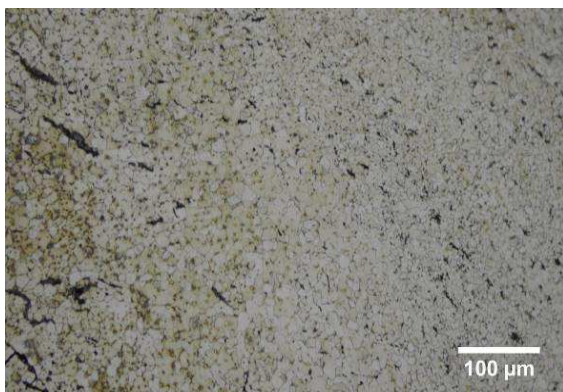
Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



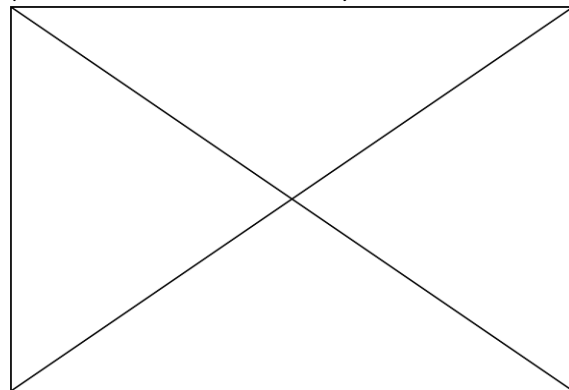
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
6	2,4

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Indirect	>0,99
Abaque	Indirect	
PROCEDE	Indirect	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon 1002-3-22

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : Valenciennes

Numéro de l'élément d'armure : 1002-3-22

Lieu de conservation :

Lieu de découverte : Site archéologique de l'atelier des fondeurs Perdry (Valenciennes)

Description : Plastron appartenant au lot de cuirasses découvert lors des fouilles de l'atelier d'un fondeur (Jacques Perdry) à Valenciennes daté de la première moitié du XVII^e siècle et destinées à la cavalerie légère (P. Korpiun, 2010, p.6)

Datation : XVII^e siècle (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Indéterminée

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Plastron

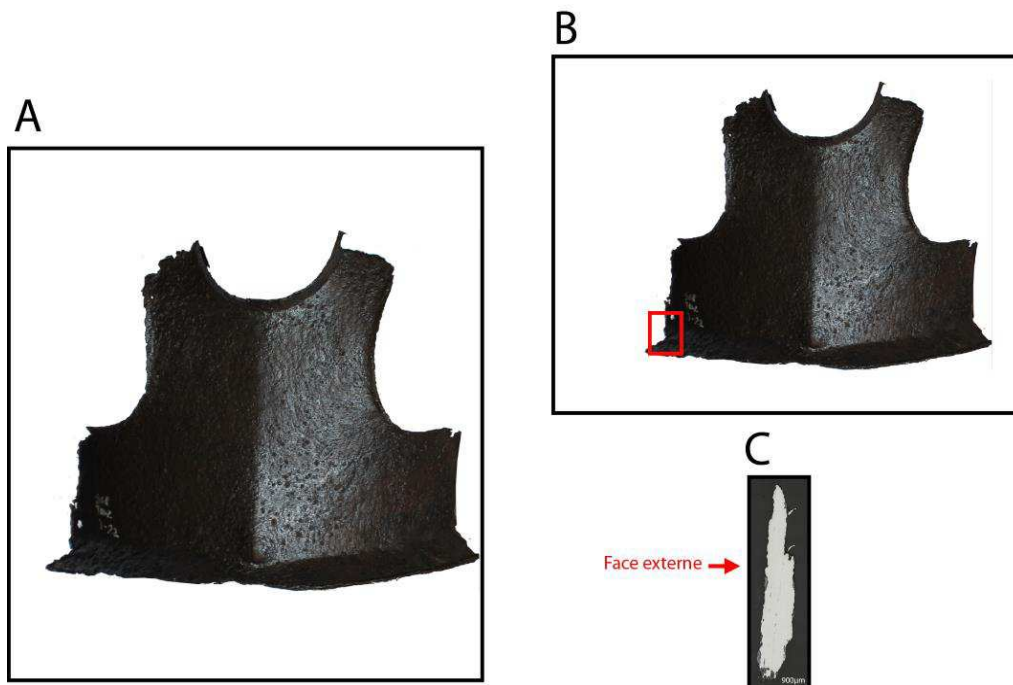
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique : (P. Korpiun, 2010)

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé sur le bord latéral gauche du plastron

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[50-200]	Non résolue	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
0,8	0,06	0,00	135 ($\sigma = 7$)	Non dosé	Non

Commentaires :

Cet échantillon possède une structure ferritique. Quelques amas de perlite sont présents par endroit.

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

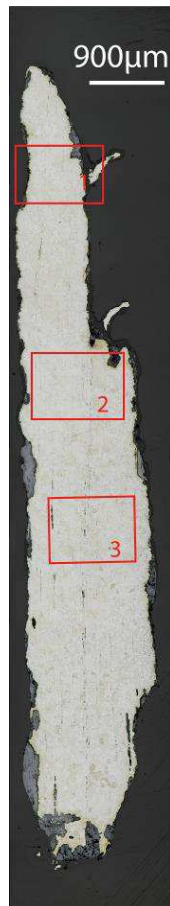
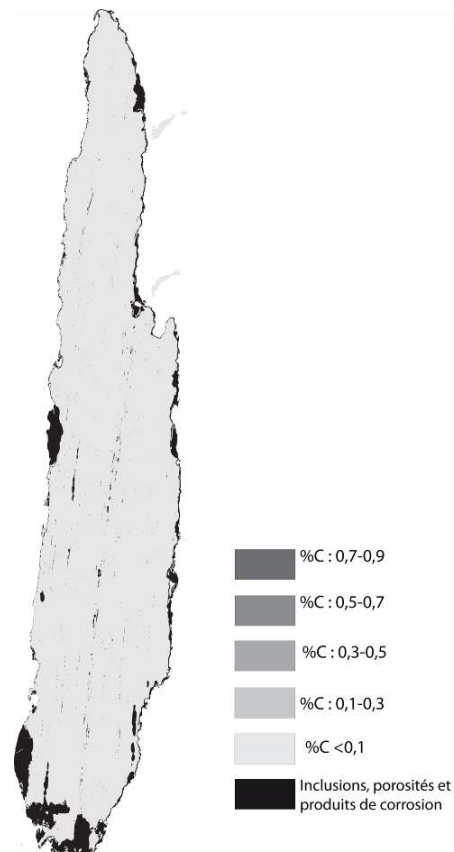
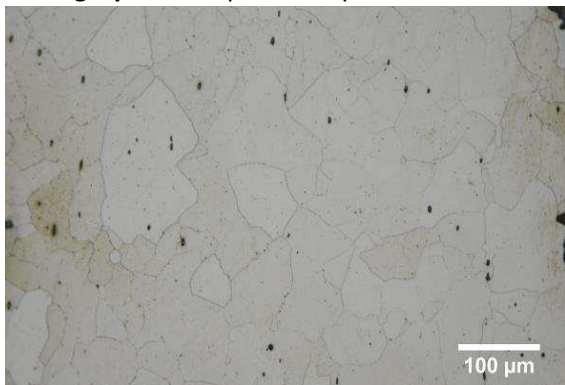


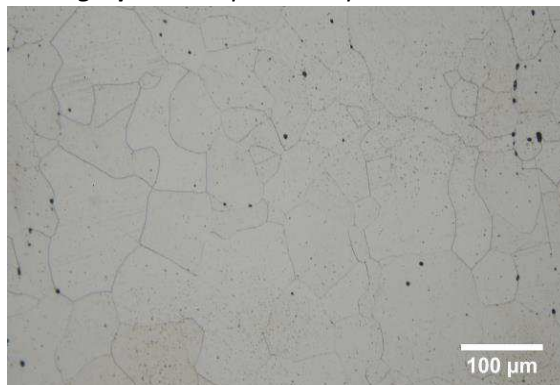
Schéma correspondant



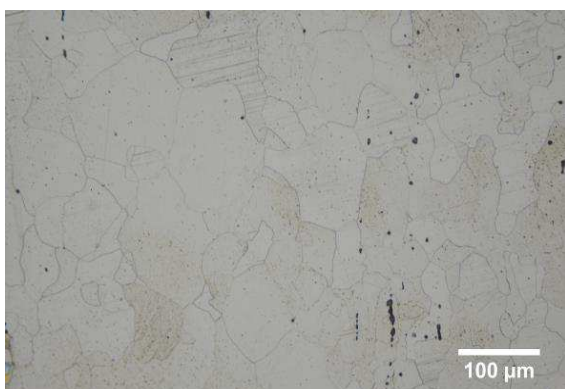
Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



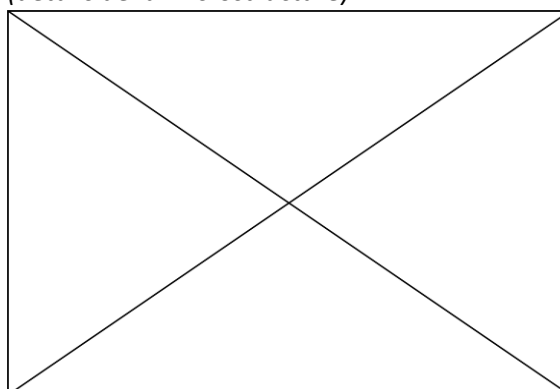
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
3	2,3

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Indirect	>0,99
Abaque	Indirect	
PROCEDE	Indirect	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon 1002-4-20

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : Valenciennes

Numéro de l'élément d'armure : 1002-4-20

Lieu de conservation :

Lieu de découverte : Site archéologique de l'atelier des fondeurs Perdry (Valenciennes)

Description : Plastron appartenant au lot de cuirasses découvert lors des fouilles de l'atelier d'un fondeur (Jacques Perdry) à Valenciennes daté de la première moitié du XVII^e siècle et destiné à la cavalerie légère (P. Korpiun, 2010, p.6)

Datation : XVII^e siècle (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Indéterminée

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Plastron

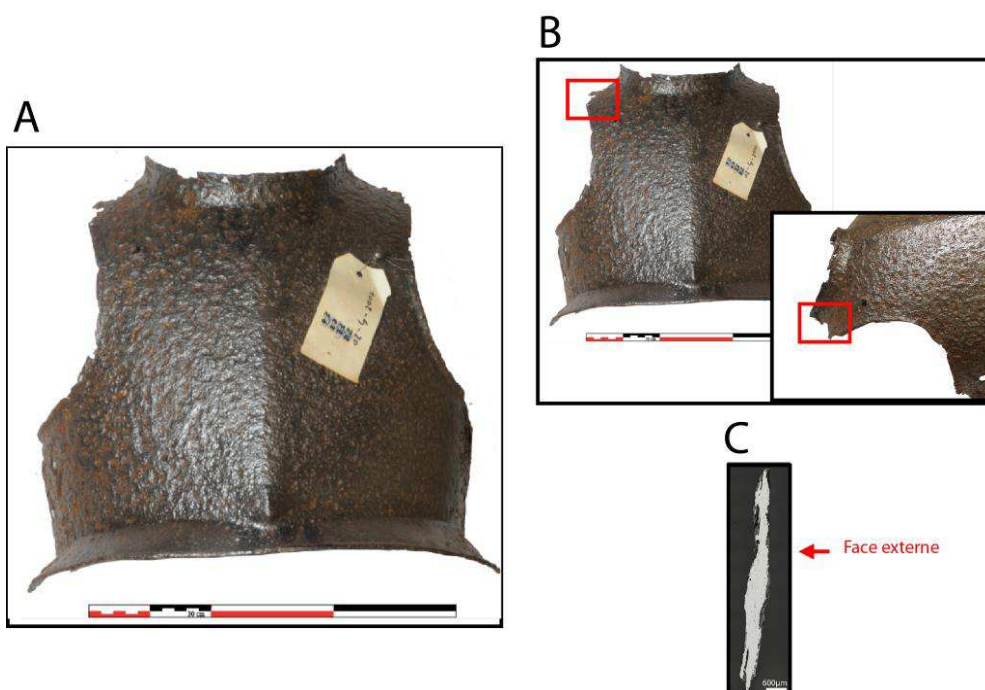
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique : (P. Korpiun, 2010)

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé sur le bord supérieur droit du plastron au niveau de l'épaule.

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[50-200]	Non résolue	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
4,9	0,10	0,06	130 ($\sigma = 6$)	Non dosé	Non

Commentaires :

Cet échantillon présente la structure d'un acier faiblement carburé, légèrement hétérogène en teneur en carbone.

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

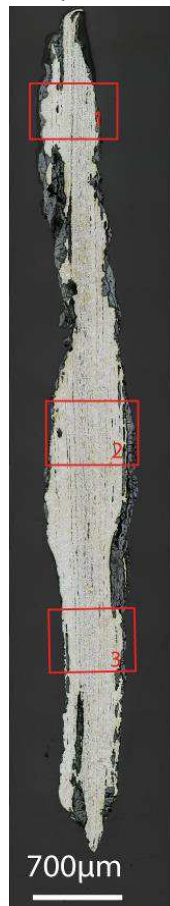
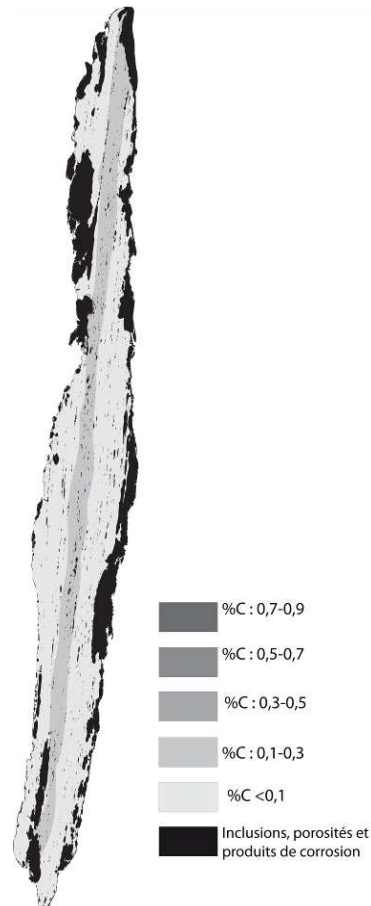
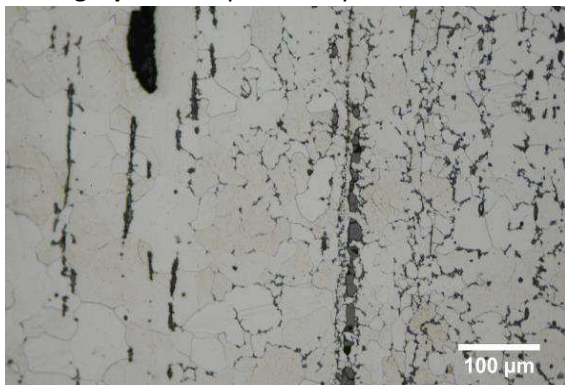


Schéma correspondant



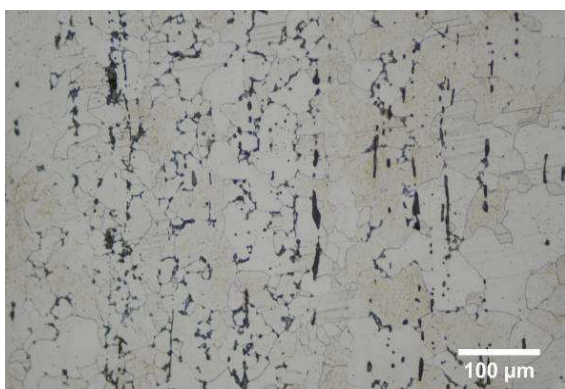
Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



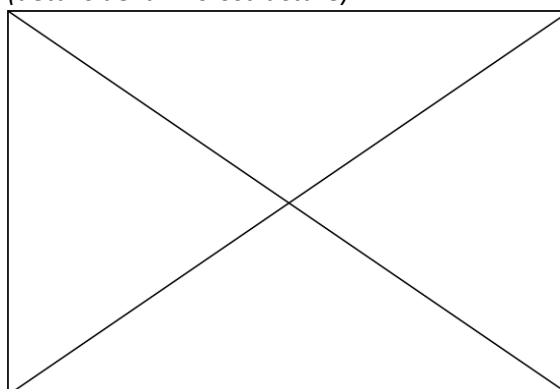
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
5	2,3

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Indirect	>0,95
Abaque	Indirect	
PROCEDE	Indirect	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon 1002-7-13

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : Valenciennes

Numéro de l'élément d'armure : 1002-7-13

Lieu de conservation :

Lieu de découverte : Site archéologique de l'atelier des fondeurs Perdry (Valenciennes)

Description : Plastron appartenant au lot de cuirasses découvert lors des fouilles de l'atelier d'un fondeur (Jacques Perdry) à Valenciennes daté de la première moitié du XVII^e siècle et destiné à la cavalerie légère (P. Korpiun, 2010, p.6)

Datation : XVII^e siècle (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Indéterminée

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Plastron

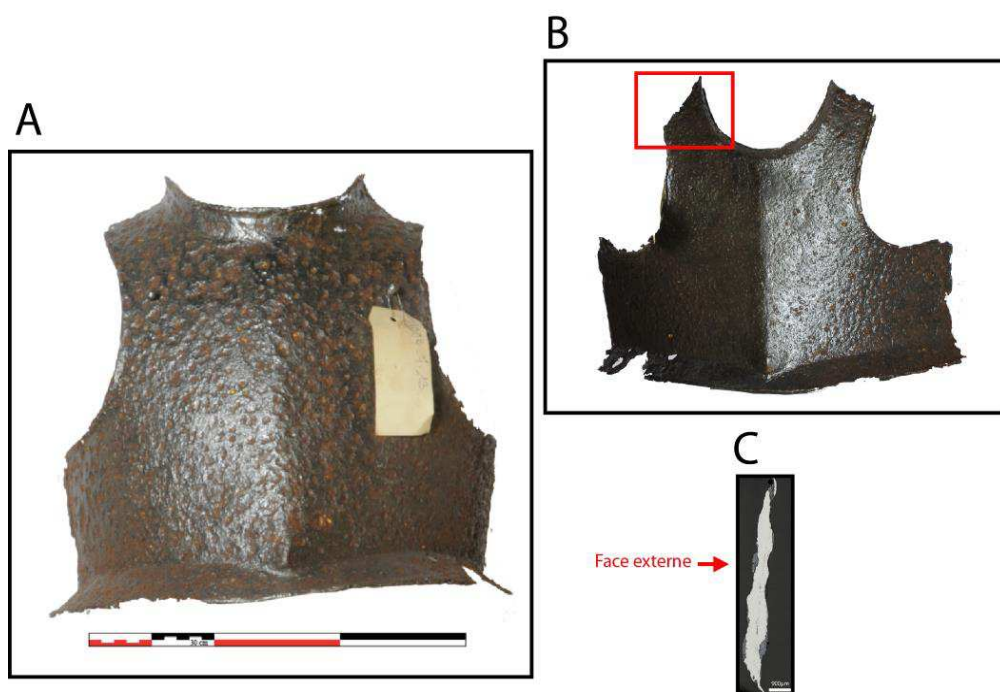
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique : (P. Korpiun, 2010)

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé sur le bord supérieur gauche du plastron au niveau de l'épaule.

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[50-200]	Non résolue	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
1,9	0,06	0,00	120 ($\sigma=10$)	Non dosé	Non

Commentaires :

Cet échantillon possède une structure ferritique. Quelques amas de perlite sont présents par endroit. Des particules sphériques sont parfois présentes dans les grains de ferrite. Il pourrait s'agir de carbures.

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

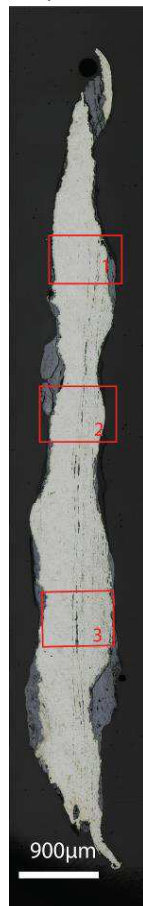
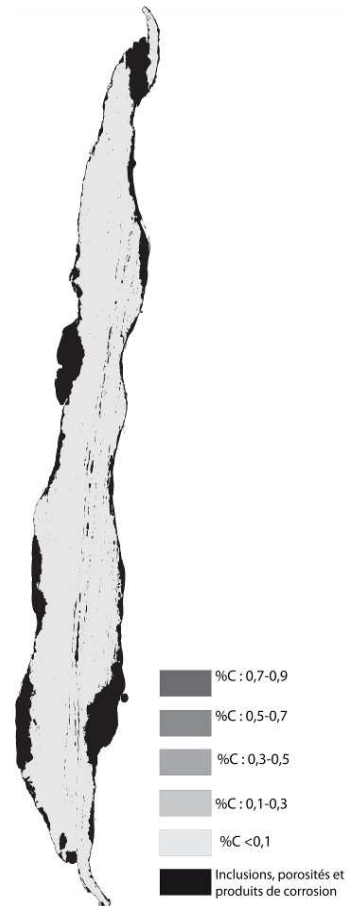
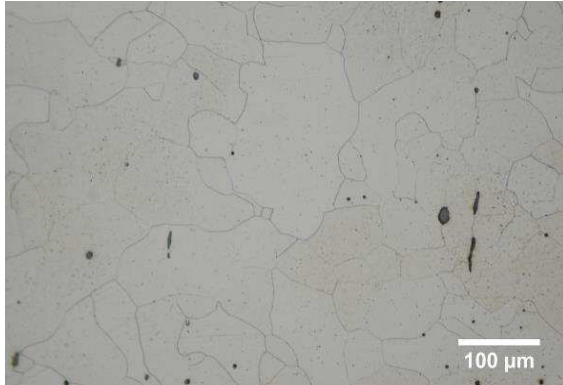


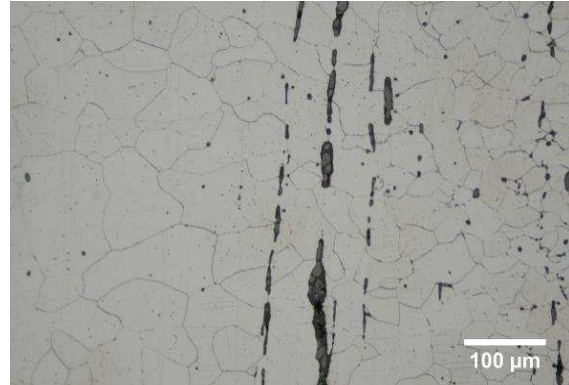
Schéma correspondant



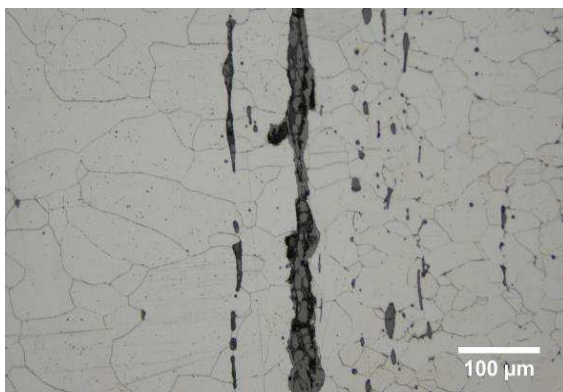
Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



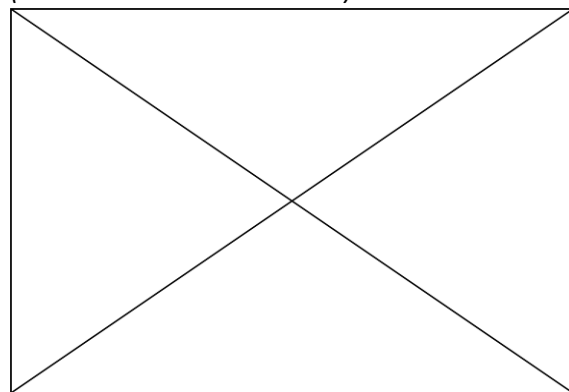
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
3	2

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Indirect	>0,99
Abaque	Indirect	
PROCEDE	Indirect	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon 1002-2-21

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : Valenciennes

Numéro de l'élément d'armure : 1002-2-21

Lieu de conservation :

Lieu de découverte : Site archéologique de l'atelier des fondeurs Perdry (Valenciennes)

Description : Plastron appartenant au lot de cuirasses découvert lors des fouilles de l'atelier d'un fondeur (Jacques Perdry) à Valenciennes daté de la première moitié du XVII^e siècle et destiné à la cavalerie légère (P. Korpiun, 2010, p.6)

Datation : XVII^e siècle (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Indéterminée

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Plastron

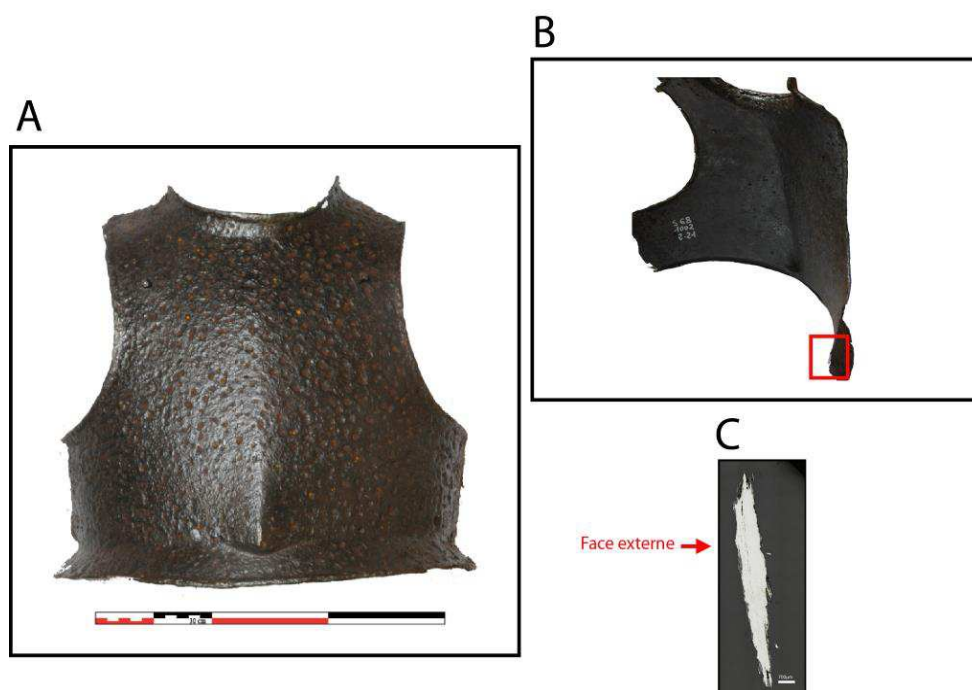
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique : (P. Korpiun, 2010)

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé sur le bord latéral droit du plastron

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[<50]	Non résolue	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
1,9	0,10	0,06	127 ($\sigma=16$)	Non dosé	Non

Commentaires :

Cet échantillon présente la structure d'un acier faiblement carburé, légèrement hétérogène en teneur en carbone. En effet une bande plus carburée est présente sur le bord droit de l'échantillon.

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

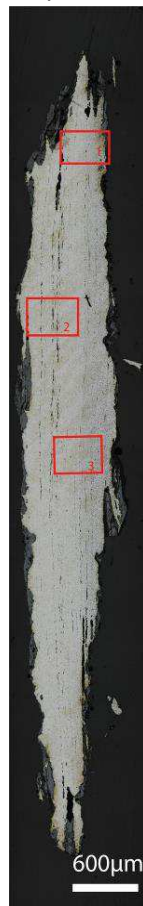
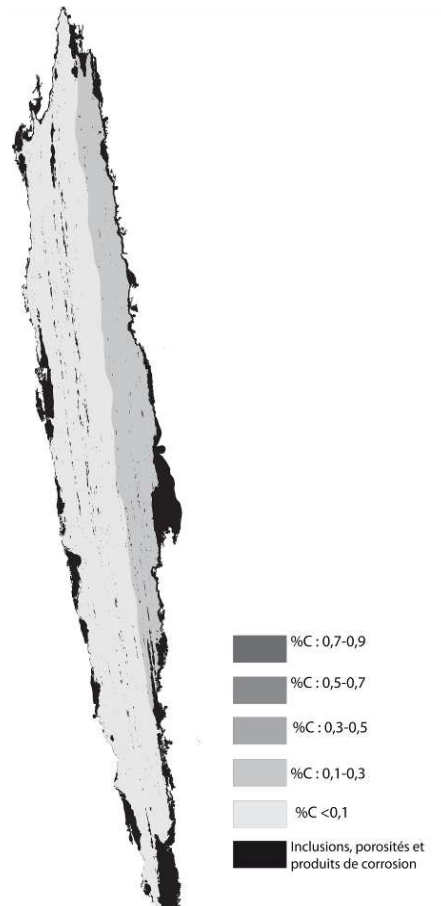


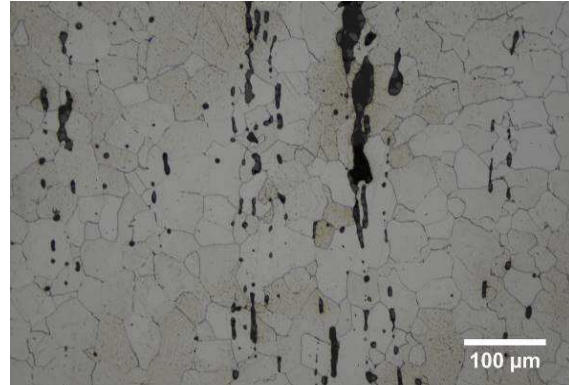
Schéma correspondant



Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



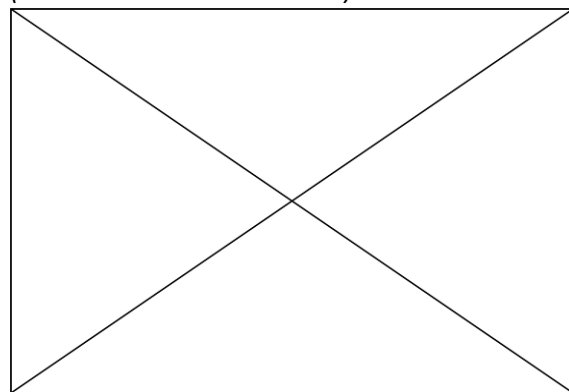
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
3	3

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Indirect	0,74
Abaque	Indéterminé	
PROCEDE	Indirect	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon 1002-6-22

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : Valenciennes

Numéro de l'élément d'armure : 1002-6-22

Lieu de conservation :

Lieu de découverte : Site archéologique de l'atelier des fondeurs Perdry (Valenciennes)

Description : Plastron appartenant au lot de cuirasses découvert lors des fouilles de l'atelier d'un fondeur (Jacques Perdry) à Valenciennes daté de la première moitié du XVII^e siècle et destiné à la cavalerie légère (P. Korpiun, 2010, p.6)

Datation : XVII^e siècle (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Indéterminée

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Plastron

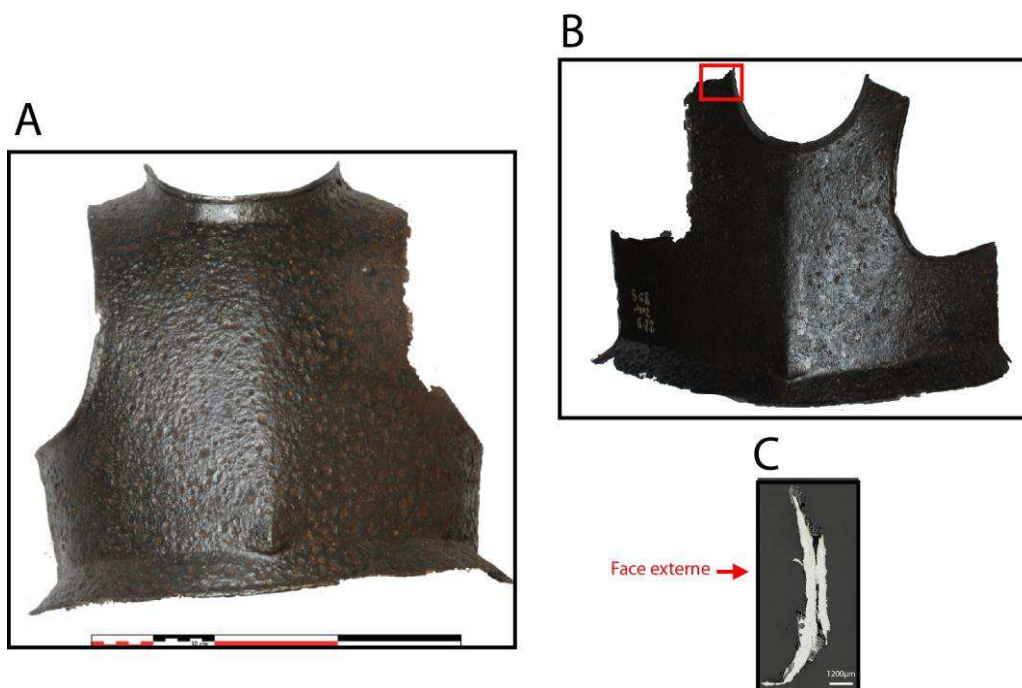
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique : (P. Korpiun, 2010)

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé sur le bord supérieur gauche du plastron au niveau de l'épaule.

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[50-200]	Non résolue	Non	Non	Non	Oui

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
4,1	0,20	0,14	149 ($\sigma=27$)	Non dosé	Non

Commentaires :

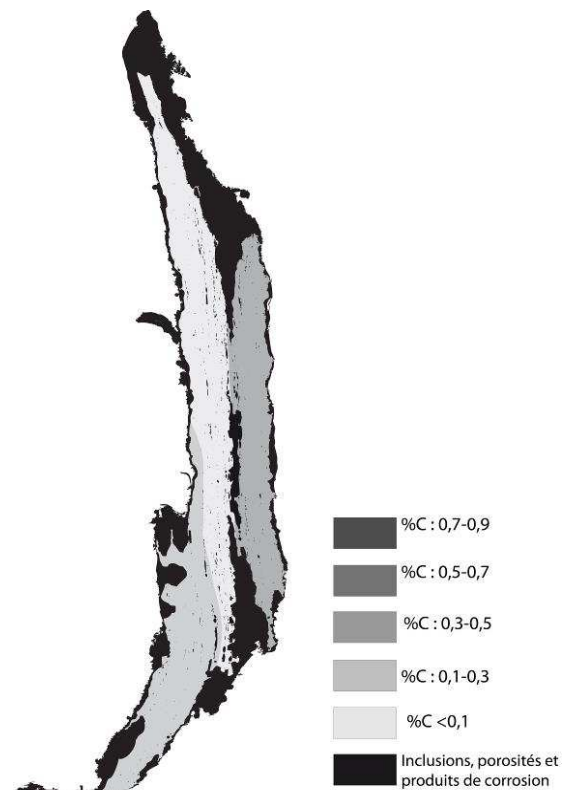
Cet échantillon présente la structure d'un acier faiblement carburé, hétérogène en teneur en carbone. Trois bandes se distinguent par leur teneur en carbone et la taille des grains variable de la ferrite.

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)



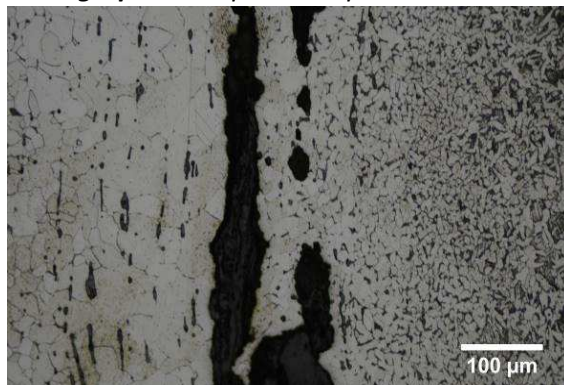
Schéma correspondant



Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



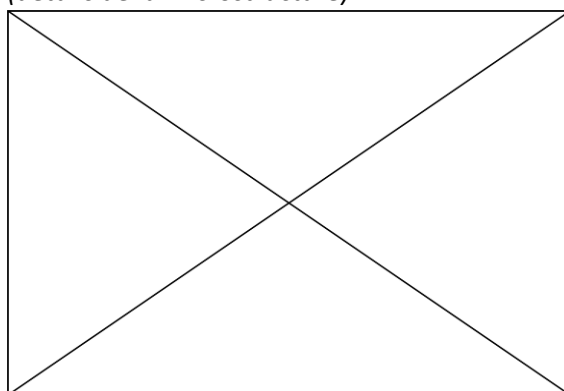
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
3	2

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Indirect	0,76
Abaque	Indéterminé	
PROCEDE	Indirect	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon 1002-10-14

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : Valenciennes

Numéro de l'élément d'armure : 1002-10-14

Lieu de conservation :

Lieu de découverte : Site archéologique de l'atelier des fondeurs Perdry (Valenciennes)

Description : Plastron appartenant au lot de cuirasses découvert lors des fouilles de l'atelier d'un fondeur (Jacques Perdry) à Valenciennes daté de la première moitié du XVII^e siècle et destiné à la cavalerie légère (P. Korpiun, 2010, p.6)

Datation : XVII^e siècle (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Indéterminée

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Plastron

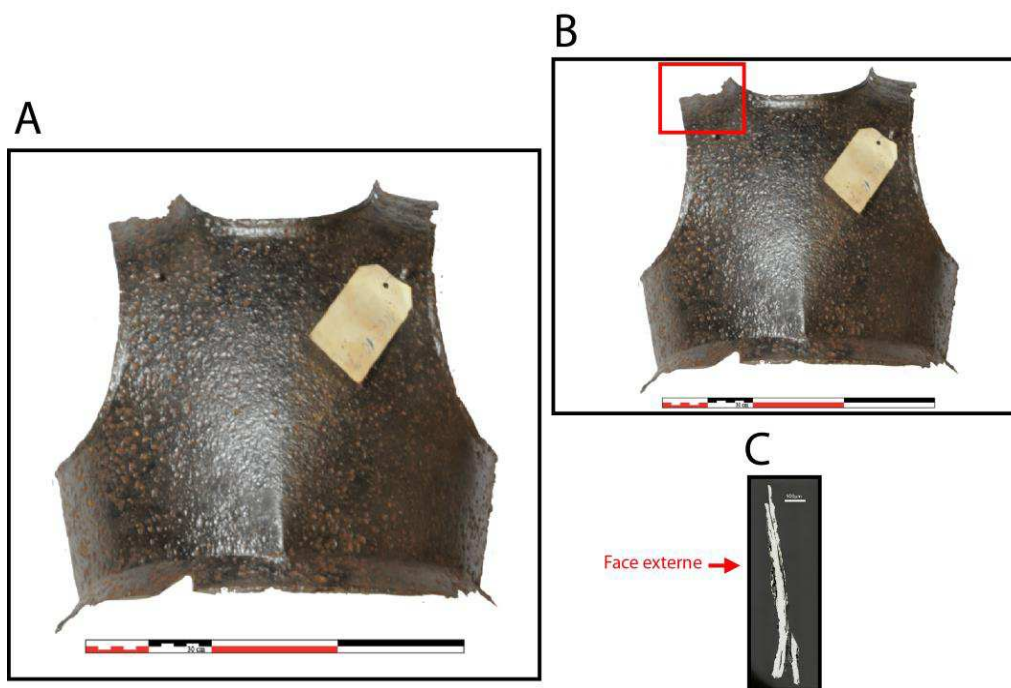
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique : (P. Korpiun, 2010)

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé sur le bord supérieur gauche du plastron au niveau de l'épaule.

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[<50]	Non résolue	Non	Non	Oui	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
2,3	0,41	0,24	183 ($\sigma=24$)	Non dosé	Non

Commentaires :

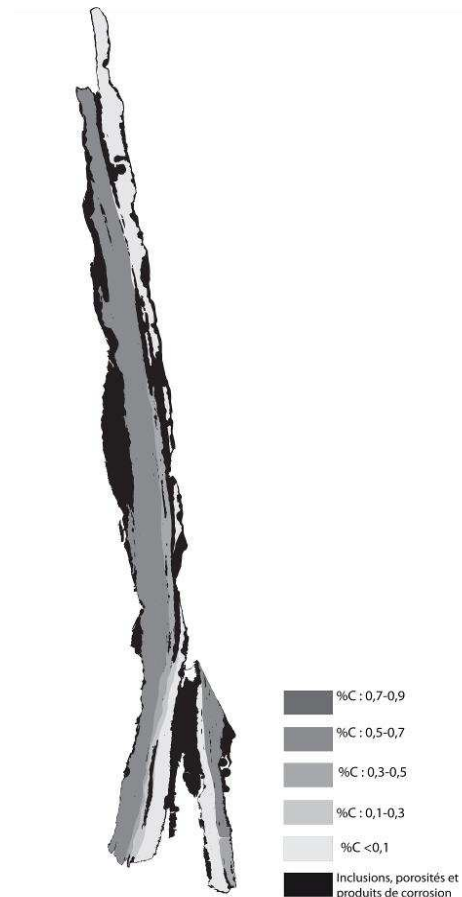
Cet échantillon présente la structure d'un acier moyennement carburé, hétérogène en teneur en carbone. En effet un gradient de teneur en carbone est visible du bord gauche au bord droit de l'échantillon.

Analyses métallographiques

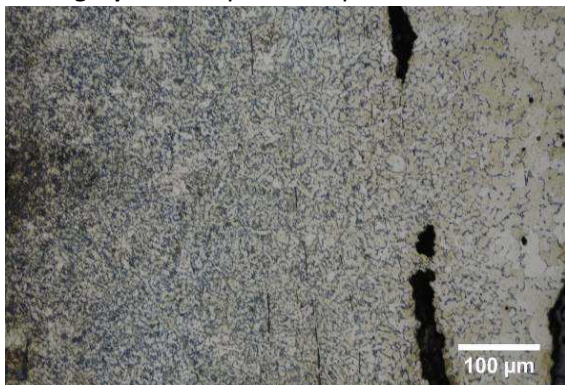
Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)



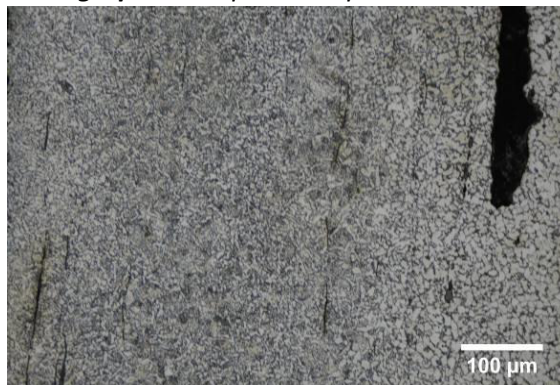
Schéma correspondant



Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



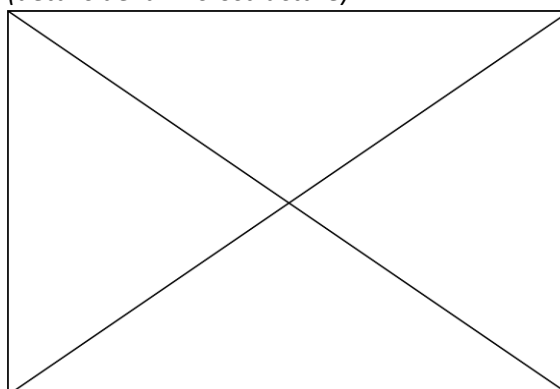
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
5	1

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Indirect	0,85
Abaque	Indéterminé	
PROCEDE	Indirect¹⁰	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

¹⁰ La présence de fortes teneurs en Ti, V et Cr (>1%mass) dans certaines inclusions renforce cette conclusion

Résumé des analyses menées sur l'échantillon "3-4"

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : Valenciennes

Numéro de l'élément d'armure : "3-4"

Lieu de conservation :

Lieu de découverte : Site archéologique de l'atelier des fondeurs Perdry (Valenciennes)

Description : Plastron appartenant au lot de cuirasses découvert lors des fouilles de l'atelier d'un fondeur (Jacques Perdry) à Valenciennes daté de la première moitié du XVII^e siècle et destiné à la cavalerie légère (P. Korpiun, 2010, p.6)

Datation : XVII^e siècle (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Indéterminée

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Plastron

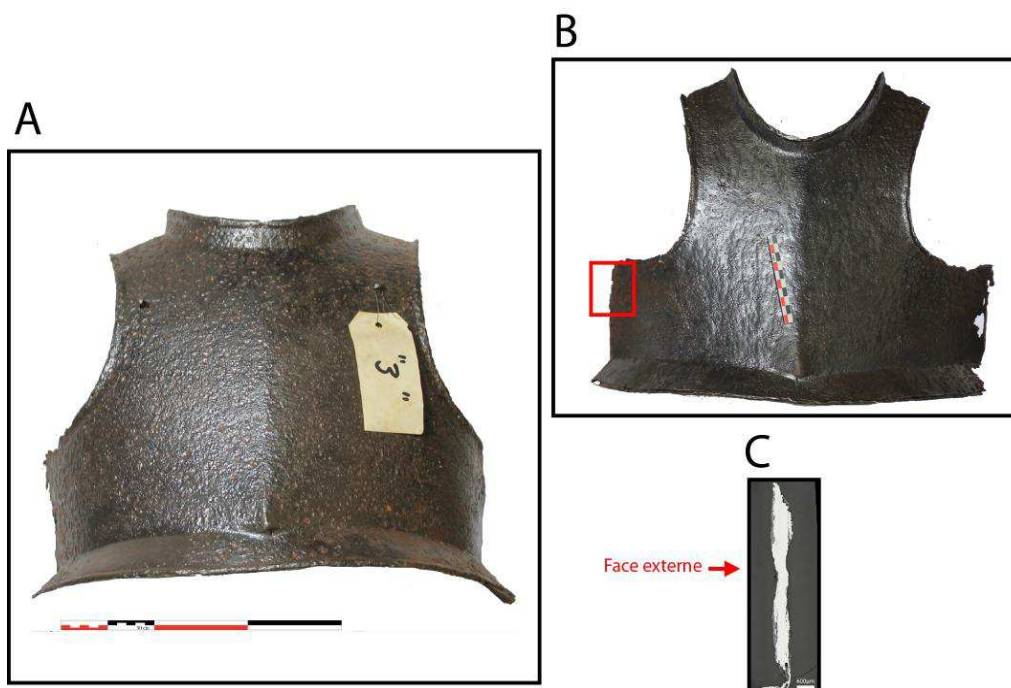
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique : (P. Korpiun, 2010)

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé sur le bord latéral gauche du plastron

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[50-200]	Non résolue	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
1,6	0,11	0,07	137 ($\sigma=15$)	<0,1	Oui

Commentaires :

Cet échantillon présente la structure d'un acier faiblement carburé, hétérogène en teneur en carbone. Deux bandes de teneurs en carbone distinctes sont visibles.

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

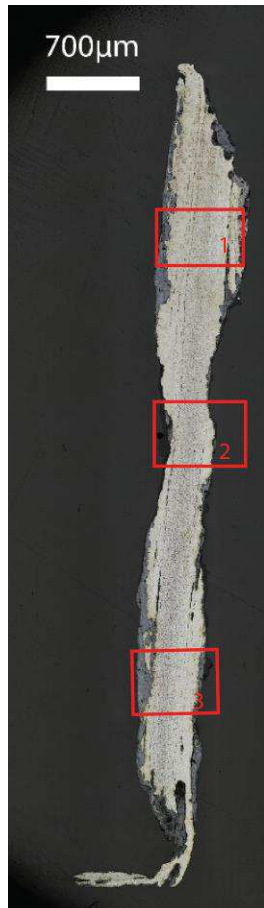
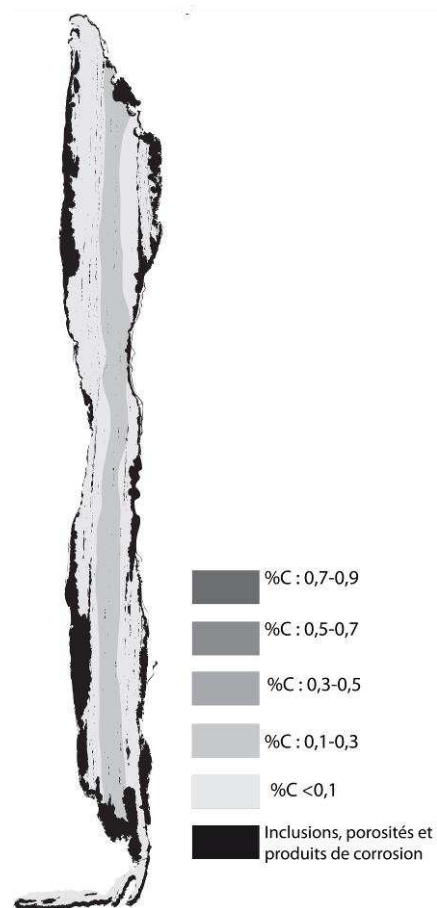
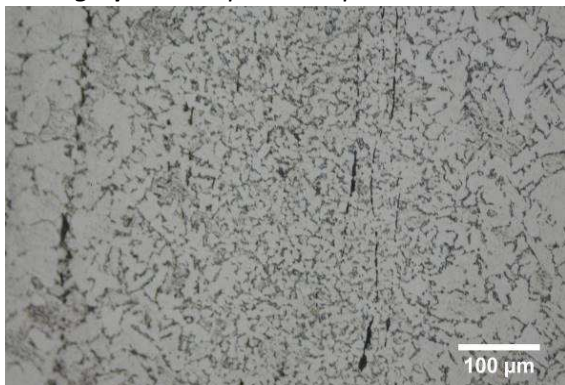


Schéma correspondant



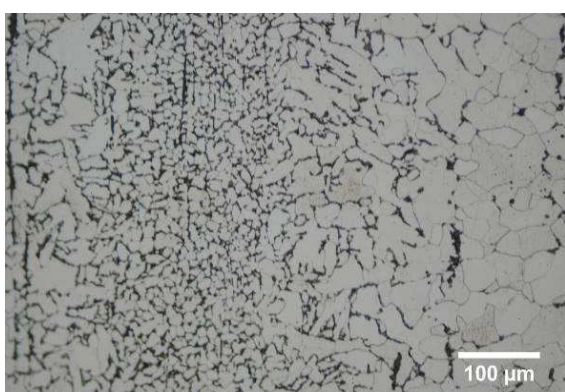
Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



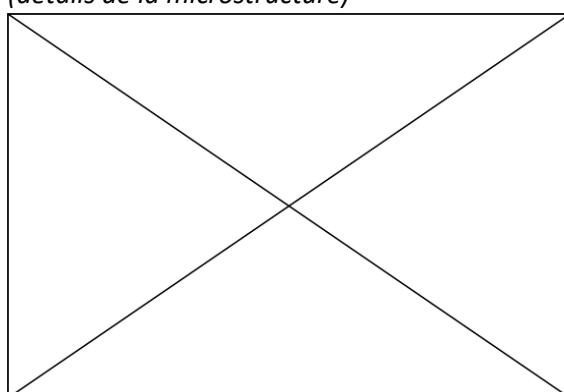
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
6	6

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Indirect	0,95
Abaque	Indéterminé	
PROCEDE	Indirect	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon 1002-3-1

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : Valenciennes

Numéro de l'élément d'armure : 1002-3-1

Lieu de conservation :

Lieu de découverte : Site archéologique de l'atelier des fondeurs Perdry (Valenciennes)

Description : Plastron appartenant au lot de cuirasses découvert lors des fouilles de l'atelier d'un fondeur (Jacques Perdry) à Valenciennes daté de la première moitié du XVII^e siècle et destiné à la cavalerie légère (P. Korpiun, 2010, p.6)

Datation : XVII^e siècle (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Indéterminée

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Plastron

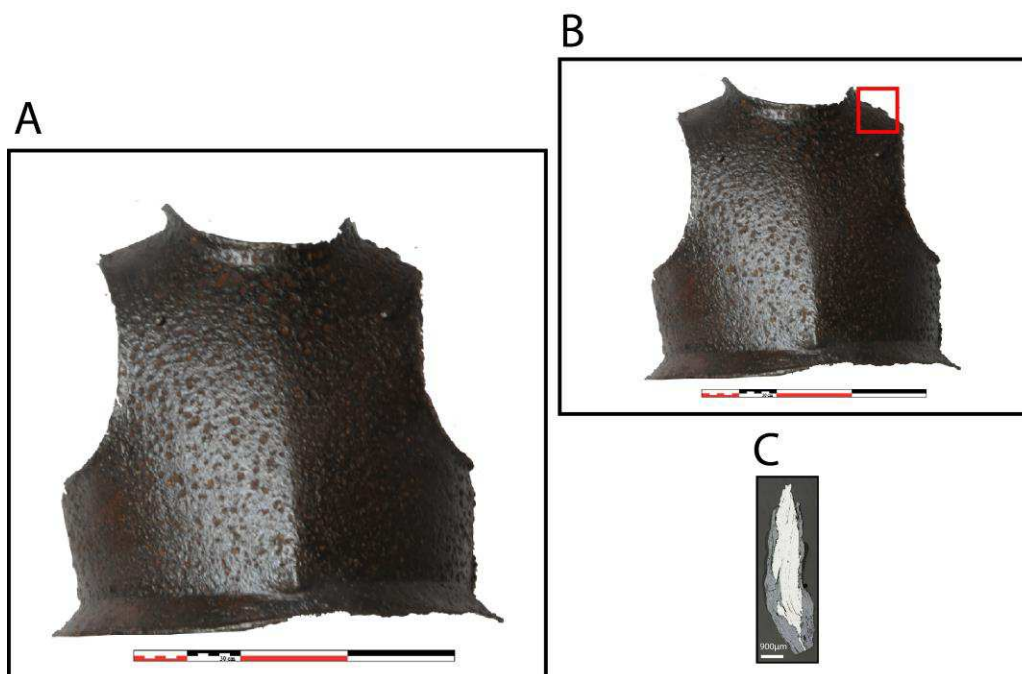
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique : (P. Korpiun, 2010)

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé sur le bord supérieur gauche du plastron au niveau de l'épaule.

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[50-200]	Non résolue	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
2,5	0,06	0,00	107 ($\sigma = 7$)	<0,1	Non

Commentaires :

Cet échantillon est un acier très faiblement carburé. Quelques amas de perlite sont présents par endroit.

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

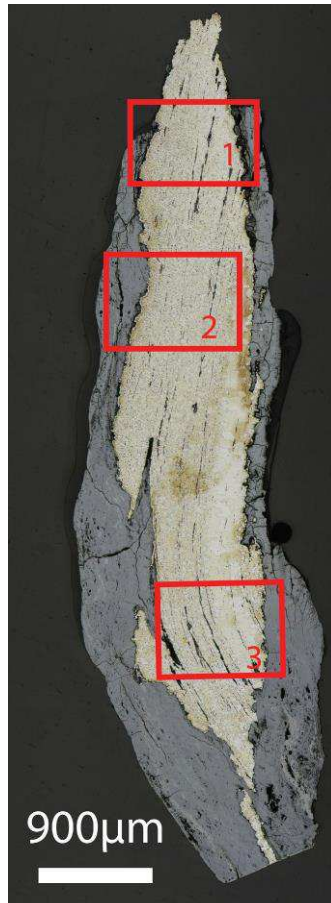
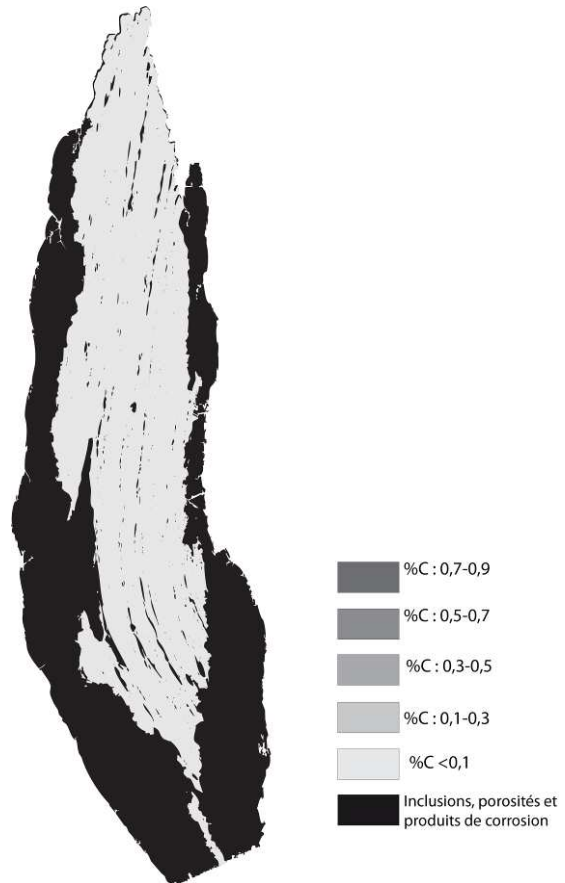
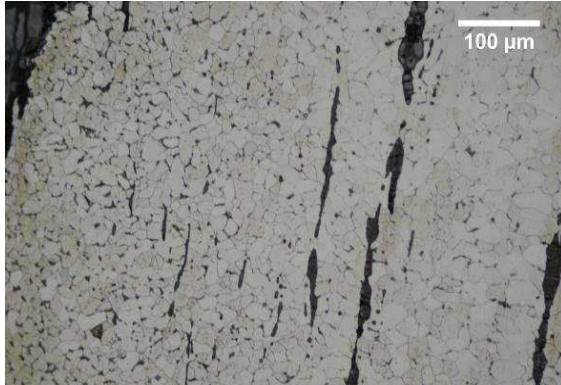


Schéma correspondant



Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



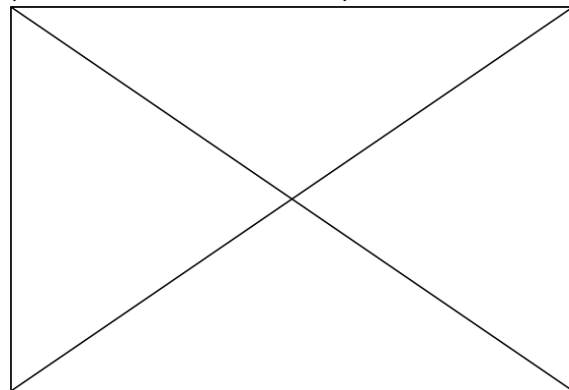
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
4	1,2

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Indirect	>0,99
Abaque	Indirect	
PROCEDE	Indirect	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon 1002-2-6

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : Valenciennes

Numéro de l'élément d'armure : 1002-2-6

Lieu de conservation :

Lieu de découverte : Site archéologique de l'atelier des fondeurs Perdry (Valenciennes)

Description : Plastron appartenant au lot de cuirasses découvert lors des fouilles de l'atelier d'un fondeur (Jacques Perdry) à Valenciennes daté de la première moitié du XVII^e siècle et destiné à la cavalerie légère (P. Korpiun, 2010, p.6)

Datation : XVII^e siècle (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Indéterminée

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Plastron

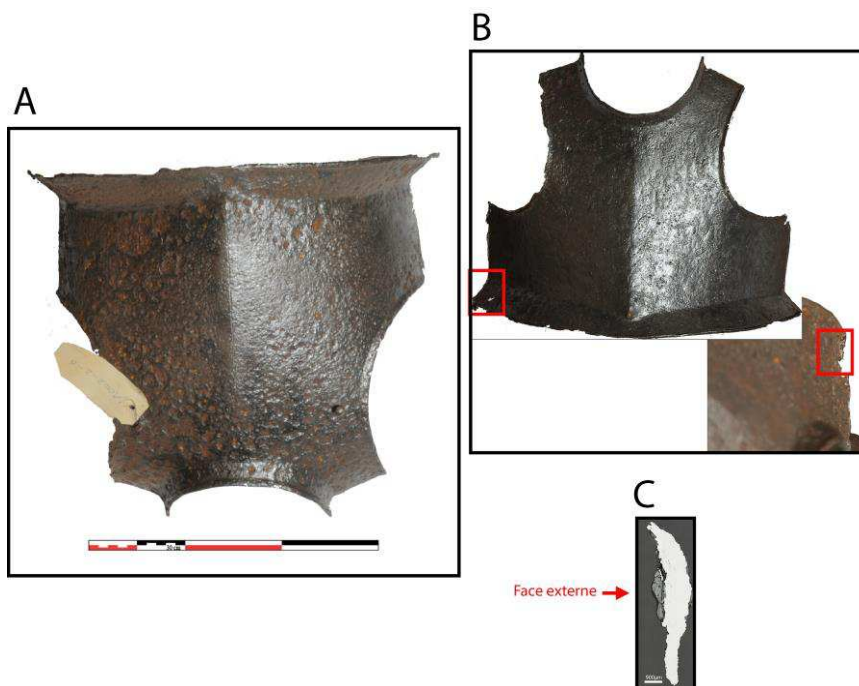
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique : (P. Korpiun, 2010)

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé sur le bord latéral gauche du plastron

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[50-200]	Non résolue	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
0,6	0,06	0,00	113 ($\sigma=6$)	<0,1	Non

Commentaires :

Cet échantillon possède une structure ferritique.

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon

(après attaque au Nital 3%)

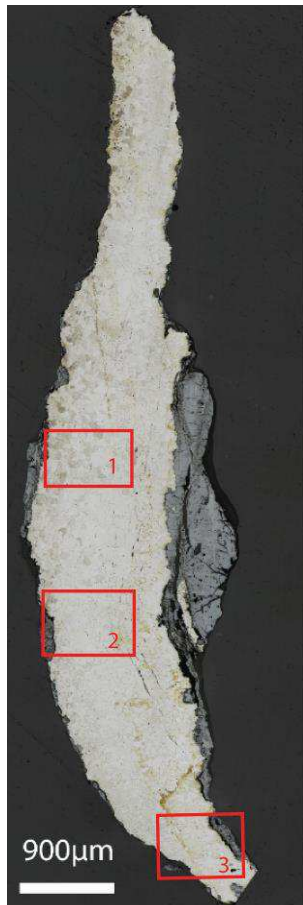
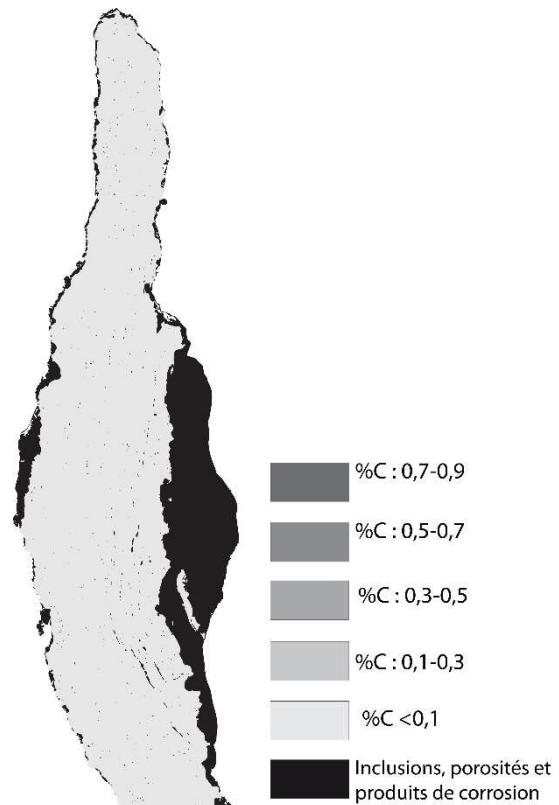
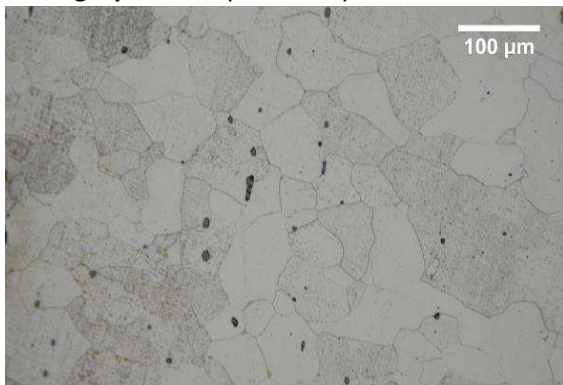


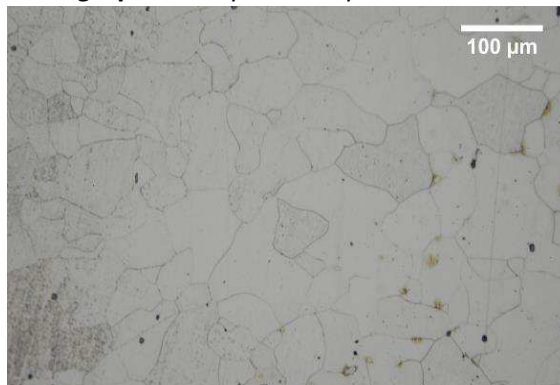
Schéma correspondant



Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



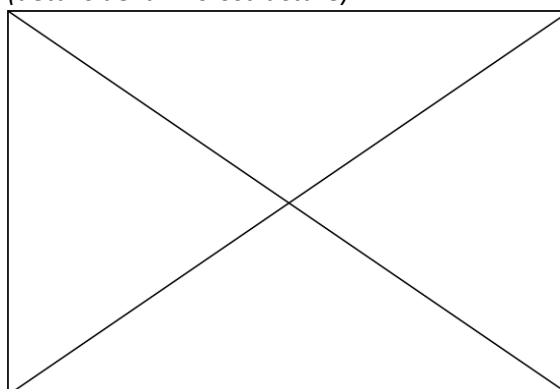
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
3	2,3

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Indirect	>0,99
Abaque	Indirect	
PROCEDE	Indirect	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon 1002-2-16

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : Valenciennes

Numéro de l'élément d'armure : 1002-2-16

Lieu de conservation :

Lieu de découverte : Site archéologique de l'atelier des fondeurs Perdry (Valenciennes)

Description : Plastron appartenant au lot de cuirasses découvert lors des fouilles de l'atelier d'un fondeur (Jacques Perdry) à Valenciennes daté de la première moitié du XVII^e siècle et destiné à la cavalerie légère (P. Korpiun, 2010, p.6)

Datation : XVII^e siècle (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Indéterminée

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Plastron

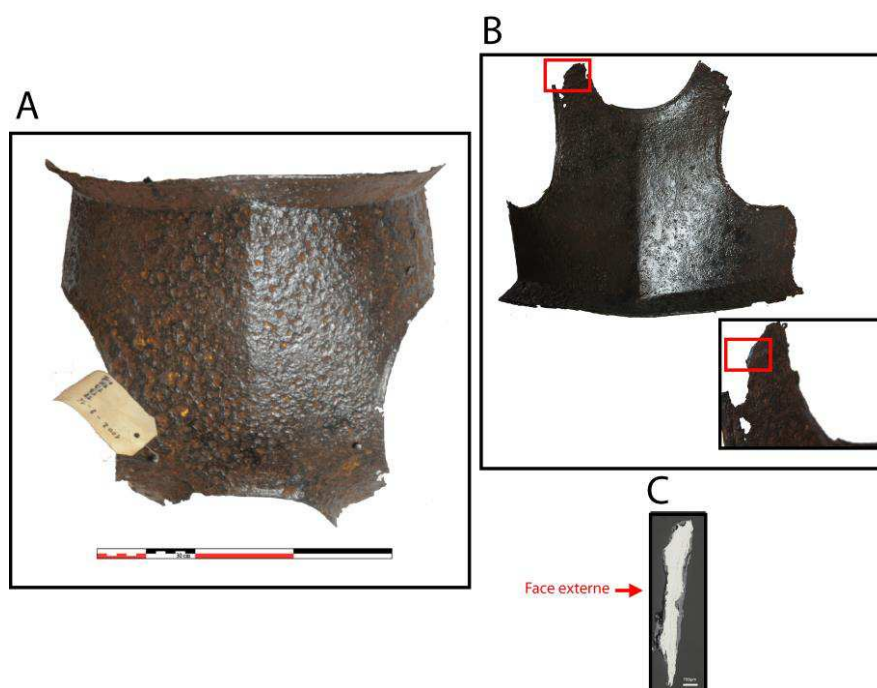
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique : (P. Korpiun, 2010)

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé sur le bord supérieur gauche du plastron au niveau de l'épaule.

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[<50]	Lamellaire	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
2,4	0,24	0,17	181 ($\sigma=30$)	Non dosé	Non

Commentaires :

Cet échantillon présente la structure d'un acier faiblement carburé, légèrement hétérogène en teneur en carbone. En effet une bande plus carburée est présente au centre de l'échantillon.

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon

(après attaque au Nital 3%)

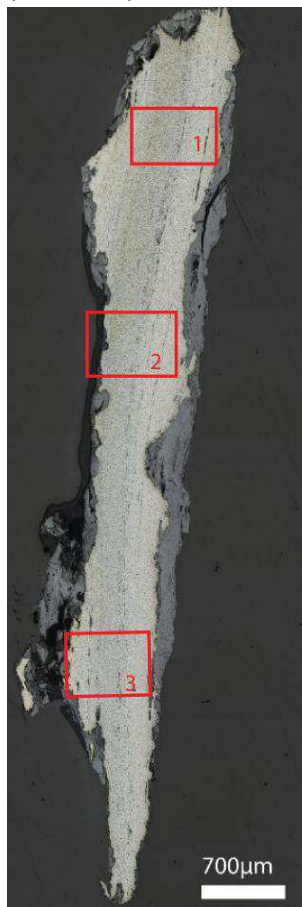
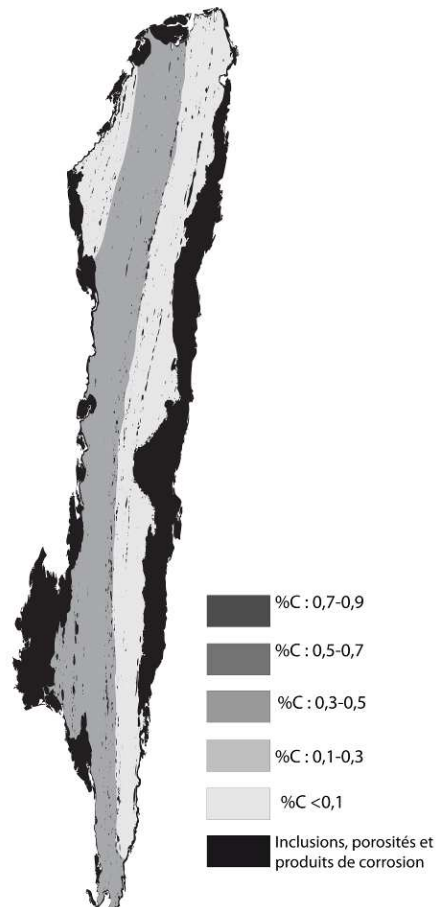
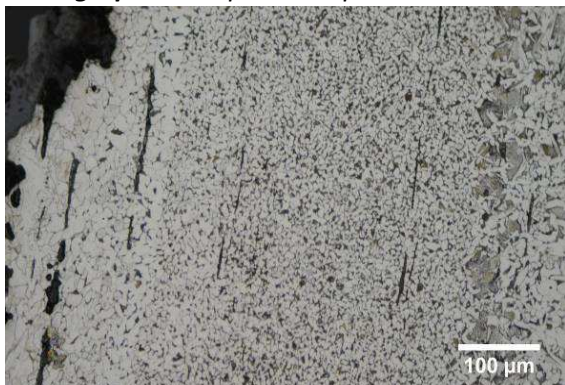


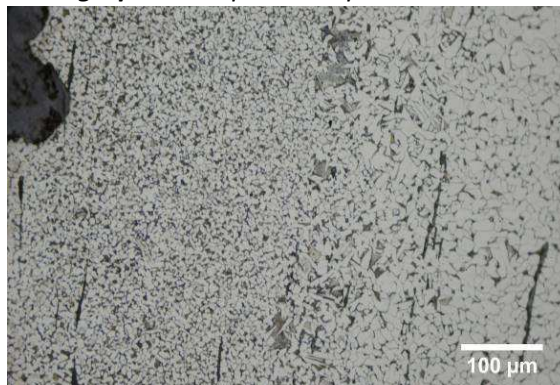
Schéma correspondant



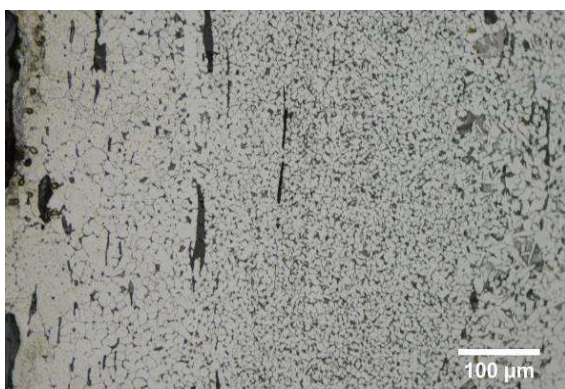
Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



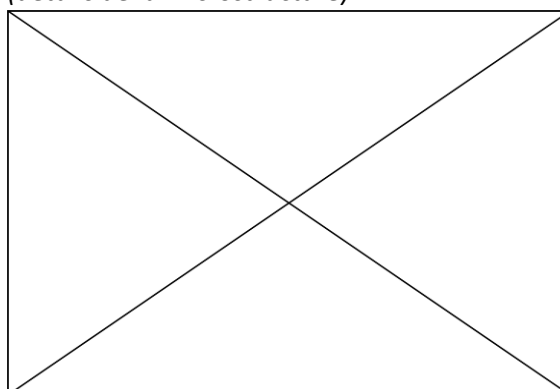
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
1,2,5	

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Indirect	$p(\text{classe 5}) = 0,85$, $p(\text{classe 1}) = 0,98$ $p(\text{classe 2}) = 0,90$
Abaque	classe 1: Indirect classe 2: Indirect classe 5: Indéterminé	
PROCEDE		Indirect

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon 1002-3-20

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : Valenciennes

Numéro de l'élément d'armure : 1002-3-20

Lieu de conservation :

Lieu de découverte : Site archéologique de l'atelier des fondeurs Perdry (Valenciennes)

Description : Plastron appartenant au lot de cuirasses découvert lors des fouilles de l'atelier d'un fondeur (Jacques Perdry) à Valenciennes daté de la première moitié du XVIIIe siècle et destiné à la cavalerie légère (P. Korpiun, 2010, p.6)

Datation : XVIIIe siècle (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Indéterminée

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Plastron

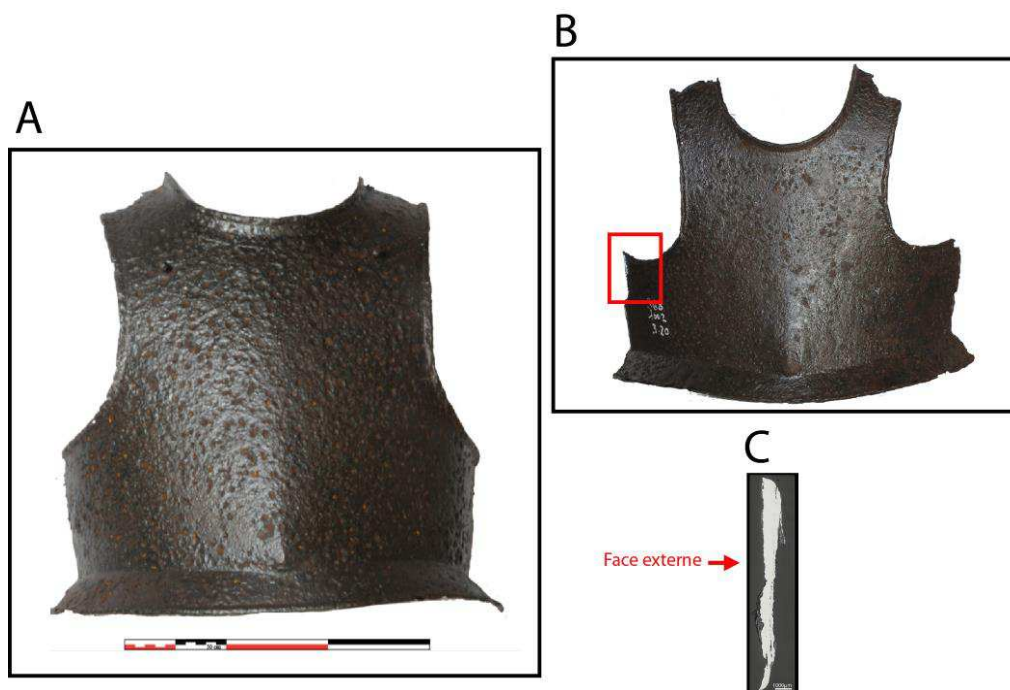
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique : (P. Korpiun, 2010)

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue en coupe transversale de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé sur le bord latéral gauche du plastron

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[50-200]	Lamellaire	Non	Oui	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
1,4	0,17	0,06	156 ($\sigma=16$)	Non dosé	Non

Commentaires :

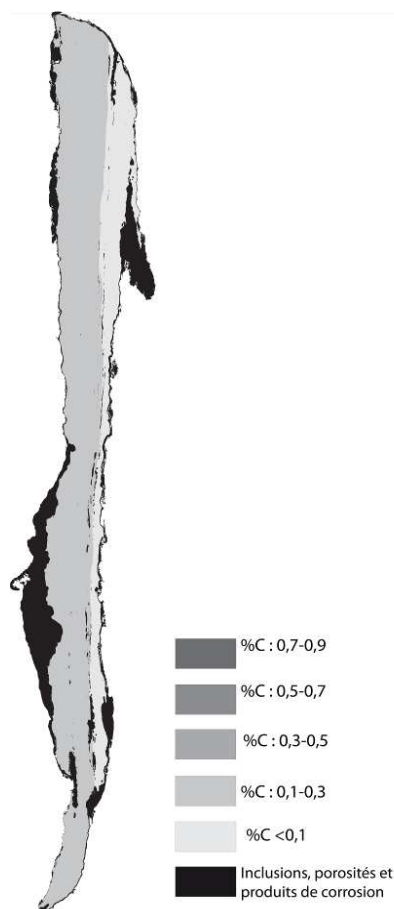
Cet échantillon est un acier faiblement carburé, légèrement hétérogène en teneur en carbone. En effet une bande plus carburée est présente sur l'extrémité gauche de l'échantillon. Des structures fantômes ont également été mises en évidence dans la partie la moins carburée. Elles témoignent de la présence de phosphore en solution solide dans le métal.

Analyses métallographiques

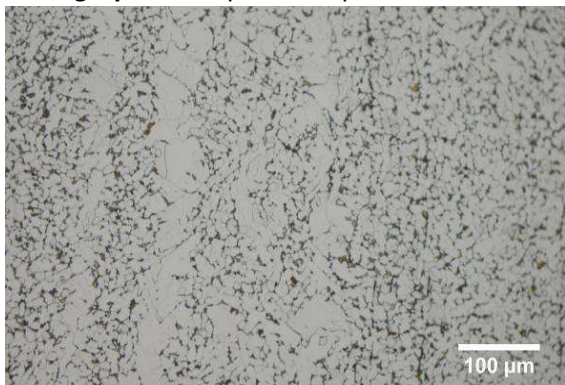
Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)



Schéma correspondant



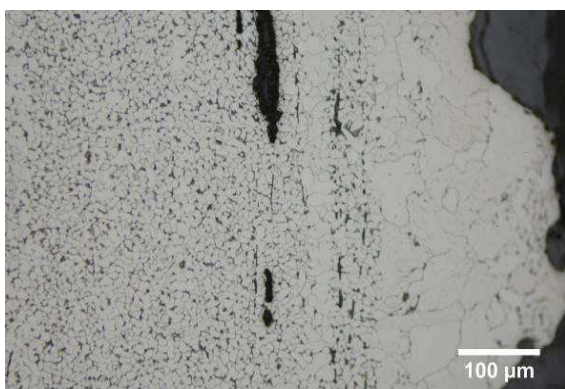
Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



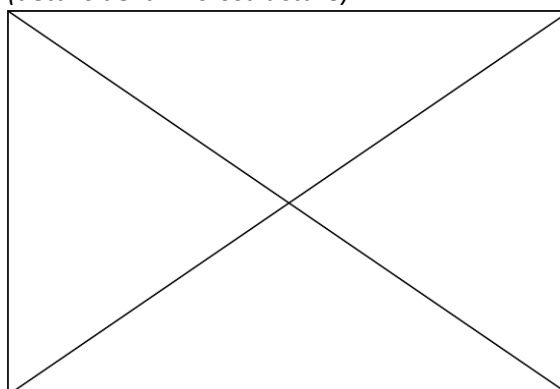
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
5	1,4

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Indirect	$p(\text{classe 1})=0,97$ $p(\text{classe 4})=0,89$
Abaque	Indéterminé	
PROCEDE	Indirect	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon A1654

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : A1654

Numéro de l'élément d'armure : A1654

Lieu de conservation : Hofjagd und Rüstkammer (Vienne)

Lieu de découverte :

Description : Une armure de cuirassier réalisée pour Maurice de Nassau (1567-1625) fabriquée au Pays Bas vers 1610 (A.Williams, 2003, p.839)

Datation : 1610 (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Pays Bas

Ville : Pays Bas

Élément de l'armure étudié : Indéterminé

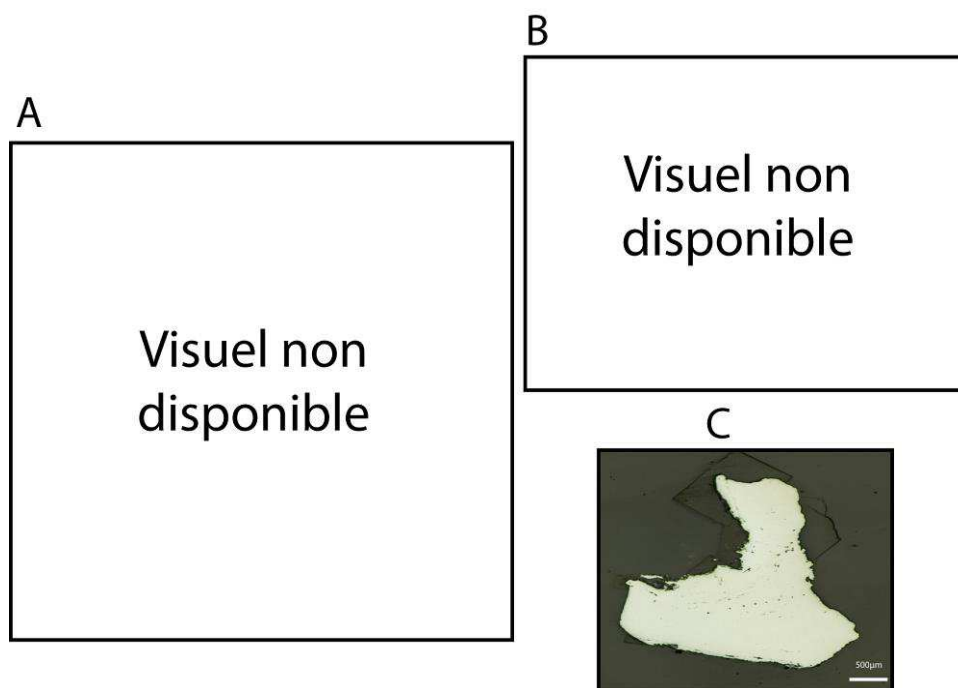
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique :

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé par Alan Williams sur la défense de cou.

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[50-200]	Non résolue	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
1,0	0,06	0,00	176 ($\sigma=17$)	<0,1	Non

Commentaires :

Cet échantillon possède une structure ferritique.

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

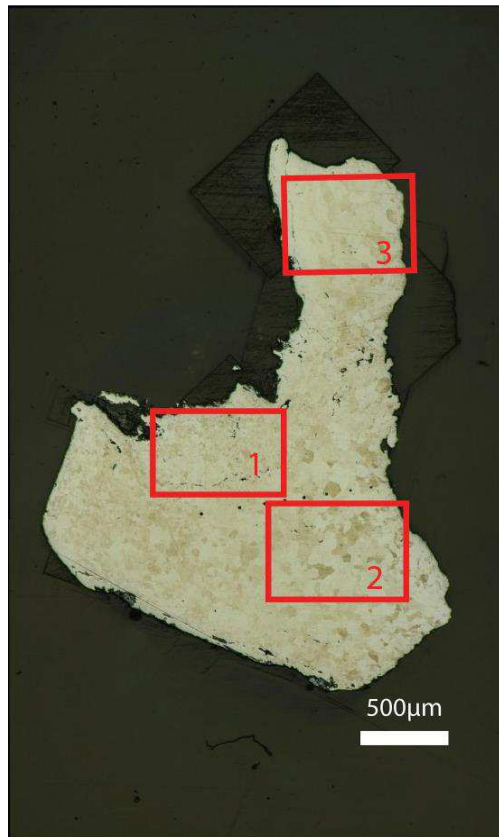
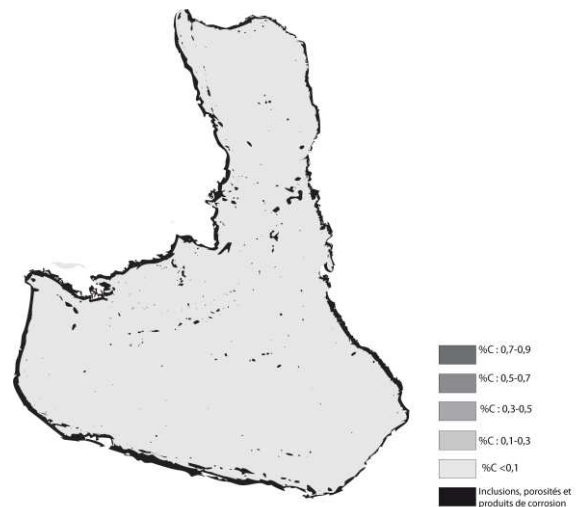
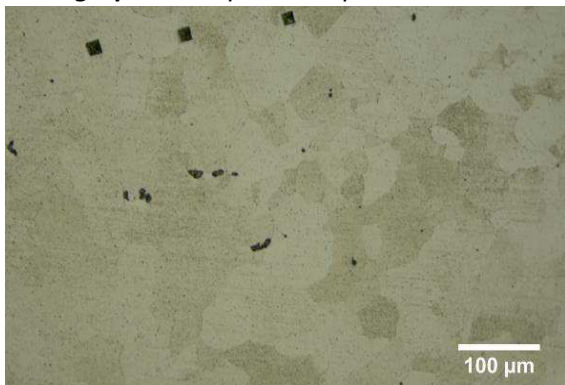


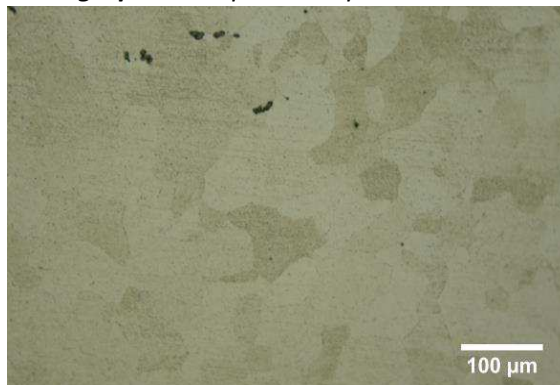
Schéma correspondant



Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



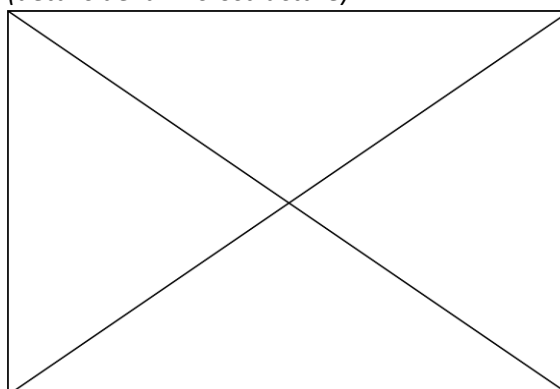
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
5	1,2

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Indirect	$p(\text{classe1}) > 0,99$ $p(\text{classe2}) = 0,95$
Abaque	Indirect	
PROCEDE	Indirect	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon W.C A.152

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : W.C A.152

Numéro de l'élément d'armure : W.C A.152

Lieu de conservation : Wallace Collection (Londres)

Lieu de découverte :

Description : "Armet, the skull having a boxed medial ridge, the strong brow reinforce cusped forming five points along its upper edge, including the two upper corners. The visor is unusually thin in front; it is perhaps later possibly 16th or 19th century" (Catalogue de la Wallace collection).

Datation : 1470-1510 (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Italie

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Armet

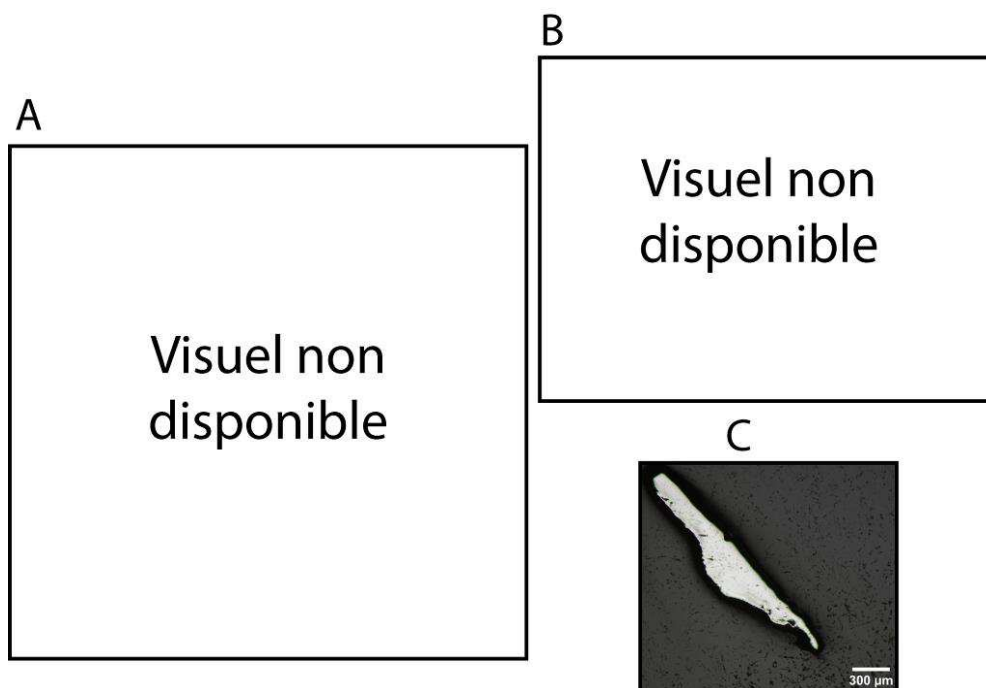
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Oui

Détails de la (ou des) marque(s) : Trois marques d'armuriers (1ère lettre "C")

Référence bibliographique :

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé par Alan Williams.

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (µm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
Ind	Lamellaire	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
1,2	0,60	0,00	242 ($\sigma=15$)	Non dosé	Non

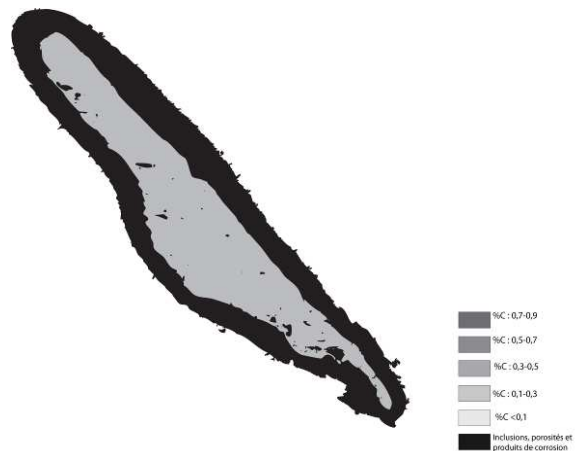
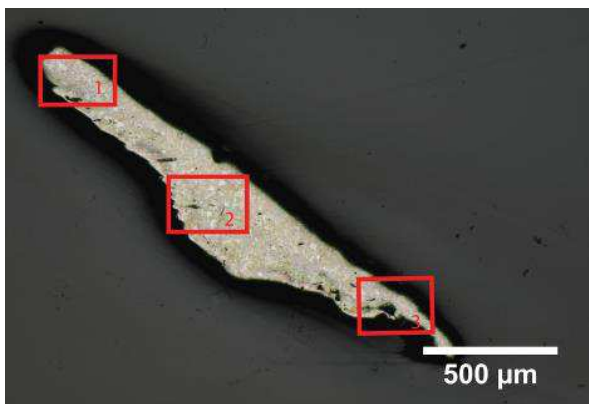
Commentaires :

Cet échantillon présente une structure ferrito perlitique. Il est fortement carburé (%C*>0,6)

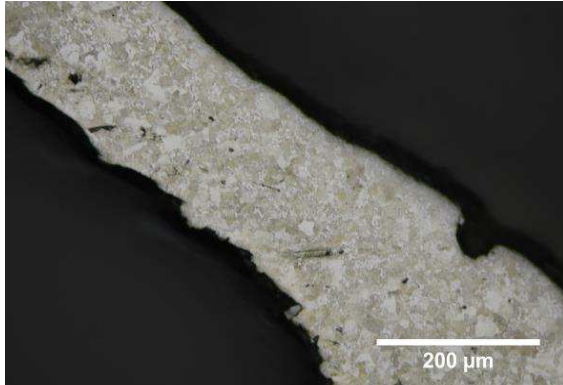
Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

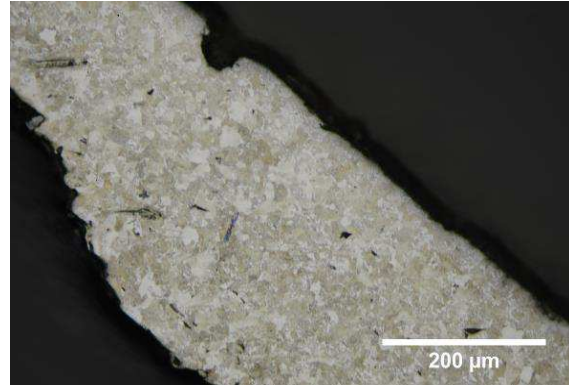
Schéma correspondant



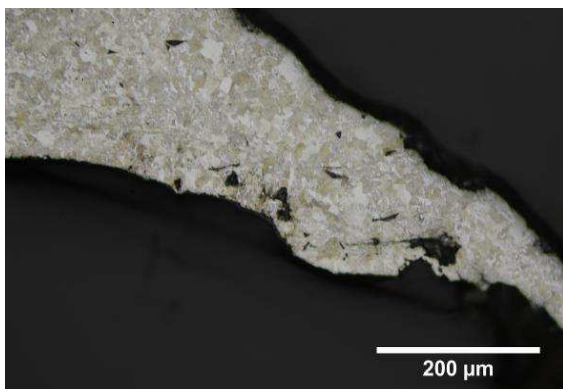
Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



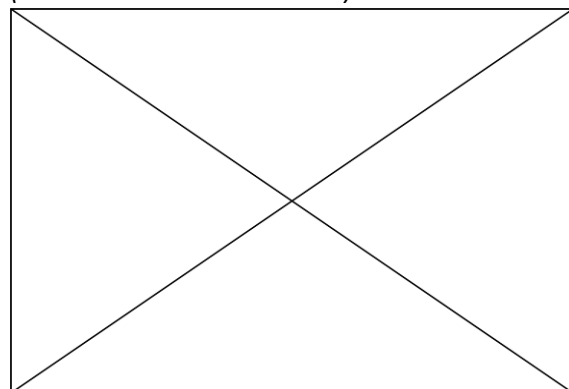
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
Non défini	Non défini

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Non défini	Non défini
Abaque	Non défini	
PROCEDE	Non défini	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon A 208

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : A 208

Numéro de l'élément d'armure : A 208

Lieu de conservation : Wallace Collection (Londres)

Lieu de découverte :

Description : « Backplate in the Gothic style made in seven pieces. The main plate covering the upper part of the back is cut to a V-shape at the top and the whole is fluted in imitation of civilian fashion. The edge are cut into cusps corresponding to the flutes" (Catalogue de la Wallace collection).

Datation : 1480 (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Allemagne

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Dossière

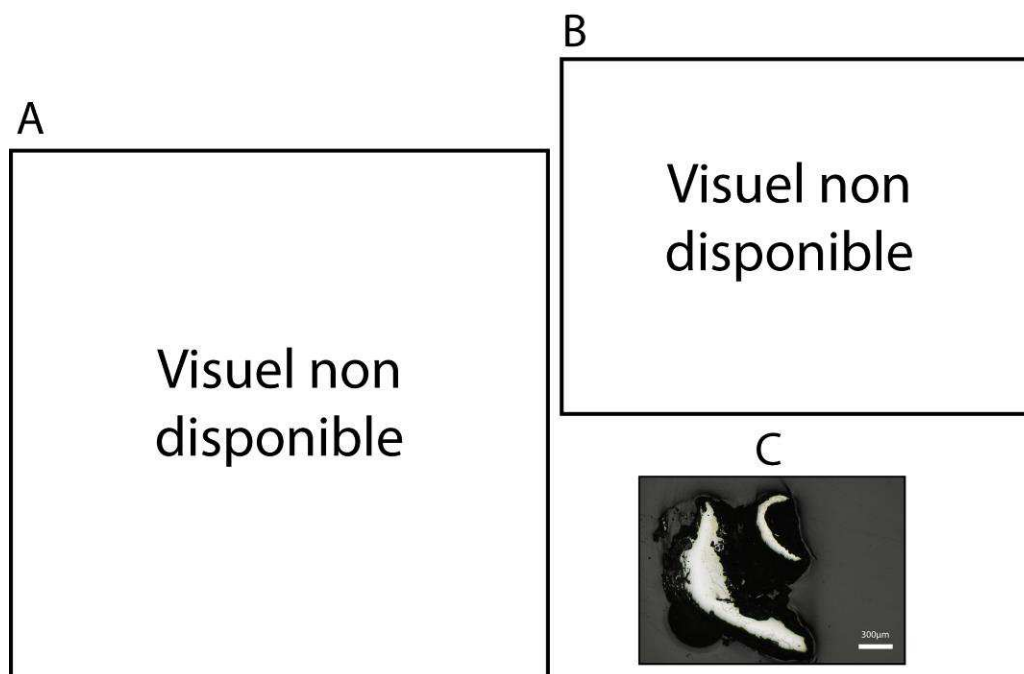
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Oui

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique :

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé par Alan Williams.

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (µm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[50-200]	Non résolue	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
0,2	0,06	0,00	179 (σ= 9)	<0,1	Non

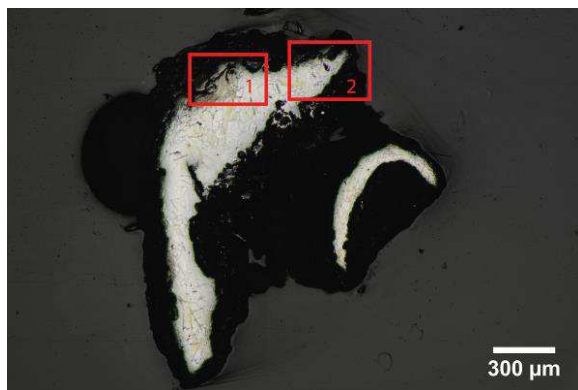
Commentaires :

Cet échantillon présente une structure entièrement ferritique

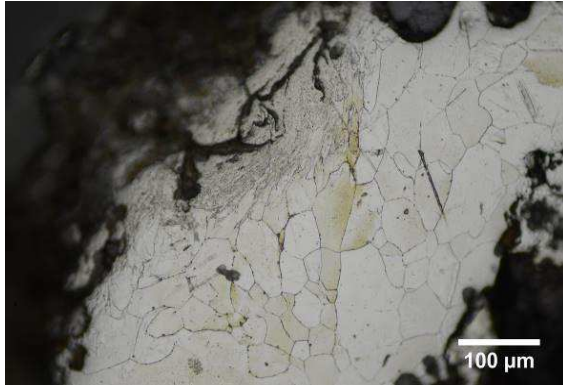
Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

Schéma correspondant



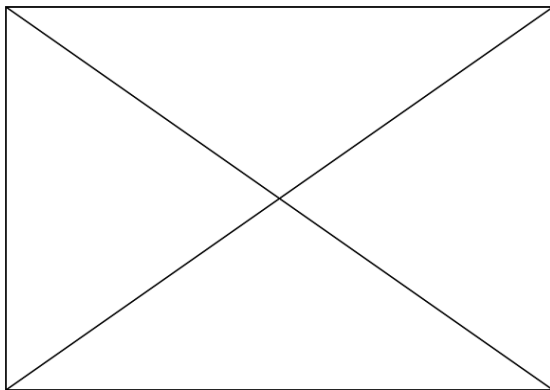
Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



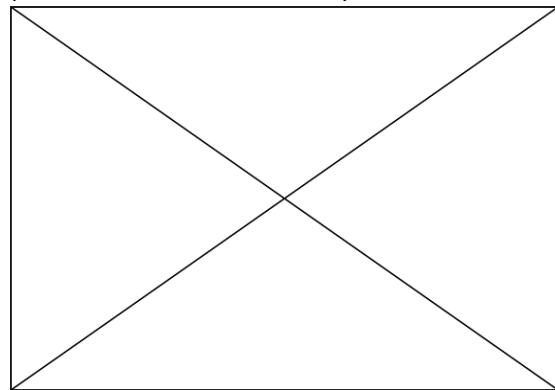
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
Non défini	Non défini

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Non défini	Non défini
Abaque	Non défini	
PROCEDE	Non défini	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon W.C A.73

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : W.C A.73

Numéro de l'élément d'armure : W.C A.73

Lieu de conservation : Wallace Collection (Londres)

Lieu de découverte :

Description : "Sallet, the skull slightly fluted ridged and lightly etched with alternate bands of floral scrolls on a hatched ground in the italian style. Fitted with a single tail-plate and brown reinforce both similarly etched" c.1500, Milan, Italy. (Catalogue de la Wallace collection).

Datation : ≈ 1500 (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Italie

Ville : Milan

Élément de l'armure étudié : Salade

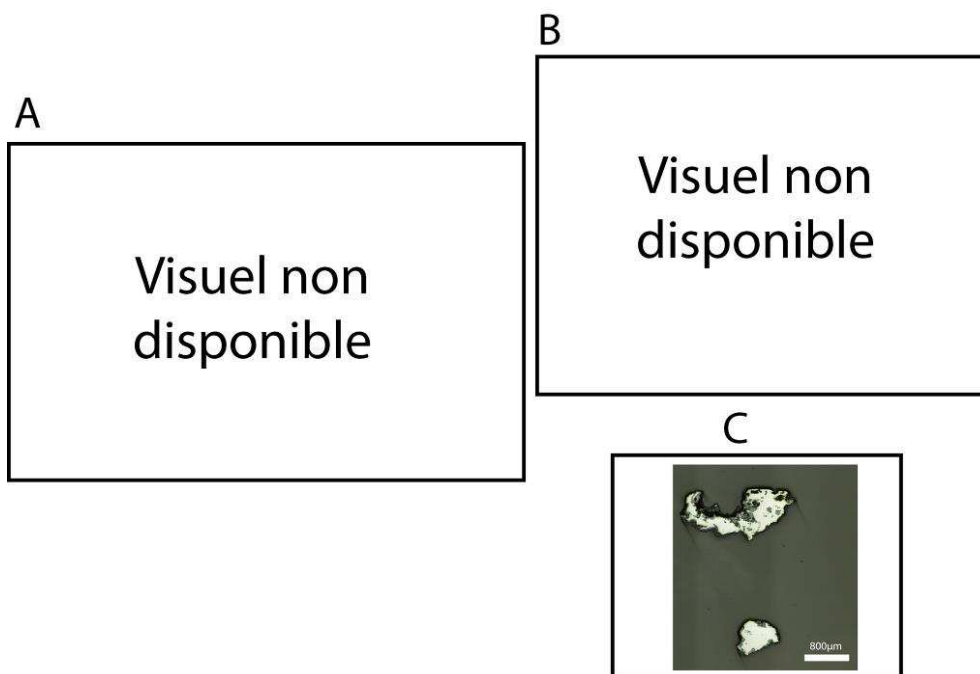
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique :

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé par Alan Williams.

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
Ind	Non résolue	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
4,2	0,59	0,03	287 ($\sigma=17$)	Non dosé	Non

Commentaires :

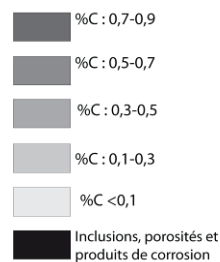
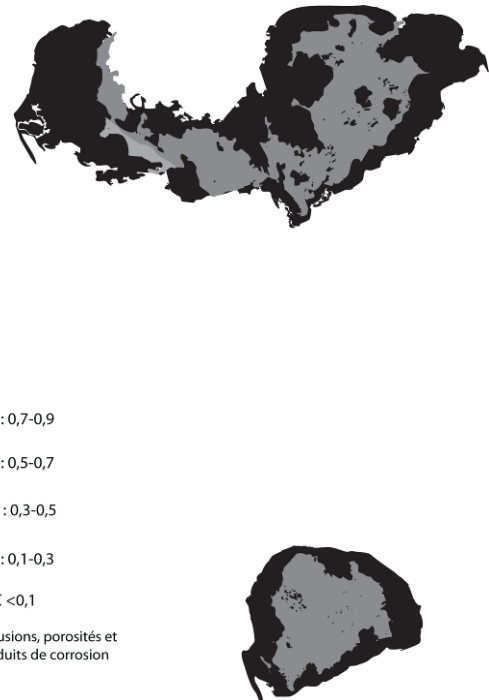
Cet échantillon présente la structure d'un acier fortement carburé de composition proche de l'eutectoïde. Quelques amas de ferrite sont visibles par endroit.

Analyses métallographiques

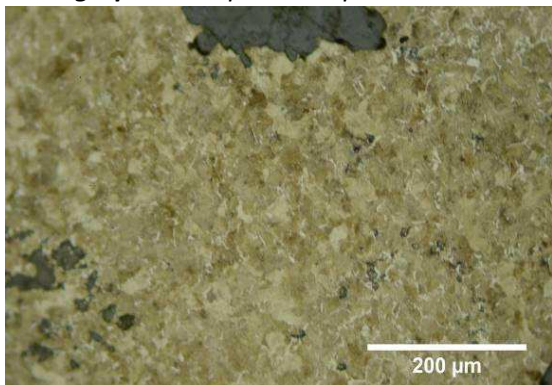
Mosaïque de l'échantillon (après attaque au Nital 3%)



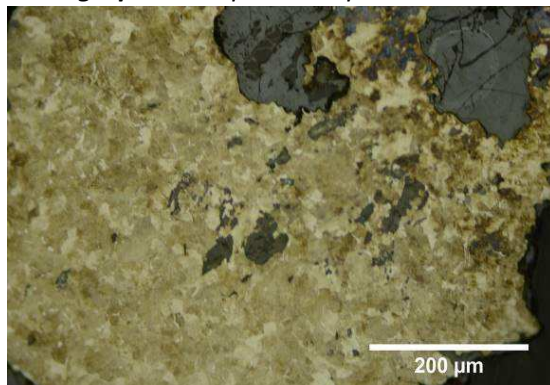
Schéma correspondant



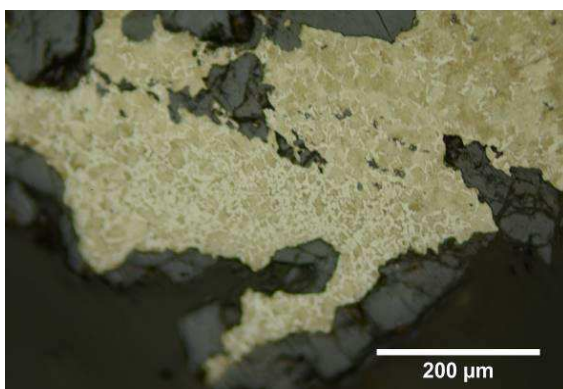
Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



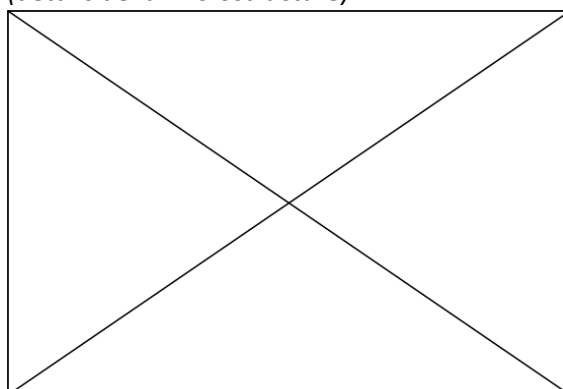
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
3	1

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Direct	<0,01
Abaque	Direct	
PROCEDE	Direct	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Oui	Non	Non	Oui	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon W.C A.215

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : W.C A.215

Numéro de l'élément d'armure : W.C A.215

Lieu de conservation : Wallace Collection (Londres)

Lieu de découverte :

Description : "Cuirass, "alla tedesca" composed of breastplate, backplate. The breastplate decorated in low relief with curved flutes radiating from the centre near the waist. The backplate decorated with sunken radiating flutes, the outer ones ending in volutes" c.1500-1520, North Italy (Catalogue de la Wallace Collection).

Datation : 1500-1520 (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Italie

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Cuirasse

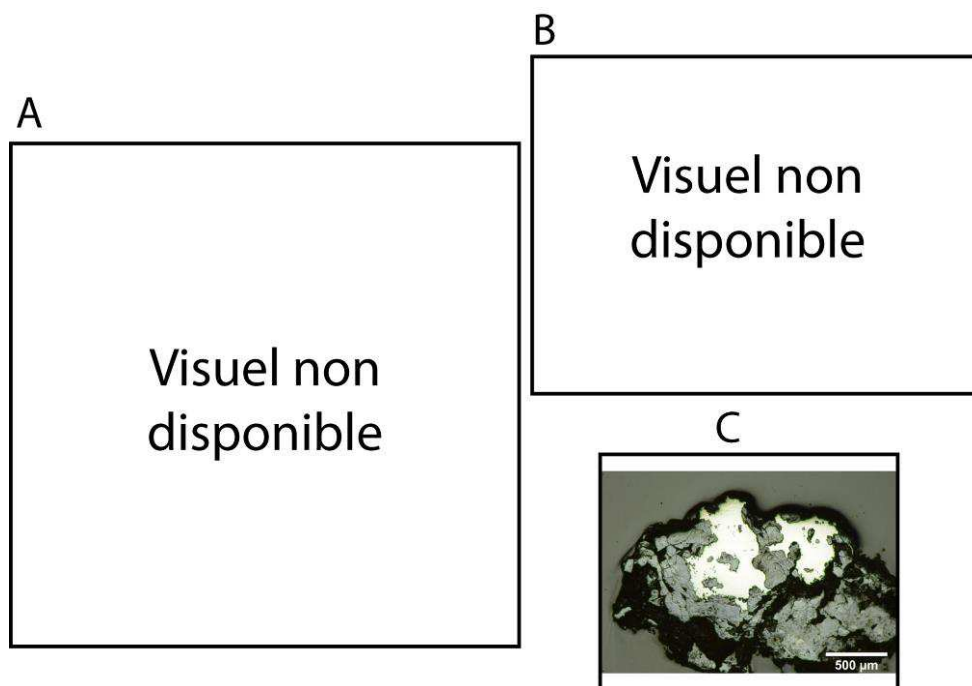
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique :

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé par Alan Williams.

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[<50]	Non résolue	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
5,8	0,20	0,00	153 ($\sigma=16$)	Non dosé	Non

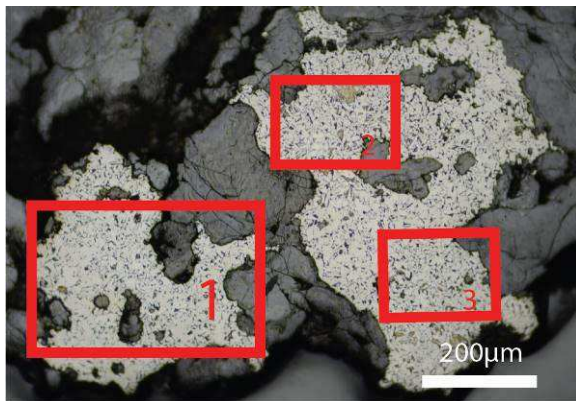
Commentaires :

Cet échantillon est un acier faiblement carburé (%C*=0,2). Lorsqu'elle a pu être résolue la perlite est de forme lamellaire.

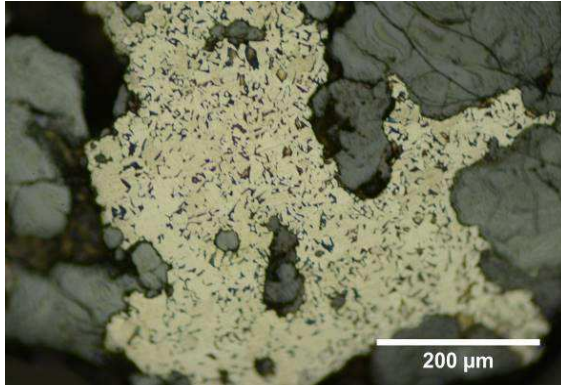
Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

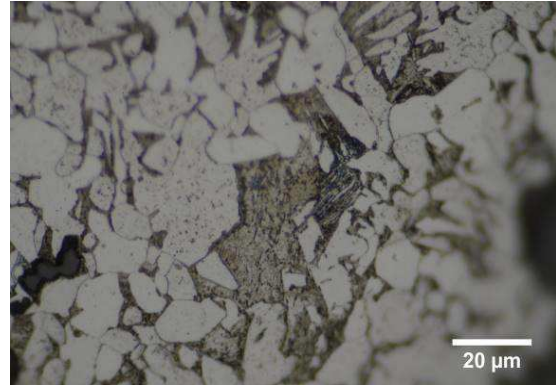
Schéma correspondant



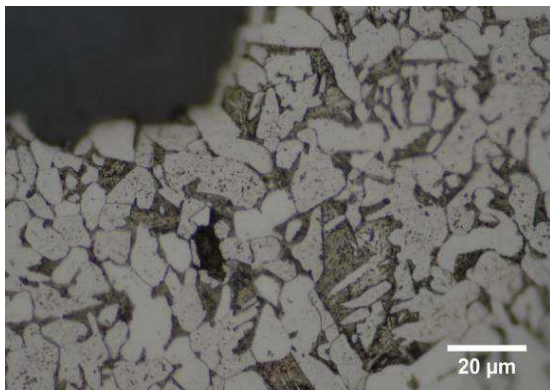
Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



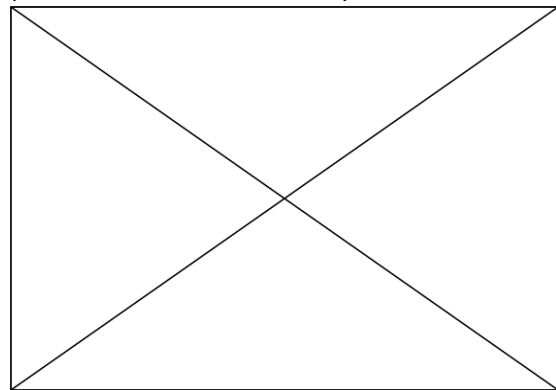
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
2	2

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Direct	<0,01
Abaque	Direct	
PROCEDE	Direct	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon W.C A.153

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : W.C A.153

Numéro de l'élément d'armure : W.C A.153

Lieu de conservation : Wallace Collection (Londres)

Lieu de découverte :

Description : Il s'agit d'un armet avec une marque indistincte (A.Williams, 200", p.819)

Datation : 1500 (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Indéterminée

Ville : Madrid

Élément de l'armure étudié : Armet

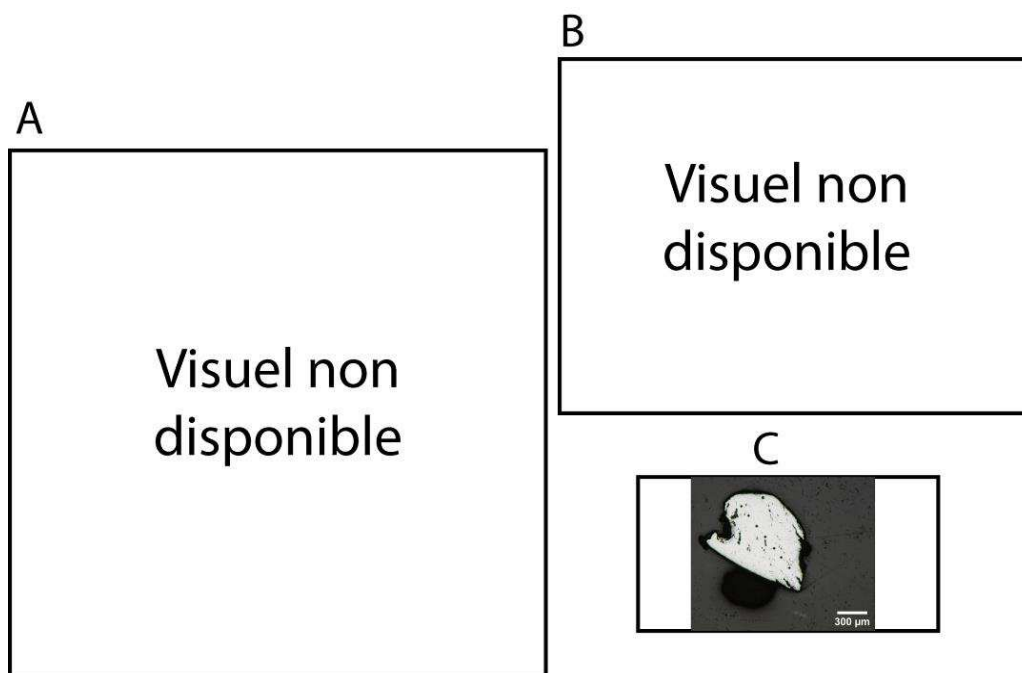
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Oui

Détails de la (ou des) marque(s) : MFR sous une couronne ?

Référence bibliographique :

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé par Alan Williams sur la joue gauche.

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[50-200]	Non résolue	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
1,8	0,20	0,00	167 ($\sigma=23$)	Non dosé	Non

Commentaires :

Cet échantillon présente la structure d'un acier faiblement carburé (%C*=0,2), homogène sur l'ensemble de sa surface.

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

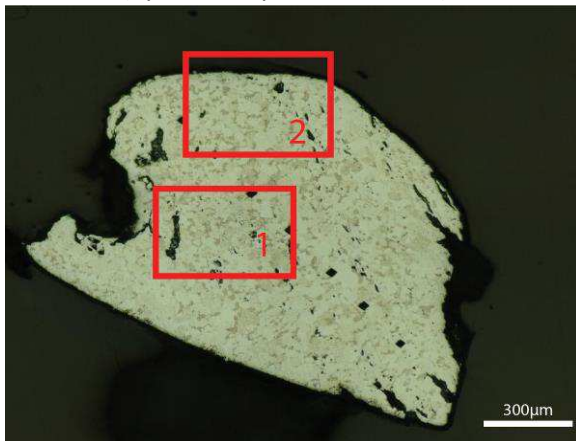
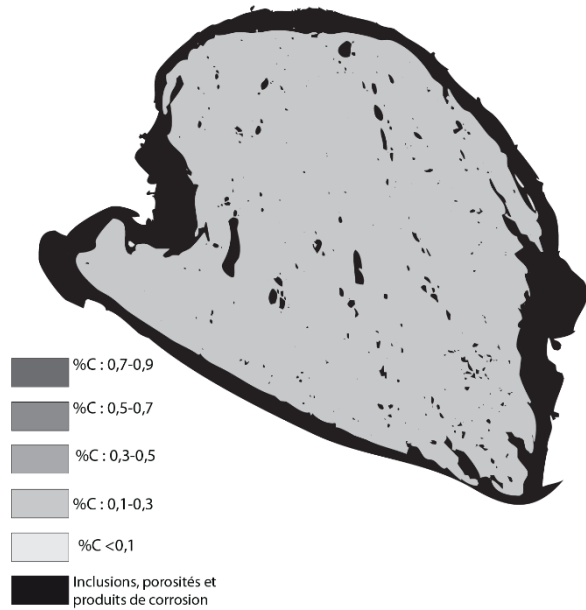
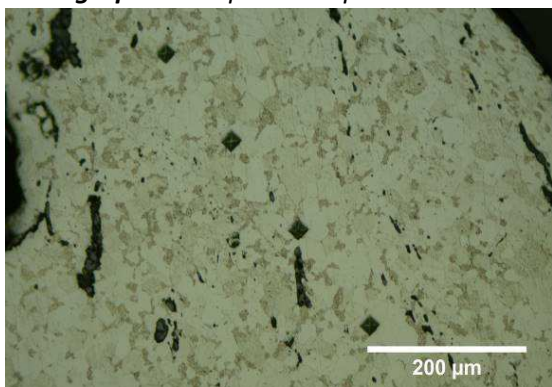


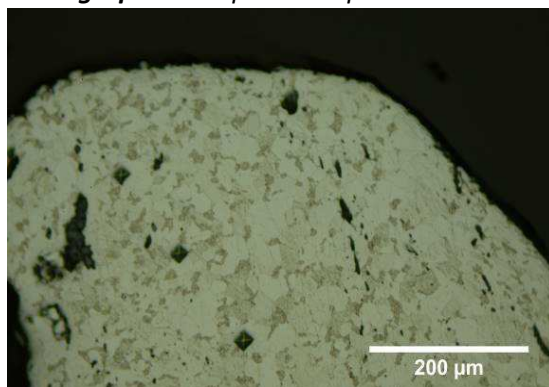
Schéma correspondant



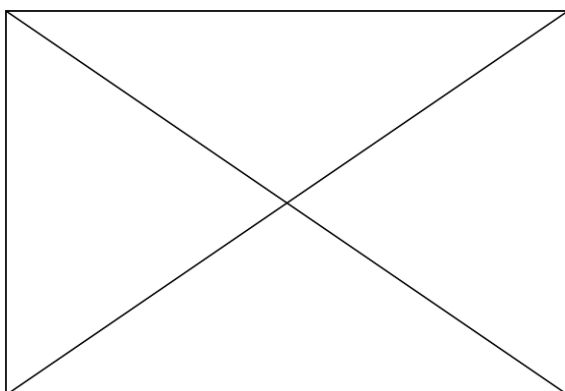
Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



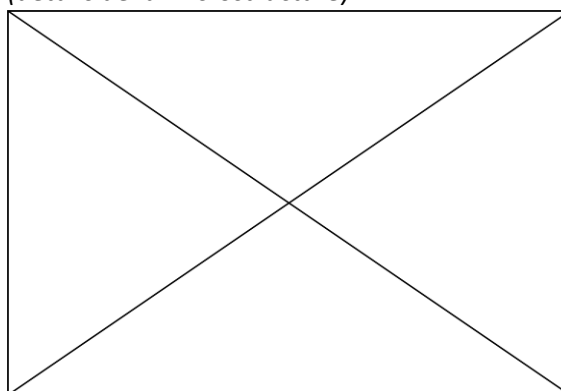
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
2	3

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Direct	<0,01
Abaque	Direct	
PROCEDE	Direct	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon W.C A.245

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : W.C A.245

Numéro de l'élément d'armure : W.C A.245

Lieu de conservation : Wallace Collection (Londres)

Lieu de découverte :

Description : Armure réalisé par Kolman Helmschmied vers 1524 pour Wilhem von Roggendorf dans le style "puffed & slashed". Elle est décorée par des bandes de gravures (A.Williams, 2003, p.399).

Datation : 1524

Lieu de fabrication supposé :

Région : Allemagne

Ville : Augsburg

Élément de l'armure étudié : Coudière gauche

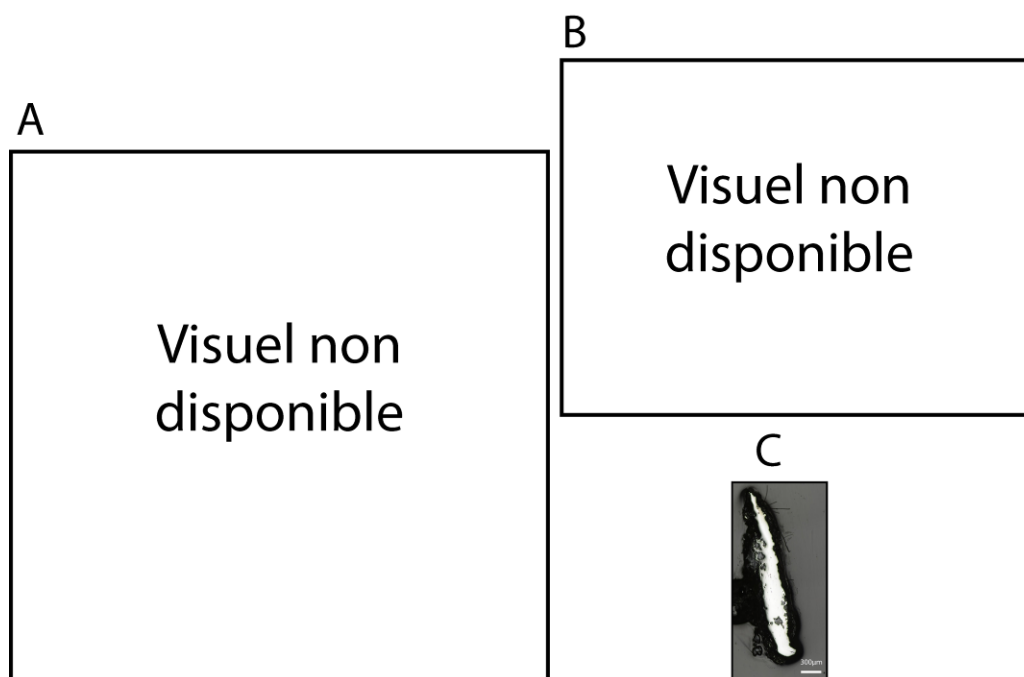
Armurier ou atelier associé : Kolman Helmschmied

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique :

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé par Alan Williams.

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
Ind	Lamellaire	Non	Non	Oui	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
3,4	0,57	0,07	227 ($\sigma=22$)	Non dosé	Non

Commentaires :

Cet échantillon présente la structure d'un acier moyennement carburé (%C* < 0,6). Un léger gradient de teneur en carbone est visible. Il s'étend de 0,8%mass à l'extrémité gauche jusqu'à environ 0,3%mass à l'extrémité droite.

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

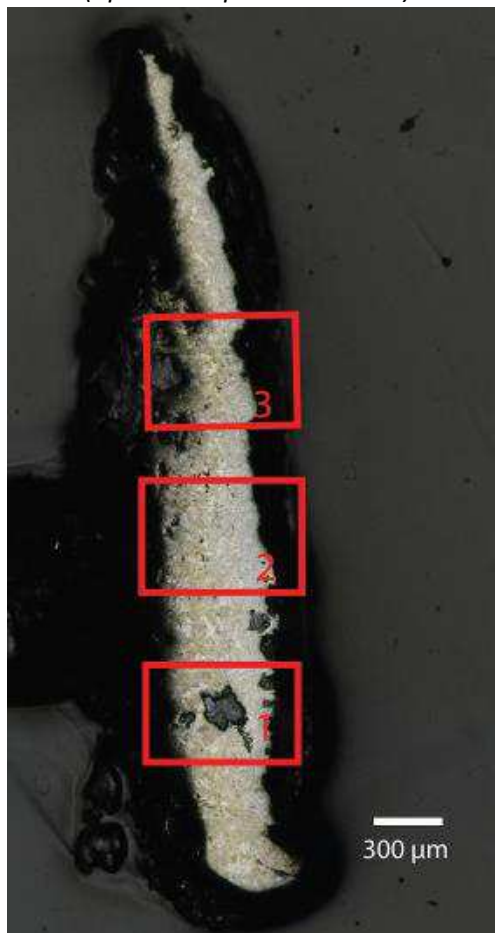
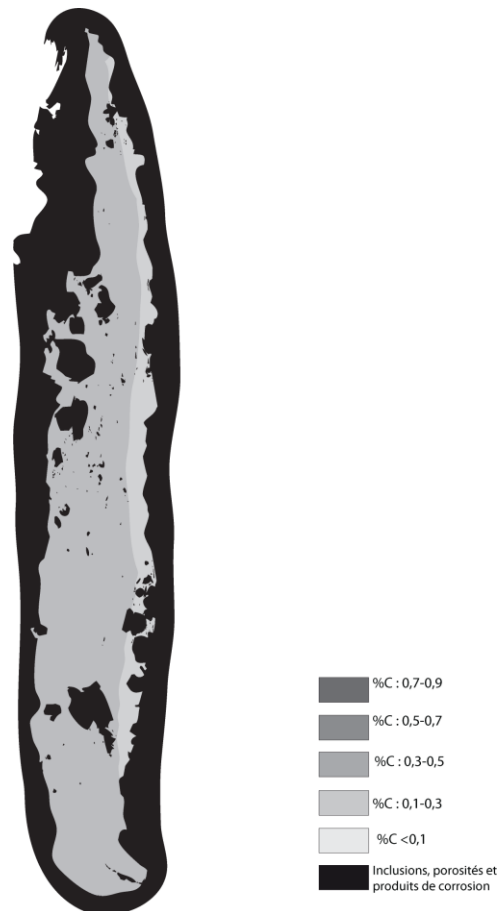


Schéma correspondant



Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



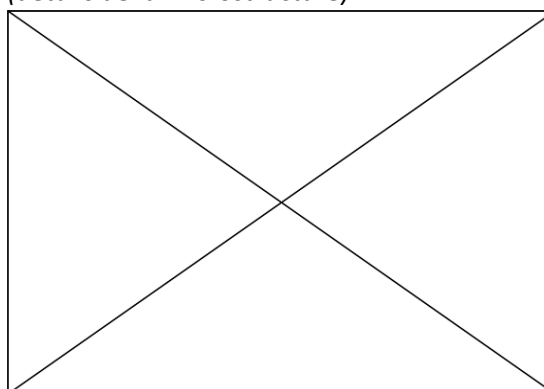
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
3	1

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Direct	<0,01
Abaque	Direct	
PROCEDE	Direct	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Oui	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon W.C A.250

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : W.C A.250

Numéro de l'élément d'armure : W.C A.250

Lieu de conservation : Wallace Collection (Londres)

Lieu de découverte :

Description : "Grandguard, for German jousts in the "Italian" fashion. Formed of a bevor and a shoulder reinforce bolted together at the neckline. The borders of both parts are decorated with bands of etched arabesque ornament on a granular ground" possibly made by Jörg Sorg II, Augsburg, c.1550 (Catalogue de la Wallace Collection)

Datation : 1550 (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Allemagne

Ville : Augsburg

Élément de l'armure étudié : Indéterminé

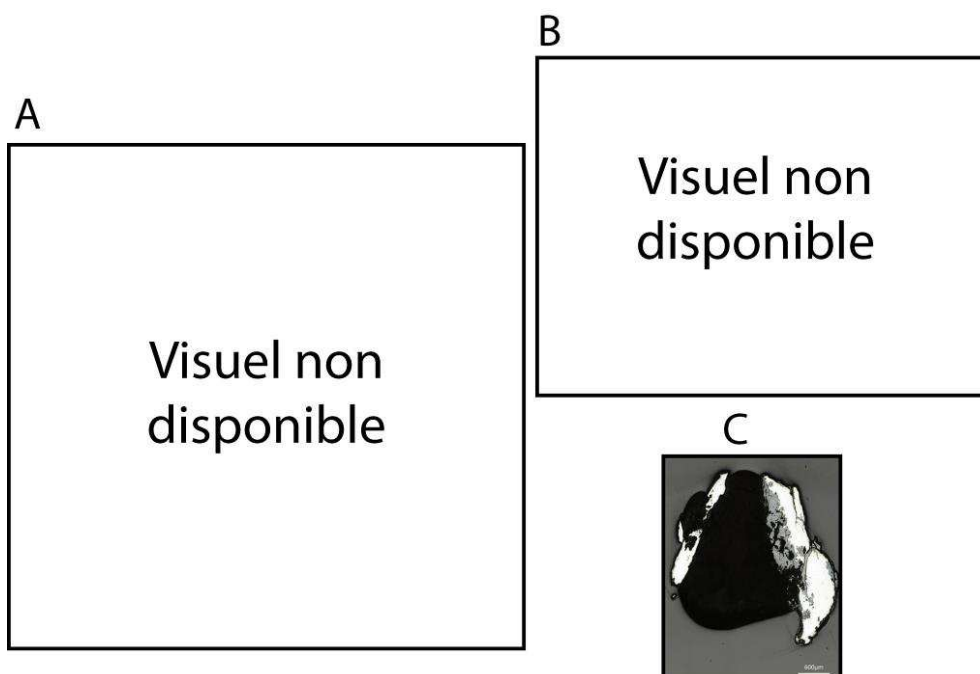
Armurier ou atelier associé : Jörg Sorg II ?

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique :

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé par Alan Williams.

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[50-200]	Non résolue	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
2,8	0,26	0,09	133 ($\sigma=13$)	Non dosé	Non

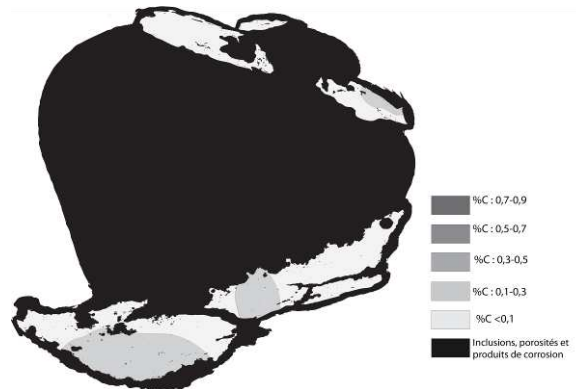
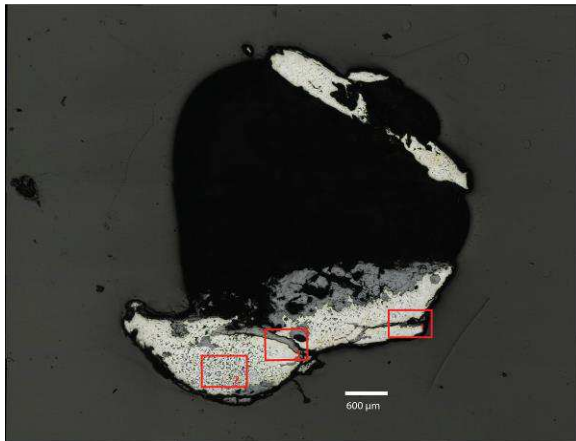
Commentaires :

Cet échantillon présente la structure d'un acier relativement homogène en teneur en carbone, faiblement carburé (%C*=0,3)

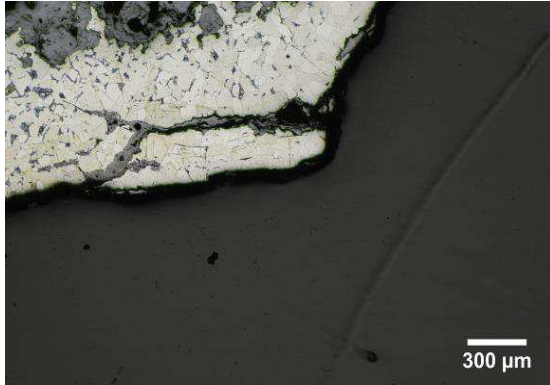
Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

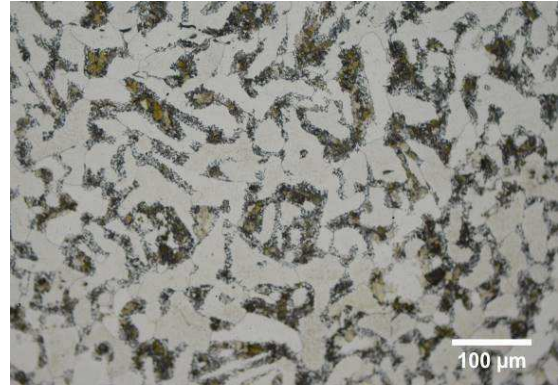
Schéma correspondant



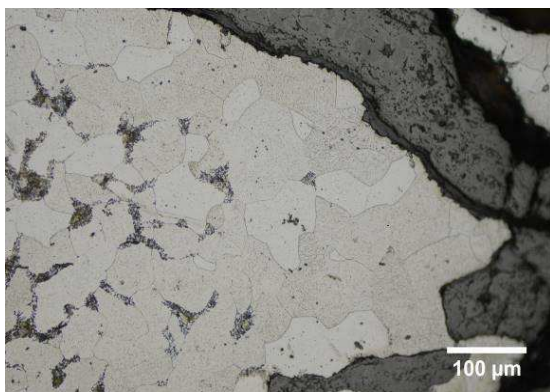
Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



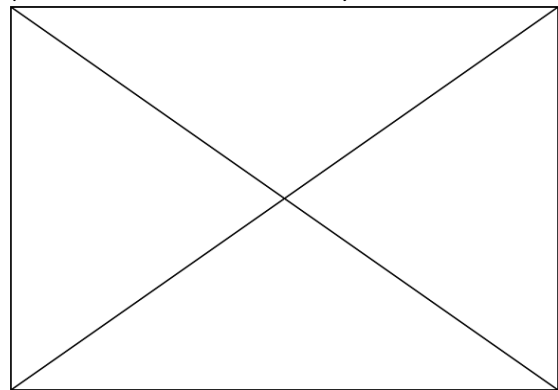
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3% (détails de la microstructure)



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
4	1

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Direct	<0,01
Abaque	Direct	
PROCEDE	Direct	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Oui	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon A228

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : A228

Numéro de l'élément d'armure : A228

Lieu de conservation : Wallace Collection (Londres)

Lieu de découverte :

Description : "Lance-rest or arret, belonging to one of the two "Cloud Bands" garnitures made for Philipp II of Spain (Madrid, Real Armeria, A.243-A.262) and his son, Prince Don Carlos (A.274-A.276). The object's small size suggests that it comes from the latter armour." c.1554-1558, Landshut, Germany (Catalogue de la Wallace Collection).

Datation : 1554-1558 (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Allemagne

Ville : Landshut

Élément de l'armure étudié : Fauce

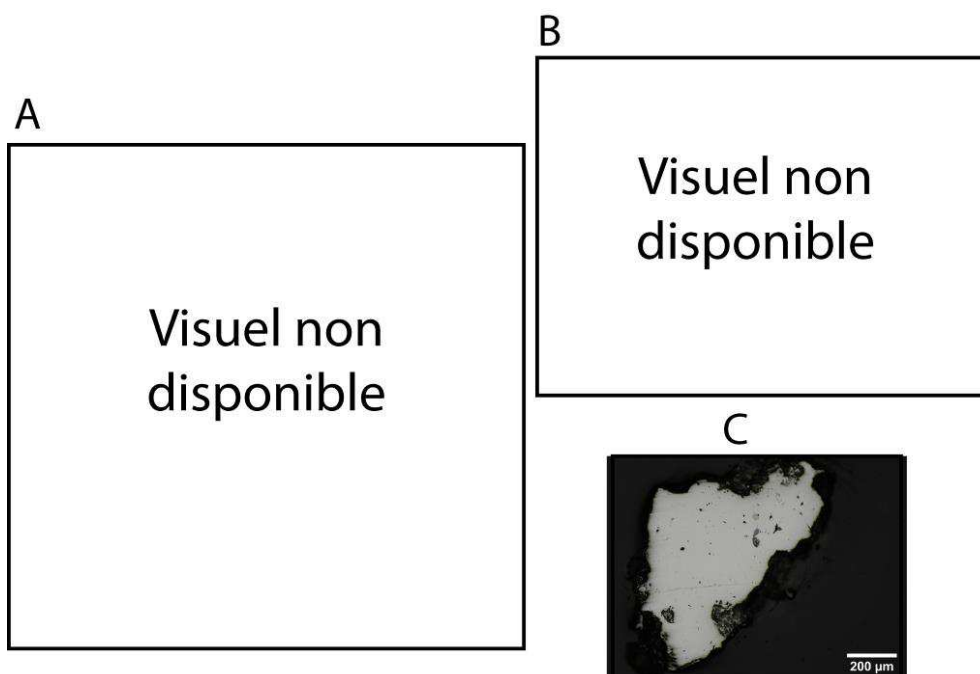
Armurier ou atelier associé : Wolfgang Grosschedel

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique :

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé par Alan Williams.

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[>200]	Non résolue	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
1,9	0,06	0,00	154 ($\sigma=26$)	0,003	Non

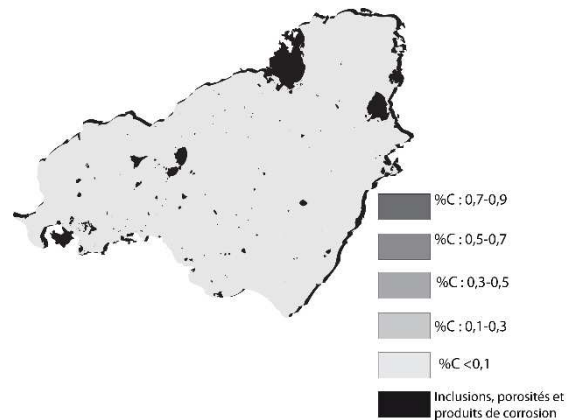
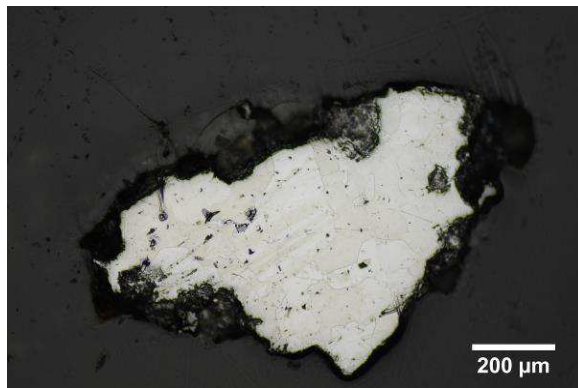
Commentaires :

Cet échantillon possède une structure ferritique à large grain équiaxe (>200 μm), ce qui témoigne qu'un recuit a été opéré.

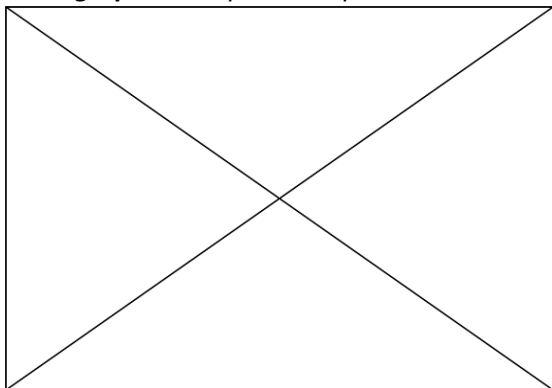
Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

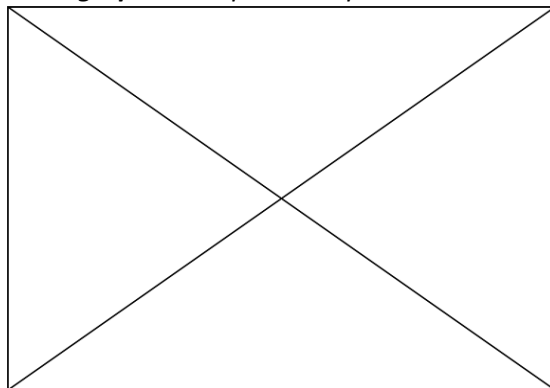
Schéma correspondant



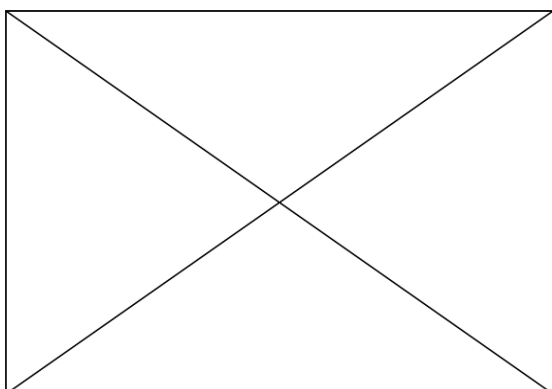
Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



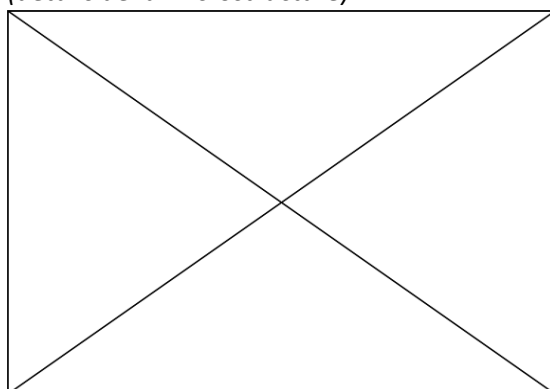
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
Non défini	Non défini

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Non défini	Non défini
Abaque	Non défini	
PROCEDE	Non défini	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon W.C A.148

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : W.C A.148

Numéro de l'élément d'armure : W.C A.148

Lieu de conservation : Wallace Collection (Londres)

Lieu de découverte :

Description : "Morion with a pointed skull, made four-sided by a ridge in the middle of each side. Each facet is teched with a leaf shaped panel containing trophies of arms and allegorical or biblical scenes one apparently representing Hercules or Samson", c.1570, North Italy (Catalogue de la Wallace Collection)

Datation : 1570 (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Italie

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Morion

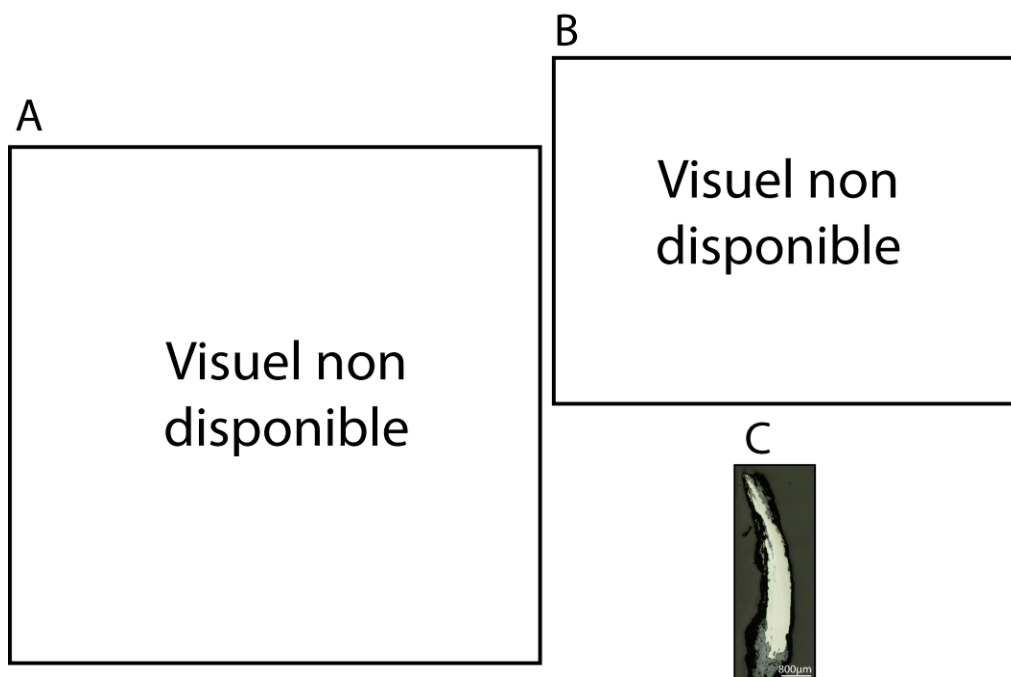
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique :

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé par Alan Williams.

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[50-200]	Non résolue	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
0,7	0,06	0,00	132 ($\sigma=14$)	Non dosé	Non

Commentaires :

Cet échantillon présente une structure ferritique. Des fragments d'un cuivrage sont encore visibles par endroit (micrographie 1)

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

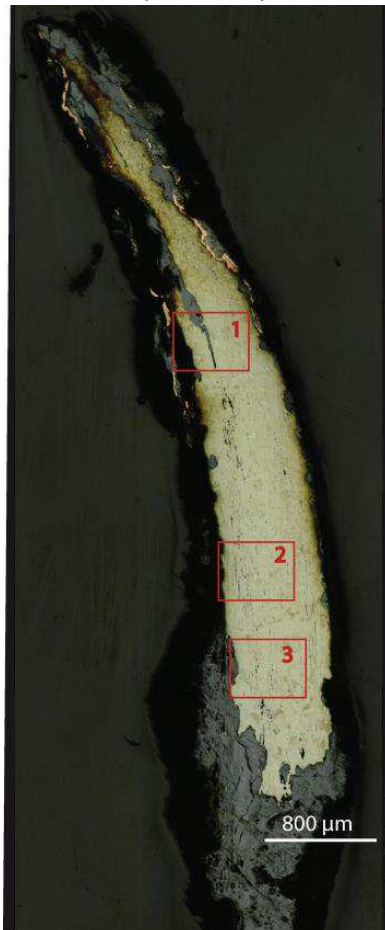
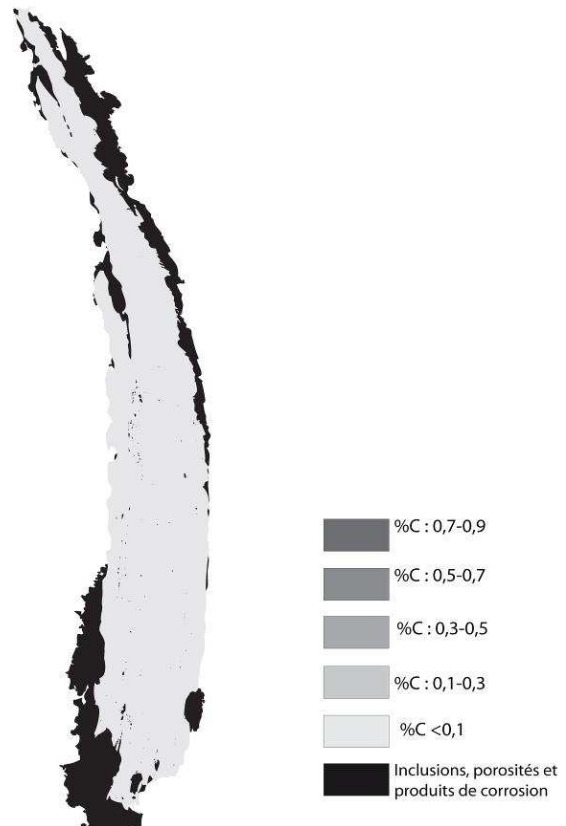


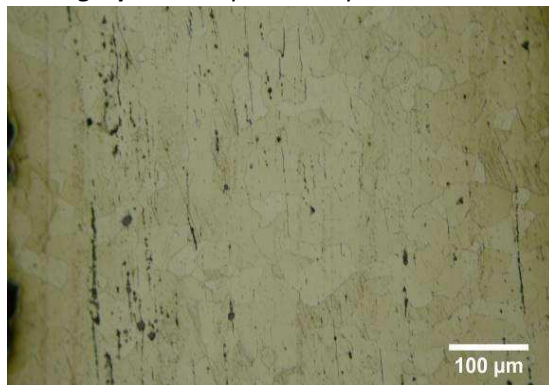
Schéma correspondant



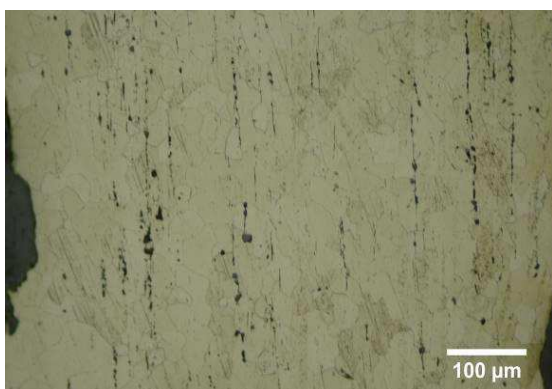
Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



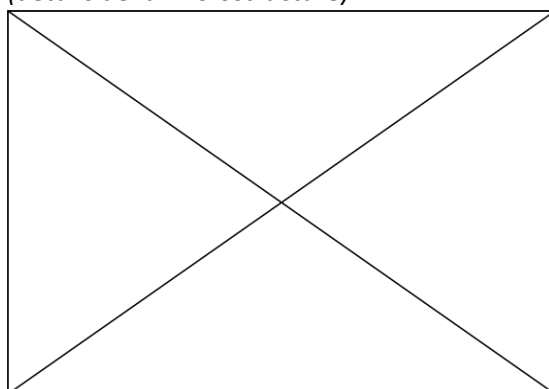
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
5	2

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Indirect	0,98
Abaque	Indéterminé	
PROCEDE	Indirect	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon W.C A.143A

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : W.C A.143

Numéro de l'élément d'armure : W.C A.143

Lieu de conservation : Wallace Collection (Londres)

Lieu de découverte :

Description : "Cabasset with a pear-shaped skull, blackened and embossed with strapwork cartouches and damascened with gold arabesques. In the centre of each side is a pair of winged putti supporting a square tablet with a monogram in Roman letters" (Catalogue de la Wallace Collection)

Datation : 1580 (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Italie

Ville : Milan

Élément de l'armure étudié : Morion

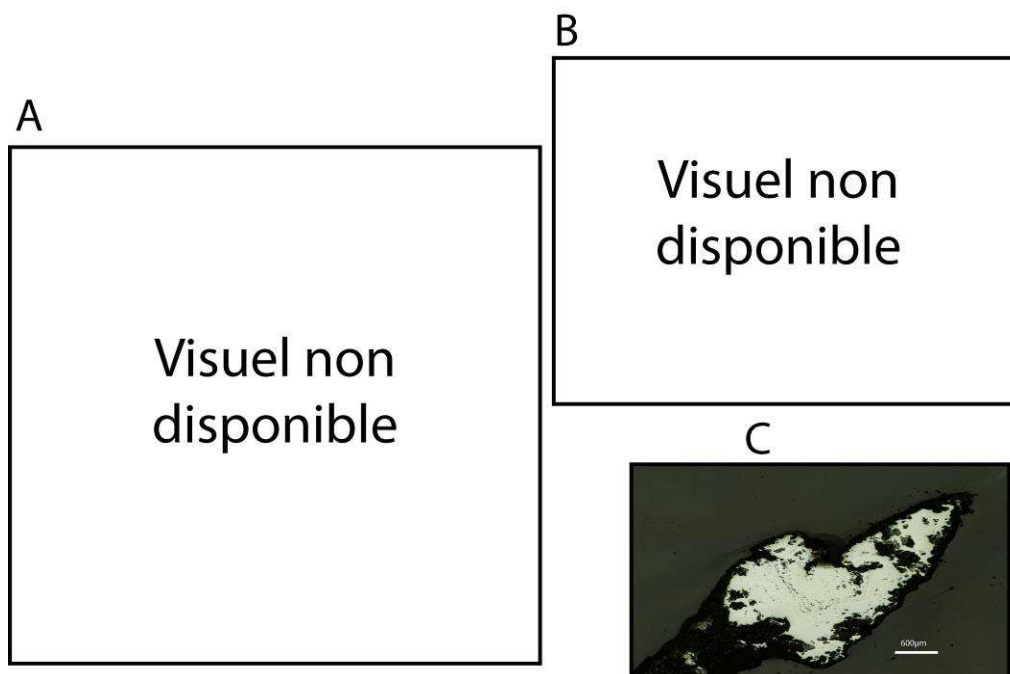
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique :

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé par Alan Williams.

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[<50]	Globulaire	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
4,4	0,20	0,00	156 ($\sigma=2$)	Non dosé	Non

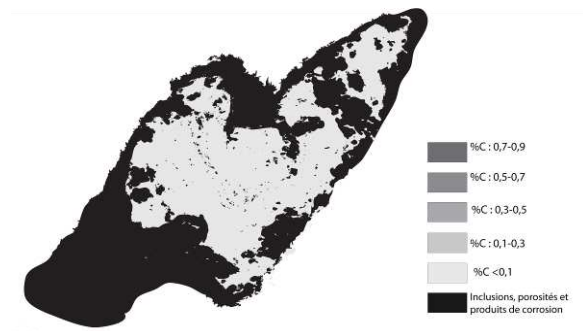
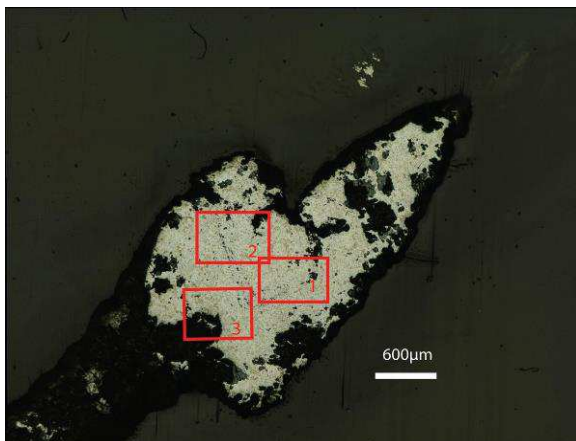
Commentaires :

Cet échantillon présente la structure d'un acier homogène en teneur en carbone, faiblement carburé (%C*=0,2)

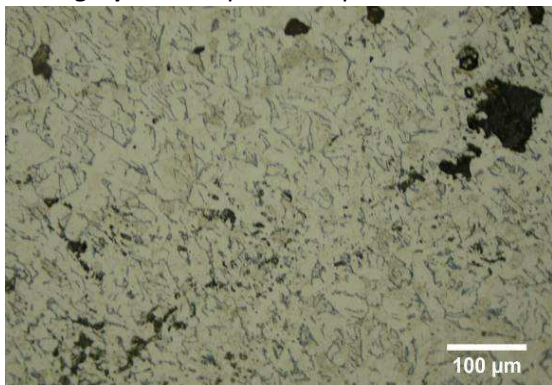
Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

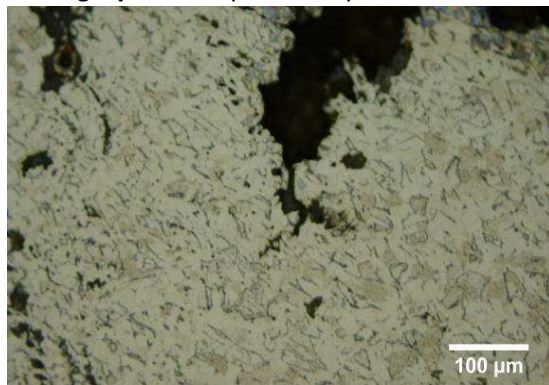
Schéma correspondant



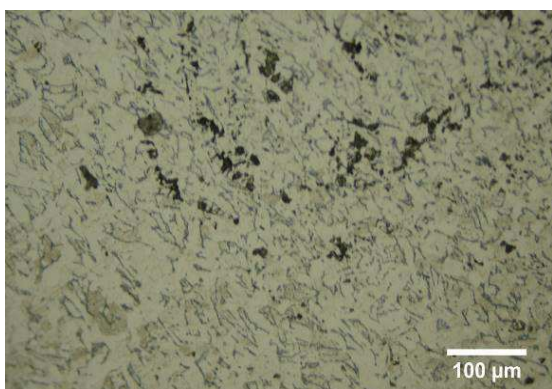
Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3% (détails de la microstructure)



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
2	2

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Direct	<0,01
Abaque	Direct	
PROCEDE	Direct	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Oui	Non	Non	Oui	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon W.C A.143B

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : W.C A.143

Numéro de l'élément d'armure : W.C A.143

Lieu de conservation : Wallace Collection (Londres)

Lieu de découverte :

Description : : "Cabasset with a pear-shaped skull, blackened and embossed with strapwork cartouches and damascened with gold arabesques. In the centre of each side is a pair of winged putti supporting a square tablet with a monogram in Roman letters" (Catalogue de la Wallace Collection)

Datation : 1580 (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Italie

Ville : Milan

Élément de l'armure étudié : Morion

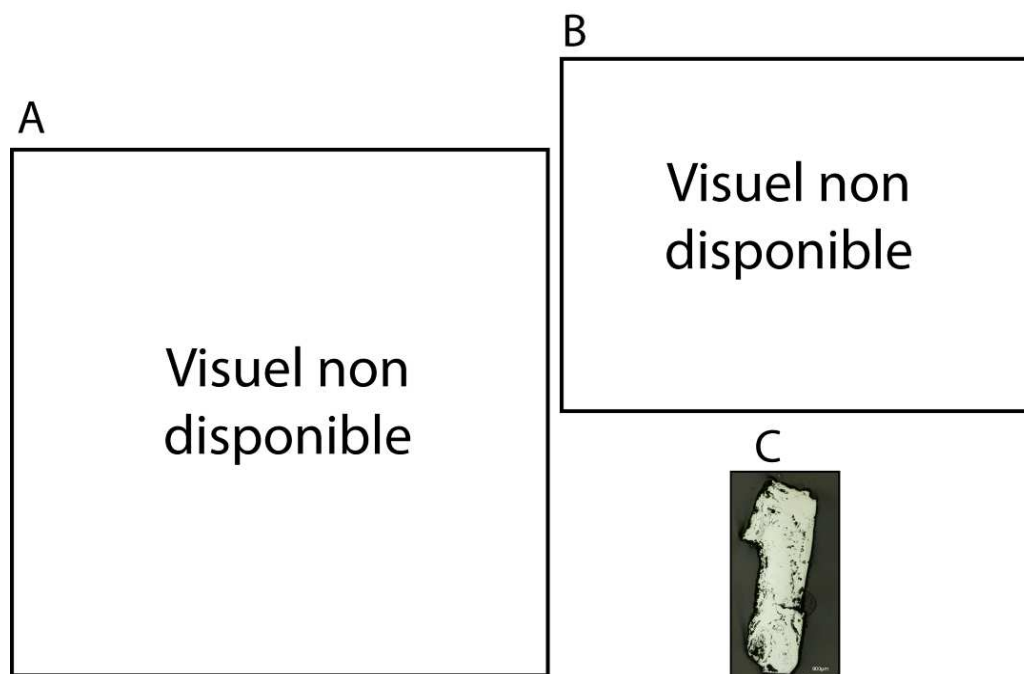
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique :

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé par Alan Williams.

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[<50]	Globulaire	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
4,9	0,20	0,00	144 ($\sigma=18$)	Non dosé	Non

Commentaires :

Cet échantillon présente la structure d'un acier homogène en teneur en carbone, faiblement carburé (%C*=0,2)

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

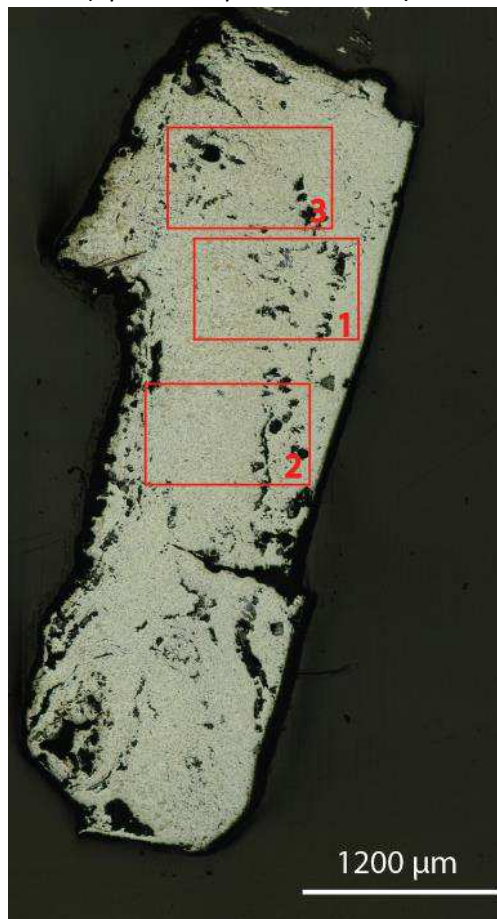
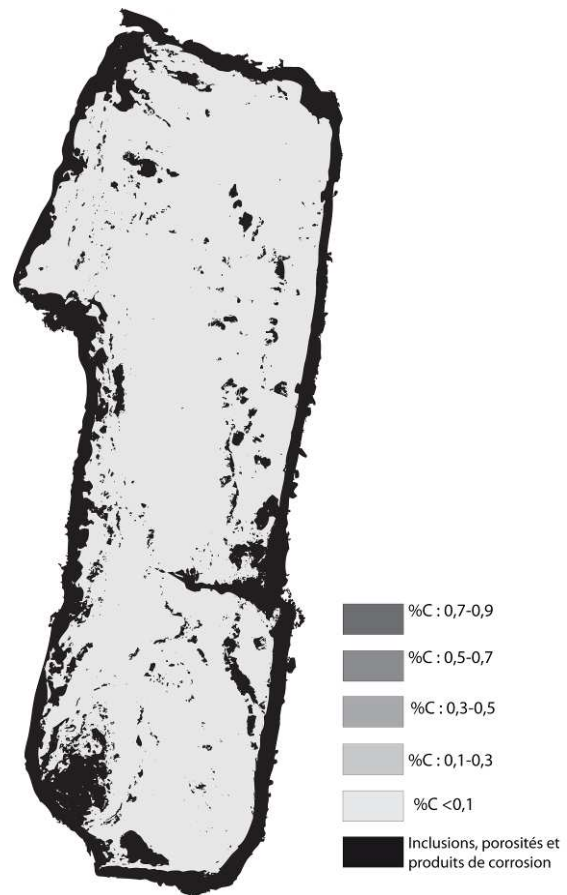
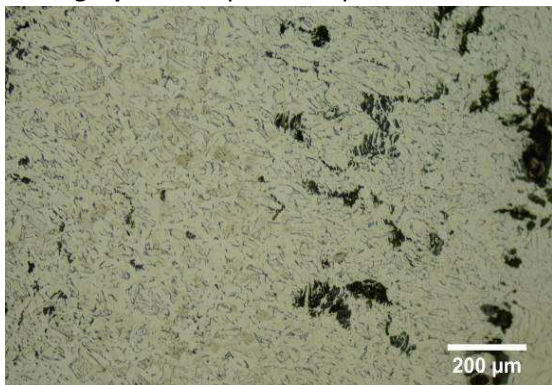


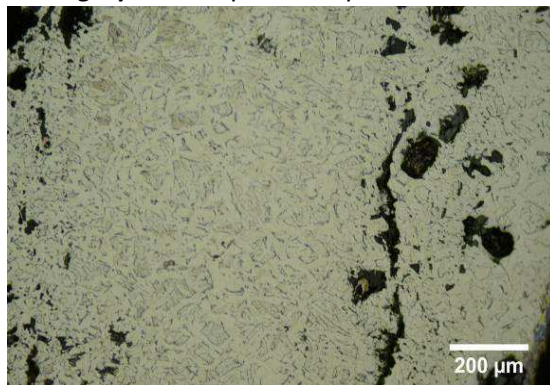
Schéma correspondant



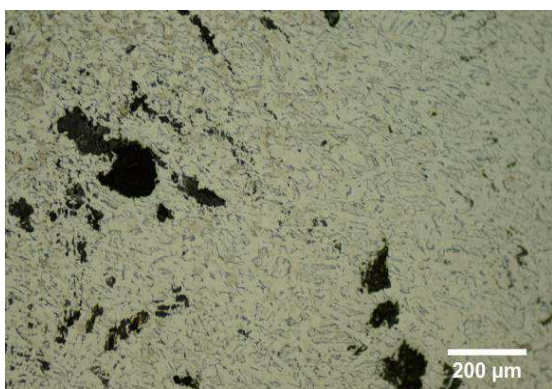
Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



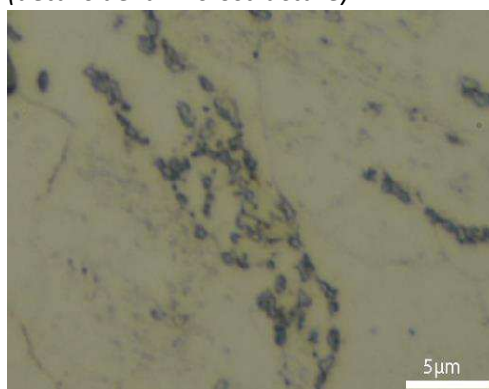
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
2	1

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Direct	<0,01
Abaque	Direct	
PROCEDE	Direct	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Oui	Non	Non	Oui	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon W.C A.235

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : W.C A.235

Numéro de l'élément d'armure : W.C A.235

Lieu de conservation : Wallace Collection (Londres)

Lieu de découverte :

Description : Gorgerin décoré avec des bandes gravées (A.Williams, 2003, p.305)

Datation : ≈ 1600 (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Italie

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Colletin

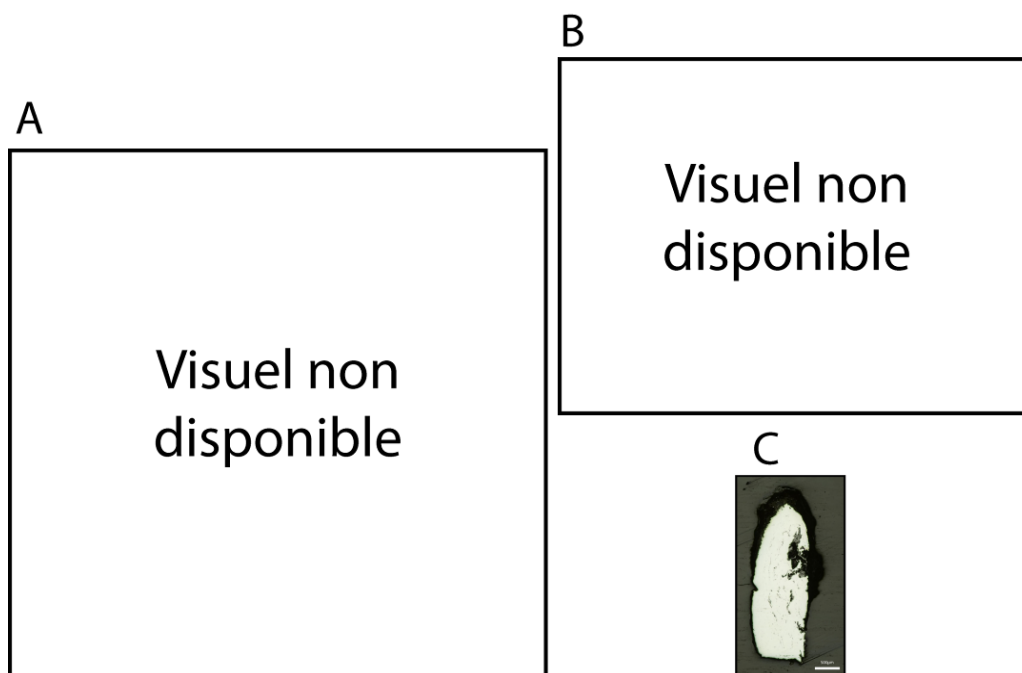
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique :

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé par Alan Williams.

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (µm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[50-200]	Lamellaire et globulaire	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
1,5	0,20	0,00	174 (σ= 26)	Non dosé	Non

Commentaires :

Cet échantillon présente la structure d'un acier homogène en teneur en carbone, faiblement carburé (%C*=0,2)

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

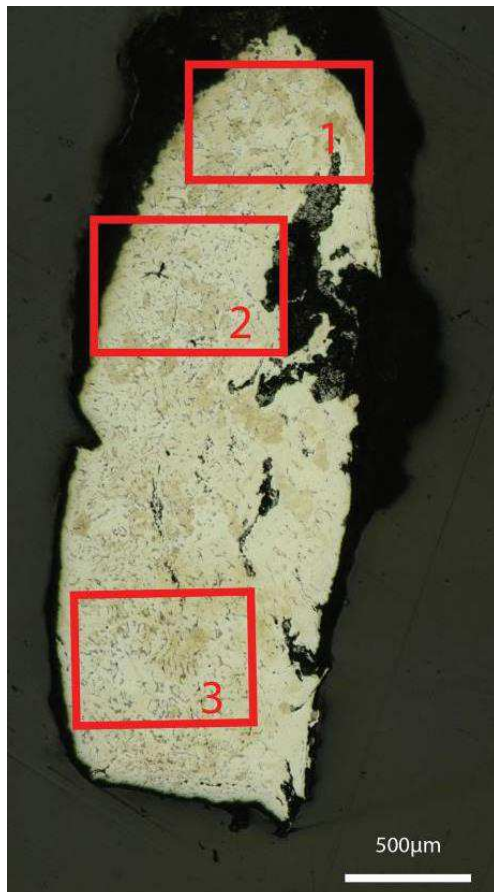
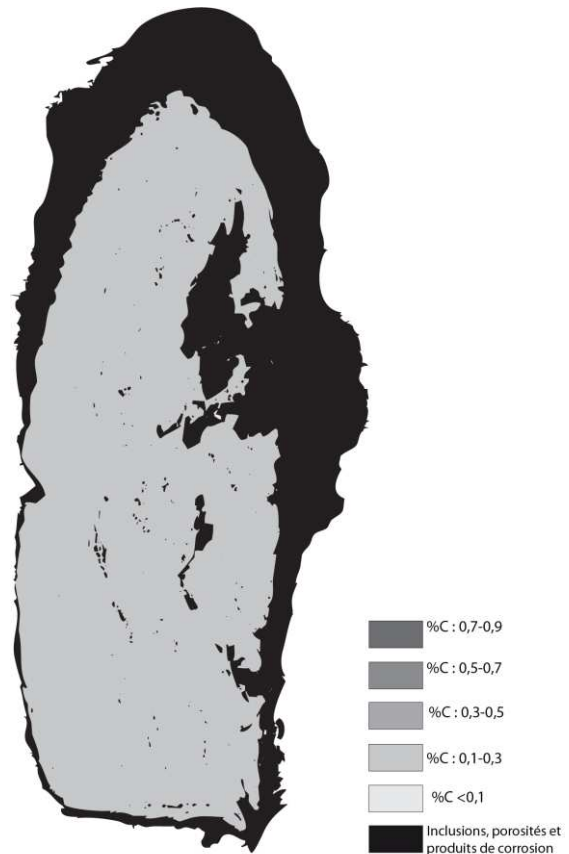
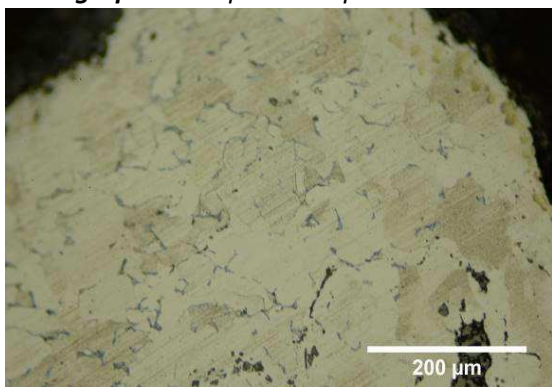


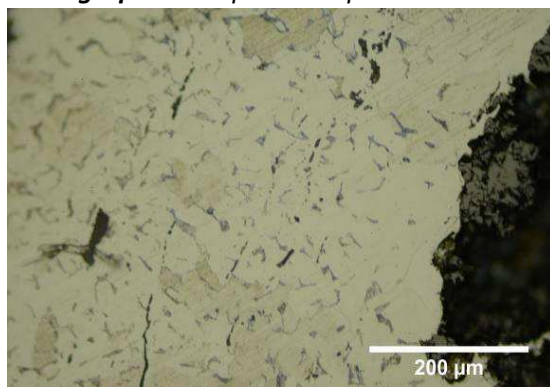
Schéma correspondant



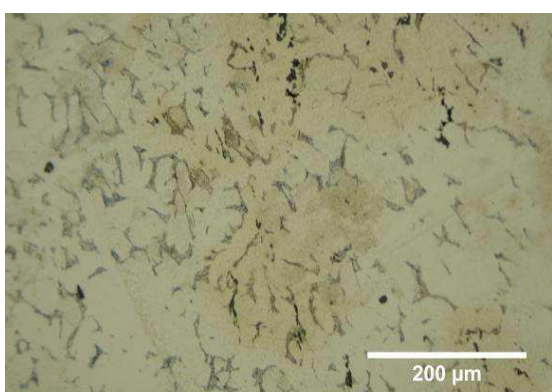
Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



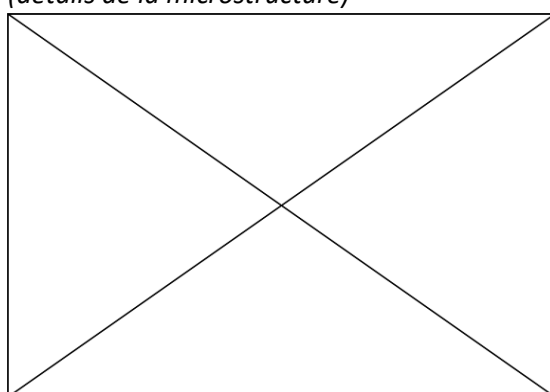
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
4	1,3

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Direct	$p(\text{classe1}) < 0,01$ $p(\text{classe3}) = 0,17$
Abaque	Direct	
PROCEDE	Direct	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Oui	Non	Non	Oui	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon W.C A.144

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : W.C A.144

Numéro de l'élément d'armure : W.C A.144

Lieu de conservation : Wallace Collection (Londres)

Lieu de découverte :

Description :

Datation : 1600-1610 (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Italie

Ville : Milan ou Brescia

Élément de l'armure étudié : Morion

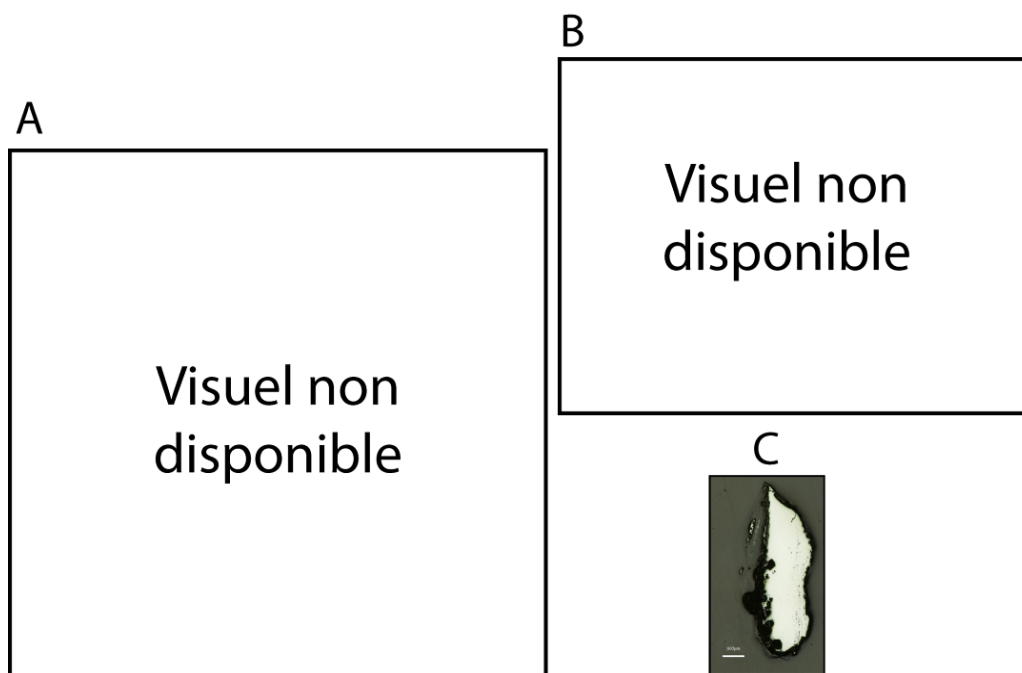
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique :

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé par Alan Williams.

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[<50]	Globulaire	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
1,2	0,20	0,00	161 ($\sigma=24$)	Non dosé	Non

Commentaires :

Cet échantillon présente la structure d'un acier homogène en teneur en carbone, faiblement carburé (%C*=0,2)

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

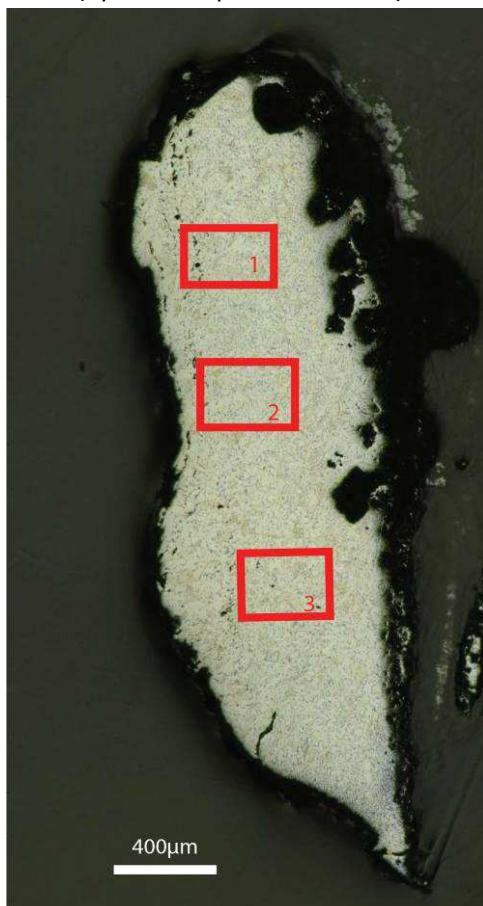
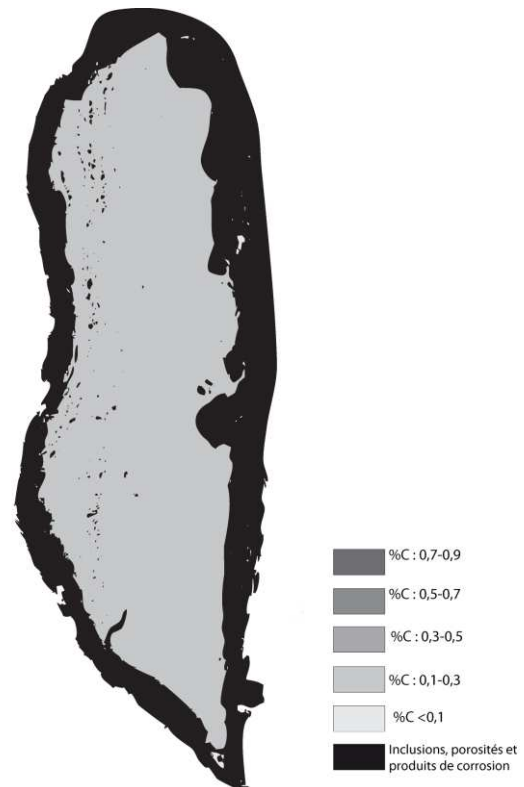
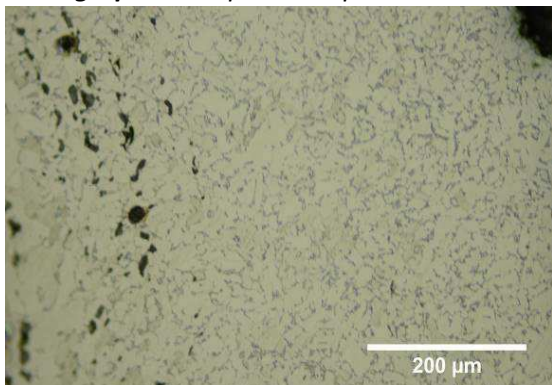


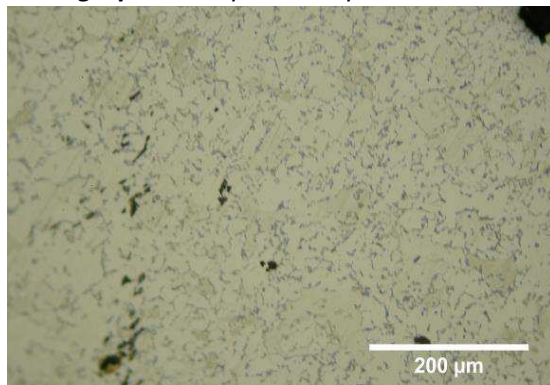
Schéma correspondant



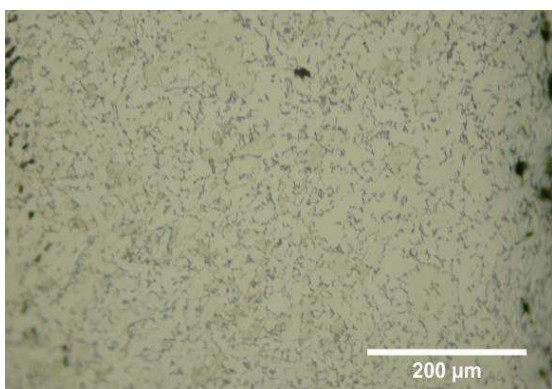
Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



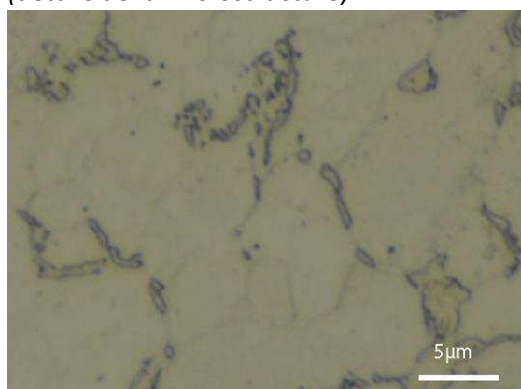
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3% (détails de la microstructure)



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
4	3

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Direct	0,09
Abaque	Direct	
PROCEDE	Direct	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Oui	Non	Non	Oui	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon W.C.A.65

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : W.C.A.65

Numéro de l'élément d'armure : W.C.A.65

Lieu de conservation : Wallace Collection (Londres)

Lieu de découverte :

Description : "Three quarter armour made up of a close helmet associated gorget; breastplate; long tassets; backplate; pauldrons;vambraces;gauntlets. Undecorated apart from an engraved line set along the borders of the plates and through the middle of the elbows". c.1620, Augsburg, Germany (Catalogue de la Wallace Collection)

Datation : 1620 (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Allemagne

Ville : Augsburg

Élément de l'armure étudié : Indéterminé

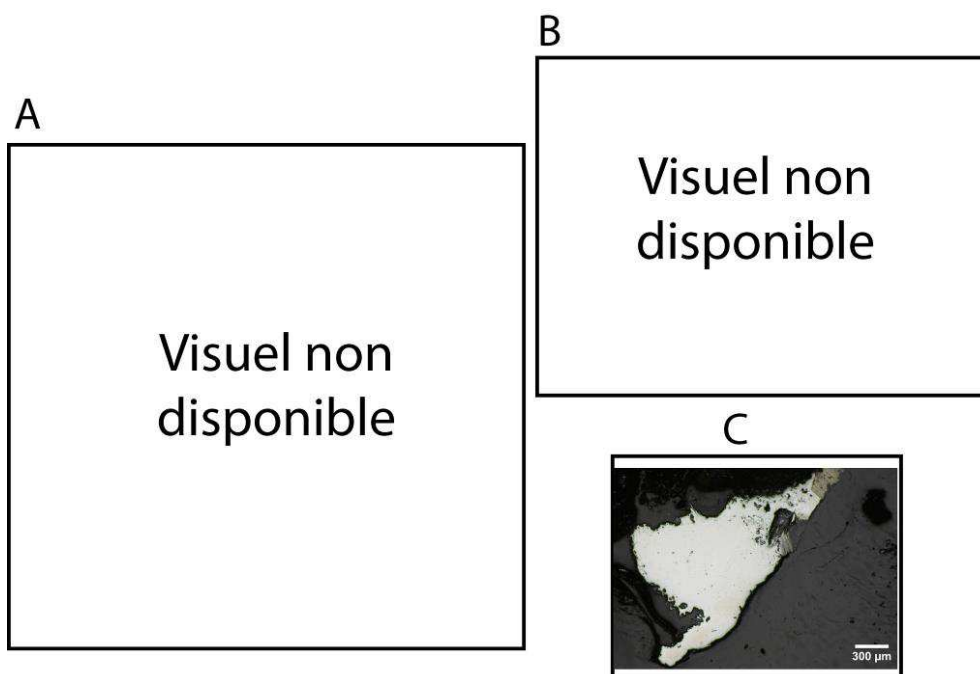
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Oui

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique :

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé par Alan Williams.

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[50-200]	Non résolue	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
0,5	0,06	0,00	180 ($\sigma=12$)	<0,1	Non

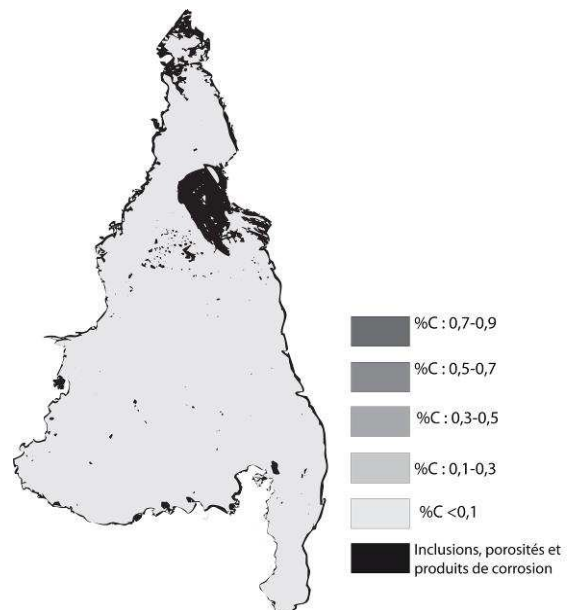
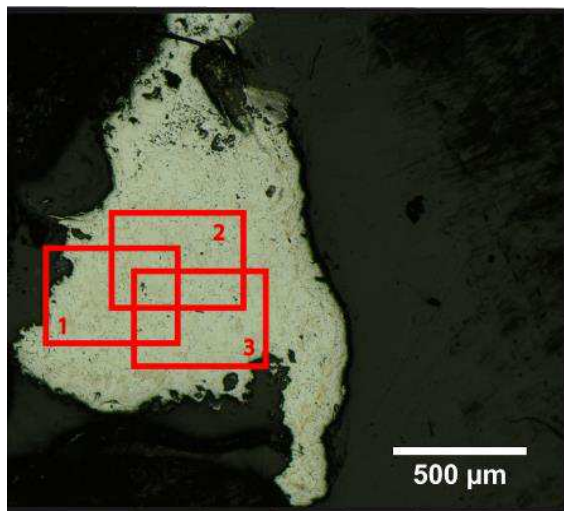
Commentaires :

Cet échantillon possède une structure ferritique. Quelques amas de perlite sont visibles par endroit.

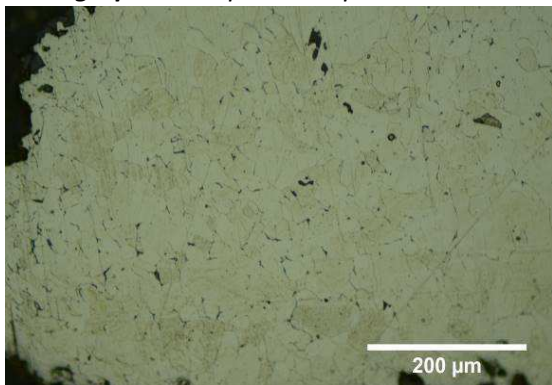
Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

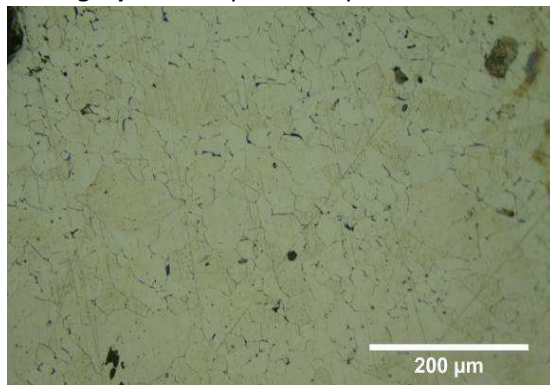
Schéma correspondant



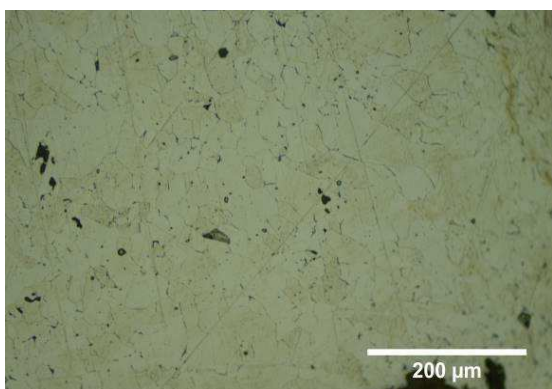
Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



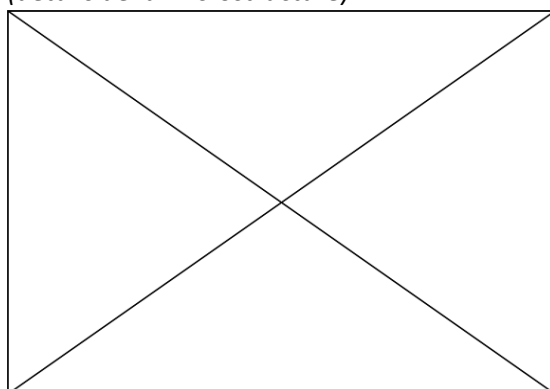
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
4	2

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Direct	<0,01
Abaque	Direct	
PROCEDE	Direct	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Oui	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon W.C.A.297

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : W.C.A.297

Numéro de l'élément d'armure : W.C.A.297

Lieu de conservation : Wallace Collection (Londres)

Lieu de découverte :

Description : "Long tasset for the left leg. Formed of nineteen plates each bordered with a single incised line. The surface is now black, but with traces of the original bluing. The edge of the lames inside the engraved line appear to always have been left bright" c.1630, France (Catalogue de la Wallace Collection)

Datation : 1630 (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : France

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Indéterminé

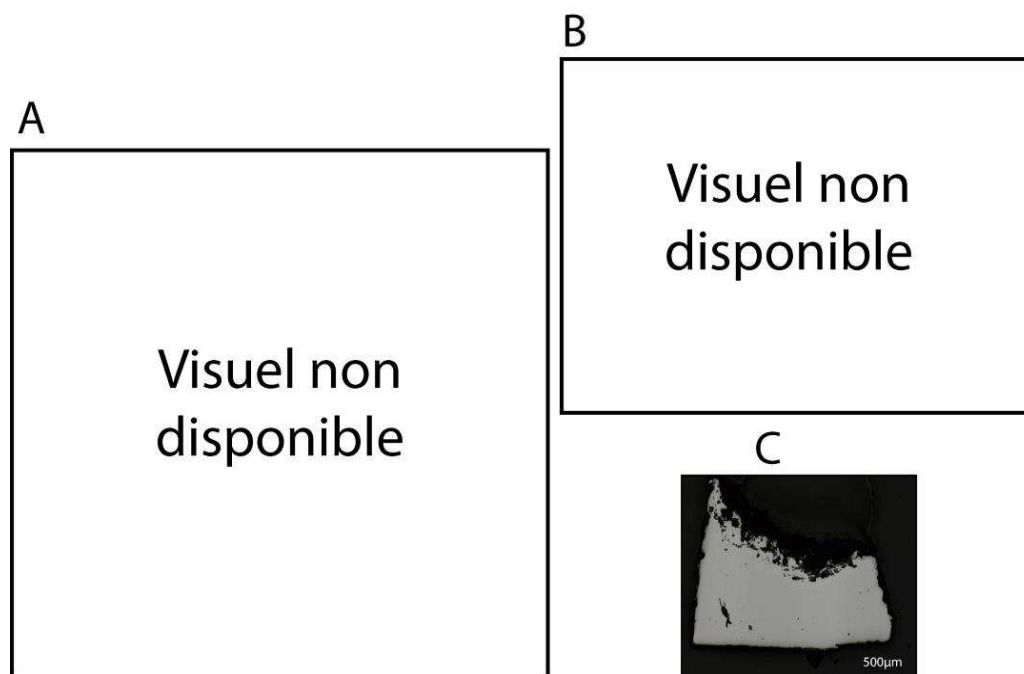
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique :

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé par Alan Williams.

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (µm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[50-200]	Non résolue	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
2,3	0,06	0,00	203 (σ= 19)	<0,1	Non

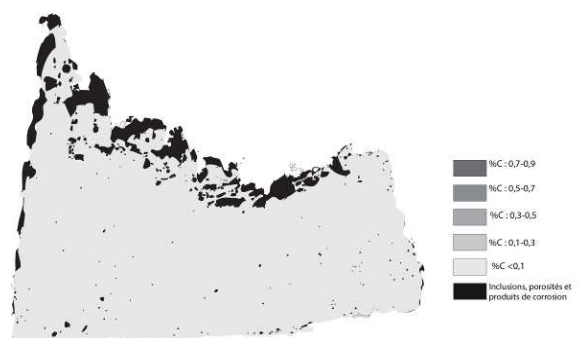
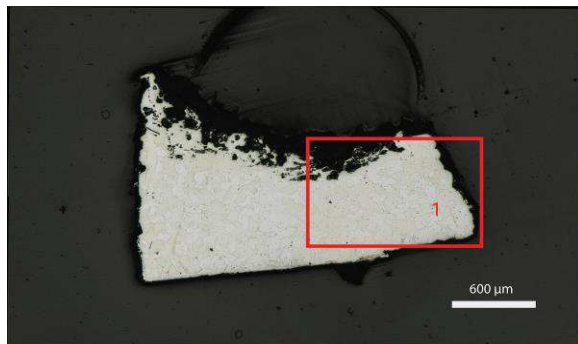
Commentaires :

Cet échantillon présente une structure entièrement ferritique.

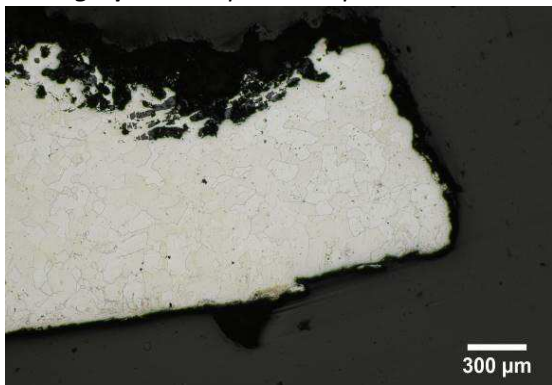
Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

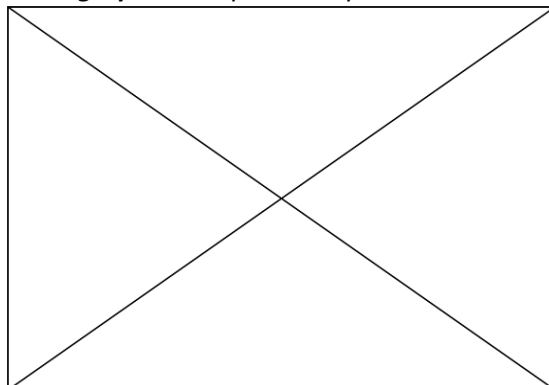
Schéma correspondant



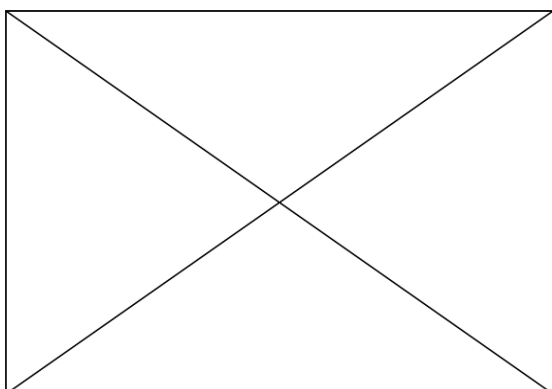
Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



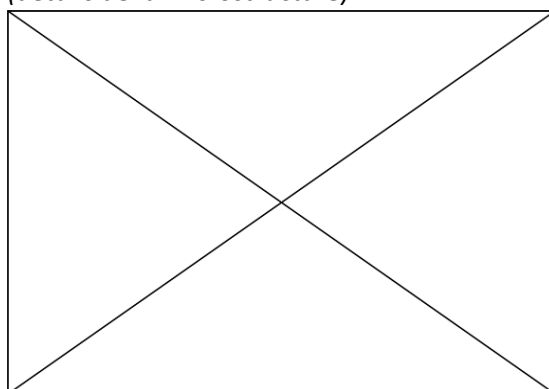
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
3	1

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Direct	<0,01
Abaque	Direct	
PROCEDE	Direct	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon W.C A.180

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : W.C A.180

Numéro de l'élément d'armure : W.C A.180

Lieu de conservation : Wallace Collection (Londres)

Lieu de découverte :

Description : Défense de tête fermée dans le style dit "Savoyard" probablement réalisée au Nord de l'Italie au début du XVII^e siècle (A.Williams, 2003, p.328)

Datation : 1630 (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Italie

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : Défense de tête

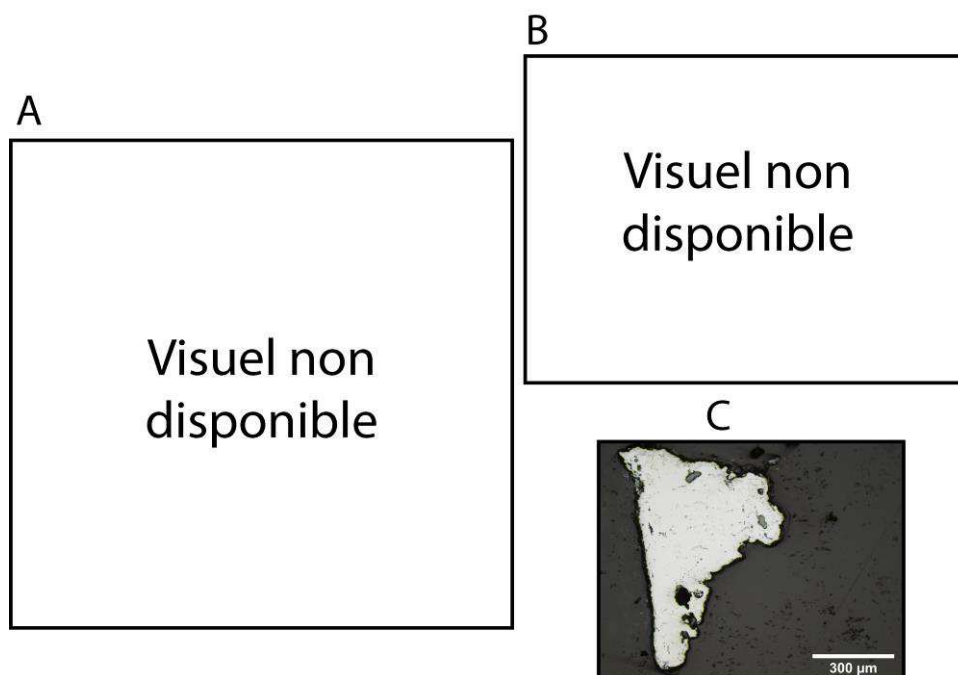
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique :

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé par Alan Williams.

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[<50]	Non résolue	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
4,6	0,17	0,06	245 ($\sigma=28$)	Non dosé	Non

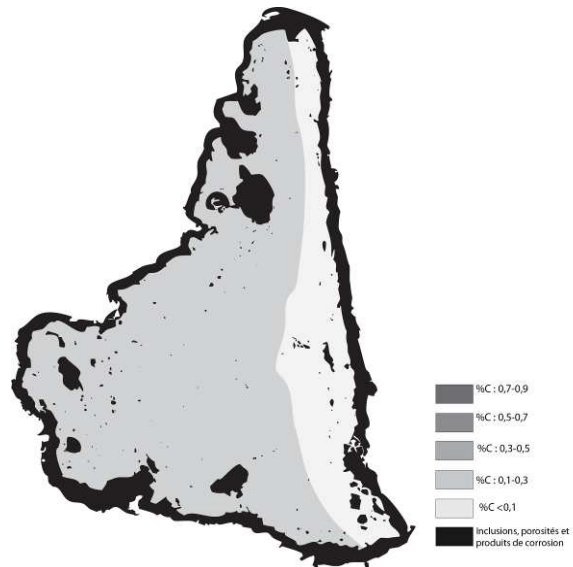
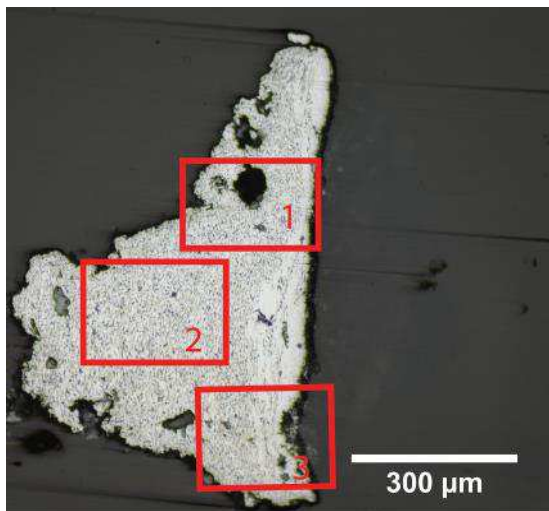
Commentaires :

Cet échantillon présente la structure d'un acier hétérogène faiblement carburé (%C* < 0,2). Une bande moins carburée se détache à l'extrémité droite. Les grains apparaissent fortement déformés selon la direction de martelage, preuve qu'un recuit n'a pas été opéré au terme de l'élaboration de l'objet.

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

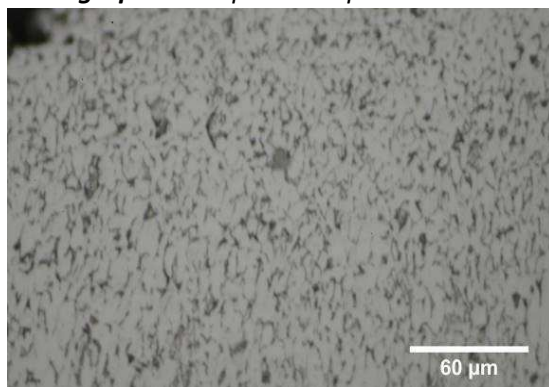
Schéma correspondant



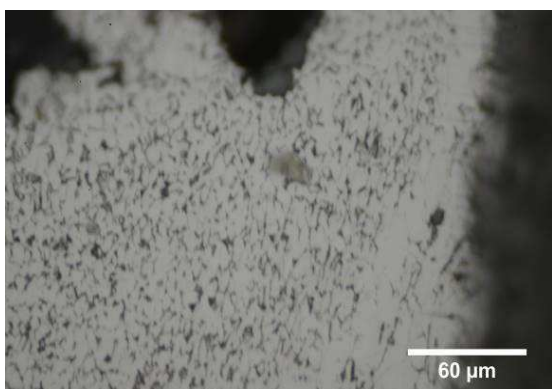
Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



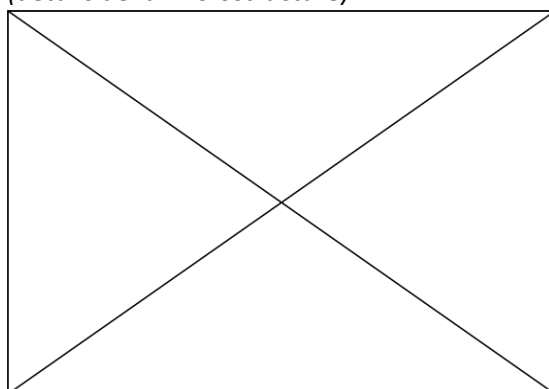
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3% (détails de la microstructure)



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
2	1

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Direct	0,25
Abaque	Indéterminé	
PROCEDE	Direct	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon W.C.A.237

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : W.C.A.237

Numéro de l'élément d'armure : W.C.A.237

Lieu de conservation : Wallace Collection (Londres)

Lieu de découverte :

Description : "Gorget made up of two plates. Blued with sunken and gilt borders and with a sunken band down the centre of both plates. The bands are etched with a running pattern of flowers and foliage. The medial band on the rear also contains a man in armour" c.1640, France or Germany. (Catalogue de la Wallace Collection)

Datation : 1640 (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : France ou Allemagne

Ville : Inconnue

Élément de l'armure étudié : gorgiere

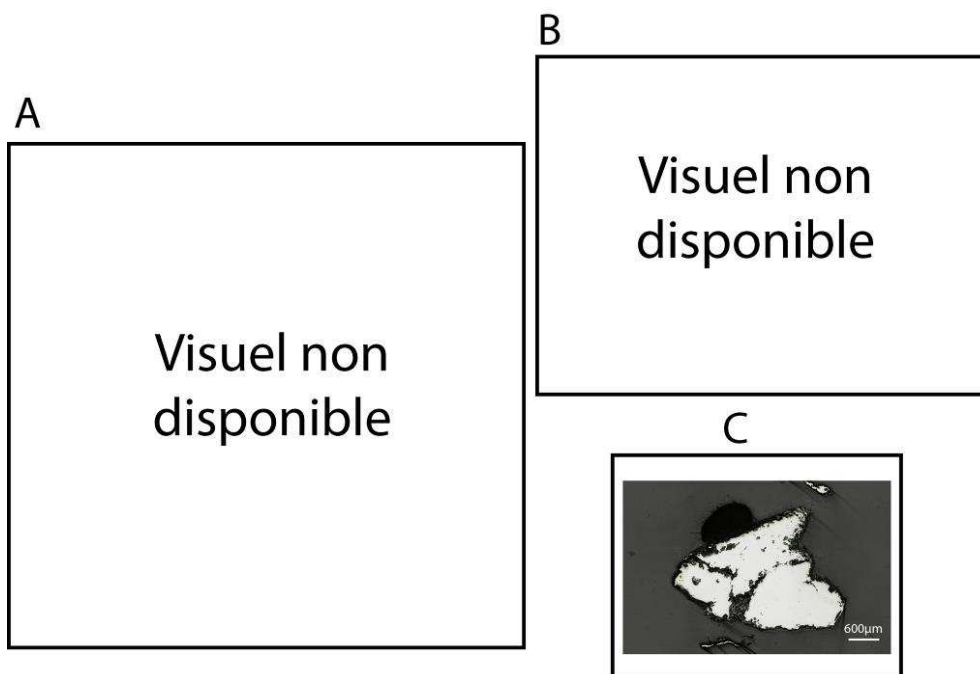
Armurier ou atelier associé :

Présence de marque(s) : Non

Détails de la (ou des) marque(s) :

Référence bibliographique :

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé par Alan Williams.

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[<50]	Lamellaire	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
4,8	0,40	0,00	201 ($\sigma=17$)	Non dosé	Non

Commentaires :

Cet échantillon présente la structure d'un acier moyennement carburé homogène. La ferrite aciculaire témoigne d'une surchauffe suivie d'un refroidissement relativement rapide (structure de Widmanstätten)

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

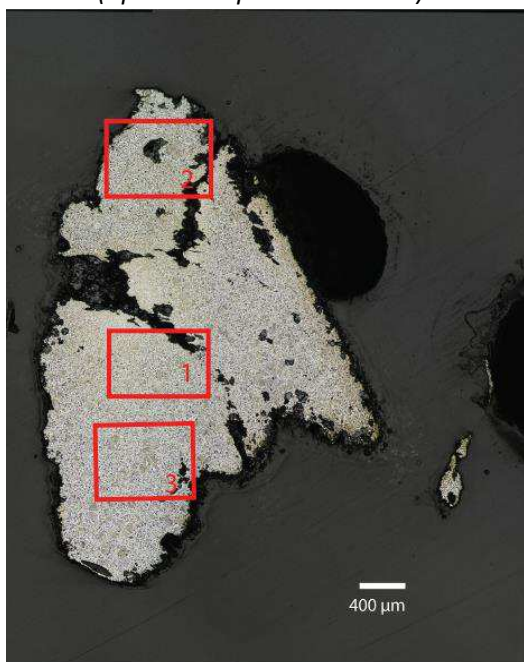
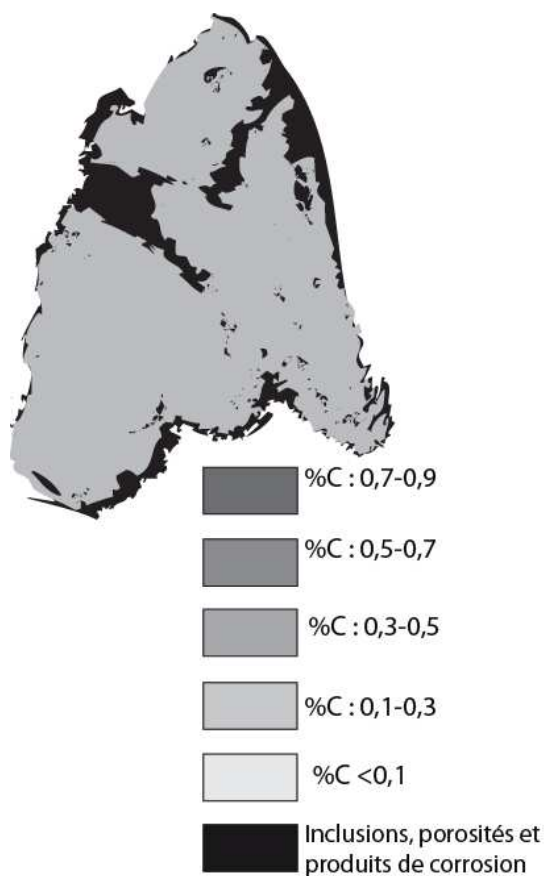
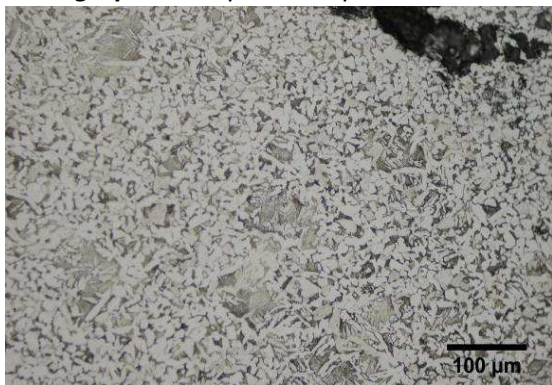


Schéma correspondant



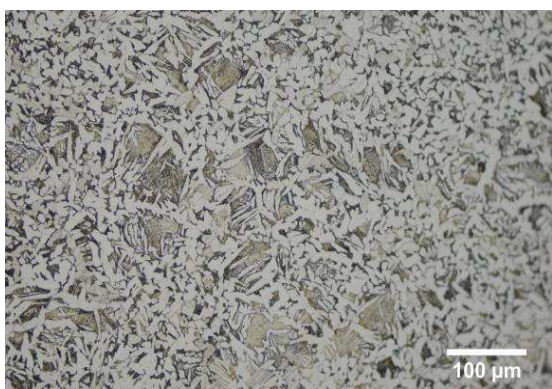
Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



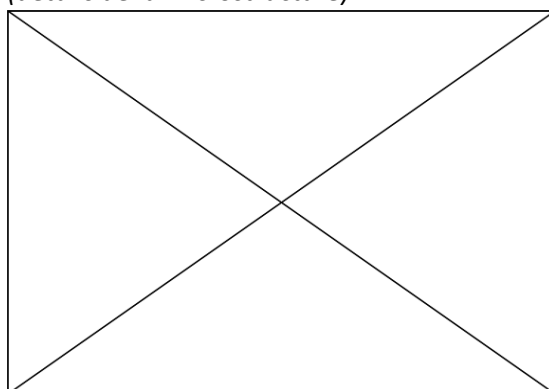
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
5	3

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Direct	<0,01
Abaque	Direct	
PROCEDE	Direct	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon E

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : E

Numéro de l'élément d'armure : E

Lieu de conservation : West Bohemian Museum (Plzen)

Lieu de découverte :

Description : Bourguignotte qui porte deux marques (A.Williams, 2003, p.665)

Datation : 1580-1600 (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Allemagne

Ville : Nuremberg

Élément de l'armure étudié : Bourguignotte

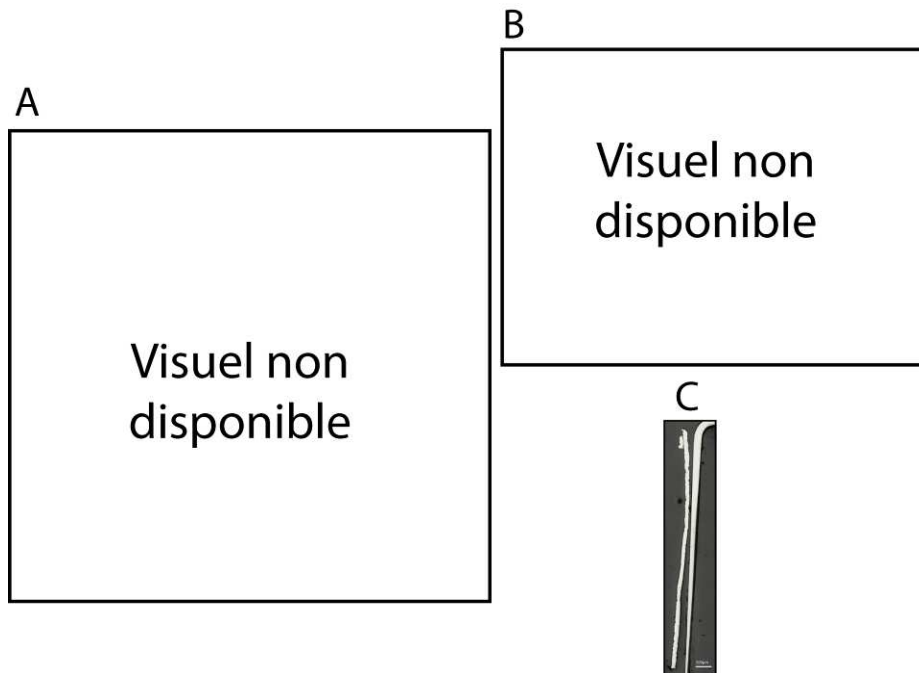
Armurier ou atelier associé : M Schneider?

Présence de marque(s) : Oui

Détails de la (ou des) marque(s) : Marque de la ville de Nuremberg et celle d'un maître M*I peut être celle de Martin Schneider.

Référence bibliographique :

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé par Alan Williams.

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[50-200]	Non résolue	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
0,9	0,06	0,00	255 ($\sigma=16$)	0,10	Non

Commentaires :

Le métal présente une structure de fer phosphoreux

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

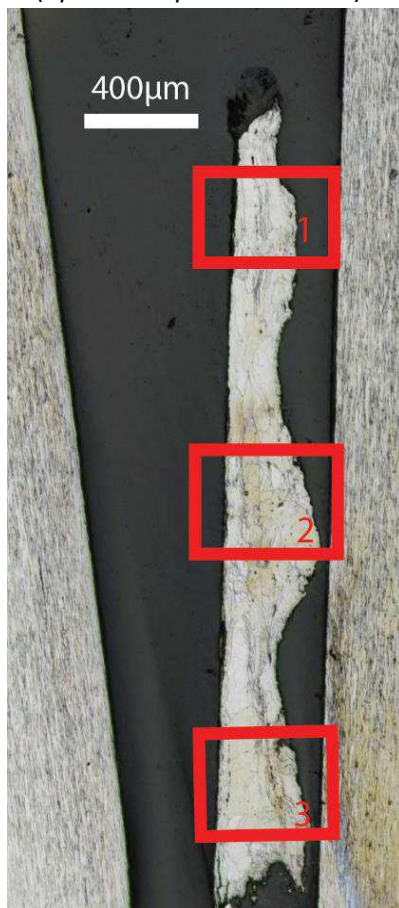
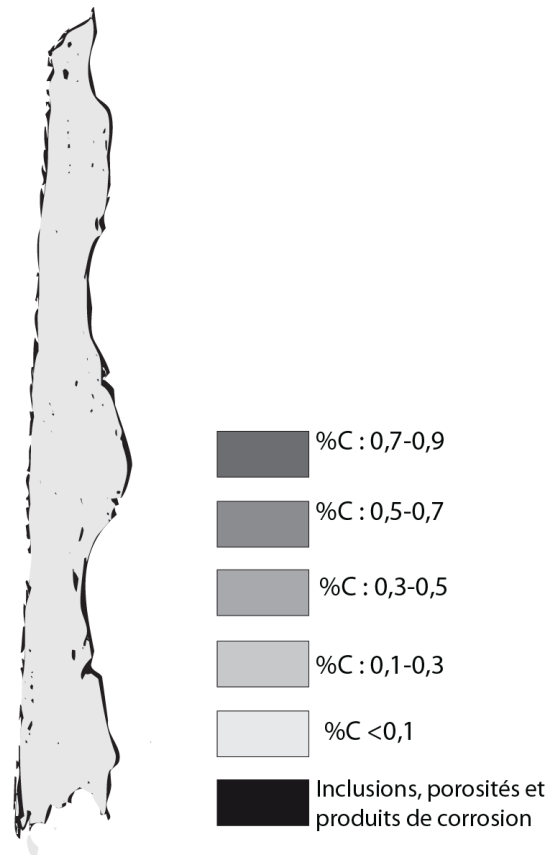
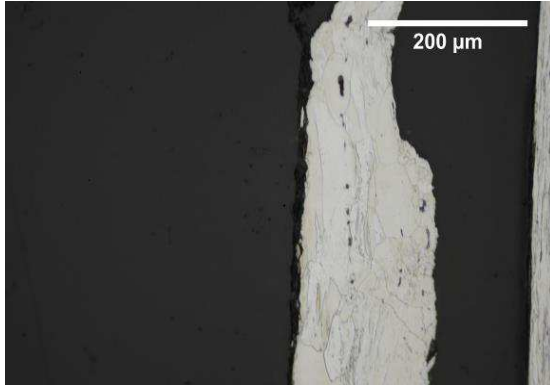


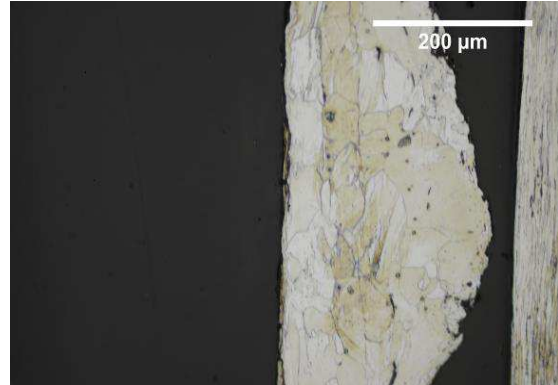
Schéma correspondant



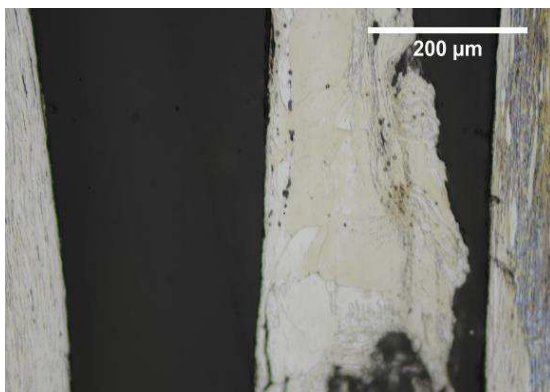
Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



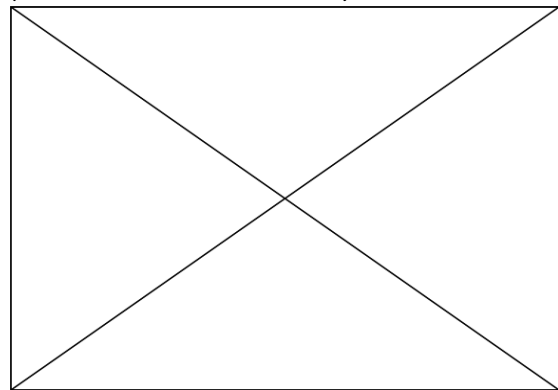
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3% (détails de la microstructure)



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
3	1

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Direct	<0,01
Abaque	Direct	
PROCEDE	Direct	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Non	Non	Non	Non

Résumé des analyses menées sur l'échantillon H

Informations générales

Nom de l'armure ou du groupe d'armures : H

Numéro de l'élément d'armure : H

Lieu de conservation : West Bohemian Museum (Plzen)

Lieu de découverte :

Description : Une défense de tête destiné à la cavalerie ("lobster-tailed cavalry helmet") (A.Williams, 2003, p.675)

Datation : 1600-1630 (Typo-chronologie)

Lieu de fabrication supposé :

Région : Allemagne

Ville : Nuremberg

Élément de l'armure étudié : Défense de tête

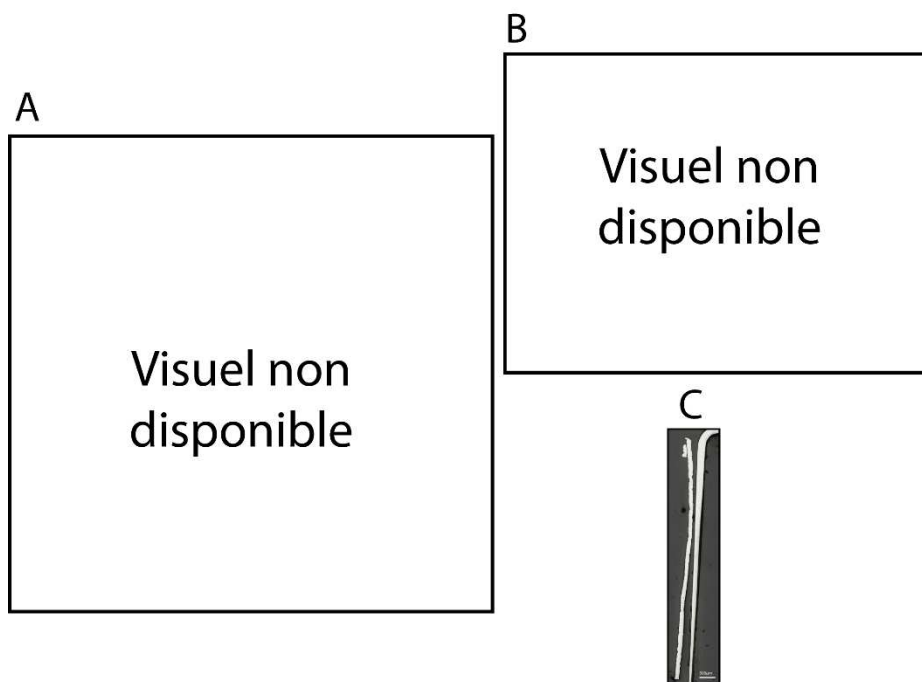
Armurier ou atelier associé : M Schneider?

Présence de marque(s) : Oui

Détails de la (ou des) marque(s) : Présence d'une marque de la ville de Nuremberg et d'un autre poinçon indéchiffré (probablement celle de Martin Schneider)

Référence bibliographique :

Repérage du prélèvement



« A » : Photographie de la pièce complète, « B » : repérage du prélèvement, « C » : vue de l'échantillon

Repérage du prélèvement :

Cet échantillon a été prélevé par Alan Williams.

Principales caractéristiques du métal

Taille des grains (μm)	Forme de la perlite	Structures de trempe	Structures fantômes	Possible cémentation Gradient de teneur en carbone	Structures de Widmanstätten
[50-200]	Non résolue	Non	Non	Non	Non

Propreté inclusionnaire (%)	Taux moyen de carbone (%C*)	Sigma	Dureté moyenne (Hv)	%massP	Structures en bandes
0,4	0,06	0,00	212 ($\sigma=23$)	<0,1	Non

Commentaires :

Cet échantillon possède une structure ferritique.

Analyses métallographiques

Mosaïque de l'échantillon
(après attaque au Nital 3%)

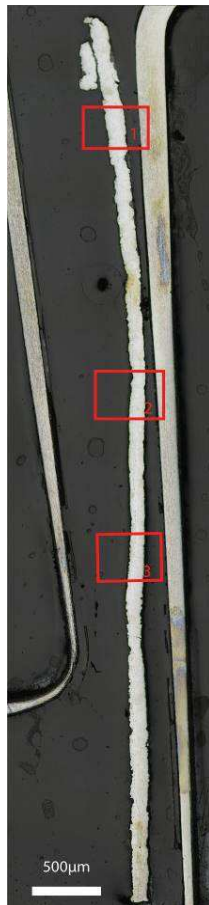
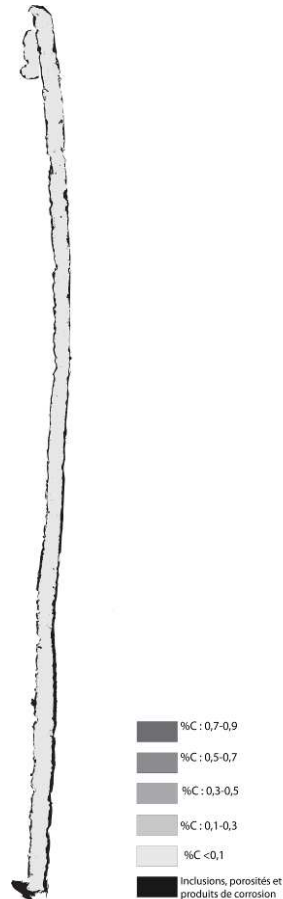
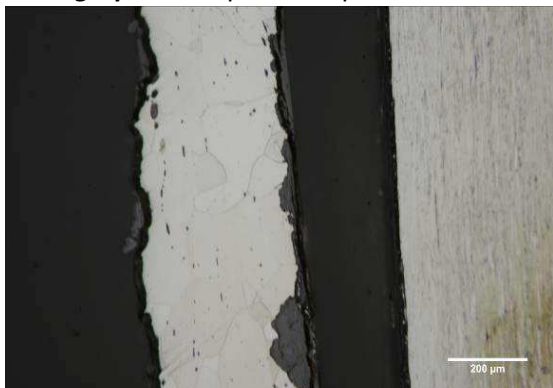


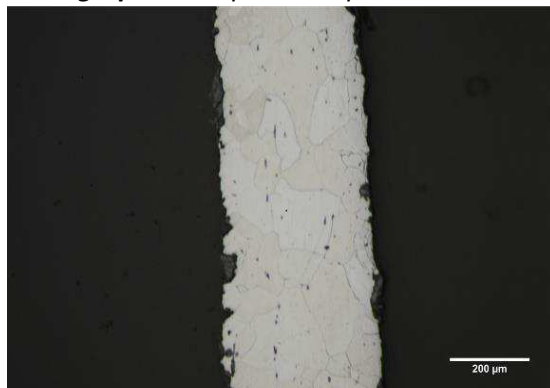
Schéma correspondant



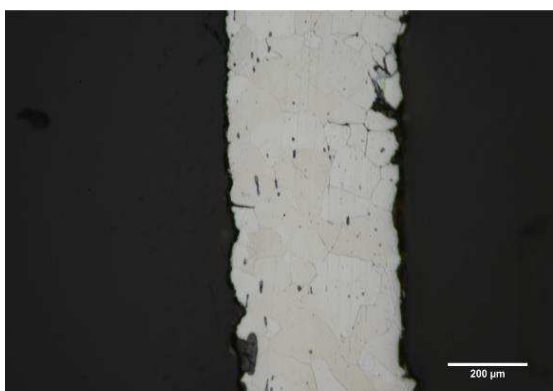
Micrographie 1 : Après attaque au Nital 3%



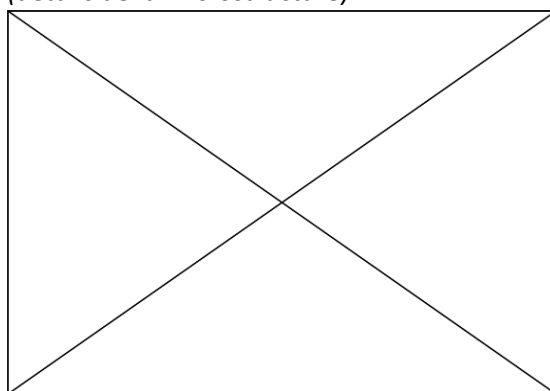
Micrographie 2 : Après attaque au Nital 3%



Micrographie 3 : Après attaque au Nital 3%



**Micrographie 4 : Après attaque au Nital 3%
(détails de la microstructure)**



Principaux résultats des analyses inclusionnaires

- Tri des inclusions

Nombres de classes définies	Classe(s) retenue(s)
4	3

- Régression Logistique et Abaque de compatibilité

	Procédé	Probabilité (p_{indirect})
Régression logistique	Direct	<0,01
Abaque	Direct	
PROCEDE	Direct	

- Provenance et compatibilité chimique

Appartient à Italie_Groupe1	Appartient à Allemagne_Groupe1	Signature chimique compatible avec Italie_Groupe1	Signature chimique compatible avec l'espace lombard (S. Leroy, 2010)	Signature chimique compatible avec la Minette Lorraine (A. Disser, 2014)
Non	Oui	Non	Non	Non

Résumé

Ce projet s'intéresse à un objet particulier : l'armure. Celle-ci, dont la fonction première était de protéger le combattant, s'est adaptée entre le XIII^e et le XVII^e siècle aux bouleversements qu'ont connu les pratiques de guerre et l'organisation des armées dans cette période. L'armure pouvait aussi avoir une autre fonction, celle de distinguer socialement son porteur. Ainsi, à la fin du Moyen Âge l'armure est à la fois un objet de grande consommation et d'usage courant mais également un produit de luxe. Sa fabrication, dominée par différents centres de productions internationaux comme les villes Milan et Nuremberg, demandait un savoir-faire spécifique pour travailler et mettre en forme le métal.

Dans le but d'éclairer d'une part les techniques et savoir-faire anciens, d'autre part la circulation et les échanges dans l'espace européen, ce projet aborde l'étude de l'armure par sa matérialité, en mettant en œuvre une approche archéométallurgique. Un corpus spécifique, de plus d'une centaine d'objets, caractéristique de l'évolution de l'équipement défensif des combattants mais également des grands centres de production européens a ainsi été constitué. L'analyse du métal a permis de déterminer la nature des matériaux employés ainsi que les techniques de fabrication de ces objets. L'étude des inclusions non métalliques a quant à elle permis de discuter de l'origine géographique du métal utilisé pour la fabrication des pièces.

De façon générale, les résultats ont montré l'emploi d'alliages de natures variées, parfois très hétérogènes pour réaliser les plates d'armures. Néanmoins en moyenne le métal employé possède une dureté proche de celle d'un acier homogène à 0,4-0,5% de carbone. Les alliages trempés de dureté élevée demeurent très minoritaires dans le corpus étudié. Des spécificités ont néanmoins été relevées, comme l'utilisation d'un matériau spécifique, associant plusieurs feuilles de métal aux propriétés différentes qui pouvait offrir à l'armure de meilleures propriétés défensives. Les informations acquises ont également permis d'étudier les pratiques mises en œuvre par les armuriers que ce soit pour la fabrication d'une armure complète, la production massive de pièces en « série », ou issues d'un même atelier. Les résultats relatifs à la nature et au travail du métal nous ont ainsi amené à questionner le rôle du maître armurier qui signait les objets et la signification de cette signature pour un atelier.

Abstract

The project focuses on a specific object: armor. Between the 13th and early 17th centuries, war practices have undergone major changes, both on the technological level, as well as the organizational one. Accordingly, defensive arms were adapted to the new needs in order to protect their owners. Armor was also in some cases a mark of social distinction. Thus, at the end of the Middle Ages, armor was both an object for everyday military use, massively produced, and a luxury attire. Its fabrication was dominated by several prestigious European centers of production like Milan and Nuremberg and required specific technical skills to shape the metal.

In order to shed light on some of the techniques and ancient skills, along with the circulation and exchanges in the European space, this project addresses the study of armor through its materiality, by implementing an archeometallurgical approach. A specific corpus of over a hundred artefacts was collected, characteristic of the evolution of the defensive equipment of the fighters but also of the great European centers of production. Physicochemical analysis of the metal can decipher its nature and reveal the technical skills of the craftsmen. Non metallic phases analysis has allowed to test hypotheses on the provenance of the materials employed.

Overall, the results showed the use of alloys of varying nature, sometimes highly heterogeneous, to realize the plates of armor. However, on average the metal employed has a hardness close to a homogeneous steel with 0.4-0.5% carbon. Hardened alloys of high hardness remain very minor in the studied corpus. Specificities were nevertheless noted, such as the use of a specific material, combining several sheets of metal with different properties that could offer better defensive properties. The information acquired also allowed to study the workshop practices implemented by the armorers, whether for the manufacture of a complete set of armor, the mass production of "serial" pieces, or those originating from the same workshop. The results relating to the nature and hammering of the metal have led us to question the exact nature of the intervention of the master armorer who signed the artefact and the significance of the signature of a workshop