

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

Auteur : Dewez, Amandine

Promoteur(s) : Van Wersch, Line

Faculté : Faculté de Philosophie et Lettres

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

Année académique : 2024-2025

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

Avertissement à l'attention des usagers :

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

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

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



ÉTUDE METALLOGRAPHIQUE ET CHIMIQUE

DE PRODUITS FINIS ET SEMI-FINIS EN FER

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



VOLUME 1 : TEXTE

Mémoire présenté par **Amandine DEWEZ**

en vue de l'obtention du grade de Master en Histoire de l'art et Archéologie,
orientation Archéométrie, à finalité approfondie

Sous la direction de **M. Pierre NOIRET** et de **Mme Line VAN WERSCH**

Lecteurs : Alexandre Dissier

Justin Coppe

Année académique 2024-2025

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



ÉTUDE METALLOGRAPHIQUE ET CHIMIQUE

DE PRODUITS FINIS ET SEMI-FINIS EN FER

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



VOLUME 1 : TEXTE

Mémoire présenté par **Amandine DEWEZ**

en vue de l'obtention du grade de Master en Histoire de l'art et Archéologie,
orientation Archéométrie, à finalité approfondie

Sous la direction de **M. Pierre NOIRET** et de **Mme Line VAN WERSCH**

Lecteurs : Alexandre Disser

Justin Coppe

Année académique 2024-2025

REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à Mme Van Wersch, promotrice de ce mémoire, pour m'avoir proposé un sujet en accord avec mes intérêts et pour son accompagnement tout au long de ce projet. Même si je n'ai pas toujours sollicité son aide autant que j'aurais pu, elle a su se montrer patiente et encourageante, et ses remarques, lorsqu'elles m'étaient nécessaires, ont toujours été précises et motivantes.

Un grand merci à M. Disser, pour son accueil au sein du LAPA et pour m'avoir initiée avec rigueur et pédagogie aux méthodes métallographiques. Sa disponibilité et son savoir-faire ont constitué un repère essentiel pour mener à bien l'étude de ce corpus. Je lui suis également reconnaissante d'avoir accepté de remplir le rôle de lecteur, pour l'attention et le temps qu'il a accordés à ce travail.

Je remercie tout particulièrement M. Coppe, qui a accepté d'endosser le rôle de lecteur dans des conditions particulières et qui, malgré cela, s'est investi avec enthousiasme et bienveillance. Sa disponibilité et ses conseils attentifs m'ont beaucoup aidée à garder confiance et à avancer.

Ma gratitude va également au CAHC et à M. Delye, pour leur générosité à partager leurs collections et pour m'avoir laissé la liberté d'explorer ce matériel avec confiance, ainsi qu'au Musée communal de Huy, pour avoir accepté de confier l'une de leurs pièces à cette recherche. Je remercie aussi chaleureusement le LAPA pour m'avoir donné accès à ses instruments et infrastructures, sans lesquels cette étude n'aurait pas été possible.

Enfin, je voudrais remercier ma famille, d'avoir continué à croire en moi et de m'avoir encouragée toutes ces années, et mes amis, Gwen, le CHAAM. Une pensée particulière pour mes plus chères amies, Amandine, Eva A., Eva G. et Cassandra : votre soutien indéfectible, tout au long des moments les plus difficiles, a été ma force. Sans vous, je me serais perdue depuis longtemps. Merci d'avoir cru en moi bien plus que je ne l'ai fait moi-même.

Je garde enfin une pensée émue pour M. Pierre Noiret, mon promoteur initial, dont la bienveillance et l'humanité m'ont profondément marquée. Lors de nos derniers échanges, il a su accueillir mes difficultés avec une écoute rare et empathique. Son souvenir m'accompagne avec gratitude et respect.

TABLE DES MATIERES

ABRÉVIATIONS	0
1. INTRODUCTION	9
2. ÉTAT DE L'ART	12
2.1. État de la recherche sur l'âge du Fer en Europe	12
2.2. État de la recherche sur les objets et la métallurgie du fer de l'Age du Fer.	16
2.2.1. <i>Sur les traces de métallurgie ancienne</i>	16
2.2.2. <i>Avancées récentes en contexte français</i>	22
2.2.3. <i>État de la recherche sur les produits semi-finis</i>	24
2.2.4. <i>État de la recherche sur les fiches de muri gallici</i>	30
3. ASPECTS TECHNIQUES DU FER.....	33
3.1. Chaîne opératoire en sidérurgie.....	33
3.1.1. <i>Introduction</i>	33
3.1.2. <i>Le minerai</i>	33
3.1.2.1. <i>Extraction du minerai</i>	34
3.1.2.2. <i>Traitement du minerai</i>	34
3.1.3. <i>La réduction</i>	34
3.1.3.1. <i>Le procédé direct</i>	35
3.1.3.2. <i>Fer, fonte, acier</i>	36
3.1.4. <i>L'épuration (dégrossissage)</i>	37
3.1.5. <i>La post-réduction</i>	37
3.1.5.1. <i>L'épuration</i>	38
3.1.5.2. <i>Le forgeage</i>	38
3.2. « Produits » et déchets	41
3.2.1. <i>Déchets et scories</i>	41
3.2.2. <i>Demi-produits</i>	42

4.	ÉTUDE DE CAS : LE SITE ROCHER DU VIEUX-CHÂTEAU DE PONT-DE-BONNE	44
4.1.	Présentation du site	44
4.1.1.	<i>Localisation et morphologie du site</i>	44
4.1.2.	<i>Données de fouille et occupations successives</i>	45
4.1.2.1.	<i>Le Néolithique</i>	45
4.1.2.2.	<i>La Protohistoire et début de l'époque gallo-romaine</i>	45
4.1.2.3.	<i>La période carolingienne</i>	46
4.2.	Historique des fouilles	46
4.2.1.	<i>Les premières découvertes et fouilles anciennes</i>	46
4.2.2.	<i>Reprise des fouilles et recherches modernes</i>	48
4.3.	Le matériel métallique	51
4.3.1.	<i>Les demi-produits</i>	51
4.3.2.	<i>Fiches</i>	52
4.3.3.	<i>Clous</i>	53
4.3.4.	<i>Scories</i>	53
4.3.5.	<i>Autres objets métalliques</i>	54
5.	MÉTHODOLOGIE ET MOYENS ANALYTIQUES	55
5.1.	Présentation et description du corpus d'étude.....	55
5.1.1.	<i>Les fiches et le demi-produit sélectionné</i>	56
5.1.2.	<i>Les clous</i>	57
5.1.3.	<i>Reste du corpus</i>	58
5.2.	Méthodologie et protocoles analytiques	60
5.2.1.	<i>Étude à échelle microscopique du corpus</i>	62
5.2.1.1.	<i>Préparation des échantillons</i>	62
5.2.1.2.	<i>Examen métallographique</i>	62

5.2.1.3.	<i>Analyse inclusionnaire</i>	64
6.	RÉSULTATS DES ANALYSES	68
6.1.	Résultats de la métallographie	68
6.1.1.	<i>Les clous</i>	68
6.1.2.	<i>Les fiches</i>	69
6.1.3.	<i>Le demi-produit</i>	70
6.1.4.	<i>Produits indéterminés</i>	71
6.2.	Résultats des analyses MEB-EDS	73
6.2.1.	<i>Les clous</i>	73
6.2.2.	<i>Les fiches</i>	74
6.2.3.	<i>Le demi-produit</i>	76
6.2.4.	<i>Produits indéterminés</i>	77
7.	INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS ET DISCUSSION	79
7.1.	Interprétation des observations métallographiques	79
7.1.1.	<i>Les clous</i>	79
7.1.1.1.	L'échantillon P.VCh11/5/2/78/7 (Annexe D, p.30-34)	79
7.1.1.2.	L'échantillon P.VCh10/5/2/70/27	79
7.1.1.3.	L'échantillon P.VCh10/5/1-2/79/5	79
7.1.1.4.	Conclusion.....	80
7.1.2.	<i>Les fiches</i>	80
7.1.2.1.	L'échantillon P.VCh10/5/1-2/84/1	80
7.1.2.2.	L'échantillon P.VCh10/5/1-2/84/2	80
7.1.2.3.	L'échantillon de la fiche P.VCh11/8/1/57/5	81
7.1.2.4.	Conclusion.....	81
7.1.3.	<i>Le demi-produit</i>	82
7.1.3.1.	L'échantillon PDB/VCh/347	82

7.1.4.	<i>Produits indéterminés</i>	82
7.1.4.1.	L'objet P.VCh12/10//142/106.....	82
7.1.4.2.	L'échantillon P.VCh11/9//125/43.....	82
7.2.	Interprétation des analytiques chimiques.....	83
7.2.1.	<i>Clous</i>	83
7.2.1.1.	L'échantillon P.VCh11/5/2/78/7	83
7.2.1.2.	L'échantillon P.VCh10/5/2/70/27	84
7.2.1.3.	L'échantillon P.VCh10/5/1-2/79/5	84
7.2.2.	<i>Fiches</i>	85
7.2.2.1.	L'échantillon P.VCh10/5/1-2/84/1	85
7.2.2.2.	L'échantillon P.VCh10/5/1-2/84/2	85
7.2.2.3.	L'échantillon P.VCh11/8/1/57/5	86
7.2.3.	<i>Le demi-produit</i>	86
7.2.3.1.	L'échantillon PDB/VCh/347	86
7.2.4.	<i>Produits indéterminés</i>	86
7.2.4.1.	L'échantillon P.VCh11/9//125/43.....	86
7.2.4.2.	L'échantillon P.VCh12/10//142/106.....	87
7.2.5.	<i>Analyse comparative des inclusions par rapports CNR</i>	87
7.3.	Discussion	88
8.	CONCLUSION	98
	BIBLIOGRAPHIE	102

INFORMATIONS CONCERNANT LA STRUCTURE DE CE TRAVAIL

Ce travail est présenté en deux volumes complémentaires :

- Volume 1 : corps du texte et bibliographie.
- Volume 2 : annexes comprenant les illustrations, les tableaux et le catalogue analytique présentant les observations métallographiques pour chaque échantillon.

La bibliographie en fin du premier volume reprend toutes les références citées, y compris celles liées aux documents iconographiques du second volume. Les crédits complets des illustrations sont présentés dans la table des figures du volume 2.

ABRÉVIATIONS

CAHC	Cercle archéologique Hesbaye-Condroz
CEA	Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives
LAPA	Laboratoire Archéomatériaux et Prévision de l'Altération
CNR	Composés Non Réduits
MEB-EDS	Microscopie électronique à balayage couplée à la spectroscopie de rayons X à dispersion d'énergie
PPM	<i>Primary Pieces of Metal</i>

1. INTRODUCTION

Le présent mémoire est né d'un intérêt marqué pour les âges des Métaux en Europe occidentale, et plus particulièrement pour la compréhension de l'artisanat du métal, et du fer en particulier, durant ces époques. En Belgique, les sites ayant livré des vestiges de l'âge du Fer sont peu nombreux, et ceux présentant des indices d'activités métallurgiques sont encore plus rares. Parmi ces derniers, peu ont fait l'objet d'études spécifiques portant sur la métallurgie. Un tel contexte suggérait l'existence d'un champ d'étude encore peu développé, en raison de la rareté des sites livrant des traces métallurgiques et du caractère souvent fragmentaire des données disponibles.

Bien que les recherches sur cette période continuent de s'enrichir et que nous disposons de connaissances partielles sur l'histoire des peuples de la Gaule préromaine, l'interprétation des sites et des vestiges associés demeure souvent complexe pour les archéologues. Depuis une vingtaine d'années, les avancées en archéométallurgie ont amélioré notre compréhension de la production du fer de ces sociétés : depuis l'approvisionnement en matières premières jusqu'à la circulation et l'usage des objets. Ces progrès ont particulièrement bénéficié aux recherches menées en France (*infra* section 2.2.2). En Belgique, en revanche, les sites livrant des traces de production métallique ferreuse n'ont pas encore fait l'objet d'études d'une ampleur comparable.

Ce mémoire s'inscrit dans le cadre de l'étude d'un site d'occupation daté de la fin de l'âge du Fer (La Tène D), en territoire *Condruses*, localisé dans l'actuelle Wallonie. Cette période correspond à un moment charnière entre la Protohistoire et l'Histoire, où les sociétés celtiques de l'Europe nord-occidentale commencent à apparaître dans les sources écrites, notamment chez les auteurs gréco-romains. Le terme de « Protohistoire » désigne ici cette période intermédiaire, qui englobe l'âge du Bronze et l'âge du Fer, et qui voit coexister une culture matérielle riche et l'absence de témoignages écrits produits par les populations concernées. Les populations qualifiées de « Celtes », apparaissent dans les textes antiques dès le V^e siècle avant notre ère pour désigner les sociétés occupant les régions nord-alpines de l'Europe occidentale. Parmi ces groupes, les « Gaulois » correspondent plus spécifiquement aux communautés établies sur les territoires de la Gaule, incluant la Belgique

actuelle¹. Ces deux appellations seront donc employées dans ce travail de manière complémentaire. Comme l'a souligné O. Buchsenschutz (2015), les contextes culturels, politiques et techniques diffèrent sensiblement entre l'Europe occidentale et orientale. Ce mémoire se limite volontairement à l'Europe occidentale, et plus précisément à la Belgique et la France. Ce choix s'explique d'une part par la localisation du site étudié, et d'autre part par l'état plus avancé de la recherche archéométallurgique en France, qui fournit des bases méthodologiques et comparatives particulièrement utiles à l'analyse des données belges, encore plus explorées.

Ce travail de fin d'études prend donc place dans ce contexte. Emmanuel Delye, responsable des fouilles programmées sur le site du *Rocher du Vieux-Château* de Pont-de-Bonne (commune de Modave) depuis 2004, s'est questionné sur la présence et la mise en œuvre de matériel ferreux sur le site. Une partie de ce matériel ferreux est issu du système de défense protégeant le site, une autre est issue de divers niveaux de fouilles associés à plusieurs occupations du site depuis l'âge du Fer à la période médiévale. Certains objets retrouvés témoignent de plusieurs étapes de la chaîne opératoire de la métallurgie du fer par procédé direct, suggérant une potentielle activité métallurgique locale donc il conviendrait d'estimer la date. L'objectif de ce présent mémoire est de réaliser une étude comparative d'un corpus d'objets datés de l'occupation de la fin de La Tène : des demi-produits et des objets façonnés, afin de mieux comprendre et interpréter la production, la circulation et le contexte d'utilisation de ces objets. Ce travail est l'opportunité d'appliquer une méthodologie à la confluence entre les disciplines archéologiques et les études scientifiques menées en laboratoire, de plus en plus usée et théorisée en France, à un site belge. Cette étude comparative vise à répondre à la problématique suivante : observe-t-on une homogénéité des matières premières et des techniques de mise en œuvre au sein d'un corpus d'objets en fer (produits finis et semi-finis) découverts sur le site de Pont-de-Bonne, indiquant une cohérence entre les productions métallurgiques du site ? En l'absence de structures en place (foyer ou forge), l'étude de ce corpus pourrait apporter des réponses à l'hypothèse d'une métallurgie locale, et affiner ainsi l'interprétation fonctionnelle du site ainsi que son éventuel rôle dans un réseau de production et d'échange des matières premières et des productions métalliques, dans cette région de la Gaule au 1^{er} siècle après J.-C.

¹ Comme le précise E. Delye, la civilisation des Condruses est mentionnée par César comme appartenant aux peuples « Germains », lors de la mention de la campagne de 57 av. J.-C. (César, *GB*, II, 4) (Delye *et al.*, 2016b). Néanmoins, nous suivons dans ce travail la tendance de l'auteur à parler de « Gaulois » ou de « Celtes » plutôt que de « Germains », par souci de cohérence et de simplicité.

L'intérêt d'un travail tel que celui-ci est que l'apport des analyses archéométriques présentement réalisées sur les matériaux ferreux de cette période a été conséquent pour l'étude de deux catégories de vestiges en particulier : d'une part, les demi-produits, situés entre la loupe de réduction et l'objet fini, et d'autre part, les déchets de production (scories, chutes, etc.). Le corpus étudié dans ce mémoire comporte des objets faisant partie des demi-produits, ainsi qu'une catégorie encore peu étudiée : les objets de quincaillerie, notamment les fiches de *murus gallicus*, système défensif largement attesté en Gaule.

Ce champ de recherche soulève encore de nombreuses questions et présente des limites, notamment liées aux phénomènes de recyclage, de emploi, ou du manque de traces. L'étude des sites liés à la métallurgie est d'autant plus délicate qu'elle nécessite des méthodes de fouilles ciblées, car sans une attention particulière portée à certaines traces, notamment présentes dans les sédiments, des éléments clefs peuvent passer inaperçus. Identifier les indices d'une chaîne opératoire ou tenter de reconstituer le parcours d'un objet en métal, depuis sa fabrication jusqu'à son abandon, reste un véritable défi, tant sur le plan archéologique que méthodologique.

2. ÉTAT DE L'ART

Avant d'aborder l'étude du corpus, il convient de revenir sur les travaux scientifiques qui ont marqué la recherche sur la métallurgie du fer à la fin de l'âge du Fer, tant en Belgique qu'à l'échelle européenne. Cet état de l'art a pour but de poser les bases théoriques et méthodologiques sur lesquelles s'appuie ce mémoire et sera organisé autour de plusieurs axes : les recherches sur la métallurgie du fer en contexte protohistorique, les avancées en archéométrie appliquées à ce champ, et les spécificités régionales observées en Gaule.

2.1. État de la recherche sur l'âge du Fer en Europe

L'étude de l'âge du Fer émerge tardivement comme champ de recherche scientifique autonome en Europe. Longtemps reléguées à la marge des grandes civilisations antiques de tradition écrite, les sociétés de l'âge du Fer ont suscité un moindre d'intérêt auprès des historiens, linguistes et archéologues jusqu'au XX^e siècle. Cela s'explique par la rareté et la complexité des sources disponibles, et par une tendance à privilégier les cultures de tradition écrite (Buchsenschutz, 2015).

Avant l'émergence de l'archéologie moderne, quelques vestiges matériels de cette période avaient déjà attiré l'attention d'érudits et d'antiquaires, dès la Renaissance et plus encore au XVIII^e siècle. A cette époque, des savants commencent également à s'intéresser aux vestiges d'enceintes en terre ou de fortifications en hauteur, bien qu'ils les interprètent souvent de manière anachronique, les attribuant à des périodes plus récentes ou les confondant avec des constructions romaines ou médiévales. Leur représentation des vestiges préromains demeure encore floue, sans distinction nette entre les périodes (Buchsenschutz, 2015).

Jusqu'au XIX^e siècle, les principales sources d'informations sur l'âge du Fer restent les textes d'auteurs grecs et latins comme César, Strabon, Tite-Live et Tacite, qui sont cependant lacunaires et souvent biaisés par le point de vue de leurs auteurs (Buchsenschutz, 2015). Ces textes sont revus par les linguistes, tandis que la numismatique commence à s'intéresser aux productions des cultures anciennes, mais l'archéologie protohistorique reste,

elle, encore peu développée. Elle se concentre essentiellement sur les vestiges les plus visibles ou les plus monumentaux : fortifications en terre, *tumuli*, contextes funéraires. Les fouilles archéologiques se multiplient, notamment en France, autour des *tumuli*, mais de manière encore très régionale et inégale. Les sites d'habitat sont, eux, beaucoup plus difficiles à appréhender en raison de leur diversité et de leur conservation, consistant en des vestiges parfois beaucoup plus discrets tels que de simples trous de poteaux. Ce déséquilibre dans les objets d'étude reflète les limites méthodologiques de l'époque, encore largement tournée vers les structures en élévation et les sites funéraires. Une première tentative de distinction des sociétés celtiques dans ce contexte antique est entreprise par le comte de Caylus au XVIII^e siècle dans son *Recueil d'antiquités égyptiennes, étrusques, grecques et romaines* (1752–1767), qui amorce une réflexion sur les productions culturelles pré-romaines. Mais la période reste encore mal définie et globalement mal connue (Buchenschutz, 2015).

C'est au XIX^e siècle, sous l'impulsion de Napoléon III en France, que des campagnes de fouilles de grande ampleur sont lancées pour retrouver les cités mentionnées dans la *Guerre des Gaules* de César. Ces recherches aboutissent à la découverte de sites majeurs comme Bibracte (Mont Beuvray, Saône-et-Loire), Alésia (Côte-d'Or), Gergovie (Puy-de-Dôme), Murcens (Lot) ou Vertault (Côte-d'Or) (Buchenschutz, 2015). Le rempart découvert à Murcens est le premier à être identifié archéologiquement comme un *murus gallicus*, un type de fortification décrit par César dans son ouvrage *Commentarii de Bello Gallico* (Buchenschutz et Ralston, 2014). Dans le reste de l'Europe, cette dynamique se poursuit avec la mise au jour de Manching en Bavière², et des sites majeurs de La Tène en Suisse et Hallstatt en Autriche. Ces découvertes vont profondément changer et redéfinir la conception de l'âge du Fer pour les contemporains. A partir de ces ensembles, riches en mobilier, s'élabore une nouvelle chronologie, basée sur les cultures matérielles et menant à la subdivision des phases de Hallstatt (âge du Fer ancien) et La Tène (âge du Fer récent), encore en usage aujourd'hui (Buchenschutz, 2015).

C'est dans ce contexte, vers les années 1860, que naît un véritable débat sur l'origine des objets en fer. Jusque-là, la maîtrise de la métallurgie du fer était considérée comme un marqueur de « civilisation » avancée, attribuable aux peuples méditerranéens. Les objets en fer retrouvés dans les contextes protohistoriques d'Europe centrale, occidentale ou nordique

² Le site a été découvert au XIX^e siècle mais seulement identifié comme *oppidum* celte au début du XX^e siècle par P. Reinecke (1903).

(îles britanniques et Irlande) étaient souvent perçus comme des produits d'importation, voire comme les vestiges d'occupations étrangères (Buchsenschutz, 2015). Mais à la lumière des découvertes de La Tène, Hallstatt ou Alésia, les chercheurs commencent à envisager que ces objets soient de production locale, voire caractéristiques des Gaulois eux-mêmes. Cela marque une rupture importante dans la manière d'appréhender les cultures dites « barbares ». Pour la première fois, on reconnaît aux sociétés gauloises et celtiques un niveau technologique et artistique comparable à celui des peuples antiques. Ce changement de regard sur les sociétés protohistoriques d'Europe occidentale a contribué à mieux reconnaître leur rôle actif dans la maîtrise du fer, désormais considérée comme marqueur identitaire et technologique (Buchsenschutz, 2015).

À partir de là, l'idée d'un âge du Fer en tant que période structurée se consolide, basée sur une culture matérielle distincte et des caractéristiques spécifiques (*oppida*, remparts, tombes princières, etc.). L'interprétation de ces vestiges ne se limite plus à la lecture des sources antiques, mais s'appuie de plus en plus sur des typologies, des stratigraphies et des comparaisons interrégionales.

Ce n'est toutefois qu'au tournant du XX^e siècle que la Protohistoire devient un véritable sujet d'étude académique, et commencent à faire l'objet d'études plus rigoureuses à travers l'Europe occidentale. En France, l'œuvre de Joseph Déchelette (*Manuel d'Archéologie préhistorique, celtique et gallo-romaine*, 1908) marque une étape importante pour les archéologues (Buchsenschutz, 2015). L'approche y est plus rigoureuse, combinant typologie, stratigraphie et étude du mobilier, notamment funéraire. Cependant, en France, la recherche de la connaissance du monde celtique est alors en grande partie motivée par une idéologie nationaliste : la volonté d'ancrer l'identité française dans un passé protohistorique valorisé. Cette démarche contribue à forger un certain « mythe celtique », qui appelle à un certain regard critique sur les productions de l'époque.

Au XX^e siècle, l'intérêt pour les sites fortifiés perdure et s'étoffe, et de plus en plus d'*oppida* sont fouillés en Europe. En France, la Société préhistorique française, nouvellement fondée, lance un vaste travail de recensement des sites fortifiés connus à travers leur *Commission d'étude des Enceintes préhistoriques et Fortifications anhistoriques*, entre 1906 et 1923 (Buchsenschutz, 2015). Plus tard, l'archéologue britannique Sir. M. Wheeler mène, dans les années 1930, une série de campagnes de prospections, de fouilles, de recensement des sites fortifiés protohistoriques dans le nord de

la France, qu'il consignera dans son ouvrage *Hill-Forts of Northern France* (1957) (Krausz, 1998).

Dans la seconde moitié du XX^e siècle, les recherches sur l'âge du Fer prennent de plus en plus d'ampleur grâce à la création de grands programmes archéologiques. Dans les années 1950, les fouilles mettent à jour des sites emblématiques comme la Heuneburg en 1951, puis la tombe princière de Vix sur le Mont Lassois en 1953. En 1956, l'archéologue allemand W. Dehn réalise la première synthèse à l'échelle européenne sur les habitats protohistoriques (publiée dans son article *Einige Bemerkungen zum « murus Gallicus »* en 1960) et redéfinit la notion d'*oppidum* celtique. Dans les années 60, les travaux de O. Buchsenschutz inventorient plusieurs remparts, dont les résultats sont publiés en 1975. La classification des fortifications celtiques progresse également grâce aux recherches des Britanniques J. Collis et I.B.M Ralston dans les années 1970 et 1980. Parallèlement, le développement de nouvelles méthodes, statistiques et informatiques, permet d'affiner la chronologie de la période, tandis que les grandes synthèses régionales (en Allemagne, Autriche, Suisse) enrichissent la compréhension des cultures celtiques. Ces avancées vont de pair avec une approche pluridisciplinaire de la discipline, mêlant archéologie, linguistique et histoire. Le perfectionnement des techniques de fouille et de prospection aide à mettre au jour de nombreux sites d'habitats jusque-là méconnus.

Les études protohistoriques sont alors institutionalisées. Si en Allemagne et en Angleterre, les cursus universitaires intègrent déjà ces thématiques avant la Seconde Guerre mondiale, la France ne voit les âges des Métaux entrer dans ses programmes qu'à partir des années 1970 (Díaz-Andreu, 2024). Après le milieu du siècle, des équipes de chercheurs organisent régulièrement des colloques nationaux et internationaux, rassemblant archéologues et linguistes autour de questions communes. En France, la création en 1983 de l'Association française pour l'étude de l'âge du Fer (AFEAF), fondée notamment par A. Duval et J.-P. Millotte, rassemble étudiants, chercheurs et archéologues de terrains, et publie annuellement les actes de ces rencontres, encore à l'heure actuelle. On peut également citer la naissance de la revue *Etudes celtiques* traitant des découvertes réalisées en archéologie, art et linguistique. En même temps, c'est le siècle des grandes expositions européennes, dont témoignent les catalogues, qui montrent alors un intérêt renouvelé pour les sociétés celtiques au-delà des simples nécropoles et typologies chronologiques, en explorant divers aspects comme l'économie, l'habitat et la diversité de celui-ci, allant des *oppida* aux fermes isolées.

2.2. État de la recherche sur les objets et la métallurgie du fer de l'Age du Fer

2.2.1. *Sur les traces de métallurgie ancienne*

L'intérêt scientifique pour la production métallique ancienne émerge véritablement au cours du XIX^e siècle, dans un contexte de développement de l'archéologie en Europe. Cette discipline s'inscrit alors dans un mouvement plus large d'émulation scientifique au sein duquel les sciences naturelles, telles que la géologie, la botanique ou la paléontologie, commencent à étudier l'environnement du passé, tandis que les sciences humaines, notamment l'ethnographie, l'anthropologie et l'histoire, se structurent progressivement (Díaz-Andreu, 2024). Comme mentionné *supra* (section 2.1.), la connaissance des périodes préhistoriques et protohistoriques reste encore embryonnaire à cette époque. Héritée de la Renaissance, la familiarité avec les cultures gréco-romaines domine, et l'approche archéologique se limite alors à une distinction relativement sommaire entre vestiges « romains » et « pré-romains » (Díaz-Andreu, 2024).

Dans le même temps, des ingénieurs des mines et des géologues s'interrogent sur la présence de vestiges et d'anciennes traces d'exploitation sur les sites miniers. Leurs observations contribuent à une première reconnaissance des activités métallurgiques anciennes, en identifiant des structures, déchets de production ou réseaux d'extraction antérieurs à l'ère industrielle (Mangin *et al.*, 2004).

Ainsi, au cours du XIX^e siècle, l'intérêt pour les sites archéologiques témoignant d'un lien avec des activités métallurgiques s'intensifie (Berranger, 2014). En 1868, le géologue Gabriel-Auguste Daubrée publie dans la *Revue Archéologique* un inventaire des sites antiques liés à la métallurgie, principalement localisés en France, en Espagne et au Portugal (Bauvais, 2007; Mangin *et al.*, 2004). Ces sites, répartis sur l'ensemble du territoire de la Gaule ainsi qu'en Grande-Bretagne, ont livré des traces d'extraction de divers métaux (or, plomb, argent, cuivre, fer, étain), ainsi que des vestiges de galeries et de ferriers. Sur la base des artefacts mis au jour – poteries, monnaies et objets divers – Daubrée attribue la majorité de ces sites à l'époque romaine. Toutefois, il formule l'hypothèse que certaines scories et installations minières pourraient être antérieures (Daubrée, 1868). Son étude de la question a mis en évidence le degré d'avancement technologique des civilisations antiques et leur maîtrise des ressources métallifères (Bauvais, 2007; Daubrée, 1868). Par ailleurs, ses travaux

montrent également qu'une prise de conscience progressive s'opère : l'origine des pratiques métallurgiques doit être recherchée au-delà de l'Antiquité romaine, vers des périodes plus anciennes, bientôt désignées sous l'appellation d'*Âges des Métaux*.

Dans le prolongement de ces réflexions, l'attention portée aux vestiges archéologiques s'élargit progressivement à la nature des matériaux eux-mêmes. Dès le début du XIX^e siècle, les avancées en chimie analytique, amorcées à la fin du siècle précédent, permettent les premières études scientifiques sur les minerais et les résidus métallurgiques. Au XVIII^e siècle, les premiers examens scientifiques et chimiques appliqués aux métaux anciens marquent les débuts de l'étude de la composition des métaux (Scott et Schwab, 2019). Le chimiste Martin Heinrich Klaproth compte parmi les premiers à analyser qualitativement les métaux anciens, inaugurant ainsi une approche scientifique de leur étude (Caley, 1964). Au sein des contributions notables du XIX^e siècle, les travaux de l'ingénieur des mines André Guenyveau sur les minerais de fer et ceux de Pierre Berthier sur les scories de haut-fourneau et de forge occupent une place importante en Europe francophone (Mangin *et al.*, 2004). Bien que certaines de ces recherches portent sur des produits issus de la réduction indirecte et sur des échantillons contemporains, elles permettent d'établir des bases de données et des référents sur les caractéristiques des produits métallurgiques. Elles démontrent également l'intérêt d'une approche analytique pour comprendre les étapes de transformation du minerai. Berthier, par exemple, identifie des différences notables entre certaines scories de forges catalanes, qu'il interprète comme les témoins d'une métallurgie plus ancienne, antérieure à l'invention du haut-fourneau (Berthier, 1822). Ces observations permettent d'envisager une distinction entre les types de production et ouvrent la voie à une lecture historique des résidus métallurgiques.

Parallèlement aux analyses de la composition chimique, les progrès réalisés dans les domaines de la chimie, de la minéralogie et de la géologie contribuent à l'émergence d'une nouvelle technique d'analyse : le microscope à lumière incidente. Comme découvert par le géologue britannique Henry Clifton Sorby, ce microscope peut servir à étudier les microstructures de certains métaux comme l'acier (Scott et Schwab, 2019). Cela marque les débuts de la métallographie. Cependant, l'application systématique de cette technique aux objets archéologiques ne se généralisera qu'au début du XX^e siècle (Scott et Schwab, 2019).

A partir des travaux de la seconde moitié du XIX^e siècle, l'archéologie des sites protohistoriques et des métaux connaît un essor important en Europe, en particulier en France (Mangin *et al.*, 2004). Les méthodes scientifiques appliquées à l'étude des métaux

anciens se sont perfectionnées et diversifiées depuis leur premières utilisations et sont intégrées de manière plus régulière et systématique aux recherches archéologiques menées sur sites à partir du premier tiers du XX^e siècle (Scott et Schwab, 2019), car il est devenu évident que leur contribution s'avère utile pour résoudre certaines problématiques archéologiques (Caley, 1964). Cette évolution est notamment due au développement de nouvelles méthodes d'analytiques, notamment la spectrométrie d'émission optique (Scott et Schwab, 2019). Comme mentionné précédemment, la métallographie commence à être appliquée de plus en plus afin de déterminer la microstructure des métaux ferreux et non ferreux, bien que ces progrès soient limités par une technologie moins avancée qu'à l'heure actuelle. Ainsi, les métaux sont étudiés sous différents angles : la microstructure, la caractérisation des inclusions de scories, des types de corrosion, etc. Ainsi, l'étude des métaux anciens repose à partir de ce moment sur une approche pluridisciplinaire qui contribue à une meilleure compréhension, plus approfondie, des artefacts métalliques anciens.

Durant l'entre-deux guerres, les avancées dans l'étude des métaux anciens et des sites archéologiques liés à la métallurgie sont moins nombreuses. Quelques ouvrages marquants ont néanmoins été publiés, comme *Le fer à l'époque mérovingienne : étude technique et archéologique* d'Édouard Salin et Albert France-Lanord, paru en 1943. Cette publication, bien que portant sur des artefacts plus récents, est un riche exemple de l'application des méthodes scientifiques à l'étude des métaux et de leurs possibilités.

A partir de la seconde moitié du XX^e siècle, la découverte de nouveaux sites archéologiques marquants relance l'intérêt pour l'étude de la métallurgie (Mangin *et al.*, 2004). C'est également le début de la parution de travaux de référence sur le sujet, parmi lesquels le livre de R.F. Tylecote, *A History of Metallurgy*, sorti en 1977). Cet ouvrage dresse un historique largement représentatif de l'évolution de la métallurgie, depuis les premières utilisations de minerais au Néolithique, jusqu'au milieu du XX^e siècle, et consacre plusieurs chapitres aux âges des Métaux. Dans la continuité de ce travail, Tylecote mène, en collaboration avec Gilmour (Tylecote et Gilmour, 1986), des analyses métallographiques sur une série d'objets tranchants et pointus (couteaux, haches, épées), retrouvés en Grande-Bretagne et datés de l'Antiquité et du Moyen Âge. Ce type d'étude n'est pas unique. Ces recherches permettent de mieux classer les vestiges, de mieux comprendre leur fabrication ainsi que leur usage, mais cela traduit également une réalité au sein de la recherche : l'étude des objets prestigieux laisse peu à peu place à l'étude des objets quotidiens.

À partir des années 1950, et particulièrement à partir de 1970, la branche de l'archéologie dédiée à l'étude des productions métalliques ne cesse d'intégrer les avancées scientifiques et les nouvelles méthodes d'analyse pour répondre à diverses problématiques. C'est également entre ces décennies que la collaboration de plus en plus effrénée entre les « sciences dures » (dont la biologie et les mathématiques) et l'archéologie donne ainsi naissance à une nouvelle discipline nommée « archéométrie ». Son intégration progressive dans les universités et les groupes de recherche contribue à dynamiser l'étude des métaux anciens, en lui apportant une reconnaissance accrue et une portée internationale. Les chercheurs mobilisent ainsi plusieurs approches, issues de la collaboration entre archéologues, chimistes et physiciens (comme l'analyse chimique élémentaire des alliages, la mesure des rapports isotopiques ou encore l'identification d'éléments traces, tels que le phosphore et le manganèse, pouvant constituer des marqueurs d'une signature chimique spécifique) et multiplient les observations à différentes échelles (macro- et micro-) afin d'affiner les interprétations (Berranger, 2014; Berranger et Fluzin, 2013; Díaz-Andreu, 2024). Par la suite, la discipline intègre également des notions de statistiques et de science informatique.

Les études menées dans les années suivantes visent principalement à étudier la circulation des métaux et leur provenance à des échelles régionales et sur des périodes définies, mais aussi à mieux comprendre les techniques de fabrication, les déchets sidérurgiques et les structures associées à leur production (Berranger, 2014; Díaz-Andreu, 2024). Dans cette optique, de nombreux bas-fourneaux sont examinés et classés en différentes typologies selon des critères de forme, de taille, de mode d'extraction de la scorie, de système de ventilation, etc. (Mangin *et al.*, 2004). Toutes les traces liées aux activités de production sont mieux prises en compte, qu'il s'agisse de structures définies comme les foyers, ou de traces plus secondaires, tels que les ferriers, les chutes ou les fines particules émises lors du travail en forge (Mangin *et al.*, 2004). Bien que la compréhension de l'évolution des techniques progresse, les chercheurs rencontrent certaines limites, notamment la difficulté d'établir des études de provenance précises pour les objets métalliques alliés ou recyclés, dont la composition chimique a pu être modifiée au fil du temps (Berranger et Fluzin, 2013). Cependant, il faut attendre le début du XXI^e siècle pour que ces recherches, encore trop limitées, notamment à l'échelle régionale en Europe, commencent à permettre l'établissement de synthèses globales exploitables.

Depuis les années 1970, les travaux se multiplient, accompagnés par l'organisation de nombreux colloques et congrès, ainsi que des premières expérimentations dans le domaine de la métallurgie (Bauvais, 2007; Berranger, 2014). Les échanges entre chercheurs se renforcent à travers toute l'Europe, notamment en France, en Suisse, au Royaume-Uni et en Europe de l'Est, favorisant l'émergence de figures majeures de la recherche telles que l'archéologue tchécoslovaque R. Pleiner, le polonais J. Piaskowski et le britannique P. Crew, qui jouent un rôle majeur dans l'avancée des études sur la métallurgie ancienne (Bauvais, 2007; Berranger, 2014; Scott, 1977).

Comme le précise M. Berranger, à partir des années 1990, les questions de recherche sur le fer s'orientent moins vers l'origine des objets et plus vers la caractérisation et la compréhension des nombreux déchets résultants de la chaîne opératoire (Berranger, 2014). Les travaux mentionnés par Berranger sur les déchets de production métallurgique s'accroissent à partir du début du XIX^e siècle. Ce type de recherche a pour but d'affiner nos connaissances sur les étapes de transformation, également appelées étapes de post-réduction, ainsi que sur les déchets qui y sont associés. Longtemps restés moins étudiés que ceux issus des étapes de réduction, ces déchets, tels que les scories piégées et coulées, les parois et fonds de four, ou encore les culotes de forge, font désormais l'objet d'analyses typologiques et morphologiques plus systématique. Leur intégration dans les études a permis de mieux définir les différentes étapes de la chaîne opératoire dont l'affinage et l'épuration, mais aussi de mieux cerner les gestes des anciens forgerons (compactage, soudure, mises en forme d'ébauche, cémentation, etc.) (Dillmann *et al.*, 2015). Ce hiatus dans la compréhension des données de terrain est une situation qui reste partiellement d'actualité, malgré des avancées récentes importantes, et qui s'explique notamment par la rareté des vestiges clairement identifiables, témoignant des étapes intermédiaires entre les sites de réduction et les sites d'utilisation ou de dépôt, notamment en ce qui concerne les étapes d'épuration des produits bruts, ainsi que par la difficulté à interpréter ces traces (Berranger, 2014).

Les progrès récents ont également rendu possibles de nouvelles synthèses sur la production métallurgique à des échelles régionales. En outre, ces travaux ont contribué à établir des bases méthodologiques précises et efficaces, tant pour les archéologues de terrain que pour ceux qui travaillent avec les laboratoires (Berranger, 2014). Un renforcement des liens entre ces deux sphères de recherche (Berranger, 2014; Berranger et Fluzin, 2013), ce qui favorise la constitution de corpus de plus en plus étoffés et la cartographie élargie des sites métallurgiques sur le territoire (Mangin *et al.*, 2004).

Depuis le début des années 2000, à travers la littérature nous pouvons constater que la recherche sur la sidérurgie ancienne a connu un renouvellement méthodologique. Alors que les travaux antérieurs s'étaient principalement concentrés sur les étapes de réduction, l'attention s'est progressivement portée sur l'ensemble de la chaîne opératoire, incluant la post-réduction, la forge et l'étude des différents déchets (Bauvais, 2007; Berranger, 2014; Berranger *et al.*, 2017b; Fluzin, 2002; Fluzin *et al.*, 2000). Ce changement de perspective s'est traduit par une multiplication des études portant sur les scories et les produits semi-finis, témoins longtemps négligés mais essentiels pour comprendre la diversité des procédés techniques (Berranger *et al.*, 2021, 2019, 2017; Fluzin *et al.*, 2012; Pagès *et al.*, 2011). La recherche, encore jeune, a d'abord visé à constituer et comparer différents corpus régionaux en France, afin d'élaborer des méthodologies adaptées et d'évaluer le potentiel informatif de ces vestiges (Bauvais, 2007; Bauvais *et al.*, 2018b; Bauvais et Fluzin, 2006; Cabboi *et al.*, 2007; Leroy *et al.*, 2000, 2012). En revanche, aucun programme d'ampleur équivalente n'a, à ce jour, été développé en Belgique. Dans ce contexte, l'expérimentation archéologique a pris une place croissante : dans la lignée des reconstitutions menées par P. Crew dès les années 1990, plusieurs programmes récents ont confronté données archéométriques et résultats expérimentaux. Les travaux d'A. Disser et de ses collègues (Disser *et al.*, 2020) ont par exemple permis d'analyser l'évolution des signaux chimiques des inclusions au fil des étapes successives de forge et des traitements appliqués (replis, soudures, ajouts spécifiques). D'autres recherches combinent l'étude d'objets archéologiques et des expérimentations notamment, à partir de minerais de composition connue, afin de tester les possibilités d'analyses de provenance et d'évaluer l'impact de ces minerais sur la signature chimique des produits finis (Blakelock *et al.*, 2009; Charlton *et al.*, 2012). L'attention particulière portée aux inclusions non métalliques, tant dans les scories que dans les objets, a montré leur rôle décisif pour caractériser les systèmes de réduction, les gestes techniques de post-réduction et les circulations du métal (Buchwald et Wivel, 1998; Coustures *et al.*, 2003; Dillmann et L'Héritier, 2007). Ces approches transversales, appliquées aussi bien aux scories qu'aux objets finis et aux demi-produits, contribuent aujourd'hui à renouveler en profondeur la compréhension des chaînes opératoires.

2.2.2. *Avancées récentes en contexte français*

En France, où la discipline s'est véritablement implantée, l'étude du fer s'est fortement développée à partir des années 1950, avec la création de laboratoires spécialisés. En 1977 est créé le premier laboratoire d'étude et de restauration du mobilier métallique (IRRAP) (Bauvais, 2007). Dans les années 1980, la recherche prend de l'ampleur notamment grâce à la structuration de grands pôles de recherche, la multiplication des programmes interdisciplinaires, la mise en place de fouilles préventives systématiques, et la création d'équipes pluridisciplinaires (Bauvais, 2007). De nombreuses unités de recherche et de laboratoires voient le jour, telles que le Laboratoire d'Archéologie des Métaux (LAM) ou l'Institut de recherche en Archéomatériaux (UMR 5060 IRAMAT) (Berranger, 2014).

Les recherches interdisciplinaires se poursuivent activement au tournant des années 2000, tant au point de vue archéologique qu'archéométrique, avec une attention particulière portée aux ateliers et aux zones de production du fer, et aux chaînes opératoires (Berranger, 2014). Les travaux fondés sur de larges corpus, couvrant la Protohistoire, l'Antiquité ou encore le Moyen Âge, ont permis de qualifier plus précisément les types de fer utilisés (aciers de différentes qualités, voire fontes) en fonction de leur finalité. A ce titre peuvent être cités les travaux sur les demi-produits de l'âge du Fer de Berranger et Fluzin (2013, 2014, 2016), les barres de fer découvertes dans les épaves antiques de Saintes-Maries-de-la-Mer de Pagès (Pagès *et al.*, 2011) ou encore les renforts métalliques des cathédrales gothiques (Dillmann et L'Héritier, 2007; Disser *et al.*, 2014). Ces dernières décennies, plusieurs travaux de synthèse régionale ont vu le jour, révélant des zones moins étudiées auparavant telles que le Bassin parisien, la Bretagne, le Centre, l'Ouest et le Nord-Est de la France, bien que l'essentiel des recherches soit concentré au nord et au sud du pays (Bauvais, 2007; Berranger, 2014). Ces deux régions présentent de fortes différences mais sont les plus riches en données. La documentation reste en revanche lacunaire dans les zones intermédiaires, où le nombre de sites connus demeure limité, ce qui restreint la possibilité d'établir des bilans généraux sur l'évolution des techniques et l'organisation du travail à grande échelle (Berranger, 2014; Cabboi *et al.*, 2007).

Un socle méthodologique commun s'est progressivement constitué. Il repose sur l'intégration des déchets sidérurgiques (parois de four, scories coulées, culots de forge, etc.) à l'analyse, combinée à des approches typologiques affinées, permettant de mieux définir les étapes de la production et de restituer certains gestes techniques des forgerons tels que le

compactage, la mise en forme d'ébauches, les soudures ou la cémentation. Simultanément, les analyses des inclusions non métalliques piégées dans les objets ont connu un essor important. Ces inclusions, originaires de scories résiduelles ou d'ajouts ultérieurs, sont devenues un marqueur essentiel pour distinguer les procédés de fabrication directs et indirects. Les travaux menés au cours des dernières décennies, notamment ceux de Dillmann et L'Héritier (2007), ont démontré l'intérêt de la chimie des inclusions pour cette différenciation, méthode récemment renforcée par des traitements statistiques et informatiques, parmi lesquels ceux proposés par Disser *et al.* (2014). Ces méthodes ont été approfondies par l'étude du comportement des éléments chimiques lors des opérations sidérurgiques et par la mise en place de bases de données de référence. Ainsi, les signatures chimiques permettent de tester la provenance des objets et de confronter les données archéologiques, archéométriques, et sources écrites quand il s'agit de périodes historiques.

Depuis le début des années 2000, la recherche française a connu une croissance relativement rapide, portée par une dynamique collective et interdisciplinaire. Parmi les contributions récentes majeures à l'étude de la métallurgie du fer, peuvent notamment être cités les travaux de M. Mangin, Ph. Fluzin, S. Bauvais, S. Cabboi, G. Pagès, M. Leroy, C. Dunikowski, Ph. Dillmann, M. L'Héritier, M. Berranger et A. Disser. Ces avancées s'inscrivent dans une dynamique collective portée par plusieurs chercheurs français aux profils complémentaires. S. Bauvais, dans sa thèse (2007), a dressé un état de la question centré sur l'organisation des activités de forge, en particulier dans le Bassin parisien. M. Berranger s'est consacrée à l'analyse des demi-produits métalliques, notamment durant la Protohistoire. Son approche, alliant typologie, métallographie et analyses chimiques des inclusions et des scories, a conduit à redéfinir ces objets à la fois comme témoins techniques, éléments de circulation et étapes-clés dans les chaînes opératoires. Sur le plan méthodologique, Ph. Dillmann et Ph. Fluzin ont joué un rôle moteur dans l'approfondissement des techniques d'analyse, notamment par l'étude des inclusions non métalliques piégées dans les objets, qui permettent de retracer les procédés de fabrication et d'identifier les filières techniques. Fluzin a également apporté une contribution importante à la compréhension archéométrique des demi-produits, souvent en collaboration avec M. Berranger. G. Pagès s'est quant à lui intéressé aux logiques de production et de diffusion du métal, en particulier aux réseaux de commercialisation en contexte romain, en croisant les données archéologiques (demi-produits issus des épaves de Saintes-Maries-de-la-Mer) et les analyses de provenance de provenance. D'autres travaux ciblés viennent enrichir cette

dynamique. E. Vega a mené des recherches spécifiques sur le fer phosphoreux, dont les propriétés soulèvent des questions quant à leur usage. A. Disser et ses collègues ont introduit des outils statistiques et informatiques appliqués à l'analyse des inclusions, avec des études expérimentales menant à mieux différencier les contextes de réduction et de forge. Avec S. Bauvais, A. Disser a également exploré l'impact des ajouts de forge sur la signature chimique des objets (2019), développant pour cela les méthodologies fondées sur les statistiques multivariées et l'analyse des variations du signal chimique dans les inclusions. Plus récemment, la thèse de M. Gosselin (2021) illustre la consolidation des approches métallographiques intégrées, en s'intéressant à la qualité des alliages ferreux selon les contextes, les finalités d'usage et les procédés de production. Si cette liste reste non exhaustive, elle illustre un champ de recherche encore jeune et en constante évolution, où des approches variées et complémentaires (interdisciplinaires et archéométriques), intégrées à des démarches collectives, contribuent désormais à un socle méthodologique afin de renouveler la compréhension de la sidérurgie ancienne.

2.2.3. *État de la recherche sur les produits semi-finis*

Au sein de la production ferreuse de l'âge du Fer, les récentes recherches sur les déchets de production et les différents éléments issus de la chaîne opératoire ont mis en lumière une catégorie particulière de vestiges : les demi-produits. Également appelés produits semi-finis ou barre³, ces objets correspondent, selon M. Berranger, à une « *étape intermédiaire entre la matière première brute et l'objet en cours de fabrication* » (Berranger, 2007). Ils constituent ainsi des « *réserves de matière première, destinées à être transformées en objets* » (Berranger, 2007). Ces objets peuvent être retrouvés dans divers contextes archéologiques : sur des sites de production ou de transformation, sur des sites de stockage ou en circulation, ou encore du hors circuit technique, en contexte votif ou de dépôt⁴ (Bauvais, 2007; Bauvais et Fluzin, 2006; Gosselin, 2021; Pagès, 2014). En contexte de production ou de transformation, ils ne sont généralement pas destinés à rester, et sont plus souvent retrouvés sous forme de chute. Sur les sites de stockage ou de circulation, ces objets

³ L'appellation « demi-produit » est privilégiée à celle de « lingot » car ce terme désigne le produit obtenu après coulée dans un moule d'un métal en fusion (Pagès *et al.*, 2008). Or, le fer n'est travaillé à l'état liquide qu'à partir de la fin du Moyen-Âge.

⁴ Le terme de « dépôt » est ici entendu comme « une action volontaire, consistant à abandonner intentionnellement des objets (par enfouissement ou immersion) », selon la définition proposée par M. Berranger (2014).

sont fréquemment retrouvés entiers. Leur présence en contexte de circulation peut livrer de nombreuses informations, comme l'illustrent les demi-produits découverts dans les épaves de Saintes-Maries-de-la-Mer, largement étudiés par L. Long, M.-P. Coustures et G. Pagès. Le contexte de dépôt est le cas le plus courant pour les époques protohistoriques. Les dépôts peuvent être terrestres (site d'habitat, site isolé) ou en zone humide (Fig. 60) (Berranger, 2014). Les demi-produits y sont majoritairement retrouvés entiers. Ce type de dépôts métalliques devient particulièrement courant à partir du V^e siècle avant J.-C. et ont livré le plus de matériel (Bauvais, 2007; Gosselin, 2021). En revanche, les cas de contextes votifs sont plus rares.

Auparavant, ces objets étaient peu pris en compte dans les études de la production métallique de l'âge du Fer et de l'Antiquité et rarement envisagés dans le cadre de l'organisation de la production (Berranger, 2014; Smith, 1905). Ces demi-produits occupent aujourd'hui une place centrale dans l'étude des productions métalliques anciennes, car ils offrent une source d'informations précieuse sur les caractéristiques de la production. A la différence des scories, ils conservent des traces à la fois des étapes de réduction et de post-réduction, ce qui permet d'appréhender plus largement la chaîne opératoire et les caractéristiques du métal en circulation (Berranger, 2014). Comme le souligne M. Gosselin (2021), *« ils sont le reflet de la production et de la nature du métal qui était travaillé ou qui circulait depuis ce site. Ils permettent d'appréhender la gestion de la matière première et portent le plus souvent les traces du travail du métal. »*

La présence de ces objets sur des sites de fouilles pose déjà question au XIX^e siècle. Certains auteurs comme R. Smith et Sir Wollaston Franks se posent des questions sur leur nature, leur origine et leur fonction. Tout comme les autres vestiges découverts à cette période, leur attribution à l'âge du Fer n'est pas immédiate, et ils finissent par être associés à d'autres cultures (Antiquité romaine ou Moyen Age). Ces demi-produits sont surtout devenus un sujet d'étude plus important à partir du XX^e siècle, au fur et à mesure que les connaissances sur les procédés de production du fer ancien se sont approfondies (Berranger, 2007). Les questionnements majeurs se portent principalement sur deux critères : leur morphologie, qui sera plus tard utilisée afin de définir des typologies, et leur fonction présumée (Berranger, 2007; Gosselin, 2021; Smith, 1905). En effet, au début du XX^e siècle, la multiplication des fouilles de sites datant de l'Antiquité en Europe amène les chercheurs à tenter de replacer ces objets dans leur contexte. Les premières recherches sur le sujet se concentrent en Allemagne et en Grande-Bretagne, où deux principaux types de demi-

produits sont retrouvés en grande quantité (plusieurs milliers d'exemplaires) (Berranger, 2014; Gosselin, 2021).

En Grande-Bretagne, les demi-produits se présentent le plus souvent sous la forme de longs fers plats à extrémité roulée. Ils ont été retrouvés sur des sites d'abord interprétés comme antiques, mais dont plusieurs ont été requalifiés, *a posteriori*, comme relevant des âges des Métaux. Bien que connus depuis longtemps, ils ont dans un premier temps été ignorés ou négligés par les spécialistes, et d'abord interprétés comme des lames d'épées retrouvées à un stade non abouti, inachevé (Smith, 1905). Toutefois, au début du XX^e siècle, le débat est relancé sur la question de leur identification et de leur fonction au sein de la société. Plusieurs chercheurs vont réfuter la théorie des lames d'épées et tenter de proposer des nouvelles pistes. Des chercheurs comme R. Smith et Derek Allen réfutent la théorie des lames d'épées et, s'appuyant sur les écrits de César lors de son passage en Grande-Bretagne, les considèrent plutôt comme des proto-monnaies (Berranger, 2014; Smith, 1905). En effet, dans le livre V de ses *Commentaires sur la Guerre des Gaules*, César écrit : « *Vtuntur aut aere aut nummo aureo aut taleis ferreis ad certum pondus examinatis pro nummo*⁵ » (Livre V, chap. XII, 4), où « *taleis ferreis* »⁶ est traduit par « barres » ou « lingots de fer » selon les traductions. Sur cette base, R. Smith propose le terme de « *currency-bar* », en référence à leur fonction présumée de monnaie (Berranger, 2007; Smith, 1905). Par la suite, ce terme évoluera dans la langue anglaise pour désigner « un fer auquel a été donné une forme distincte, avec généralement une douille à une extrémité », et le terme « *bar* » désigne une « barre plate relativement mince qui a été partiellement ou totalement allongées » (Crew, 1994). Cette désignation de « *currency-bar* » est encore aujourd'hui largement utilisée dans ce domaine de recherche. Afin d'éviter toute confusion ou interprétation hâtive et erronée, nous privilégierons dans ce travail le terme descriptif de « fers plats à extrémité roulée », comme le suggère M. Berranger (Berranger, 2007). Une troisième interprétation est défendue notamment par E.W. Hulme et R. F. Tylecote : ces objets seraient plutôt des produits intermédiaires, servant de réserves de matière première destinées au travail de forge et à la mise en forme d'objet (Berranger, 2014).

En Allemagne, ces artefacts n'ont pas l'objet d'un même débat puisque la forme prédominante de demi-produits est celle des bipyramidés, d'épaisses masses de fer aux

⁵ Traduction : « Pour monnaie, on se sert de cuivre, de pièces d'or ou de lingots de fer d'un poids déterminé. » (César, 1994).

⁶ Nous voyons également figurer « *taleae ferrae* » dans la littérature (Berranger, 2007).

pointes étirées. Une autres variante existe également, en moindre quantité, de type fers plats à extrémité roulée appelés *Schwertbarren* (« barre-épées ») (Berranger, 2014). Ces objets ont été particulièrement étudiés par Otto Kleeman entre les années 1960 et 1980, essentiellement d'un point de vue typo-chronologique (Berranger, 2014). Malheureusement, ces classifications sont encore fort empreintes des présupposés de leur époque, qui attribuaient la maîtrise des savoir-faire artisanaux aux civilisations romaines, en dénigrant les compétences techniques des sociétés de l'âge du Fer.

Cependant, ces avancées réalisées sur les demi-produits, axées principalement sur leur typologie et leur fonction, présentaient certaines limites. D'une part, en l'absence de découvertes en contextes bien documentés, il était difficile de proposer une chronologie précise de la production ou de produire des bilans solides à une échelle plus large (Berranger, 2007). D'autre part, ces objets ont longtemps été étudiés en marge des réflexions portant sur l'organisation de la production et des problématiques plus générales sur la métallurgie, et ce, jusqu'aux années 1990 (Berranger, 2014).

A partir des années 1990, les *currency-bar* font partie d'études approfondies en Grande-Bretagne, notamment par P. Crew. Ces travaux marquent une étape importante dans l'analyse de ces demi-produits : il propose une nouvelle classification typologique fondée sur l'étude statistique des formes, les longueurs, des épaisseurs ainsi que des morphologies des extrémités (Berranger, 2007). Il identifie ainsi dix-huit types distincts, issus de contextes de dépôts ou d'atelier (Berranger, 2014). Dans le même temps, il établit des corrélations entre la forme des barres et la provenance des matériaux utilisés. Parallèlement, il s'intéresse ponctuellement à la composition chimique de ces objets (Berranger, 2014), notamment à la présence de phosphore, qu'il tente de mettre en relation avec certaines caractéristiques morphologiques. Il développe également une approche expérimentale rigoureuse : pendant plus d'une décennie, il mène des reconstitutions des chaînes opératoires en bas fourneau, qui restent aujourd'hui une référence en archéologie expérimentale (travaux de 1991 à 2013) (Gosselin, 2021). Ces expérimentations ont permis de confronter les données issues des analyses chimiques des déchets métallurgiques à des observations concrètes sur la fabrication de ces objets (Dillmann *et al.*, 2015). Crew est par ailleurs l'un des premiers à proposer une interprétation technique et fonctionnelle des extrémités des fers plats, en particulier les profils roulés, qu'il considère comme des marqueurs de qualité du métal, suffisamment épuré pour ne pas se fissurer lors de leur mise en forme (Berranger, 2007). Les publications issues de ses recherches et expérimentations, tels que sa synthèse générale sur

les *currency-bars* en Grande-Bretagne (*Currency bars in Great-Britain, Typology and Function*, 1994), ont beaucoup apportés dans ce domaine.

Jusqu'au tournant des années 2000, l'étude des demi-produits protohistoriques reposait essentiellement sur trois catégories bien identifiées : les bipyramidés, les fers plats à extrémité roulée et les barres quadrangulaires, et seules les deux premières catégories avaient réellement été étudiées en profondeur. Dès 1963, A. France-Lanord avait mis en évidence des différences de qualité de métal : les bipyramidés présentent un état relativement brut, peu épuré, tandis que les fers plats à extrémité roulée témoignent d'une épuration plus poussée, ce qui a été ensuite confirmé par V. Serneels et A. Faivre (Berranger, 2007). Les recherches menées par Marion Berranger dans le courant des années 2000-2010 sur le sujet (Berranger, 2014, 2007; Berranger *et al.*, 2019; Berranger et Fluzin, 2016) proposent un nouveau classement typologique pertinent pour les âges du Fer. Sur le territoire de la France, cinq classifications typologiques principales sont désormais reconnues pour classer les demi-produits : les bipyramidés, les quadrangulaires, les fers à soir, les fers à extrémité roulée et les *Hooked billets* (à extrémité « en crochet »), ainsi que leurs sous-types (Fig.1) (Berranger *et al.*, 2019). Ces classifications se basent sur les critères déjà avancés par P. Crew (dimensions, forme de leurs extrémités) en y ajoutant leur aspect macroscopique, leur masse, leur qualité d'épuration, leur quantité de métal théorique, leur distribution géographique ainsi que leur caractéristiques métallographiques (microstructure, propreté inclusionnaire, teneur en carbone, traitements thermo-chimiques, etc.). Les deux nouvelles catégories mises en évidence par Berranger (les fers à soie et les *hooked* billets) ont été identifiés tout d'abord dans le nord-est de la France dès 2003 et caractérisés grâce à l'analyse métallographique, puis recensés dans d'autres contextes européens (Berranger, 2007). Ses travaux contribuent à mieux définir cette catégorie de vestiges, à préciser leur rôle dans la production et à relier leur morphologie à leur qualité métallurgique, en confirmant les hypothèses proposées auparavant. Ainsi, par exemple, les bipyramidés sont généralement caractérisés par une épuration moins poussée, un compactage plus grossier tandis que les barres à douille comptent parmi les demi-produits les plus épurés, composés de fer doux, d'acier et parfois cémentés (Berranger, 2007).

Ces trente dernières années, beaucoup d'études ont été entreprises sur le sujet des demi-produits, via des axes de recherches différents, de plus en plus précis, permettant d'appréhender ces témoins de la production sidérurgique sous divers aspects. Parmi ces recherches récentes, figurent les travaux de : Philippe Fluzin, Marion Berranger (thèse de

2009, publication de 2014), Sylvain Bauvais (2007), Gaspard Pagès et Manon Gosselin (thèse de 2021). Ces travaux ont notamment permis d'établir des synthèses générales sur les demi-produits des deux âges du Fer (du VII^e au I^{er} siècle avant J.-C.), issus de différents contextes en France et dans les régions voisines. Ces recherches portent désormais sur des aspects variés : analyses métallographiques plus systématiques, études contextuelles détaillées (dépôts, circulation, production), prise en compte des réseaux de diffusion et des aspects socio-économiques, élargissement chronologique et comparaison avec d'autres périodes.

Bien que la plupart des sites livrant des demi-produits soient datés du second âge du Fer ou de la période romaine, il en existe également pour les périodes médiévales. Cependant, il y a moins d'études sur le sujet. Les contextes de découvertes évoluent, les dépôts se font plus rares. Ils sont plutôt retrouvés sur des sites de production et de transformation, où ils sont souvent fragmentés ou sous forme de chute, ou en contexte de circulation, notamment sur des épaves de navires. Cependant, ces périodes médiévales livrent une nouvelle catégorie d'objet qui s'apparente fortement à des demi-produits : les fers architecturaux, notamment utilisés dans les charpentes (sous forme de barres ou d'agrafes peu élaborées). Ceux-ci ont été plus spécifiquement étudiés ces dernières années, notamment en France par Dillmann, Disser, L'Héritier, ainsi qu'en Belgique et aux Pays-Bas (Gosselin, 2021).

Dans l'état actuel des recherches, plusieurs aspects demeurent encore insuffisamment explorés et constituent autant de pistes prometteuses pour de futures études (Berranger, 2007). L'un des enjeux majeurs consiste à analyser plus finement le lien entre les demi-produits et leurs contextes de découverte, notamment lorsque ceux-ci proviennent de dépôt et de sanctuaires. Une telle approche permettrait de mieux comprendre leur place dans les systèmes socio-économiques et de contribuer à trancher la question, toujours débattue après un siècle de recherche, de leur éventuelle fonction de proto-monnaie. L'examen de leur rôle dans l'économie, qu'il s'agisse d'échanges à longue distance ou de circuits plus locaux, reste à approfondir. Il serait également nécessaire d'élargir les investigations sur leur circulation à différentes échelle géographique, afin de mettre en évidence d'éventuels réseaux d'échange et d'identifier les espaces de production et de concentration spécialisés. L'étude des outils et techniques employés pour réaliser les diverses formes de demi-produits représente une autre piste de recherche, qui pourrait bénéficier de collaborations avec des forgerons pour interpréter les traces de fabrication. Jusqu'ici, l'attention s'est principalement portée sur les

demi-produits complets, mais ceux-ci présentent certaines limites : les traces de fabrication y sont plus rarement visibles et ils offrent peu d'informations sur le contexte artisanal. Il conviendrait donc d'accorder une place plus importante à l'étude des fragments et chutes, qu'il s'agisse de scories, de *gromps* ou de morceaux de demi-produits, en tenant compte non seulement de leur morphologie finale, mais aussi de leur cycle de vie, de leur production à leur usage, jusqu'à leur abandon.

Ces avancées ont démontré que le plein potentiel informatif des objets en fer ne peut être atteint qu'à travers des approches archéométriques combinées. L'observation métallographique des coupes transversales renseigne sur la structure interne et les gestes de fabrication, tandis que l'analyse chimique, et plus particulièrement celle des inclusions non métalliques, éclaire à la fois les conditions de réduction (nature des minerais, rôle des parois de fourneaux, usage éventuel de fondants, maîtrise des températures) et les opérations de post-réduction (oxydations de surface, soudures, traitements thermo-chimiques). L'intérêt croissant pour l'étude des inclusions va de pair avec celui porté aux scories, puisque la caractérisation chimique de ces deux catégories de vestiges permet d'établir des correspondances et d'avancer vers une compréhension intégrée de la chaîne opératoire. Ces travaux concernent principalement les Âges du Fer, l'Antiquité et le Moyen Âge. Toutefois, ils se sont concentrés jusqu'ici sur les demi-produits et les scories, alors que certaines catégories d'objets plus modestes, tels que les fiches ou les clous, n'ont que rarement fait l'objet d'études spécifiques. Le présent travail vise ainsi à explorer leur potentiel, encore largement méconnu.

2.2.4. *État de la recherche sur les fiches de muri gallici*

Le terme *muris gallicus* désigne, au sens strict, une technique de fortification constituée d'une armature interne en poutres horizontales ou obliques, assemblées à l'aide de longues fiches ou clous en fer, et formant une ossature en caissons remplis de pierres et de terre (Féliu et Fichtl, 2020). La face externe est recouverte d'un parement de pierre, laissant, selon les modèles, apparaître ou non l'extrémité des poutres, tandis que le côté interne est généralement aménagé en rampe de terre. Ce type d'architecture, attesté au moins depuis le II^e s. av. J.-C., est mentionné par Jules César dans sa description des sièges gaulois (BG VII, 23). Selon Krausz (Krausz, 1998), il s'agit du modèle défensif le plus courant en Gaule, présent notamment sur les sites d'*oppida*, mais aussi dans des contextes plus variés tels que des bourgades ou des fermes aristocratiques. L'archéologie a mis en relation la

description césarienne avec des observations de terrain lors des fouilles de Murcens, puis de Bibracte et de Vertault dans les années 1860. Depuis, les découvertes se sont multipliées en France, Belgique, Suisse et Allemagne, avec une répartition cependant concentrée à l'ouest du Rhin, à l'exception notable de Manching en Bavière (Buchsenschutz et Ralston, 2014). En Belgique, quatre sites sont actuellement attribués à ce type (Fig.2) : Lompret (commune de Chimay, Hainaut), Rouveroy (commune d'Estinnes, Hainaut), Olloy-sur-Viroin (commune de Viroinval, Namur) et Pont-de-Bonne (commune de Modave, Liège) (Cahen-Delhay *et al.*, 1984).

Un élément distinctif de ces fortifications est la présence de fiches en fer, dont l'abondance et la taille ont frappé dès les premiers inventeurs. Dès la fin du XIX^e siècle, elles sont régulièrement mentionnées comme des témoins de ce type architectural et constituent rapidement une « signature » permettant de reconnaître un *murus gallicus* même en l'absence de fouille détaillée (Buchsenschutz et Ralston, 2014). Les inventaires illustrent l'importance prise par ces objets dans l'identification typologique : M.A. Cotton recensait une vingtaine de sites ayant livré des fiches en 1957 (Buchsenschutz et Ralston, 2014), tandis que Buchsenschutz et Ralston (2014) en comptabilisent soixante-deux, incluant la Belgique et la Suisse (Fig.3).

Toutefois, malgré leur rôle central comme marqueur typologique, les fiches en fer n'ont que rarement fait l'objet d'études approfondies. Dans la plupart des publications consultées dans le cadre des recherches bibliographiques de ce travail, elles sont mentionnées de manière descriptive (nombre, dimensions générales, parfois croquis ou photographies), mais rarement analysées sur le plan technique ou métallurgique. Elles sont donc restées cantonnées au statut d'indices de reconnaissance, sans véritable réflexion sur leur mode de fabrication, leur logistique de production ou leur rôle structurel exact. Les données disponibles montrent pourtant une grande variabilité au sein de cette catégorie d'objets. La longueur des fiches oscille généralement entre 15 et 40 centimètres, avec une majorité d'exemplaires autour de 20–30 centimètres. Leur section est le plus souvent carrée (1–2 centimètres de côté), munie d'une pointe pyramidale ou rétrécie, tandis que la tête est le plus souvent discrète, aplatie ou absente. Leur implantation verticale au croisement des poutres assemblées à mi-bois est la disposition la mieux attestée, bien que des placements obliques ou en périphérie soient également documentés. Certaines fiches conservent des traces de bois ou apparaissent tordues sous la pression des pierres, confirmant leur rôle structurel. Sur certains sites, des scories de forge retrouvées au pied des remparts suggèrent

une fabrication locale, comme à l'Impérial. Le nombre de fiches recensées varie fortement selon les sites, allant de quelques exemplaires isolés à plusieurs dizaines (jusqu'à 76 à Boviolles, pour une masse totale de 4,5 kilogrammes de fer). Leur état de conservation, parfois remarquable, permet d'envisager des études comparatives plus fines. En dépit de ce potentiel, la documentation reste inégale et fragmentaire, ce qui limite les analyses globales.

En résumé, les fiches en fer constituent aujourd'hui un critère diagnostique fondamental du *murus gallicus*, mais elles ne sont encore que très rarement appréhendées comme un objet d'étude à part entière. Leur examen systématique, sur les plans morphologique, technologique et contextuel, pourrait pourtant apporter des informations essentielles sur les techniques de construction, les pratiques métallurgiques et la conception structurelle des remparts.

3. ASPECTS TECHNIQUES DU FER

3.1. Chaîne opératoire en sidérurgie

3.1.1. Introduction

Afin de saisir pleinement les enjeux de ce mémoire et des pièces qui y sont étudiées, il est indispensable de rappeler les procédés d'obtention et de transformation du fer. Ce rappel, bien que non exhaustif, a pour objectif de poser les bases essentielles de la sidérurgie ancienne pour en faciliter la compréhension. Le sujet ayant été largement étudié au fil des dernières années, nous renvoyons à la littérature spécialisée pour un approfondissement détaillé (Cabboi *et al.*, 2007; Fluzin, 2002, 1983; Mangin *et al.*, 2004; Pleiner, 2000; Soullignac, 2017).

La chaîne opératoire de la métallurgie du fer comprend trois phases principales : extraction et préparation du minerai, réduction et post-réduction. Le recyclage des pièces métalliques peut également s'ajouter à ce schéma, comme une phase complémentaire parfois intégrée au processus (Fig.4).

3.1.2. Le minerai

Le fer est l'un des éléments les plus abondants sur la planète, présent dans l'écorce terrestre et dans la majorité des roches terrestres. Bien qu'il puisse exister à l'état natif ou météoritique, il est le plus souvent présent sous forme combinée dans des minerais (oxydes, sulfures, carbonates ou silicates). Ce sont ces composés, comme la magnétite (Fe_3O_4), la goethite ($\text{FeO}(\text{OH})$), l'hématite (Fe_2O_3) et la limonite, qui ont été exploités pour la métallurgie du fer, notamment à l'Âge du Fer et à l'Antiquité (Fluzin, 1983; Mangin *et al.*, 2004; Soullignac, 2017). Ces minerais contiennent du fer en proportions variables, ainsi que d'autres éléments non ferreux, qui constituent la gangue. La teneur en fer de ces composés et leur concentration en éléments divers ont une influence sur les propriétés du métal obtenu, et donc sur leurs possibilités d'utilisation dans le cadre de la métallurgie du fer. C'est pourquoi, tous les minerais ne sont pas adaptés à un usage sidérurgique (Bauvais and Fluzin, 2009).

3.1.2.1. *Extraction du minerai*

Dans un premier temps, durant le début de l'Âge du Fer, les minerais de fer sont extraits d'affleurements rocheux en surface ou proche de la surface. Par après, lorsque la demande en matière première devient plus importante, les minerais sont extraits de mines à de faibles profondeurs, à ciel ouvert ou en puits (Bauvais, 2007; Pleiner, 2000; Soullignac, 2017).

3.1.2.2. *Traitement du minerai*

La présence de la gangue est un élément gênant pour la transformation du minerai en fer. C'est pourquoi le minerai, après son extraction, subit généralement un traitement préalable à la réduction afin d'éliminer les éléments non désirés. Ces traitements principalement mécaniques ou chimiques incluent notamment le tri, le lavage, le concassage, le broyage, le grillage et la calcination (Pleiner, 2000). Les premiers visent à séparer le plus possible le minerai de sa gangue par action mécanique. Les deux derniers traitements consistent à chauffer une première fois le minerai à une haute température (entre 400°C et 800°C selon Pleiner, entre 300°C et 600°C selon Serneels (Leroy, 2010), en vue de transformer une plus grande partie du minerai en oxyde de fer, la forme la plus favorable à la réduction. Ces différentes étapes peuvent être réalisées à proximité du lieu d'extraction ou sur le site de réduction directement.

3.1.3. *La réduction*

L'étape de la réduction consiste à extraire le métal contenu dans le minerai en le séparant de sa gangue, afin d'obtenir une matière première (fer, acier ou fonte) destinée à être transformée en produit fini. Au cours de l'histoire, deux méthodes se sont succédées en Europe. La première, dite réduction directe, est la plus ancienne. Elle permet d'obtenir une masse de fer malléable (ou « loupe ») en une seule opération, sans atteindre le point de fusion du métal. Cette méthode a largement prédominé jusqu'au bas Moyen Âge⁷. À partir des XV^e-XVI^e siècles, elle est progressivement supplantée en Europe par la réduction indirecte, qui repose sur des températures plus élevées obtenues en haut fourneau pour produire de la fonte.

⁷ Selon Vega *et al.*, 2002, la méthode directe a été prépondérante jusqu'au XII^e siècle, et la filière indirecte s'est globalement généralisée en Europe à partir du XVI^e siècle (Vega *et al.*, 2002). Berranger (Berranger, 2014) mentionne l'apparition de la filière indirecte aux alentours du XV^e siècle et Bauvais (Bauvais, 2007) la place au XIV^e siècle. Dillmann et L'Héritier situent l'apparition et la diffusion de ce nouveau procédé à la fin du Moyen Âge et au début de l'époque moderne (Dillmann et L'Héritier, 2016).

Cette dernière, plus riche en carbone, doit toutefois subir une seconde opération pour être transformée en acier. La méthode indirecte n'intervenant pas dans le cadre chronologique de cette étude, ne sera pas abordée davantage ici. Pour approfondir le sujet, nous renvoyons les lecteurs intéressés à la littérature spécialisée (Dillmann et L'Héritier, 2016; Fluzin, 2002, 1983; Fluzin *et al.*, 2000; Pleiner, 2000).

3.1.3.1. *Le procédé direct*

Comme mentionné précédemment, le procédé direct est la méthode principale de production du fer en Europe depuis les débuts de la métallurgie et durant les âges du Fer. Ce procédé permet d'obtenir du fer ou de l'acier en une seule opération, réalisée dans un bas fourneau. Ces structures, très variées dans leurs formes et dimensions, ne seront pas détaillées ici (voir littérature déjà mentionnée), nous nous concentrons dans ce travail sur le fonctionnement général de la réduction en bas fourneau. Un bas fourneau se présente généralement comme un foyer creusé dans le sol ou logé dans une structure en argile ou en pierre, surmonté d'une cheminée pourvue d'une ouverture. Cette ouverture sert à l'évacuation des gaz produits lors de la réduction ainsi qu'à l'introduction des matériaux nécessaires à l'opération de réduction : le charbon de bois et le minerai. Lors de l'introduction des matières, il est parfois nécessaire d'ajouter des fondants qui favorisent la réduction. Outre l'alimentation en combustible et en minerai, le foyer nécessite un bon apport en oxygène, afin de maintenir une température suffisante dans le fourneau et d'assurer une bonne combustion. Cet apport en air se fait soit par tirage naturel, soit à l'aide de soufflets actionnés manuellement, reliés à des tuyères en terre cuite insérées à la base du fourneau (Cabboi *et al.*, 2007; Fluzin, 1983). La température dans le bas fourneau peut ainsi atteindre entre 1100° C et 1400°C. Bien que cela suffise pour séparer le minerai, cette température est inférieure au point de fusion du fer, qui est de 1535°C, empêchant ainsi le fer de passer à l'état liquide.

En brûlant, le charbon de bois produit du monoxyde de carbone (CO) et du dioxyde de carbone (CO₂) (Fig.5). Ces gaz entraînent une réaction chimique d'oxydo-réduction, transformant les oxydes présents dans le minerai en fer métallique. Le fer ainsi issu de cette réaction reste à l'état solide, ou pâteux, et s'agglomère, tandis que les impuretés qui étaient contenues dans le minerai se liquéfient au fond de la cuve et forment ce qu'on appelle la scorie. Selon le type de fourneau utilisé, cette scorie liquide peut également s'écouler hors de la cuve par une ouverture prévue à cet effet. À l'extraction du fourneau, le fer se présente

sous la forme d'une masse brute, informe et hétérogène, composée d'un mélange de fer, d'acier et de scorie. Cette dernière n'étant pas entièrement éliminée se retrouve piégée dans la matrice métallique. Cette masse, ayant parfois un aspect spongieux, est appelée éponge, loupe ou masse brute de réduction, et peut peser de quelques grammes à plusieurs dizaines de kilos.

Bien que certains artisans se soient particulièrement perfectionnés dans le savoir-faire de cette étape complexe de la métallurgie du fer, les paramètres en jeu lors de la réduction sont nombreux et les conditions ne sont pas toujours maîtrisées parfaitement. Selon la température atteinte, le temps de l'opération, la nature et la quantité de combustible et de matière première, le résultat peut différer. Rien qu'au sein même de la cuve, les températures ne sont pas réparties de manière égale. C'est pourquoi, ce type de réduction n'est pas parfaite et cela se marque d'une part par la présence de fer non réduit dans la scorie et d'autre part par la présence d'impuretés piégées dans la loupe de fer, appelées inclusions. La qualité de la masse de fer obtenue dépend donc d'un grand nombre de paramètres tout au long du processus et de la maîtrise de celui-ci.

3.1.3.2. Fer, fonte, acier

Le fer se trouve naturellement dans l'environnement sous forme d'oxyde, et sa transformation en métal nécessite un procédé de réduction fondé sur une réaction d'oxydo-réduction. Le produit obtenu dépend de la teneur en carbone et de la température atteinte lors du processus. Le diagramme d'équilibre fer-carbone (Fig.6) permet de distinguer les différents états métalliques : fer pur, acier (alliage de fer et de carbone), et fonte (alliage à forte teneur en carbone). Le fer, à l'état solide, change de structure cristalline selon la température : fer alpha (α) en dessous de 910°C, le fer gamma (γ) entre 910° et 1392°C, puis delta (δ) jusqu'au point de fusion (1535°C) . Le carbone peut exister sous plusieurs formes : dissous dans la ferrite (fer pur à faible teneur en carbone), dans l'austénite (structure à solubilité plus élevée), ou combiné sous forme de cémentite, carbure de fer (Fe_3C) très dur. La combinaison de ferrite et de cémentite forme une structure lamellaire appelée perlite, typique des aciers à teneur intermédiaire en carbone. Lorsqu'un alliage contient moins de 1,7% de carbone, il est désigné comme un acier. Au-delà de cette teneur, le matériau relève du domaine des fontes (Fig.7), plus cassantes et inadaptées à la forge. Dans les aciers très faiblement carburés (moins de 0,02% de carbone), la structure est composée presque uniquement de ferrite (aussi appelé fer doux). Ce type de fer est très malléable, facile à

travailler, mais peu résistant mécaniquement car il se déforme plus facilement. En revanche, il résiste mieux à la corrosion que les fers plus riches en carbone, ce qui peut expliquer pourquoi certains objets archéologiques en fer doux sont relativement bien conservés (Fluzin, 1983).

Tous ces changements internes qui ont lieu pendant la fabrication ou de refroidissement du métal laissent des traces visibles au microscope. En observant la microstructure, on peut identifier plusieurs types de phases. Lorsque le fer alpha contient très peu de carbone dissous, il est appelé ferrite. La ferrite apparaît au microscope comme une surface claire, lisse, avec de petits grains bien nets, sans texture interne. La cémentite se voit comme des zones sombres et massives, souvent sous forme de lignes foncées en bordure ou en nodules. La perlite est un mélange de ferrite et de cémentite, organisé en lamelles. Elle a un aspect strié, où les parties claires sont de la ferrite et les parties sombres, de la cémentite. Plus le refroidissement a été lent, plus les lamelles sont grossières et bien visibles. Si le refroidissement a été rapide, elles sont plus fines et difficiles à distinguer.

3.1.4. L'épuration (dégrossissage)

L'étape de l'épuration consiste, selon Fluzin, en un « martelage à chaud de la loupe afin de densifier le métal en évacuant les impuretés » (Fluzin, 2002). Dans la littérature, cette étape est tantôt considérée comme faisant partie du processus de réduction, tantôt rattachée à celui de la post-réduction. Cela se justifie par le fait que cette opération peut être réalisée directement sur le site de la réduction, profitant de l'énergie thermique à la sortie du foyer, ou bien plus tard, en forge, après refroidissement de la masse. Cette partie du processus peut également être appelée dégrossissage. La loupe peut également être découpée en plusieurs parties avant d'être acheminée vers les lieux de post-réduction.

3.1.5. La post-réduction

La phase de post-réduction correspond à l'ensemble des opérations effectuées après la phase de réduction du minerai (Fig.8). Elle a trois objectifs principaux : épurer le métal, le mettre en forme, et en modifier les propriétés mécaniques et chimiques. Ces opérations se déroulent en forge, généralement dans un foyer ouvert, permettant à l'artisan d'alterner chauffes répétées et séries de martelage sur enclume. Ces étapes mobilisent des savoir-faire spécifiques, distincts de ceux impliqués dans la réduction. Elles peuvent ainsi être réalisées

sur d'autres sites, spécialisés dans la transformation du métal, bien qu'il n'existe pas de consensus strict quant à cette organisation. Chacune de ces étapes génère des déchets et de traces archéologiques caractéristiques, ainsi que divers résultats, allant de la masse de fer épurée à un objet élaboré.

3.1.5.1. *L'épuration*

Le terme d'épuration revient plusieurs fois au sein de la littérature concernant la métallurgie ancienne du fer. En effet, le travail d'évacuation des impuretés contenues dans le métal doit être répété à plusieurs stades de la chaîne opératoire en fonction du produit souhaité (Fig.9). L'épuration de post-réduction a pour objectif de nettoyer le métal d'un maximum d'inclusions, réduire les porosités et compacter la masse. Cela est réalisé par une série de chauffe et de martelage à chaud, nécessitant des allers-retours entre la forge et l'enclume. La masse est ainsi compactée (martelage), repliée sur elle-même à plusieurs reprises, puis soudée (soudures internes) dans un but d'homogénéisation. Elle peut ensuite faire l'objet d'une première mise en forme approximative, dite de préformage.

À l'issue de ce processus, la masse métallique obtenue est plus homogène. Toutefois, le degré d'homogénéisation peut fortement varier selon la qualité initiale de la loupe issue de la réduction, ainsi que selon les caractéristiques recherchées pour le produit final. Le métal ainsi traité est désigné sous le terme de « demi-produit ». C'est sous cette forme intermédiaire que le fer est en général transporté et commercialisé. Il existe différentes morphologies sous lesquelles circulent ces demi-produits (par exemple sous forme de bipyramidé), et la qualité de ces objets dépend en partie du degré d'épuration qu'ils ont subi. Cette phase génère également plusieurs types de déchets caractéristiques : des battitures⁸, des scories de forge en culot, ainsi que des fragments métalliques riches en inclusions de scorie, appelés *gromps*. Des chutes métalliques issues des opérations de découpe ou de mise en forme peuvent également être retrouvées en contexte de production et de transformation (Fig.9).

3.1.5.2. *Le forgeage*

Le forgeage désigne l'ensemble des opérations de transformation et de mise en forme du demi-produit épuré en un objet fini, abouti et fonctionnel. Ce processus regroupe de

⁸ Fragments d'oxydes de fer ou de métal qui se détachent des lingots d'acier au cours du forgeage (Fluzin, 1983).

nombreux procédés et traitements (mécaniques, thermiques, chimiques, finitions). Le forgeage permet non seulement de donner une forme précise à la pièce travaillée à l'aide d'outils adaptés, mais aussi d'en améliorer les propriétés techniques et mécaniques. Toujours réalisé en forge, ce travail nécessite un savoir-faire spécifique, propre à chaque artisan ou atelier. La mise en forme de l'objet repose principalement sur une déformation plastique à chaud, par martelage, étirage et autres opérations selon les besoins. Certaines étapes peuvent inclure des traitements particuliers visant à doter l'objet final de caractéristiques spécifiques (dureté, élasticité, etc.). Le déroulement du forgeage dépend de plusieurs facteurs tels que la nature et la quantité de matière première disponible, les équipements disponibles dans l'atelier, les compétences du forgeron, la nature de l'objet à réaliser, ainsi que les contraintes économiques.

Les déchets générés au cours du forgeage sont similaires à ceux issus de l'étape d'épuration. Comme le souligne Fluzin (2002), le processus d'épuration ne s'interrompt pas strictement à une étape précise, mais peut se prolonger en réalité jusqu'au stade final de l'obtention de l'objet fini. Dans certains cas, épuration et forgeage peuvent se dérouler de manière simultanée, dans un même foyer. Cette continuité technique rend difficile, d'un point de vue archéologique, la distinction nette entre les deux phases à partir de leurs résidus.

Enfin, ces opérations de post-réduction peuvent être réalisées une nouvelle fois lors du recyclage d'objets métalliques. Dans ce cas, les objets sont à nouveau chauffés, martelés, voire reforgés, ce qui entraîne une altération ou une disparition partielle des informations initiales sur leur fabrication, en raison de la ré-homogénéisation de la matière et de la perte de certaines traces techniques.

a. Traitements mécaniques

Les traitements mécaniques regroupent les opérations de mise en forme et de consolidation du métal par action physique. Ils peuvent être réalisés à chaud, à température supérieure à 631°C, ou à froid, à température inférieure à 543°C (Fluzin, 1983). La mise en forme à chaud inclut des procédés comme le forgeage, le laminage, le martelage ou encore l'étirage, ce dernier visant à allonger la masse métallique tout en affermissant sa structure. Ces opérations permettent d'homogénéiser la matière, d'éliminer les défauts internes et de préparer l'ébauche de l'objet. Parmi les procédés spécifiques, peut être citée la soudure, qui consiste à assembler deux éléments métalliques chauffés jusqu'à une température adéquate (environ 1200 à 1300°C pour le fer, 830 à 900°C pour l'acier) (Fluzin, 1983). Cette opération requiert une pression vive et rapide sur les pièces chauffées. Pour favoriser l'adhérence des

matières et éviter l'oxydation de surface, l'artisan projette parfois un fondant, souvent à base de silice ou d'argile, qui nettoie la surface métallique et empêche la formation de nouveaux oxydes. Une technique spécifique de soudure, le corroyage, consiste à souder des fragments métalliques, souvent issus de récupération, pour former une masse réutilisable. Ce terme désigne également une « opération de pétrissage visant à améliorer la compacité et l'homogénéité du métal » (Fluzin, 1983). Certaines de ces opérations peuvent provoquer un écrouissage, c'est-à-dire un durcissement mécanique du métal par déformation de ses grains internes sous l'effet de contraintes. Si la pièce est ensuite maintenue à haute température pendant un temps prolongé, cela entraîne la recristallisation des grains qui annule l'effet de l'écrouissage. En revanche, la présence d'un écrouissage visible au microscope témoigne généralement d'un traitement mécanique réalisé à basse température (inférieures à 100°C), provoquant une déformation durable des grains. Il est cependant également possible d'obtenir un effet similaire par un choc thermique, notamment lors d'un refroidissement rapide du métal chauffé, ce qui modifie également sa structure interne.

b. Traitements thermiques

Les traitements thermiques correspondent à des opérations de chauffage du métal suivies d'un refroidissement contrôlé. Leur objectif est de modifier la structure cristalline du métal pour influencer ses propriétés sans altérer sa composition chimique. Parmi les procédés employés, le recuit est l'un des traitements les plus fréquents. Il consiste à chauffer le métal à une température élevée (généralement au-delà de 721°C, seuil de la transformation de la ferrite (fer α) en austénite (fer γ), le maintenir à cette température puis de le laisser refroidir lentement. Cela a pour but de ramener l'acier à une structure stable, à différentes fins telles que l'homogénéisation ou la recristallisation. La trempe, à l'inverse, repose sur un refroidissement brutal du métal après un chauffage élevé, par immersion dans un fluide (huile, eau, etc.). Le choc thermique transforme partiellement l'austénite en martensite, conférant au métal une grande dureté. Ce procédé est particulièrement appliqué aux aciers. Un refroidissement lent de l'acier favorise la formation de perlite, une structure caractéristique. Si le refroidissement est légèrement accéléré, la perlite s'affine. En revanche, un refroidissement très rapide ne laisse pas le temps à la perlite de se former et conduit donc à l'apparition de martensite (Fluzin, 1983).

c. Traitements chimiques ou thermochimiques

Les traitements chimiques ou thermochimiques modifient la structure et la composition du métal. L'un des plus notables est la cémentation, qui consiste à immerger

une pièce en fer dans une atmosphère ou un liquide riche en carbone pour enrichir la surface superficielle du métal en carbone. Ce procédé confère une plus grande dureté superficielle au fer, tout en conservant une certaine ductilité au cœur de la pièce. Il est particulièrement utile pour les outils ou les armes, qui nécessitent une résistance accrue à l'usure.

3.2. « Produits » et déchets

3.2.1. *Déchets et scories*

La fabrication d'un objet en fer par filière directe génère, à chaque étape, une grande diversité de déchets, qui témoignent des différentes opérations techniques mises en œuvre (Fig.8). Ces résidus ne sont généralement pas le résultat d'un geste unique mais plutôt d'une succession d'opérations au sein de la chaîne opératoire (Cabboi *et al.*, 2007).

L'étape de réduction du minerai produit des déchets spécifiques tels que des scories coulées, des scories en culot, typiques de l'épuration du métal, des scories informes plus ou moins riches en métal, des fragments de scories, ou encore des fragments métalliques mêlés à des scories (*gromps*), souvent arrachés lors du martelage. En contexte de forge, les déchets les plus courants sont les battitures, de fines paillettes d'oxydes de fer qui se détachent de la surface du métal chauffé lors du martelage (Fluzin, 2002). Très légères, elles s'accumulent autour de l'enclume, et leur présence peut donc indiquer l'emplacement d'un lieu de forge même si aucune structure n'est conservée. Leur détection sur site nécessite un tamisage fin des sédiments. Il est également possible de retrouver des scories de forge, cette fois formées dans le foyer et produites par des réactions entre le métal chauffé, les cendres, les ajouts ou encore les impuretés présentes dans le métal (Leroy, 2010). D'autres types de déchets incluent des fragments de métal issu du recyclage, de la récupération ou de la refonte d'objets anciens, ainsi que des chutes de travail (Fig.22) (Bauvais et Fluzin, 2009; Fluzin, 2002), c'est-à-dire des morceaux de métal volontairement coupés pendant la mise en forme. Il peut s'agir d'extrémités coupées (comme une soie de préhension), de morceaux mal chauffés ou ratés, ou simplement de découpes nécessaires à la fabrication d'un objet (Cabboi *et al.*, 2007). Parfois, il peut s'agir d'ébauches abandonnées ou d'objets ratés, qui n'ont pas été terminés ou utilisés. Des fragments de terre cuite provenant des parois du foyer peuvent également se détacher et se retrouver en contexte archéologique (Cabboi *et al.*, 2007).

Tous ces déchets ne fournissent pas les mêmes informations : les scories permettent parfois d'identifier le type de traitement ou la phase de travail, tandis que les chutes, au sens large du terme, peuvent en dire plus sur la qualité du métal, la maîtrise des gestes techniques ou encore les outils utilisés (Fluzin, 2002).

Chaque étape de production laisse également des traces comme des structures dans le sol (fosses, fours, foyers, etc.), ou des déchets spécifiques produits à ce moment-là. Pour identifier les phases de la chaîne opératoire, il est important de prendre en compte l'ensemble des déchets retrouvés sur le site, mais cela est souvent délicat. Premièrement, une partie importante de ces informations ne se conserve que partiellement en contexte archéologique. Ensuite, les déchets issus des étapes de post-réduction sont souvent plus discrètes et plus difficiles à identifier que ceux produits lors de la réduction du minerai ou de l'affinage (Bauvais et Fluzin, 2009). Par ailleurs, comme le rappellent plusieurs chercheurs (Cabboi *et al.*, 2007; Fluzin, 2002), l'absence de scories ou de battitures sur un site ne signifie pas nécessairement qu'il n'y a pas eu de forge, il faut être attentif à la présence d'autres types de déchets, même s'ils peuvent passer inaperçus si on ne sait pas les identifier. Cela illustre bien la complexité à laquelle fait face l'archéologie pour identifier des pratiques métallurgiques sur base des vestiges et la nécessité d'une approche fine et globale des vestiges.

3.2.2. *Demi-produits*

Les demi-produits constituent un maillon essentiel de la chaîne opératoire sidérurgique, situés entre la masse brute issue de la réduction et l'objet fini (Berranger, 2014). Leur forme et leur structure présentent une très forte variabilité, directement liée à la nature du métal obtenu à la réduction et au degré d'achèvement des traitements post-réduction. Cette variabilité influence non seulement la morphologie extérieure et la microstructure interne, mais également les usages possibles et la quantité de travail restant à fournir pour le forgeron. D'un point de vue technologique, plus un élément est brut, plus il livre d'informations sur les procédés de réduction. Inversement, plus il est transformé, plus il renseigne sur les procédés d'élaboration (Berranger, 2007). Les demi-produits sont ainsi parmi les rares témoins métallurgiques qui permettent une approche typologique croisant plusieurs dimensions : les conditions thermodynamiques de la réduction, les savoir-faire des artisans et l'organisation des ateliers de production. L'étude de ce matériel offre aussi un angle d'analyse sur la normalisation et la standardisation des produits, indicateurs d'un éventuel savoir-faire partagé et de la diffusion des techniques métallurgiques, dans des

contextes où les biens et les connaissances circulent à différents échelles, du local au régional, voire au-delà (Berranger, 2014 ; Bauvais *et al.*, 2018b).

Les demi-produits peuvent se présenter sous des formes et des masses diverses, reflétant des logiques de production et de commercialisation différenciées. Berranger distingue notamment les barres-ébauches, pesant seulement quelques dizaines de grammes, des barres des plusieurs centaines (Berranger, 2014). Les premières pourraient répondre à des circuits d'échange ou à des usages spécifiques, distincts des logiques associées aux demi-produits plus massifs. La circulation de ces éléments est attestée à divers stade de transformation. Ils peuvent se déplacer sous une forme encore grossière, avec une épuration incomplète, pour être retravaillés et purifiés dans un autre atelier. À l'inverse, l'épuration peut être poussée jusqu'à l'obtention d'une ébauche d'objet, destinée à être acheminée vers un autre lieu pour finition.

4. ÉTUDE DE CAS : LE SITE ROCHER DU VIEUX-CHÂTEAU DE PONT-DE-BONNE

4.1. Présentation du site

Ce mémoire s'intéresse à l'étude d'objets en fer découverts sur le site du *Rocher du Vieux-Château* de Pont-de-Bonne, situé sur le territoire de la commune de Modave, en province de Liège (Belgique) (Fig.10). Ce site archéologique se trouve en Condroz (Vrai Condroz), une sous-région naturelle de la Belgique caractérisées par un relief ondulé et un substrat calcaire.

4.1.1. Localisation et morphologie du site

Le site, également connu sous les dénominations de *Camp Romain* ou *Camp de Bonne*, occupe le sommet d'un éperon rocheux calcaire, culminant entre 211 et 218 mètres d'altitude et dominant le cours du Hoyoux d'environ soixante mètres. Ce cours d'eau, affluent de la Meuse, a largement contribué à façonner le relief de la région. En effet, l'éperon rocheux est entouré par le Hoyoux et son affluent, la Bonne, qui confèrent au site une morphologie de quadrilatère irrégulier, naturellement protégé sur trois de ses côtés (nord-ouest, sud-ouest et sud-est) (Fig.11), comme cela a souvent été le cas pour les sites fortifiés de l'âge du Fer (Fichtl, 2005). Le seul accès possible au site se trouve à l'est, vers les plaines, où le relief est plus doux. La zone est large d'une centaine de mètres. C'est à cet emplacement qu'une fortification en pierre a été édifiée, dont les vestiges sont partiellement conservés (Delye *et al.*, 2016b). La zone ainsi délimitée sur le sommet du rocher couvre une superficie d'environ quatre hectares (Fig.12). Elle présente une surface relativement plane, probablement aménagée ou nivelée durant l'occupation du site. Aujourd'hui, le rocher est recouvert de végétation et d'arbres. L'environnement proche est fait de vallées encaissées et de sommets rocheux recouverts de bois et de bosquets, ainsi que de terres agricoles et de prairies (Delye *et al.*, 2016b).

4.1.2. *Données de fouille et occupations successives*

Le site est fouillé de manière programmée depuis 2004 par le Cercle archéologique Hesbaye-Condroz (CAHC), sous la direction d’Emmanuel Delye. Les recherches ont révélé une occupation sur plusieurs millénaires, allant du Néolithique au haut Moyen Âge, avec plusieurs phases de fréquentation et de structuration du site.

4.1.2.1. *Le Néolithique*

Les premières traces d’occupation remontent au Néolithique moyen II (une première occupation à la fin du V^e millénaire, une seconde au début du IV^e millénaire), comme en témoignent divers artefacts retrouvés sur place : industrie lithique taillée, haches et herminettes polies, outillage osseux dont des éléments de parure, ainsi que de la céramique. Des structures probables (tranchées et trous de poteaux) ont également été observés. Cette occupation semble liée à celle de la grotte du Trou du Soldat, située sur le versant occidental du *Rocher*. Fouillée à la fin du XIX^e siècle par Ivan Braconnier, cette cavité a livré une sépulture collective attribuable au Néolithique, contenant les restes d’au moins trois individus (Delye *et al.*, 2016b).

4.1.2.2. *La Protohistoire et début de l’époque gallo-romaine*

La Protohistoire, regroupant l’âge du Bronze et l’âge du Fer, est très mal documentée dans la région. Delye (2016b) souligne qu’aucun site clairement identifié n’est documenté à ce jour dans la commune de Modave, en dehors de quelques tessons isolés. Pour la période gallo-romaine, la région est traversée par un axe de communication important, la voie Metz-Arlon-Tongres, à proximité de laquelle ont été découverts plusieurs vestiges, dont une villa de grande taille mise au jour en 1889 par Braconnier et Godelaine, ainsi que divers artefacts retrouvés à Limet et Modave (notamment un trésor monétaire daté du III^e siècle et une dédicace à la déesse Viradectis) (Delye *et al.*, 2016b).

En ce qui concerne spécifiquement le *Rocher* de Pont-de-Bonne, les fouilles ont mis en évidence une phase d’occupation durant la fin du Second âge du Fer (La Tène III). Elle est marquée par la construction d’une enceinte défensive de type *murus gallicus* sur le versant oriental, protégeant l’accès le plus vulnérable du site. Le mobilier associé aux niveaux laténiens comprend de la céramique, du verre, des objets métalliques en fer et du matériel cuivreux. Des datations radiocarbone réalisées sur des résidus de bois brûlés du secteur de la porte (zone 5) situent l’édification du rempart entre la fin du III^e et le I^{er} siècle

av. J.-C. Plusieurs indices, tels que des pierres éclatées et des concentrations de charbons, notamment dans le secteur 5, témoignent d'une destruction par incendie, possiblement liée aux campagnes de César en 53 av. J.-C. ou à des incursions germaniques (Delye *et al.*, 2016b).

4.1.2.3. *La période carolingienne*

Après une interruption d'occupation de plusieurs siècles, le site est à nouveau fréquenté durant le haut Moyen Âge, plus précisément à la fin du IX^e-début du X^e siècle (Delye *et al.*, 2016b). Une nouvelle enceinte défensive est alors édifiée, réutilisant partiellement le tracé protohistorique. Cette fortification est construite en maçonnerie de pierre, selon des techniques distinctes de celle de l'âge du Fer. La fonction précise du site reste cependant mal définie, les investigations archéologiques à l'intérieur de l'enceinte n'ayant révélé qu'un petit bâtiment religieux interprété comme une église.

4.2. Historique des fouilles

4.2.1. *Les premières découvertes et fouilles anciennes*

L'intérêt porté au site du *Rocher du Vieux-Château* remonte au milieu du XIX^e siècle. Dès 1855-1856, Nicolas Hauzeur, membre de la Société Archéologique de Namur, explore la région à la recherche de traces d'occupation antiques. Son passage à Modave est évoqué par Léon Caumartin, ainsi que par Gustave Arnould et Henri de Radiguès de Chennevière.

En 1863, Léon Caumartin publie une description du site dans le *Bulletin de l'Institut archéologique liégeois*, sans y avoir mené de fouilles (Caumartin, 1863). Il interprète les amas de pierres visibles sur le plateau comme les vestiges d'un *oppidum* fortifié, qu'il attribue à la civilisation des Condrusiens. Il identifie deux phases de construction distinctes : une première, en pierres brutes sans mortier, qu'il associe à une occupation protohistorique, et une seconde, maçonnée au mortier, qu'il relie à une réutilisation romaine. Il mentionne : « *après avoir fait la conquête du pays, ils [les Romains] ont eux-mêmes occupé l'oppidum des Condrusiens, et l'ont perfectionné en y ajoutant de nouveaux ouvrages de défense ; ceux-ci à leur tour après avoir encore servi pendant les premiers siècles après la*

chute de l'Empire romain, auront donné naissance à un château féodal, demeure d'un de ces puissants barons du moyen-âge. ».

Les premières fouilles véritables sont réalisées entre 1862 et 1872 par Gustave Arnould et Henri de Radiguès de Chennevière. Ces derniers, qui étudiaient préalablement les fortifications du site de Hastedon à Saint Servais (Namur), se sont intéressés aux remparts du *Rocher* mentionnés par Caumartin. Ils explorent le rempart par trois tranchées afin de mieux en comprendre la construction et publient leurs résultats dans les *Actes du Congrès International d'Anthropologie et d'Archéologie Préhistorique de Bruxelles* en 1872 (Arnould et De Radiguès, 1872). Ils y découvrent notamment des médailles romaines, du matériel lithique, de la céramique et plusieurs grands clous en fer mesurant entre 14 et 19 centimètres de long, retrouvés au pied des remparts sud et principal (nord-est). Cependant, Arnould et Radiguès ne proposent pas d'interprétation sur la fonction du site, se contentant de reprendre la dénomination de « camp », encore utilisée par la suite. Les tranchées ouvertes dans le rempart sud révèlent des différences notables de stratigraphie : la tranchée n°4 montre un remblai de pierres et de terre sans trace de parement ni de calcination, tandis que la tranchée n°3 présente un mur maçonné en calcaire lié au mortier, avec des traces de charbon de bois au contact du socle rocheux. Une troisième tranchée, au nord-est, met en évidence deux murs parallèles en dalles de grès, associés à un parement extérieur et à une masse interne de terre et de pierres, avec, là aussi, des traces de calcination. Un mur maçonné en calcaire, encore conservé sur deux assises, repose sur ces structures. La présence répétée de clous en fer dans ces différentes zones suggère leur implication dans les phases de construction. Arnould et de Radiguès proposent l'existence de trois phases constructives distinctes pour le rempart : une première couche présentant des traces de charbons et de calcination, une deuxième couche de murs parementés en grès, puis une surélévation maçonnée en calcaire. Toutefois, ils s'abstiennent de proposer une chronologie précise (Arnould et De Radiguès, 1872; Delye *et al.*, 2016b).

À la fin du XIX^e siècle, Ivan Braconier mène à son tour des recherches sur le site, sans formation archéologique formelle. Il expose ses découvertes, dont des haches en silex, pointes de flèches et autres outils lithiques néolithiques, lors du Congrès de Liège de 1890. Ce mobilier, essentiellement préhistorique, est aujourd'hui dispersé entre divers musées en région liégeoise et à Bruxelles (Delye *et al.*, 2016b).

Le site ne fait ensuite plus l'objet de fouilles systématiques jusqu'aux années 1980 (Delye *et al.*, 2016b). En 1983, une intervention ponctuelle au détecteur de métaux est

réalisée par Jean-Marc Doyen, Georges Loumaye et Eugène Warmembol. Leurs découvertes, publiées en 1983 dans la revue *Amphora* (vol. 33), incluent deux fibules en fer, deux monnaies celtiques, plusieurs outils servant au travail du bois (ciseaux, hache, poinçon), une pointe de javeline, des tessons d'un vase à parois éclaboussées, ainsi que 85 fiches en fer (Delye, 2022; Delye *et al.*, 2016b). Ces fiches sont décrites comme étant de section carrée et mesurant de 16 à 20 centimètres de longueur. La localisation exacte de ces objets lors de leur découverte n'est pas mentionnée, mais au vu de la typologie des fiches et de leur grand nombre, E. Delye estime probable qu'elles proviennent du secteur des remparts (Delye *et al.*, 2016b). Ces fiches ont été comparées dans la publication de 1983 à des objets analogues trouvés sur les sites de Lompret, Olloy-sur-Viroin et Rouveroy, et sont attribués à une phase de construction de la fin de l'époque celtique voire « *immédiatement postérieure* » à la conquête romaine. L'ensemble du mobilier collecté lors de cette intervention a été déposé au Musée communal de Huy, où il est aujourd'hui conservé. Toutefois, une partie de ce matériel n'a pas été publiée dans la revue, notamment sept demi-produits en fer (Fig.13), dont seul un avait fait l'objet d'une mention dans l'article, alors interprété comme un outil indéterminé à douille ouverte (Delye, 2022). C'est au terme d'un échange entre E. Delye et le conservateur du Musée communal de Huy que ces pièces ont été redécouvertes dans les collections et réinterprétés comme des demi-produits.

4.2.2. *Reprise des fouilles et recherches modernes*

Depuis 2004, le CAHC, sous la direction d'E. Delye, mène des campagnes de fouilles programmées annuelles sur le site. Les premiers travaux ont consisté à rouvrir les tranchées du XIX^e siècle afin de vérifier la stratigraphie décrite par Arnould et de Radiguès, ce qui a permis de confirmer une occupation protohistorique attribuable à La Tène finale (zones 1 à 3). Entre 2004 et 2008, les recherches se sont concentrées sur le rempart sud (zones 4/7), où la superposition de deux systèmes défensifs distincts a été mise en évidence, révélant plusieurs phases de construction (Fig.15). Afin d'approfondir l'étude stratigraphique du rempart sud (structure 2), la zone 4 a été prolongée vers le nord avec l'ouverture de la zone 7 (Fig.14). Cette nouvelle excavation, contiguë à la précédente, a été réalisée pour atteindre des niveaux mieux conservés, là où l'extension de la zone 4 se heurtait à des contraintes topographiques. En raison de leur continuité physique et de leur cohérence archéologique, les zones 4 et 7 sont systématiquement étudiées ensemble et désignées sous l'appellation commune de « zone 4/7 ».

À partir de 2009, les recherches se concentrent sur la zone 5 (Fig.14), correspondant à l'accès principal à la fortification, où se rencontrent les remparts protohistorique et carolingien (Fig.16). Cette zone, fouillée jusqu'en 2011, a livré des résultats majeurs. Un mur de parement externe en moellons de grès brut posés à sec est conservé sur près d'un mètre de hauteur et situé de part et d'autre du chemin d'accès à la porte. Au pied de ce mur, des traces d'incendie (charbons de bois) et la présence de petits clous en fer (Fig.18) suggèrent l'existence d'une structure légère en bois, probablement un parapet (Fig.19) (Delye *et al.*, 2011). Derrière ce mur de parement, les fouilles ont révélé la présence de logettes correspondant aux empreintes laissées par des poutres en bois, désintégrées avec le temps mais dont la trace a été conservée dans la maçonnerie. À l'emplacement des intersections entre ces éléments ont été retrouvées seize fiches en fer, pratiquement en place (Fig.17). La répartition de ces fiches et l'emplacement des logettes a permis de restituer l'espacement des poutres et la structuration verticale de l'ossature en bois, caractéristique d'un *murus gallicus*. Il s'agit donc clairement d'une phase de construction datée de l'occupation laténienne, bien qu'aucun autre matériel de l'époque ait été exhumé à cet endroit. L'ensemble de ces données a permis de reconstituer le plan complet d'une porte celtique associée à un *murus gallicus*, une structure alors considérée comme unique en Belgique mais comparable aux exemples de Vernon, Fécamp en France ou Manching en Allemagne (Delye, 2013). Les niveaux carolingiens du secteur ont également livré des trous de poteaux interprétés comme les fondations d'une tour défensive, tandis que des couches profondes ont révélé un niveau néolithique riche en industrie lithique, osseuse et céramique (Bischheim).

Les zones 8 et 9, situées à l'intérieur de l'enceinte (Fig.14), ont été ouvertes en 2011. La zone 8, située perpendiculaire au rempart sud, a livré un matériel très hétérogène, allant du Néolithique à l'époque contemporaine, vraisemblablement lié à des déblais récents associés à l'aménagement du chemin d'accès au site. La zone 9, située derrière le rempart sud et dans le prolongement des zones 4 et 7 (4/7), a livré quelques trous de poteaux et du mobilier néolithique, peut-être en lien avec une palissade préhistorique (Delye, 2013).

Entre 2012 et 2015, les fouilles se sont étendues à l'intérieur de l'enceinte (zones 9 à 14), livrant un mobilier très hétérogène (du Néolithique à l'époque moderne). Y ont été mis au jour des fosses et des trous de poteaux, ainsi qu'une quantité significative de scories. Celles-ci sont décrites comme accompagnées de « loupes de fer en forme de cupule, de projections de coulées (goutte vitrifiées) et deux ou trois ratés de fabrication de fiche en fer »

(Delye *et al.*, 2014). Ces vestiges sont répartis sur l'ensemble de la zone fouillée et suggèrent la pratique d'activités métallurgiques sur le site. Cette découverte nourrit l'hypothèse, formulée par E. Delye et l'équipe de fouille, d'une production locale des fiches en fer, en lien direct avec les structures défensives du *murus gallicus*. Dans la zone 11, ouverte à l'arrière du rempart, quarante-neuf scories ont été recensées pour une masse totale de 1 220 kilogrammes (Lucon *et al.*, 2014). Bien que ces couches soient mélangées et rassemblent du mobilier de différentes époques, cette découverte renforce l'hypothèse d'activités métallurgiques sur le site, même si leur datation précise reste à établir. La zone 14, à l'ouest du site, a documenté un tronçon du rempart carolingien en bord de versant, construit en pierre, mais installé sur les vestiges du rempart protohistorique. Quelques tessons de céramique de type pré-Andenne y sont associés, ainsi que des petits clous en fer (Delye *et al.*, 2016a).

De 2016 à 2020, les recherches ont mis en évidence une petite porte carolingienne en pierre et mortier de chaux (X^e siècle) (Delye *et al.*, 2017), la poursuite d'une palissade néolithique (zones 15 et 16) ainsi que les fondations d'un édifice religieux tardo-carolingien (petite église à chevet absidial) au centre du plateau (campagnes 2018-2019) (Delye *et al.*, 2019, 2018). Le mobilier de ces campagnes, très hétérogène (du Néolithique au haut Moyen Âge), livre peu d'éléments directement attribuables à l'époque laténienne, si ce n'est quelques tessons résiduels. Des clous en fer et des scories ont également été signalés en zone 15 (Delye *et al.*, 2018). Enfin, en 2020, les fouilles du rempart oriental reprennent pour réévaluer les découvertes du XIX^e siècle, en parallèle avec l'étude d'objets en fer issus des collections anciennes du Musée de Huy, dont les demi-produits mentionnées *supra* (section 4.2.1). Depuis 2020-2021, les fouilles ont été suspendues, notamment en raison de la pandémie de Covid-19. Elles n'ont repris que de façon limitée, centrées sur le secteur de l'église.

À ce stade, malgré la richesse des données archéologiques, allant du Néolithique au haut Moyen Âge, la fonction exacte du site demeure difficile à établir. Les vestiges défensifs protohistoriques et carolingiens témoignent de son rôle stratégique, mais l'occupation interne reste encore largement méconnue, si ce n'est la présence d'un petit édifice religieux carolingien.

4.3. Le matériel métallique

Une partie du matériel métallique mis au jour sur le site a fait l'objet d'un inventaire croisé entre la base de données de M. Delye (CAHC) et mes propres relevés. Cet inventaire, non exhaustif, est présenté en annexe (Tab.7).

Le site a livré un ensemble significatif de vestiges métalliques (Fig.28), principalement issus des zones 4/7 et 5. La majorité provient de niveaux attribués à la fin de l'âge du Fer, en particulier ceux en relation directe avec la construction et la destruction du *murus gallicus*. D'autres proviennent de niveaux d'époque carolingienne, de couches stratigraphiques perturbées ou encore de l'humus superficiel. Dans plusieurs cas, des éléments laténiens ont été retrouvés en contexte médiéval, intégrés involontairement dans la fortification carolingienne lors de la récupération de terres et matériaux provenant du rempart protohistorique. L'état de conservation des vestiges est variable, allant d'une corrosion modérée à une corrosion avancée. De nombreuses pièces sont également à l'état de fragments. Ainsi, une part du matériel, dont un grand nombre de fiches, a fait l'objet de restauration. L'inventaire général comprend plus de 400 objets métalliques (Tab.8), dont 332 en fer et 1 en cuivre pour les zones 4/7 et 5 (Delye et *al.*, 2016b).

4.3.1. Les demi-produits

Comme mentionné précédemment (*supra* section 4.2.1.), sept demi-produits (Fig.13) ont été mis au jour lors d'une intervention sur le site en 1983 par Warmembol et Doyen, puis redécouverts récemment dans les collections du Musée communal de Huy. Ils auraient été découverts dans une fosse, empilés les uns sur les autres (*comm.pers.* Delye 2022), mais leur emplacement exacte sur le site n'a pas été documenté.

E. Delye a identifié ces pièces comme des barres à douille, selon la typologie définie par M. Berranger (2014), et plus précisément de type BAD2 (Fig.20), c'est-à-dire des fers plats étroits et rectilignes, à bords parallèles. Cette typologie de demi-produit est particulièrement attestée à la fin de l'âge du Fer à travers le territoire de la France. Ces exemplaires, dont la douille est manquante, ne dépassent pas les 200 grammes pour une longueur maximale de 155 millimètres (Delye, 2022). Il est vraisemblable que la douille dans son entièreté ait été un tube très fin et étroit. Il semblerait que ce type de demi-produit soit caractéristique de la fin de La Tène, avec une répartition concentrée sur le Bassin

parisien, la Belgique et l'ouest de l'Allemagne (Delye, 2022). Le corpus découvert à Pont-de-Bonne sont tout de même plus petits, avec un poids moyen de 50,8 grammes et une longueur moyenne de 157,8 millimètres (Tab.2).

En Belgique, seulement deux autres sites ont livré ce type de matériel. Le premier site se situe à Marilles, *Le Haut Tiège* (province du Brabant Wallon), où trois exemplaires ont été trouvés dans un « fond de cabane » avec d'autres artefacts, et datés de la fin de La Tène finale (Berranger, 2014; Delye, 2022). Le second site est à Tavieres, *La Terre aux Pierres* (province de Namur), où dix exemples (Fig.21) ont été exhumés en 1848 en contexte d'habitat gallo-romain, associé à de l'armement et de l'outillage (Berranger, 2014; Delye, 2022; Léva, 1957). Il est également intéressant de mentionner la présence de cinq exemplaires d'un autre type de demi-produit plus massif, plutôt de type *currency-bar*, à Éprave (*Bois de Wérimont, Trou de l'Ambre*, province de Namur) (Delye, 2022; Mariën, 1970).

Delye a établi une comparaison des caractéristiques de ces fiches et des vestiges des remparts avec Pont-de-Bonne (Tab.1). Nous pouvons constater que les caractéristiques de ces sites sont très semblables.

4.3.2. *Fiches*

Les fiches, au même titre que les clous, représente la catégorie la plus abondante des objets métalliques (Tab.8). Leur identification a été réalisée sur base du protocole établi par Guillaumet en 2003 lors de la fouille de Bibracte (Guillaumet, 2003). Ces pièces correspondent à de longs clous en fer, présentant une section carrée et terminés par une tête plate de forme variable (carrée, rectangulaire, arrondie, sans tête ou dite « tête homme »). Elles servaient à fixer et solidariser entre elles les poutres de l'ossature interne du *murus gallicus* (Delye et al., 2016). Les fiches découvertes à Pont-de-Bonne mesurent entre 130 et 202 millimètres pour un poids compris entre 24 et 140 grammes (Delye et al., 2016). Quelques exemplaires de plus forte section, probablement associés aux couches inférieures de la structure de bois, ont également été recensés (Fig.23 à 25). Au total, 57 fiches ont été inventoriées, dont 47 en zone 5 et 10 en zone 4/7. La majorité provient des niveaux correspondant au cœur du rempart celte (UF [19], [45], [66]), tandis que d'autres proviennent des couches d'éboulis (Tab.7). Certaines proviennent du rempart carolingien mais leur présence s'explique par la réutilisation, lors de la construction de la fortification médiévale,

de terres extraites du rempart laténien qui contenaient déjà ces fiches. Les couches d'humus en surface ont également livré plusieurs exemplaires.

Parmi ces fiches, trente-trois ont été restaurées. Deux fragments ont été interprétés comme des ratés de fabrication, bien qu'une analyse morphologique et métallographique plus poussée soit nécessaire pour confirmer cette hypothèse. Les fiches de Pont-de-Bonne présentent des similitudes avec celles observées à Lompret et Rouveroy en Belgique, et au Titelberg au Grand-Duché de Luxembourg (Delye *et al.*, 2016b).

4.3.3. *Clous*

Les clous, complets ou fragmentaires, sont également très nombreux sur le site (Fig.26 et 27). La plupart provient de niveaux liés à la phase de destruction du rempart laténien, d'autres ont été trouvés dans des niveaux carolingiens ou dans l'humus de surface. Quelques exemplaires, ainsi que des fiches, ont également été exhumés de trous de poteaux, mais aucun n'a été retrouvé dans le cœur du rempart. Trois catégories ont été mises en évidence : des grands clous de 120 millimètres de long, des clous moyens de 25 à 82 millimètres, de section carrée (3,8 à 6 millimètres) et à tête plate (carrée, rectangulaire ou arrondie), et des petits clous dont la longueur est inférieure à 30 mm, de section carrée ou rectangulaire, à tête plate et large. Les deux premières catégories étaient associées à une structure légère en bois (probablement un parapet) près de la porte d'accès du site. La troisième catégorie provient de niveaux carolingiens mais leur attribution chronologique est incertaine. Certains clous issus de couches d'époque médiévale sont aussi interprétés comme des clous décoratifs, des accessoires vestimentaires ou des clous de ferrure (Delye *et al.*, 2016b).

4.3.4. *Scories*

Plusieurs centaines de scories ont été mises au jour à l'arrière du rempart. La majorité provient de l'humus moderne, sans attribution chronologique précise. Quelques-unes proviennent aussi des niveaux carolingiens et laténiens. Une grande part de ces scories sont non magnétiques, certaines semblent potentiellement agglomérées à des matières argileuses, possiblement des parois de foyers. En l'absence d'étude spécifique dans le cadre de ce travail, ces pièces n'ont pas fait l'objet d'une analyse détaillée. Les informations présentées ici proviennent de la base de données des collections du site ainsi que d'observations directes effectuées sur le matériel.

4.3.5. *Autres objets métalliques*

Le reste du corpus comprend quelques couteaux à soie (attribués aux niveaux carolingiens), des pointes de flèches de même attribution, des fragments de tôle et divers éléments indéterminés. Ces derniers regroupent des éléments de petite taille, parfois très corrodés, tels que des fragments de petits clous ou des déchets métallurgiques. Certains d'entre eux, au profil particulier, ont été interprétés comme des ratés de fabrications de fiches (Fig.27 – 4 et 5).

5. MÉTHODOLOGIE ET MOYENS ANALYTIQUES

5.1. Présentation et description du corpus d'étude

Le corpus d'étude a été défini selon un ensemble de critères, établis en concertation avec M. Dissert, Mme Van Wersch et M. Delye. S'inscrivant dans l'hypothèse de produits distincts issus d'une même chaîne opératoire, la sélection des échantillons s'est volontairement orientée vers une diversité typologique des échantillons, afin de refléter différentes étapes des processus de fabrication. L'objectif principal est d'examiner les relations techniques et microstructurales entre produits finis et semi-finis afin d'identifier d'éventuelles similarités dans les procédés de fabrication et, plus largement, de rechercher des indices suggérant une activité métallurgique locale sur le site.

La sélection du corpus s'est fondée sur plusieurs critères. Dans un premier temps, à partir d'une observation formulée par M. Delye, ont été privilégiés des objets présentant une certaine corrélation macroscopique apparente, notamment les barres à douille et les fiches. Le corpus a également été restreint aux objets *a priori* attribuables à l'occupation laténienne du site, afin d'assurer une cohérence chronologique. Des considérations techniques ont également guidé les choix : les objets devaient être de bonnes dimensions pour les instruments de mesure, se trouver dans un état de conservation suffisamment correct et contenir encore une quantité significative de métal afin de garantir la faisabilité et la pertinence des analyses. Enfin, l'attention s'est portée en priorité sur des objets finis ou semi-finis car, comme évoqué par M. Berranger, ils sont plus révélateurs des étapes de la chaîne opératoire (*supra* section 2.2.3.).

Plusieurs contraintes ont toutefois restreint l'élaboration de ce corpus. Le temps accordé aux différentes analyses ainsi que le budget imparti ont limité le nombre d'échantillons possibles. Par ailleurs, la majorité des fiches issues des niveaux laténiens du site avait fait l'objet d'une campagne de restauration antérieure, ce qui a conduit M. Delye à les exclure automatiquement de l'étude car les analyses envisagées étaient invasives, et donc incompatibles avec le statut de pièces déjà restaurées. De même, l'intégration initialement envisagée d'un petit nombre de scories dans l'analyse comparative s'est rapidement révélée peu pertinente. En effet, une telle approche aurait nécessité un corpus plus large, mieux documenté et spécifiquement constitué, afin de produire des résultats véritablement

représentatifs des activités de production locales au site. En outre, il a fallu composer avec un matériel parfois issu de contextes archéologiques perturbés (humus moderne, niveaux mélangés). Certains objets métalliques retrouvés sur le site, dont les fiches en fer, proviennent notamment des couches associées à l'effondrement du rempart carolingien ou à son remblaiement, ce qui complique leur datation précise. Néanmoins, l'attribution de ces éléments à une phase laténienne reste plausible, compte tenu de leur typologie, de leur état de fabrication, et du contexte général d'occupation du site.

Le corpus retenu comprend finalement un ensemble de neuf objets : un demi-produit, trois clous, trois fiches dont une proposée comme un raté de fabrication, et un autres élément considéré comme un raté de fabrication mais que nous appellerons chute. Les données récapitulative de ce corpus sont présentées en annexe (Annexe B, Tab.3).

Chaque objet du corpus est identifié par un numéro d'inventaire structuré, composé de l'année de fouille, de la zone et de la structure de découverte (rempart sud = structure 1 ; rempart principal au nord = structure 2), de l'unité de fouille/unité stratigraphique (UF), et enfin du numéro séquentiel de l'objet. Cette nomenclature garantit la traçabilité des données archéologiques et facilite leur mise en relation avec le contexte de fouille. Ces données (année et zone de fouille, structure, UF, numéro d'objet), ainsi que la description des unités de fouille, proviennent de la base de données des collections du site, mise à disposition par M. Delye.

5.1.1. Les fiches et le demi-produit sélectionné

Parmi les sept demi-produits conservés au Musée communal de Huy, l'exemplaire PDB/VCh/347 (Annexe A, planche I, p.5) a été retenu pour faire l'objet d'analyses dans le cadre de cette recherche avec l'accord de l'institution. Ce choix s'explique par son bon état de conservation général : faible fragmentation, corrosion limitée qui n'a pas que faiblement affecté la largeur et l'épaisseur de la barre, masse résiduelle suffisante (61 grammes) (Tab.2), suggérant une quantité de métal encore significative. Cette barre conserve la base de sa douille sur environ un centimètre, identifiable malgré sa fragmentation, ainsi qu'une extrémité distale repliée sur elle-même sur quelques centimètres.

Trois éléments identifiés de manière certaine à des fiches ont été sélectionnés pour cette étude. Les deux premières (P.VCh10/5/1-2/84/1, P.VCh10/5/1-2/84/2) proviennent de la zone 5. La première fiche P.VCh10/5/1-2/84/1 (Annexe A, planche II, p.6) est issue de la

fouille de 2010. Elle a été exhumée dans la zone du chemin d'accès au plateau entre le rempart sud et le rempart nord, dans une couche stratigraphique correspondant à la phase d'éboulis du rempart carolingien (UF [84]), couche elle-même située au-dessus d'un niveau d'écroulement du *murus gallicus* (UF [80]). Par son analogie aux fiches retrouvées *in situ* dans le rempart, l'origine de cet objet a été datée de la phase d'occupation de la fin du second âge du Fer. Il fait partie des artefacts non restaurés, mais se trouve tout de même dans un état de conservation correct et est conservé dans son entièreté. Il s'agit donc d'un bon exemplaire représentatif de ce type de fiches pour ce site.

Le second échantillon de cette nature, le P.VCh10/5/1-2/84/2 (Annexe A, planche III, p.7-8), a été découvert dans le même contexte. Sur le plan macroscopique, il présente une tête plate épaisse, une extrémité distale plus fine et très corrodée, aujourd'hui incomplète. Plus massive que la fiche précédente, celle-ci conserve toutefois l'intégralité de sa longueur, bien que pliée à un angle d'environ trente degrés au premier tiers de sa longueur. Elle est également couverte d'une fine couche de corrosion et n'a pas fait l'objet d'une restauration. Cette pièce permet de comparer deux éléments issus d'un même contexte, tant d'un point de vue macroscopique que microscopique et structurelle.

La troisième fiche sélectionnée, P.VCh11/8/1/57/5 (ou P.VCh11/8/1/166/1)⁹ (Annexe A, planche IV, p.9), a été exhumée lors de la fouille de 2011. Elle est issue d'une couche stratigraphique associée au cœur et à l'éboulis du rempart médiéval (UF [57] ou [166]) dans la zone 8, zone qui recoupe la structure 1 et se prolonge vers l'intérieur du site. Présentant une forme et un aspect similaire à l'échantillon P.VCh10/5/1-2/84/1, cette pièce provient également probablement de l'éboulis du *murus gallicus*. Elle se trouve dans un bon état de conservation, bien que corrodée, et a préservé son entièreté. L'intérêt de ce troisième échantillon réside également dans le fait de comparer des contextes distincts, dans des zones du site différentes.

5.1.2. Les clous

Comme mentionné précédemment, l'intégration de scories dans cette étude aurait été peu pertinente. Le choix des échantillons complémentaires s'est donc orienté vers une autre catégorie d'objets exhumés susceptibles de contribuer à la réflexion d'une éventuelle

⁹ Les deux unités de fouille (UF) sont mentionnées sur la fiche d'inventaire de cette pièce. Ainsi, les deux numéros d'inventaire sont repris ainsi dans la base de données de M. Delye. Par souci de simplicité, seul le premier numéro sera utilisé pour le reste de ce travail.

production métallurgique locale : les clous. Ces clous en fer, de dimensions plus réduites que les fiches, semblent avoir été associés à la construction du système défensif, notamment à un parapet en bois servant de poste de contrôle au niveau de la porte d'entrée. Trois exemplaires ont été retenus dans le cadre de cette recherche : les pièces P.VCh10/5/1-2/79/5, P.VCh11/5/2/78/7 et P.VCh10/5/2/70/27. Leur sélection repose sur leur attribution fiable à un contexte stratigraphique documenté, à savoir la zone 5, correspondant à l'entrée principale du site, et sur leur provenance de niveaux distincts mais tous attribués à La Tène finale (UF [70], [78] et [79]). Les autres clous provenant de cette zone mais issus de contextes médiévaux ou de couches perturbées ont été écartés afin de préserver la cohérence du corpus. Ces trois pièces se caractérisent par leur conservation pratiquement complète, un bon état général, une masse suffisante indiquant une quantité exploitable de métal et des profils légèrement différents (deux de dimensions proches et un plus grand) permettant d'intégrer une certaine diversité morphologique à l'analyse.

Le clou P.VCh10/5/1-2/79/5 (Annexe A, planche V, p.10) est de section carrée, courbé et plié dans sa longueur à un angle d'environ nonante degrés près de l'extrémité correspondant à la tête, aujourd'hui manquante. Il se pourrait également qu'il manque le bout de l'extrémité distale. La tige présente une légère torsion. Le clou P.VCh11/5/2/78/7 (Annexe A, planche VII, p.12), de petite taille, est de section quadrangulaire, dépourvu de tête et possède une extrémité distale fine et courbée à environ un angle de nonante degrés. La corrosion a altéré une partie de son épaisseur au milieu de la tige. Des résidus indéterminés, probablement du bois ou de la terre calcinée, adhèrent à la zone de la tête, suggérant un contact ou une fixation avec un autre matériau lors de son enfouissement. L'échantillon P.VCh10/5/2/70/27 (Annexe A, planche VI, p.11) est de bonne section, à tête rectangulaire, et présente une déformation importante. Ce clou est plus massif que les deux autres, présentant une morphologie plus proche d'une petite fiche qu'un clou classique. Le bout de son extrémité distale est manquant. La corrosion a également endommagé en partie de son épaisseur dans la longueur près de l'extrémité distale.

5.1.3. *Reste du corpus*

Dans la continuité de l'hypothèse d'une activité métallurgique locale, deux objets considérés par M. Delye comme de possibles « ratés » de fabrication ont été intégrés au corpus (Fig.29). Ces pièces pourraient correspondre à des étapes incomplètes ou interrompues de transformation d'un objet, ou à des chutes de forge. Cette interprétation

reste toutefois discutée par M. Dissler, qui, sur la base de leur aspect macroscopique, estime que l'hypothèse de « ratés de fabrication » pourrait ne pas être retenue (*comm. pers.* 2023).

Le premier exemplaire retenu, P.VCh12/10//142/106 (Annexe A, planche VIII p.13), a été mis au jour lors de la fouille de 2012 dans la zone 10, située en bordure du rempart sud, à l'intérieur de la fortification. Il provient de l'UF [142], correspondant à une couche d'humus moderne, dont le contexte archéologique est perturbé, comme en témoignent la présence conjointe de clous, de céramique carolingienne, d'objets modernes, mais surtout d'un nombre important de scories. C'est précisément cette association significative avec des résidus métallurgiques qui a motivé, en grande partie, la sélection de cet objet. Cet artefact a initialement été identifié comme une fiche du *murus gallicus*, avant d'être décrit dans sa fiche d'inventaire par M. Delye comme « une barre de section carrée (10x10mm) dans sa section la plus large, s'amincissant vers la pointe (extrémité distale) et dont l'extrémité proximale n'est pas terminée normalement par une tête homme mais par un rétrécissement de la section ». Cette morphologie évoque en partie celle des fiches, tout en présentant ce rétrécissement qui rappelle, sans l'attester, la forme d'une soie de préhension. La morphologie générale reste identifiable bien que la corrosion ait partiellement altéré l'objet.

Le second échantillon de cette nature est le numéro P.VCh11/9//125/43 (Annexe A, planche IX, p.14). Cet objet a été découvert en zone 9, adjacente à la zone 10, également caractérisé par une couche humifère perturbée avec présence de nombreuses scories. Lui aussi initialement identifié comme une fiche, il est trop corrodé pour en estimer la section exacte. Le premier tiers de sa longueur, au niveau de la tête, présente une épaisseur nettement plus importante que le reste de la pièce. Il semble encore associé à un matériau indéterminé, potentiellement du bois. La corrosion a fortement endommagé la section restante, principalement dans la partie médiane de sa longueur. L'extrémité distale, mieux conservée, présente un repli en forme de boucle, une caractéristique morphologique singulière, dont l'origine ou la fonction reste à éclaircir.

5.2. Méthodologie et protocoles analytiques

Il existe différentes méthodes d'analyse pour étudier les métaux archéologiques et les matières ferreuses particulièrement, en fonction de la question de recherche et de l'objectif en amont.

Les méthodes non invasives et non destructrices utilisées pour l'analyse des objets métalliques reposent principalement sur des techniques de surface telles que la PIXE (*Particule Induced X-ray Emission*), la spectrométrie de fluorescence des rayons X (XRF) ou la spectrométrie Raman. Toutefois, ces techniques ne sondent qu'une faible profondeur sous la surface, ce qui limite leur capacité à caractériser la composition du métal sous-jacent lorsque l'objet est recouvert d'une couche de corrosion (Caley, 1964; Meyer-Roudet, 1999).

Parmi ces méthodes non invasives, l'imagerie par radiographie X sert à évaluer l'état de conservation de l'objet sans l'altérer et à révéler d'éventuelles reprises ou éléments internes particuliers (Meyer-Roudet, 1999). Cette technique aurait pu être utilisée lors de la sélection des échantillons, si des doutes avaient existé quant à la densité ou à l'intégrité du métal conservé. Toutefois, le poids des échantillons indiquait déjà une masse de métal suffisante, et recourir à la radiographie aurait entraîné un coût supplémentaire.

Les méthodes invasives sont généralement les plus efficaces et les plus pertinentes pour l'étude du matériel métallique archéologique. Dans le cadre de cette étude, le caractère invasif a certes limité le nombre d'échantillons disponibles pour les analyses, mais il n'a pas empêché leur mise en œuvre. Parmi les possibilités analytiques, il faut distinguer, d'une part, les techniques d'observation et de caractérisation optique du métal, telles que la microscopie optique, la microscopie électronique à balayage (MEB), la métallographie et la pétrologie (Mangin *et al.*, 2004) ; d'autre part, les méthodes de caractérisation chimique du métal et des inclusions de scorie emprisonnées dans la matière, comme la spectroscopie de rayons X à dispersion d'énergie (EDS ou EDX), souvent couplée au MEB. D'autres méthodes peuvent également être utilisées pour caractériser chimiquement les métaux, notamment en considérant les éléments présents en traces (Leroy, 2010). C'est le cas de la spectrométrie de masse à plasma à couplage inductif (ICP-MS), souvent associée à l'ablation laser (LA-ICP-MS), ainsi que de la spectrométrie d'émission atomique (ICP-AES), bien que cette dernière soit surtout utilisée pour les alliages cuivreux (Meyer-Roudet, 1999). Ces techniques sont particulièrement utiles pour des études de provenance, en comparant la composition

élémentaire d'un objet à celle des gisements de minerais connus. Cependant, ces méthodes sont destructrices car elles nécessitent généralement la mise en solution d'une partie de l'échantillon, ce qui explique pourquoi elles n'ont pas été retenues dans le cadre de cette étude. L'analyse par activation neutronique (NAA) peut également fournir une composition élémentaire très précise grâce à l'analyse des rayonnements γ . Cependant, son usage nécessite l'accès à un réacteur nucléaire, et rend les échantillons temporairement radioactifs, ce qui en limite fortement l'usage dans un contexte patrimonial.

Dans le cadre de cette étude, nous avons privilégié des méthodes invasives ciblées, qui permettent une observation fine de la microstructure du métal ainsi qu'une caractérisation élémentaire localisée des éléments majeurs des inclusions de scories. Deux techniques principales ont été mobilisées : la métallographie, utilisant la microscopie métallographique en lumière réfléchie, et la microscopie électronique à balayage (MEB), couplée à la spectroscopie de rayons X à dispersion d'énergie (EDS)¹⁰. Ce protocole, largement établi dans les travaux des chercheurs de l'école française (Ph. Dillmann, Ph. Fluzin, G. Pagès, M. Berranger, etc.), constitue la méthode standard d'analyse pour ce type de matériel¹¹.

Les techniques de spectrométrie ICP-MS ou d'activation neutronique n'ont pas été retenues, dans la mesure où l'objectif premier de l'étude n'était pas de déterminer la provenance des objets du corpus. De plus, ces méthodes impliquent des délais d'analyse plus longs ainsi que des coûts plus élevés, ce qui les rendait moins adaptées aux contraintes de ce projet. Il est également possible de recourir à des analyses de datation par radiocarbone sur ce type de matériel (Fluzin *et al.*, 2000). Toutefois, elles n'ont pas été envisagées en raison des contraintes mentionnées et du fait qu'elles ne répondaient pas directement aux objectifs principaux de cette étude.

Une première observation à l'œil nu permettra une étude morphologique et une observation macroscopique du corpus. Ensuite, la métallographie permettra d'appréhender les caractéristiques internes de la matrice métallique grâce à une étude en microscopie optique des coupes transversales, préalablement obtenues par préparation des échantillons. Enfin, le couplage MEB-EDS prodiguera une analyse chimique semi-quantitative des inclusions de scories retenues dans la matrice métallique.

¹⁰ Les analyses archéométriques ont été réalisées au Laboratoire « Archéomatériaux et Prévention à l'Altération » (LAPA, CEA Paris-Saclay) sous la supervision d'A. Disser.

5.2.1. Étude à échelle microscopique du corpus

5.2.1.1. Préparation des échantillons

Comme mentionné précédemment, la métallographie doit être effectuée sur des coupes transversales, sélectionnées en fonction de leur représentativité. Dans cette optique, il est préférable de conserver la totalité de la surface de l'échantillon. Si cela n'est pas possible, les zones les plus pertinentes doivent être identifiées, ou plusieurs sections peuvent être réalisées sur une même surface.

Parmi les échantillons étudiés, six ont fait l'objet d'un prélèvement en raison de la taille limitée des instruments de mesure : P.VCh10/5/1-2/84/1, P.VCh10/5/1-2/84/2, P.VCh11/8/1/57/5, P.VCh11/9//125/43, P.VCh12/10//142/106 (deux prélèvements ont été réalisés sur ce dernier) et PDB/VCh/347. Trois autres échantillons ont été conservés dans leur intégralité : P.VCh10/5/1-2/79/5, P.VCh10/5/2/70/27 et P.VCh11/5/2/78/7. Les prélèvements ont été effectués à l'aide d'une meule de tronçonnage diamantée et nitrure de bore cubique (CBN), à l'aide de l'appareil Struers Minitom. Les coupes ont été réalisées selon l'axe longitudinal. Ce choix, comme le mentionne S. Leroy, permet d'appréhender au mieux les inclusions piégées dans la matrice métallique (Leroy, 2010). Pour les fiches, les sections ont été prélevées dans la partie proximale des fiches (tête). Ces échantillons ont ensuite été enrobés dans de la résine synthétique, puis polis à l'aide d'une polisseuse automatique (Struers Tegramin-30), équipée de disques abrasifs de différentes granulométries (200 μm , 125 μm et 68 μm). Ce polissage est terminé par l'utilisation de solutions diamantées en suspension (granulométrie de 9 μm à 1 μm), permettant d'aboutir au poli miroir des coupes transversales.

5.2.1.2. Examen métallographique

Scott et Schwab proposent cette définition dans leur ouvrage : « la métallographie est essentiellement la science de la structure interne des matériaux métalliques » (Scott et Schwab, 2019). Mangin précise que « traditionnellement, la métallographie concerne l'étude des principales structures des métaux à l'aide d'un microscope en lumière réfléchi : le faisceau lumineux est réfléchi sur la surface de l'échantillon, préalablement poli : c'est le microscope métallographique » (Mangin *et al.*, 2004). En archéométrie, la métallographie sert concrètement à caractériser la nature du métal à travers l'observation de sa microstructure (aspects des grains, phases métalliques, inclusions), à évaluer qualitativement

sa composition (fer, acier, phosphore), à mettre en évidence d'éventuelles traces de fabrication (soudure, replis, etc.), et ainsi d'en déduire la qualité du matériau ainsi que les techniques employées lors de la fabrication et transformation de ces objets (Bauvais et al., 2018b; Berranger et al., 2017a; Caley, 1964; Fluzin et al., 2000; L'Héritier et al., 2003; Mangin et al., 2004).

Cette technique implique le prélèvement d'un échantillon représentatif d'un objet, qui est ensuite préparé, c'est-à-dire monté et poli, puis attaqué chimiquement à l'acide. Cette étape, appelée « attaque métallographique », permet de révéler la microstructure du métal, rendant les détails internes visibles par microscopie optique (Scott et Schwab, 2019).

a. Microscopie optique métallographique

L'observation est réalisée à l'aide d'un microscope métallographique, instrument spécialement conçu pour l'examen de matériaux métalliques en lumière réfléchie, avec des grossissements allant de x5 à x100. Dans le cadre de cette étude, les observations ont été menées à l'aide d'un microscope ZEISS Axio Imager, équipé d'un système de capture d'image¹² ainsi que d'un logiciel d'acquisition et de traitement numérique¹³. Chaque échantillon a fait l'objet de trois phases d'observation : une première sur la surface polie non attaquée, puis deux autres après des attaques successives à l'acide. L'acquisition des images est réalisée pour chacune des pièces et des échantillons, capturant les éléments les plus pertinents à différentes échelles de grossissements (à x20, x50, x100 et x200). Ces étapes permettent de faire apparaître progressivement différents éléments de la microstructure, certaines caractéristiques n'étant visibles qu'après attaque, tandis que d'autres, comme certaines inclusions, défauts de surface ou lignes de soudure, peuvent déjà être repérées sans traitement chimique préalable (L'Héritier *et al.*, 2003).

b. Attaque au réactif Nital 4%

Les sections polies sont soumises au réactif Nital 4%¹⁴. Cette opération sert à révéler la microstructure du métal en fonction de la teneur en carbone, par l'identification de phases comme la ferrite et la perlite ou de zones localement carburées (Disser *et al.*, 2020; Lam *et al.*, 2020; Pagès *et al.*, 2011). Elle permet également de mettre en évidence les soudures, les replis et les lignes de corroyage. Par ailleurs, cette attaque facilite l'observation des inclusions (forme, nature, répartition).

¹² Camera AxioCam 305 color

¹³ Logiciel ZEISS ZEN.

¹⁴ Solution composée de 4% d'acide nitrique (HNO₃) et d'éthanol.

c. Attaque au réactif Oberhoffer

Le réactif Oberhoffer¹⁵ est ensuite utilisé afin de mettre en évidence les zones riches en phosphore, ainsi que la présence de ferrite et d'acier (Kastowsky *et al.*, 2007; Vega *et al.*, 2002).

5.2.1.3. Analyse inclusionnaire

La démarche d'analyse s'appuie sur les travaux de Dillmann et L'Héritier (2007) et sur leurs applications ultérieures (Dillmann et L'Héritier, 2007; Berranger *et al.*, 2017; Bauvais *et al.*, 2018a; Disser *et al.*, 2020).

Les échantillons métalliques, initialement enrobés dans de la résine époxy, ont été repolis avec des suspensions diamantées de 9 µm, 3 µm et 1 µm afin d'obtenir une surface non attaquée chimiquement pour l'observation des inclusions. Pour assurer une conductivité optimale sous microscope électronique à balayage (MEB), la surface résinée a été recouverte d'une fine couche de carbone par métallisation et les contours ont été entourés d'adhésifs cuivrés.

L'analyse élémentaire des inclusions a été réalisée au SEM-FEG JEOL 7001-F, équipé d'un détecteur à dérive en silicium pour la spectrométrie de rayons X à dispersion d'énergie (EDS). Le principe repose sur trois types de signaux produits par l'interaction faisceau-échantillon : les électrons secondaires fournissent la topographie de la surface, les rayons X caractéristiques permettent l'identification des éléments chimiques, et les électrons rétrodiffusés offrent une cartographie chimique par contraste. Ainsi, l'imagerie par électrons rétrodiffusés distingue les zones métalliques (valeurs de gris clair, blanc) des inclusions, porosités et produits de corrosion (valeurs basses, gris à noir). Cela permet de cibler chaque ensemble de pixels sombres comme une entité et de définir des zones d'analyses sous forme de quadrilatères, spatialement localisés par le système de déplacement du microscope. L'appareil a été programmé à une tension de 15 kV, un courant de sonde d'environ 8 nA. Chaque inclusion détectée (au moins 40 par échantillon) a été analysée pour sa composition élémentaire et ses coordonnées spatiales.

Les données brutes ont été automatiquement traitées avec un filtre (logiciel AZtec, Oxford Instruments) pour éliminer le bruit de fond et quantifier les éléments O, Na, Mg, Al,

¹⁵ Solution composée de chlorure de fer (FeCl₃), de chlorure de cuivre (CuCl₂), de chlorure d'étain (SnCl₂), d'acide chlorhydrique (HCl) et d'éthanol en diverses concentrations mélangées à de l'eau.

Si, P, S, Cl, K, Ca, Ti, V, Cr, Mn et Fe. Les teneurs élémentaires ont été normalisées à 100%, c'est-à-dire recalculées proportionnellement de façon à ce que la somme des pourcentages en masse soit exactement égale à 100%. Cette opération permet de corriger les écarts liés aux mesures et de rendre les compositions plus comparables entre elles. Le logiciel génère ensuite un tableau de données regroupant pour chaque inclusion ses coordonnées spatiales, ses caractéristiques morphologiques et sa composition chimique (Disser *et al.*, 2020).

Ce protocole produit un très grand volume de données qui nécessite un traitement statistique adapté. Celui-ci a été effectué par A. Disser au LAPA à l'aide d'un script en langage R spécialement développé pour ce type d'analyse (Disser *et al.*, 2020). Le traitement statistique comprend d'abord une gestion des données qui sont sous la limite de détection (généralement Na, Mg, et Mn), pour lesquelles des valeurs aléatoires sont générées selon une distribution uniforme entre la valeur nulle et la limite de détection. Cela permet de conserver l'information sur ces éléments, qui reste particulièrement pertinente, et éviter les biais statistiques. Ensuite, il permet d'éliminer les valeurs aberrantes et les entités non pertinentes (porosités et corrosion) afin de ne garder que les inclusions, ainsi que d'écarter les mesures dont la précision n'est pas suffisante. Enfin, les particules dont la composition était faussée par un signal parasite provenant de la matrice métallique environnante ont également été exclues afin de ne conserver que des mesures fiables. Par la suite, chaque concentration élémentaire est convertie en oxyde (Na_2O , MgO , Al_2O_3 , SiO_2 , P_2O_5 , SO_3 , K_2O , CaO , TiO_2 , Cr_2O_3 , V_2O_5 , MnO , FeO), en supposant que le fer est présent sous forme FeO ou Fe_2SiO_4 (valence II). De plus, les inclusions dont la somme des oxydes est inférieure à 80% ou supérieure à 120% sont écartées.

Afin de définir les groupes chimiques des inclusions conservées, il est nécessaire de passer par une approche multivariée, protocole déjà employé et approuvé dans l'étude des éléments majeurs pour restituer les systèmes techniques (Dillmann et L'Héritier, 2007; Charlton *et al.*, 2012; Disser *et al.*, 2020, 2014). En effet, les teneurs élémentaires brutes ne peuvent pas être utilisées telles quelles car elles dépendent de la proportion variable d'oxydes de fer présent dans les inclusions. De plus, certains éléments (Si, Ca) peuvent être présents en quantités jusqu'à dix fois supérieures à celles d'autres éléments (Na, Mg ou Mn). Afin d'éviter que ces facteurs n'influencent excessivement l'analyse, une transformation des données doit être appliquée. Les teneurs élémentaires corrigées sont donc transformées en *log-ratios* centrés et réduits afin de limiter la dominance des éléments plus abondants et de permettre les comparaisons sur une même échelle. Ensuite, une analyse en composantes

principales (ACP) et une classification hiérarchique ascendante (algorithme de Ward) sont appliquées aux variables transformées afin définir des groupes d'inclusions chimiquement homogènes. Enfin, le jeu de données final, comprenant les inclusions retenues, leur classification, leur coordonnées et leurs compositions est intégré dans un système d'information géographique (logiciel QGIS version 3.22.13). La mosaïque micrographique de chaque échantillon a été géoréférencée à l'aide de trois ou quatre points de repère identifiés sur des inclusions, permettant la superposition du nuage de points d'inclusions et de l'image métallographique et donc la comparaison entre les inclusions et les spécificités de l'échantillon, telles que des soudures (Disser et al., 2020).

Dillmann et l'Héritier (2007) ont montré que certains oxydes, dits *Composés Non-Réduits* (CNR) ou *Non-Reduced Compounds* (NRC) (Al_2O_3 , SiO_2 , K_2O , MgO , CaO) ne sont pas réduits lors de la transformation du minerai en métal et constituent ainsi une signature chimique stable du système de réduction (minerai, charbon, revêtement de four, fondants). Dans de nombreux cas, les rapports entre ces oxydes ($\% \text{Al}_2\text{O}_3 / \% \text{SiO}_2$, $\% \text{K}_2\text{O} / \% \text{CaO}$, $\% \text{MgO} / \% \text{Al}_2\text{O}_3$) sont constants au sein d'un artefact, depuis la loupe jusqu'au demi-produit, ce qui permet de relier un objet à une aire ou un système de production. Néanmoins, certaines inclusions peuvent s'écarter de ces rapports, soit par effet de concentration lié à la petite taille de certaines inclusions ou à leur fragmentation, soit à cause de l'ajout de sable ou d'argile lors des étapes de forge (post-réduction), qui peut modifier fortement la composition chimique (par exemple, forte hausse de SiO_2). Les ajouts peuvent provenir de l'étape de transformation de la loupe ou de phases de forge plus tardives. Dans certains artefacts très travaillés, avec un usage important d'additifs, les auteurs observent que les inclusions issues de la réduction peuvent devenir minoritaires. Selon Serneels (Serneels, 1994), la composition des inclusions résulte de plusieurs contributions : le métal apporte essentiellement du fer, avec des traces de Co, Ni et Cu ; le charbon de bois introduit Ca, Na, K et quelques éléments en faibles proportions ; les parois et les ajouts argilo-sableux fournissent Si, Al et divers éléments mineurs ; la scorie de réduction refondue véhicule des éléments typiques des minerais (V, Cr, Mn) absents des matériaux argilo-sableux.

Selon Pagès *et al.* et Disser *et al.* (Disser *et al.*, 2020; Pagès *et al.*, 2011), la présence de plusieurs groupes distincts d'inclusions non réduites dans un même objet traduirait un procédé composite impliquant plusieurs étapes de transformation ou sources de pollution. Cette approche ne permet pas de déterminer directement l'origine géographique du métal,

mais fournit des indicateurs technologiques sur le système de réduction employé, la présence d'ajouts ou de pollutions, et l'évolution chimique au cours du forgeage.

Afin d'interpréter les résultats MEB-EDS, la comparaison des inclusions a été menée en tenant compte des *Primary Pieces of Metal* (PPM) ou « masses de métal initiales », et non pas des échantillons dans leur ensemble. En effet, comme l'ont rappelé Pagès et *al.* (Pagès et *al.*, 2011), un même échantillon peut en effet être constitué d'une ou de plusieurs PPM, elles-mêmes d'origines métallurgiques différentes. L'analyse doit donc porter sur les PPM supposées, à partir desquelles sont établis des tableaux de composition chimique. Pour certains oxydes comme le MnO et le P₂O₅, les valeurs sont normalisées au fer. Le phosphore peut jouer un rôle déterminant : des teneurs significatives en phosphore ne peuvent provenir uniquement du minerai ou du charbon, et doivent être interprétées comme un marqueur spécifique du système de réduction.

Les graphes obtenus des rapports NRC constants seront interprétés comme indicateurs de la signature chimique du système de réduction, tandis que les rapports incohérents seront considérés comme révélateurs d'additifs ou de phénomènes de post-réduction.

6. RÉSULTATS DES ANALYSES

6.1. Résultats de la métallographie

Les principaux résultats des observations métallographiques, classés par échantillon, sont regroupés dans le corpus de fiches analytiques présenté en annexe (annexe D). Les travaux de M. Gosselin (2021) et S. Leroy (2010) ont servi de référence pour l'interprétation et la description des observations métallographiques.

6.1.1. Les clous

L'échantillon P.VCh11/5/2/78/7¹⁶ (Annexe D, p.67-70) présente une certaine hétérogénéité, avec alternance de zones ferritiques et de zones aciérées à faible teneur en carbone (estimée entre 0,1 et 0,3% C). Des inclusions apparaissent déformées, allongées, perpendiculaires au plan de martelage et parallèles aux lignes de soudure visibles après attaque au réactif Oberhofer.

L'échantillon P.VCh10/5/2/70/27 (Annexe D, p.80-84) est constitué de deux parties principales, jointes sur toute la longueur de l'objet jusqu'à sa tête. La première partie est composée d'un fer riche en phosphore, comme en témoignent les structures fantômes, visibles après attaque au réactif Oberhofer, au sein d'une matrice majoritairement ferritique. En revanche, la seconde partie ne présente aucune structure fantôme associée au phosphore et se caractérise par une alternance de bandes de fer doux et d'acier, traduisant une microstructure plus hétérogène. Plusieurs lignes de soudure sont visibles tout au long de la pièce. Après attaque au Nital, certaines apparaissent en raison de la présence de corrosion infiltrée dans ces dernières. D'autres, non visibles initialement, sont révélées après attaque au réactif d'Oberhofer, sous forme de lignes blanches typiques. La portion non phosphoreuse présente des indices clairs de soudures internes multiples. Ces deux parties sont interrompues

¹⁶ Les trois clous ont été les premiers objets à être passé au réactif Nital 4% par mes soins et les premiers que j'ai observés ensuite. Cela étant ma première manipulation après la démonstration de M. Disser, elle n'était pas aussi bien réussie que les suivantes. Le réactif a « mordu » la matière un petit peu trop longtemps et le nettoyage de la pièce avant cela n'était pas assez bien réalisé. Cependant, il n'a pas été nécessaire de refaire les manipulations (polissage et attaque) car la microstructure du métal n'était pas endommagée et elle restait lisible. Cela rend la lecture de cette pièce plus difficile (présence de lignes comme des sortes de griffes, zones fort foncées ou tâches circulaires) mais ne rend pas les résultats nuls ou invalides pour autant. Cette erreur de manipulation concerne également les échantillons P.VCh10_5_2_70_27 et P.VCh10_5_2_78_7.

au niveau de la tête, par une troisième zone constituée d'acier carburé et forgée aux deux autres éléments selon un assemblage en « gueule de loup » (ou *split welding*) (Fig.30). L'extrémité supérieure de la pièce présente une déformation par pliage, entraînant deux conséquences notables. D'un part, un écrouissage léger est observable, caractérisé par une déformation des grains de fer. D'autre part, ce pliage a favorisé l'infiltration de corrosion le long des lignes de soudure fragilisées. Sur l'ensemble de l'objet, les inclusions de scories sont relativement peu nombreuses, majoritairement de petite taille, foncées et scorifiées. Elles sont globalement bien réparties, elles apparaissent souvent sous forme allongée et orientées dans le sens du martelage. De manière générale, l'objet présente une dégradation importante par la corrosion, affectant la lecture de certaines zones.

L'échantillon P.VCh10/5/1-2/79/5 (Annexe D, p.85-88) présente une microstructure relativement similaire sur l'ensemble de sa surface, caractérisée par une hétérogénéité formée par une alternance de bandes parallèles de fer doux et de fer faiblement carburé (acier contenant moins de 0,1% de carbone). Ces bandes sont orientées horizontalement dans le sens du plan de frappe. Les inclusions sont peu nombreuses, très fines et foncées, et elles sont alignées selon la même orientation, ce qui traduit une bonne qualité inclusionnaire. L'attaque au réactif Oberhofer relève la présence de structures fantômes du phosphore, présentes en bandes entre les différentes couches de fer.

6.1.2. Les fiches

L'échantillon P.VCh10/5/1-2/84/1 (Annexe D, p.71-75) est majoritairement constitué de ferrite. Quelques zones plus carburées sont observables, mais elles restent localisées : une bande au centre de la pièce, le long des bords supérieur, droit et inférieur, ainsi qu'une zone au centre de la « tête », à proximité d'un éventuel repli. Cette dernière présente une structure d'acier eutectoïde à perlite globulaire. Les autres zones aciérées contiennent une teneur estimée d'environ 0,2-0,3% de carbone. Le long du bord droit, les grains de ferrite ont subi un écrouissage. Les inclusions sont nombreuses et hétérogènes : certaines sont peu déformées et de grande taille, tandis que d'autres sont allongées, linéaires, mais orientées selon des trajectoires courbes, non parallèles au plan de frappe. Elles se présentent sous forme de globules de wüstite, d'inclusions scorifiées et certaines légèrement vitreuses. L'attaque au réactif Oberhofer met en évidence certaines de ces soudures par des lignes blanches caractéristiques, mettant également en avant leur profil atypique, sinueux, non linéaire et complexe.

L'échantillon P.VCh10/5/1-2/84/2 (Annexe D, p.76-79) présente une matrice principalement composée de fer doux, à l'exception de trois zones distinctes : le long des bords supérieur et inférieur, ainsi que dans la partie médiane inférieure de la moitié gauche de l'échantillon, où la microstructure évolue progressivement vers un acier faiblement carburé, atteignant localement environ 0,3% de carbone. Au sein du fer doux, certaines zones présentent des grains ferritiques équiaxes de grande taille, tandis que d'autres montrent des grains plus fins, aux joints de grains plus marqués, suggérant localement une teneur en carbone pouvant atteindre 0,1%. La transition entre ces différentes microstructures est nette, marquée par des lignes de soudures visibles après attaque au Nital et confirmées par l'attaque au réactif Oberhofer. L'échantillon présente une forte densité d'inclusions. Celles-ci majoritairement sombres, parfois anguleuses ou légèrement vitreuses, et certaines contiennent des dendrites de wüstite. . Celles-ci sont allongées et alignées dans le sens du plan de frappe. Une des lignes de soudures semble s'être ouverte, laissant place à une infiltration de la corrosion en profondeur. Des structures fantômes ont été observées après attaque au réactif Oberhofer, visibles à plusieurs endroits de l'échantillon, attestant de la présence de phosphore dans la matrice métallique. Par ailleurs, la tête de la fiche présente une coupe nette, perpendiculaire à son axe longitudinal.

L'échantillon de la fiche P.VCh11/8/1/57/5 (Annexe D, p.89-92) est entièrement constituée d'acier, mais présente des variations de teneur en carbone. La partie centrale est composée d'un acier hypoeutectoïde, encadrée de part et d'autre par des zones d'acier eutectoïde à perlite nodulaire. De fines lignes claires ponctuées d'inclusions semblent délimiter ces différentes zones, ce qui pourrait correspondre à des lignes de soudure. L'attaque au réactif Oberhofer révèle que la partie centrale a été repliée sur elle-même à plusieurs reprises. Les inclusions observées dans cette partie, bien que peu nombreuses, sont relativement grandes et présentent une morphologie allongée et aplatie dans le sens du plan de frappe. Les inclusions sont principalement constituées de wüstite globulaire, parfois anguleuses, de teinte sombre ou à l'aspect vitreux. La propreté inclusionnaire est globalement bonne à très bonne.

6.1.3. Le demi-produit

L'échantillon PDB/VCh/347 (Annexe D, p.103-106), prélevé à l'extrémité distale recourbée de la barre, présente une matrice entièrement ferritique. La microstructure révèle deux zones distinctes, différenciées par leur aspect métallographique ainsi que par leur

propreté inclusionnaire. La partie supérieure de la coupe transversale est constituée de grains équiaxes bien formés, avec une très faible quantité d'inclusions. Cette zone forme une bande homogène et visiblement mieux épurée que le reste de la pièce. En revanche, les parties centrale et inférieure de l'échantillon présentent une plus forte concentration d'inclusions de scorie, principalement sous forme de filaments allongés, parfois de grande taille, et orientés selon l'axe longitudinal du métal. La propreté inclusionnaire reste néanmoins bonne à très bonne, malgré la présence ponctuelle de quelques inclusions plus volumineuses. La majorité des inclusions sont de couleur gris foncé, amorphes et sans morphologie particulière ; certaines présentent des formes légèrement anguleuses, et quelques-unes renferment des dendrites de wüstite. Dans ces zones, les grains de ferrite apparaissent légèrement plus déformés, sans pour autant présenter d'indices d'écrouissage prononcé. Quelques bandes plus claires, où les grains sont peu discernables après attaque au Nital, sont également visibles. L'extrémité repliée de la pièce, caractéristique de cette typologie de barre, est clairement visible après attaque au Nital. Nous pouvons observer que cet élément a particulièrement fragilisé le métal et a favorisé l'infiltration de la corrosion au fil du temps. Une fine bande à microstructure plus carburée est également visible dans cette partie inférieure de l'échantillon, au niveau de la pointe du repli. Quelques surfaces similaires apparaissent dans la partie supérieure, avec une évolution progressive de la ferrite vers une structure légèrement plus carburée. Toutefois, la corrosion avancée sur les bords rend difficile une analyse certaine de ces zones. L'attaque au Oberhofer révèle la présence de structures fantômes caractéristiques de la présence de phosphore, qui sont nettement visibles dans la partie centrale et inférieure (sur le côté gauche de la coupe), mais absentes de la zone supérieure. Une bande sans phosphore traverse également partiellement la pièce.

6.1.4. Produits indéterminés

L'échantillon P.VCh11/9//125/43 (Annexe D, p.93-96) se compose de trois parties distinctes, reconnaissables par leurs microstructures et séparées par des lignes de soudure longitudinales. La première partie, localisée dans la zone supérieure de la pièce, est faite exclusivement de ferrite, avec une microstructure homogène. Quelques inclusions allongées, orientées dans le sens horizontal (plan de frappe), sont observables. La deuxième partie, située au centre de l'échantillon, est également formée de ferrite. Les grains y sont plus irréguliers, parfois légèrement globulaires. Les inclusions, similaires à celles de la partie supérieure, sont également allongées et orientées horizontalement. L'attaque au réactif

Oberhofer révèle la présence de structures fantômes, caractéristiques d'un fer obtenu à partir d'un minerai phosphoreux. La troisième partie, occupant la zone inférieure de l'échantillon, est jointe à la partie centrale par une soudure longitudinale bien visible. Elle présente une plus grande hétérogénéité de la microstructure, alternant entre des bandes de ferrite à grains équiaxes, des bandes de ferrite à grains fins (voire des zones légèrement carburée, à environ 0,1% de carbone), et des bandes de ferrite aux grains plus difficilement visibles. Cette zone est nettement plus riche en inclusions que les deux précédentes. Celles-ci comptent une grande variabilité dans les tailles, parfois réduites à de simples points répartis dans la matière. Certaines bandes de ferrite sont délimitées par des lignes claires identifiées comme des soudures internes, révélées de manière plus nette après attaque au réactif Oberhofer. La bande la plus proche du bord inférieur de la pièce présente également des structures fantômes, indiquant la présence de phosphore. En dehors des soudures internes observées dans la troisième partie (et dans la deuxième partie), deux soudures principales relient les trois grandes sections de l'objet : l'une entre les parties centrale et inférieure, l'autre entre les parties supérieure et centrale. Cette dernière, visible à l'extrémité de la tête, présente une infiltration de corrosion. La propreté inclusionnaire est globalement mauvaise à moyenne. Les inclusions observées sont variées : wüstite globulaire, inclusions sombres contenant des petits points clairs évoquant des microdendrites de wüstite, et des phases vitreuses. Les globules de wüstite sont plus fréquents le long des soudures, tandis que les autres types sont répartis de manière plus diffuse dans la matrice métallique. Leur taille varie de simples points à des formes plus massives.

L'objet P.VCh12/10//142/106 (Annexe D, p.97-102) a fait l'objet de deux échantillonnages, donnant lieu à deux coupes transversales. La première section (Annexe D, p.97-100) présente une alternance de ferrite et d'acier faiblement carburé (environ 0,1% de carbone) sur l'ensemble de la surface, avec une teneur globale faible en carbone. Cette hétérogénéité est typique pour des produits issus d'un procédé de réduction directe. La propreté inclusionnaire est relativement moyenne : de nombreuses inclusions de scorie sont présentes, certaines encore de grande taille et légèrement aplaties, tandis que la majorité apparaît sous une forme allongée, aplatie et orientée dans le sens longitudinal. Elles présentent des morphologies variées : inclusions foncées simples, inclusions foncées renfermant de fines dendrites de wüstite, scories fragmentées, ou encore globules de wüstite. La présence de quelques soudures internes sont visibles. Par ailleurs, des structures fantômes

typiques de la présence de phosphore sont visibles sous forme de bandes horizontales superposées sur toute la surface de l'échantillon.

La deuxième section (Annexe D, p.100-102) présente des éléments sensiblement similaires, ce qui est cohérent puisqu'il s'agit de la continuité de la pièce. Toutefois, certaines lignes (probablement des soudures internes) présentent un profil plus sinueux que sur la première section. L'attaque au réactif Oberhofer montre également la présence généralisée des structures fantômes, témoignant d'une teneur non négligeable de phosphore dans le métal. Les inclusions sont également nombreuses et orientées. L'extrémité de la pièce est fortement affectée par la corrosion, ce qui complique une partie de la lecture métallographique de cet échantillon.

6.2. Résultats des analyses MEB-EDS

Les résultats des teneurs en oxydes pondérés par surface des éléments majeurs des PPM sont présentés en annexe (Annexe B, Tab.5, p.17).

6.2.1. Les clous

L'analyse de l'échantillon P.VCh11/5/2/78/7 met en évidence deux groupes distincts d'inclusions (Fig.31). La classe 1 (en rouge) est localisée exclusivement dans les couches de corrosion en périphérie de l'objet. Selon cette distribution, il est probablement qu'elle corresponde à des produits d'oxydation plutôt qu'à des inclusions d'origine métallurgique. Elle ne sera donc pas prise en compte dans l'interprétation technologique. La classe 2 (en vert), en revanche, est observée au sein de la matrice métallique, sur l'ensemble de la surface. Les rapports des composés non réduits (CNR) (Fig.48) présentent de bonnes corrélations pour les rapports $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ (~0,6) et $\text{K}_2\text{O}/\text{CaO}$ (~0,7). Cette classe est essentiellement composée de SiO_2 (silice) et d' Al_2O_3 (alumine), avec une présence moindre de K_2O et CaO .

Trois groupes d'inclusions ont été identifiés pour l'échantillon P.VCh10/5/2/70/27, avec une répartition spatiale de ces groupes très spécifique (Fig.32). La classe 1 (en vert) et la classe 2 (en bleu) sont présentes sur l'ensemble de l'échantillon, mais bien scindées de part et d'autre de la pièce. La classe 3 (en rouge) n'est présente qu'au niveau de la tête du clou, à l'endroit d'une possible soudure en « gueule de loup ». Cette partie comprend

également des inclusions du groupe 1 et du groupe 2. Les rapports CNR (Fig.49) montrent des corrélations assez faibles pour les rapports $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ (entre $\sim 0,1$ et $0,2$) et des corrélations faibles à très faibles des rapports $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ pour toutes les classes. Le rapport $\text{SiO}_2/\text{P}_2\text{O}_5$ indique des corrélations faibles également. Les rapports $\text{K}_2\text{O}/\text{CaO}$ sont plus élevés pour les classes 1 et 2 ($\sim 0,7$) mais faibles pour classes 3 ($0,03$). Sur le plan chimique, les classes 1 et 2 sont toutes les deux majoritairement composées de silice (SiO_2), avec des proportions moins élevées d'alumine (Al_2O_3) et de phosphore (P_2O_5). La classe 2 contient toutefois moins de SiO_2 et présente également du K_2O , CaO , Cr_2O_3 et du Mn.

Pour l'échantillon P.VCh10/5/1-2/79/5, trois groupes d'inclusions ont été identifiés. Ils sont répartis sur l'ensemble de la pièce sans position préférentielle (Fig. 33). La classe 1 (en vert) est présente en très faible quantité. Les corrélations des rapports CNR (Fig.50) sont faibles pour $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ dans les trois classes ($\sim 0,2-0,3$) et le rapport $\text{SiO}_2/\text{P}_2\text{O}_5$ montre des corrélations très faibles également ($\sim 0,1$). Les rapports $\text{K}_2\text{O}/\text{CaO}$ sont moyens à élevés, avec une valeur $0,5$ pour la classe 2 (en bleu) et de $0,7$ pour les classes 1 et 3 (en rouge). Pour le rapport $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$, les corrélations sont élevées pour les classes 2 ($\sim 0,7$) et 3 ($\sim 0,5$), mais basses pour la classe 1 ($\sim 0,1$). Sur le plan chimique, la classe 1 est composée principalement d'alumine (Al_2O_3) et de phosphore (P_2O_5), avec de faibles proportions de MgO , K_2O et CaO . Les classes 2 et 3 présentent une composition similaire, dominée également par Al_2O_3 et SiO_2 , mais avec une teneur plus importante en CaO , et de faibles quantités de MgO , Cr_2O_3 et du Mn. La différence principale entre ces deux classe réside dans la présence, dans la classe 2, d'une faible proportion de ClO_2 et d'un phosphore peu abondant, tandis que la classe 3 contient davantage de phosphore et ne présente pas de ClO_2 détectable.

6.2.2. Les fiches

L'analyse chimique pour l'échantillon P.VCh10/5/1-2/84/1 met en évidence deux groupes d'inclusions. La cartographie des inclusions (Fig.34 et 35) met en évidence une distribution hétérogène. Les inclusions de la classe 1 (en vert) et de la classe 2 (en rouge) apparaissent regroupées en amas relativement denses dans certaines zones, notamment sur les parties latérales de l'échantillon, tandis que d'autres zones sont nettement plus pauvres en inclusions. Il subsiste toutefois une incertitude quant à la représentativité de la zone analysée car il est possible que les bandes supérieure et inférieure de la pièce n'aient été couvertes par l'analyse ou bien qu'aucune inclusion n'y ait été détectée. Les plus grosses inclusions sont moins fréquentes mais souvent situées dans des zones où les inclusions sont

déjà denses. À l'inverse, la partie centrale est marquée par une plus grande dispersion et une moindre concentration. Cette répartition suggère que les inclusions suivent partiellement la texture interne de la pièce (soudures, replis de matière) mais de manière discontinue. Les rapports normalisés (CNR) montrent des corrélations faibles pour $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ ($\sim 0,1-0,2$) et des corrélations modérées pour $\text{SiO}_2/\text{P}_2\text{O}_5$ ($\sim 0,3$) (Fig.51). Les rapports $\text{K}_2\text{O}/\text{CaO}$ sont plus élevés, atteignant $\sim 0,4$ pour la classe 1 et $\sim 0,6$ pour la classe 2. Le rapport $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ présente en revanche un contraste marqué entre les deux classes : très bas pour la classe 1 ($\sim 0,01$), mais relativement élevé pour la classe 2 ($\sim 0,6$). Sur le plan chimique, les deux classes apparaissent globalement similaires : elles sont caractérisées par des teneurs relativement élevées en silice (SiO_2), moyennes en phosphore (P_2O_5) et Al_2O_3 , ainsi que de faibles proportions de CaO et de K_2O . Il est à noter que les deux groupes d'inclusions distingués chimiquement ne correspondent pas nécessairement à des types morphologiques distincts. En effet, certaines inclusions regroupées dans une même classe (par ex. les vertes) peuvent aussi bien correspondre à des globules de wüstite (oxydes de fer) qu'à des scories silicatées.

Pour l'échantillon P.VCh10/5/1-2/84/2, les groupes d'inclusions identifiés sont au nombre de quatre. Le groupe 1 (en vert) se distingue par une présence diffuse mais sporadique sur l'ensemble de la pièce (Fig.36 et 37). Le groupe 2 (en rouge) est quant à lui presque exclusivement localisé dans la partie inférieure de l'échantillon. À l'inverse, le groupe 4 (en orange) n'est présent que dans la partie supérieure. Le groupe 3 (en bleu) apparaît de manière plus uniforme sur toute la surface de l'échantillon. Cette opposition de distribution entre les groupes 2 et 4, situés de part et d'autre d'une soudure centrale clairement visible, pourrait refléter l'assemblage de deux masses métalliques distinctes. Une bande dépourvue d'inclusions est visible dans la partie supérieure, sans qu'il soit possible de déterminer si cette absence correspond à une limite du champ analysé ou à une réelle pauvreté en inclusions. Globalement, les inclusions présentent une orientation marquée, suivant des lignes parallèles qui correspondent à la déformation plastique de la pièce. Les inclusions de la classe 4 se distinguent par leur grande taille et leur morphologie particulière : elles apparaissent sombres, anguleuses, parfois vitreuses, et comportent localement des dendrites de wüstite. Les rapports CNR indiquent des corrélations faibles pour $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ dans les classes 1, 2 et 3 ($\sim 0,3$), et très faibles pour la classe 4 ($\sim 0,07$) (Fig.52). Les rapports $\text{K}_2\text{O}/\text{CaO}$ sont très faibles pour la classe 3 ($\sim 0,05$), mais relativement élevés pour la classe 4 ($\sim 0,6$) et pour les classes 2 et 3 ($\sim 0,7$). Les rapports $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ apparaissent relativement élevés, ce qui s'explique par la très faible proportion de MgO dans toutes les classes. Enfin,

les rapports $\text{SiO}_2/\text{P}_2\text{O}_5$ varient entre $\sim 0,1$ et $\sim 0,4$ selon les classes. Sur le plan chimique, la classe 1 est caractérisée par une forte proportion de silice (SiO_2). Les classes 3 et 4 sont également riches en silice, mais dans une moindre mesure, et présentent en parallèle des teneurs moyennes en phosphore (P_2O_5). La classe 2 se distingue par une concentration plus marquée en Al_2O_3 . L'ensemble des classes contient par ailleurs des proportions moindres de K_2O et CaO .

Pour l'échantillon P.VCh11/8/1/57/5, trois groupes d'inclusions ont été identifiées. Leur distribution est relativement homogène sur l'ensemble de la pièce (Fig.38-39). L'observation métallographique après attaque au Nital révèle cependant une présence plus marquée des inclusions de la classe 1 le long des lignes de soudure séparant les zones fortement carburées des zones plus faiblement carburées. Ces inclusions apparaissent également dans les zones corrodées. Les inclusions des classes 2 et 3, quant à elles, se présentent de manière plus diffuse et régulière, sans lien direct avec les lignes de soudure. Sur le plan morphologique, la classe 1 correspond essentiellement à des globules de wüstite, interprétables comme des oxydes de fer. Les classes 2 et 3 regroupent des inclusions sombres, vitreuses et plus hétérogènes. La composition chimique des trois classes montre des tendances globalement comparables : toutes présentent des teneurs significatives Al_2O_3 et en SiO_2 , ainsi que des proportions notables en chaux (CaO) et potasse (K_2O). Les corrélations obtenues par l'analyse des rapports CNR (Fig.53) indiquent des résultats contrastés. Les rapports $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ montrent des corrélations modérées à élevées ($R^2 \approx 0,3-0,67$ selon les classes). Les rapports $\text{K}_2\text{O}/\text{CaO}$ révèlent des corrélations plus fortes, particulièrement pour les classes 1 et 2 ($R^2 \approx 0,7$), mais plus faibles pour la classe 3 ($R^2 \approx 0,45$). Les rapports $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ sont globalement faibles ($R^2 \approx 0,23-0,26$). Enfin, les rapports $\text{SiO}_2/\text{P}_2\text{O}_5$ sont hétérogènes, avec des corrélations allant de très faibles ($R^2 \approx 0,08$ pour la classe 3) à modérées ($R^2 \approx 0,54-0,68$ pour les classes 1 et 2).

6.2.3. *Le demi-produit*

L'échantillon PDB/VCh/347 comporte deux classes d'inclusions (classe 1 et classe 2), réparties de manière relativement homogène et en proportions équivalentes. Leur distribution se concentre principalement dans la partie centrale de la pièce. Après géoréférencement sur les micrographies issues des attaques au Nital et à l'Oberhoffer (Fig.42 et 43), il apparaît que ces inclusions sont localisées uniquement dans une des deux parties constitutives de l'objet : celle composée de grains de ferrite équiaxes, située dans la zone

supérieure et se prolongeant dans la partie inférieure du repli. Les inclusions suivent globalement des alignements parallèles. Les inclusions dendritiques de wüstite semblent plutôt se rattacher à la classe bleue (classe 2). La composition chimique des deux classes est dominée par Al_2O_3 et SiO_2 , avec des proportions notables de P_2O_5 et de CaO . Des teneurs plus modestes en K_2O et MgO sont présentes, tandis que les autres oxydes ne sont détectés qu'à l'état de traces. Les similitudes de composition entre les deux classes appuient l'idée d'une origine commune. Les rapports de corrélation CNR (Fig. 55) mettent en évidence : une corrélation modérée à forte pour les rapports $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ ($R^2 = 0,4-0,6$), une corrélation forte entre K_2O et CaO ($R^2 \approx 0,71-0,81$), une corrélation faible entre MgO et Al_2O_3 ($R^2 \approx 0,2-0,2$), une corrélation faible à modérée entre SiO_2 et P_2O_5 ($R^2 \approx 0,2-0,3$).

6.2.4. Produits indéterminés

Quatre groupes d'inclusions ont été identifiés sur l'échantillon P.VCh11/9//125/43. Leur répartition n'est pas homogène : chaque groupe présente des zones de concentration privilégiées (Fig.40 et 41). La classe 1 (en vert) comprend des inclusions abondantes et largement réparties sur la pièce, mais elles montrent une tendance à se concentrer dans la partie inférieure. Elles apparaissent de tailles variables, parfois regroupées en alignements. Les inclusions de la classe 4 (en orange) se concentrent surtout dans la partie médiane, formant des alignements nets. Elles sont de taille moyenne à grande et suivent localement certaines lignes internes de soudure. Les inclusions de la classe 3 (en bleu) sont moins nombreuses mais réparties sur toute la surface. Elles sont de grande taille, souvent anguleuses, et apparaissent en faible densité. Pour la classe 2 (en rouge), les inclusions se distinguent par leur forte concentration dans la zone inférieure, avec des tailles généralement petites à moyennes. Elles suivent un réseau organisé en bandes parallèles, cohérent avec des flux de déformation. Une bande pauvre en inclusions est observée dans la partie supérieure de l'échantillon, qui pourrait correspondre soit à une zone métallique plus homogène, soit à une limite de détection de l'analyse. Sur le plan chimique, les inclusions des différentes classes présentent des compositions dominées par Al_2O_3 et SiO_2 avec des teneurs non négligeables en phosphore (classe 1 et 3). Les rapports de corrélation (Fig.54) mettent en évidence une corrélation modérée entre Al_2O_3 et SiO_2 (R^2 compris entre $\sim 0,2$ et $0,3$ selon les classes). La relation entre la K_2O et la CaO est plus faible ($R^2 \leq 0,3$), tandis que celle entre MgO et Al_2O_3 apparaît globalement forte (R^2 atteignant $0,7$ pour certaines classes) mais

demeure contrastée en raison de valeurs proches de zéro pour d'autres. Enfin, la corrélation entre la SiO_2 et le P_2O_5 reste faible ($R^2 \leq 0,3$).

L'analyse a révélé quatre groupes d'inclusions pour les deux parties de l'échantillon P.VCh12/10//142/106 (Fig. 44 à 47). La classe 1 (en bleu) regroupe des inclusions de taille variable, réparties sur l'ensemble de la pièce. Leur densité est légèrement plus marquée dans certaines zones où elles suivent les lignes internes de soudure. C'est la classe la moins représentée. La classe 2 (en vert) présente des inclusions de taille petite à moyenne, distribuées de façon assez régulière mais de manière préférentielle dans la partie médiane. Elles apparaissent localement en alignements discontinus. Les inclusions de la classe 3¹⁷ (en rouge) sont abondantes et se situent aussi dans la partie médiane de la pièce, proche des inclusions du deuxième groupe. Elles sont de taille moyenne à grande et parfois regroupées en plages localisées. Enfin, la classe 4¹⁸ (en orange) est représentée par des inclusions plus éparses, localisées essentiellement en périphérie externe de la pièce. Dans l'ensemble, les inclusions des classes 1 et 5 se retrouvent préférentiellement dans les mêmes zones, tandis que celles des classes 2 et 4 se concentrent dans d'autres parties. Cette distribution se vérifie sur les deux sections analysées. Il n'y a pas de corrélation spécifique entre l'aspect de certaines inclusions et les groupes d'inclusions. Les rapports des composés non réduits (CNR) (Fig.56) présentent de faibles corrélations pour les rapports $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ (entre $\sim 0,1$ et $\sim 0,3$). En revanche, les rapports $\text{K}_2\text{O}/\text{CaO}$ sont élevés pour les quatre classes d'inclusions (entre $\sim 0,6$ et $\sim 0,7$). Les rapports $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ sont faibles pour les classes 1, 2 et 4 (R^2 compris entre $\sim 0,1$ et $\sim 0,3$), mais plus élevé pour la classe 3 ($R^2 \approx 0,6$). Les rapports $\text{P}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ montrent des corrélations moyennes (entre $\sim 0,39$ et $\sim 0,5$). Sur le plan chimique, les inclusions se répartissent en deux grands ensembles. Les classes 2 et 4 sont dominées par la silice et le phosphore, associées à des teneurs notables en chrome et manganèse, traduisant des compositions silico-phosphatiques enrichies en oxydes de transition. À l'inverse, les classes 1 et 5 présentent des teneurs plus élevées en alumine et surtout en fer, la classe 1 se distinguant par une proportion exceptionnellement élevée en Fe_2O_3 .

¹⁷ Notée classe 4 en figure.

¹⁸ Notée classe 5 en figure.

7. INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS ET DISCUSSION

7.1. Interprétation des observations métallographiques

7.1.1. *Les clous*

7.1.1.1. L'échantillon P.VCh11/5/2/78/7

Le type de microstructure de cet échantillon est cohérent avec un mode de réduction directe. L'orientation des inclusions et leur alignement avec les lignes de soudure suggèrent que la pièce a subi plusieurs replis successifs de matière. L'absence de discontinuités franches conduit à l'hypothèse de la déformation d'une masse unique, repliée de manière répétée, peut-être dans l'objectif d'une homogénéisation générale de la pièce, conduisant à la formation de soudures internes parallèles.

7.1.1.2. L'échantillon P.VCh10/5/2/70/27

Les différences microstructurales et chimiques (présence et absence de phosphore) entre les deux parties principales de cette pièce suggèrent qu'il s'agit de pièces métalliques distinctes, élaborées et travaillées séparément par replis successifs, puis soudées ensemble. La présence de lignes de soudure continues et la localisation des soudures internes dans la portion non phosphoreuse appuient également cette hypothèse. La troisième partie, en acier carburé et montée en « gueule de loup », témoigne d'un assemblage plus soigné, peut-être destiné à conférer des propriétés mécaniques ou fonctionnelles spécifiques à la tête de l'objet. La déformation observée à la moitié de la longueur semble résulter d'un pliage à froid comme l'indique l'écroutissage des grains de ferrite. Si un tel pliage avait pu se produire lors de la pose, sous l'effet de coups puissants portés au marteau sur le clou, il paraîtrait néanmoins plus probable qu'il soit dû à des contraintes mécaniques postérieures, lié au poids des matériaux du rempart ou aux forces exercées lors de sa mise en place ou de sa destruction. Ce type de contrainte appliquée à froid expliquerait à la fois l'écroutissage et la fragilisation locale des lignes de soudure, qui ont facilité l'infiltration de la corrosion.

7.1.1.3. L'échantillon P.VCh10/5/1-2/79/5

L'orientation parallèle des bandes hétérogènes de teneur en carbone différentes et des inclusions témoigne d'un martelage répété. L'alternance de couches de composition

différente, associée à la présence de structures fantômes disposées entre elles, suggère un corroyage avec des replis successifs de la matière.

7.1.1.4. Conclusion

Ces trois clous présentent des caractéristiques communes. Les inclusions étirées, alignées et parallèles indiquent une déformation liée au travail de martelage répété et sur un même plan. Leur microstructure est hétérogène, avec une alternance de ferrite et d'acier faiblement carburé (teneur en carbone comprise entre moins de 0,1% et 0,3%), disposée en bandes parallèles. Cette structure s'accompagne de soudures internes, qui sont des indices de replis successifs de la matière sur elle-même, probablement dans un but d'homogénéisation et de renforcement mécanique. Deux des trois échantillons présentent également des parties réalisées en fer phosphoreux. L'absence de structures fantômes caractéristiques du phosphore ne permet pas d'exclure la présence de cet élément dans le métal, car celles-ci dépendent en partie des conditions de fabrication du métal et des traitements appliqués, mais leur présence constitue un indice fiable de l'usage d'un fer contenant une teneur significative en phosphore.

7.1.2. *Les fiches*

7.1.2.1. L'échantillon P.VCh10/5/1-2/84/1

L'écrouissage observé sur le bord droit indique une déformation mécanique réalisée à basse température. Les alignements courbes des inclusions sont très probablement des lignes de soudure internes, possiblement créés lors de replis successifs de la matière. Les inclusions de grande taille observées à proximité de ces soudures pourraient correspondre à des zones d'oxydations résiduelles, résultant de soudures incomplètes. Le profil sinueux et non linéaire de certaines soudures suggère un assemblage complexe, différent des alignements rectilignes attendus pour des replis simples.

7.1.2.2. L'échantillon P.VCh10/5/1-2/84/2

L'alignement des inclusions dans le sens du plan de frappe indique un travail de martelage répété, associé à de possibles replis successifs de la matière. L'abondance et la morphologie des inclusions suggèrent une épuration incomplète du métal, caractéristique de procédé de réduction ou d'un forgeage peu poussé ou mal maîtrisé. La présence de lignes de soudure franches, associée à des microstructures contrastées, suggèrent l'hypothèse d'un

assemblage de masses métalliques de compositions différentes. Les structures fantômes témoignent de l'utilisation d'un minerai phosphoreux pour au moins une partie de la pièce. La coupe nette à la tête de la fiche évoque une découpe volontaire, probablement réalisée à l'aide d'un outil tranchant.

7.1.2.3. L'échantillon de la fiche P.VCh11/8/1/57/5

Les variations de teneur en carbone et la disposition des microstructures suggère un assemblage de masses d'aciers de compositions différentes. La morphologie des inclusions et les indices de replis successifs indiquent un travail de martelage et de corroyage répété sur la partie centrale de l'objet, probablement réalisé avant l'assemblage final des différentes parties. L'ensemble témoigne d'un assemblage par soudure fer-acier techniquement complexe, ici remarquablement bien exécuté. L'éventualité que les parties les plus aciérées aient subi un traitement thermo-chimique de type cémentation afin d'optimiser leurs caractéristiques n'est pas à exclure.

7.1.2.4. Conclusion

Les fiches présentées ici comportent à la fois des similarités et à des différences. Parmi les éléments communs, tous les échantillons présentent des inclusions étirées et alignées, qui indiquent un martelage plus ou moins intensif à un certain stade de la fabrication. Des replis successifs de la matière sur elle-même sont également observés, ainsi que des soudures, témoins d'un assemblage à chaud de différentes parties. Toutefois, la nature des masses métalliques assemblées et la localisation des soudures diffèrent selon les objets. Un autre point commun est la présence de nombreuses inclusions, sauf pour l'échantillon aciéré. Trois des quatre pièces sont majoritairement constituées de fer doux, à très faible teneur en carbone (maximum 0,3% C), tandis qu'une pièce se distingue par une microstructure entièrement aciérée. Deux échantillons présentent de zones de fer phosphoreux. L'échantillon P.VCh10/5/1-2/84/1 se distingue par son profil particulier : un martelage non perpendiculaire à l'axe longitudinal, des soudures atypiques, ainsi qu'un repli visible au niveau de la tête. L'échantillon P.VCh10/5/1-2/84/2 se distingue par un assemblage de plusieurs parties peu aciérées, un martelage perpendiculaire à l'axe longitudinal et la présence de phosphore. Mais la fiche P.VCh11/8/1/57/5 est celle qui constitue le cas le plus singulier : elle se distingue par une microstructure complètement différente et une propreté d'exécution technique beaucoup plus poussée.

7.1.3. *Le demi-produit*

7.1.3.1. L'échantillon PDB/VCh/347

La propreté inclusionnaire et l'homogénéité de la partie supérieure suggèrent un métal mieux épuré, éventuellement issu d'un traitement particulièrement poussé en forge ou d'une réduction directe de meilleure qualité. L'orientation et la disposition en bandes des inclusions dans les parties centrale et inférieure évoquent des replis successifs, très probablement antérieurs à l'assemblage final. L'infiltration de corrosion au niveau du repli, qui suit la limite entre les deux zones, suggère une soudure incomplète ou peu poussée. La cohésion des parties métalliques y est clairement insuffisante, comme en témoigne la discontinuité visible entre les deux masses. Ces observations suggèrent donc la présence de deux parties métallurgiquement distinctes dans l'échantillon, bien qu'aucune soudure claire ne soit visible. Les différences de composition chimique mises en évidence par l'Oberhofer (présence et absence de phosphore) appuient l'idée que les deux zones correspondraient à des masses de fer distinctes, soudées ensemble.

7.1.4. *Produits indéterminés*

7.1.4.1. L'objet P.VCh12/10//142/106

La morphologie orientée des inclusions et la présence de quelques soudures internes suggèrent que la pièce a subi de multiples replis successifs ainsi qu'un martelage modéré à fort, contribuant à l'homogénéisation de la pièce. Les bandes phosphoreuses renforcent l'hypothèse d'un corroyage à partir d'un métal phosphoreux. La variation de profil des soudures internes entre les deux sections pourrait refléter des différences locales dans le travail de forge.

7.1.4.2. L'échantillon P.VCh11/9//125/43

La déformation des inclusions indique un martelage modéré. L'infiltration de corrosion au niveau de la soudure entre les parties supérieure et centrale traduit une fermeture moins bien consolidée ou fragilisée après la fabrication. Les observations tendent vers l'idée que les parties une et deux aient été assemblées en premier, avant d'être soudée à la troisième partie. Le martelage, attesté par l'orientation générale des inclusions, pourrait avoir été effectué en partie avant l'assemblage, mais pourrait aussi s'être poursuivi après la soudure

finale, contribuant à homogénéiser la répartition des inclusions. L'ensemble de la pièce témoigne d'un assemblage complexe.

7.2. Interprétation des analytiques chimiques

Il est utile de rappeler que l'ensemble de la charge introduite dans le bas fourneau se retrouve, sous une forme ou une autre, dans les produits et déchets issus de la réduction (Leroy, 2010) (*supra* section 5.2.1.3.). Cette charge ne se limite pas au minerai de fer : elle comprend également le charbon de bois, les parois du four, divers ajouts volontaires, ainsi que des combinaisons de minerais. Le charbon de bois, utilisé en proportions très élevées (jusqu'à deux fois la masse de minerai par opération), génère des cendres qui entrent en contact direct avec le minerai et les scories. Ces cendres apportent principalement du calcium et du potassium, mais également du phosphore, de la silice et divers éléments traces (Leroy, 2010). Les parois du fourneau, constituées de matériaux argilo-sableux, peuvent aussi contaminer la charge en fournissant de la silice, de l'aluminium et d'autres éléments mineurs. Des fondants peuvent également être ajoutés pour améliorer la fluidification des scories et en facilitant leur évacuation (Leroy, 2010). Enfin, le recours à différents minerais ou leur mélange entraîne la production d'une signature chimique composite, qui se reflète dans les inclusions et complique l'identification d'une origine unique.

7.2.1. Clous

7.2.1.1. L'échantillon P.VCh11/5/2/78/7

Deux catégories d'inclusions ont été distinguées. La classe 1 est limitée aux couches de corrosion périphériques, correspond à des produits d'oxydation et ne présente pas d'intérêt pour l'étude technologique. La classe 2, observée dans la matrice métallique, sur l'ensemble de la section, regroupe un ensemble chimiquement homogène d'inclusions silico-alumineuses enrichies en FeO, avec des teneurs moindres en K₂O et CaO. Ces inclusions correspondent vraisemblablement à des résidus de scorie issus du processus de réduction directe. Leur morphologie allongée et leur orientation parallèles aux lignes de soudure reflètent plusieurs replis successifs lors du forgeage. Combinée aux observations métallographiques, cette distribution suggère que les soudures internes résultent uniquement

de ces replis et non de l'assemblage de masses distinctes. L'objet semble donc provenir d'une seule masse initiale, travaillée et homogénéisée par martelage répété.

7.2.1.2. L'échantillon P.VCh10/5/2/70/27

La répartition spatiale des inclusions met en évidence une polarisation nette entre les classes 1 et 2, chacune étant associée à l'une des deux barres constitutives de la pièce. Cette distinction traduit des signatures d'inclusions propres à chaque masse métallique, confirmant que les deux parties principales de l'objet ont été élaborées séparément avant leur assemblage. Les rapports de composés non réduits (CNR) révèlent des valeurs relativement élevées pour K_2O/CaO ($\sim 0,7$) dans les classes 1 et 2, indiquant, malgré une certaine variabilité des rapports Al_2O_3/SiO_2 et MgO/Al_2O_3 . Cette homogénéité suggère que chacune des masses provient d'un même système de réduction ou de charges proches. La classe 2 se distingue toutefois par une proportion plus marquée de K_2O et CaO , probablement due à un apport de cendre, de fondant ou de matériaux argileux. La classe 3, localisée uniquement au niveau de la tête, dans la zone soudée en « gueule de loup », présente en revanche une cohérence chimique très faible (rapport K_2O/CaO quasi nul). Elle correspond vraisemblablement à des inclusions exogènes, introduites au cours de l'opération de soudure, soit par l'apport de flux local, soit par une pollution liée à l'assemblage, voire par l'utilisation d'un métal distinct pour la tête. L'analyse métallographique et inclusionnaire conduit à interpréter l'objet comme une pièce composite faite de trois éléments distincts : une masse riche en phosphore, une masse non phosphoreuse et une tête en acier façonnée par assemblage en « gueule de loup ». Les inclusions des classes 1 et 2 traduisent des scories de réduction et de forge caractéristiques de chacune des deux masses, tandis que celles de la classe 3 se rapportent spécifiquement à l'opération de soudure de la tête.

7.2.1.3. L'échantillon P.VCh10/5/1-2/79/5

Trois classes d'inclusions ont été identifiées, sans distribution préférentielle dans la pièce. Les inclusions du 79/5 se regroupent en trois classes proches, dominées par l'alumine et la silice, avec des variations en CaO et P_2O_5 . Les classes 2 et 3 partagent une composition très similaire, traduisant probablement un même système de réduction, tandis que la classe 1, plus riche P_2O_5 , pourrait en représenter une variante. Les observations métallographiques (bandes parallèles, structures fantômes) indiquent un corroyage par replis successifs, sans assemblage externe. La pièce proviendrait donc d'une seule masse de fer initiale, homogénéisée à la forge.

7.2.2. *Fiches*

7.2.2.1. L'échantillon P.VCh10/5/1-2/84/1

Deux groupes d'inclusions ont été identifiés. Sur le plan chimique, les deux classes présentent une composition globalement proche (dominée par SiO_2 , avec des teneurs intermédiaires en P_2O_5 et Al_2O_3 , et de faibles proportions de CaO et K_2O). Elles se différencient toutefois par le rapport $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$: très bas dans la classe 1 ($\sim 0,01$), mais élevé dans la classe 2 ($\sim 0,6$). Ce contraste, associé aux valeurs de $\text{K}_2\text{O}/\text{CaO}$ plus élevées ($\sim 0,4-0,6$), suggère que si les deux classes dérivent d'un même système de réduction, la classe 2 a enregistré des apports liés à la post-réduction plus marqués. Morphologiquement, les classes ne se distinguent pas de manière nette : chacune regroupe à la fois des globules de wüstite et des inclusions scorifiées ou vitreuses. Cette absence de correspondance stricte renforce l'hypothèse que l'ensemble provient majoritairement du système de réduction, enrichi ponctuellement par des apports liés au travail de forge. En conclusion, la classe 1 semble correspondre à des inclusions de réduction, tandis que la classe 2, avec sa localisation près des soudures sinueuses, fait plutôt penser à des apports post-réduction, intégrés au moment de la forge/soudure.

7.2.2.2. L'échantillon P.VCh10/5/1-2/84/2

La distribution des inclusions en quatre classes montre une organisation qui recoupe directement la structuration interne de la pièce. La classe 1, à dominante siliceuse, est diffuse mais sporadique sur l'ensemble de la surface. Elle correspond vraisemblablement à des scories de réduction résiduelles, homogénéisées par la déformation. La classe 2, enrichie en Al_2O_3 , est localisée dans la partie inférieure de l'échantillon. Elle témoignerait plutôt d'une signature propre à une masse métallique distincte. La classe 4, limitée à la partie supérieure, se distingue par ses inclusions anguleuses, vitreuses et de grande taille, contenant des dendrites de wüstite. Leur chimie et leur morphologie atypique suggèrent un apport exogène : soit des inclusions de forge issues d'une soudure imparfaite, soit des résidus liés à une phase de corroyage ou à la pollution d'assemblage. La classe 3, distribuée de manière plus uniforme, présente une composition compatible avec des inclusions de réduction réparties sur toute la masse. La séparation nette des classes 2 et 4 de part et d'autre d'une soudure centrale appuie l'hypothèse d'un assemblage de deux masses métalliques distinctes, chacune portant sa signature inclusionnaire spécifique.

7.2.2.3. L'échantillon P.VCh11/8/1/57/5

Trois groupes d'inclusions ont été identifiés dans l'échantillon. Les inclusions des classes 2 et 3 paraissent correspondre à des scories de réduction piégées puis redistribuées lors du forgeage. La classe 1, en revanche, suit plus spécifiquement l'empreinte des zones de soudure, où les globules de wüstite se sont accumulés. Elles apparaissent plutôt comme oxydes de fer secondaires, produits lors des opérations de forgeage et surtout des soudures à chaud. Elles peuvent donc être rattachées à des inclusions de forge ou de soudure, et non à des scories piégées initialement.

7.2.3. *Le demi-produit*

7.2.3.1. L'échantillon PDB/VCh/347

Les deux classes d'inclusions identifiées dans l'échantillon présentent des compositions chimiques similaires, dominées par la silice (SiO_2) et l'alumine (Al_2O_3), avec des proportions notables de phosphore (P_2O_5) et en (CaO), ainsi que de faibles teneurs en K_2O et MgO . Les corrélations chimiques entre les principaux oxydes indiquent une cohérence interne modérée à forte, suggérant que ces inclusions dérivent de scories de réduction plutôt homogènes. Leur répartition en bandes parallèles et leur morphologie dendritique (wüstite) traduisent un piégeage au cours du forgeage et des replis successifs de la matière. Toutefois, la présence ou l'absence de phosphore dans la matrice métallique témoigne d'origines distinctes pour ces deux zones, probablement issues de minerais de nature différente. L'échantillon PDB/VCh/347 correspondrait donc à un assemblage de deux barres de fer distinctes. Les inclusions de scorie (classes 1 et 2) traduisent un même type de scorie de réduction, mais les différences microstructurales et surtout la présence/absence de phosphore indiquent clairement deux chaînes de réduction indépendantes. Le repli observé à l'extrémité de la pièce a fragilisé la soudure entre ces deux masses, ce qui explique la discontinuité locale et l'infiltration de corrosion.

7.2.4. *Produits indéterminés*

7.2.4.1. L'échantillon P.VCh11/9//125/43

Quatre classes d'inclusions ont été distinguées. Les inclusions de la classe 1, largement réparties mais concentrées surtout dans la partie inférieure, sont dominées par des phases alumino-silicatées associées à du phosphore. Elles pourraient donc correspondre à des

scories de réduction issues d'un minerai phosphoreux. La classe 2, également concentrée dans la partie inférieure et organisée en bandes parallèles, correspond à des inclusions plus petites mais chimiquement très caractéristiques : leur forte teneur en phosphore, associée à des proportions élevées de silice et de fer, traduit des scories de réduction ferro-phosphatées directement héritées du minerai. Les inclusions de la classe 3, moins nombreuses mais souvent massives et anguleuses, présentent une composition ferro-phosphatée comparable. Enfin, la classe 4 se concentre dans la partie médiane, le long des soudures internes, et regroupe des inclusions de taille moyenne à grande, à morphologie alignée. Leur localisation et leur chimie indiquent un apport exogène lié aux opérations de forge, soit à cause de la soudure, soit d'ajouts. La classe 4 est quand même phosphatée, mais elle montre une signature silico-alumineuse renforcée suggérant l'apport de matériaux argileux aux zones de soudures. En conclusion, l'échantillon correspond à un assemblage composite de trois parties métalliques soudées entre elles. Les classes 1, 2 et 3 renvoient à des scories de réduction issues d'un minerai phosphoreux, redistribuées et partiellement déformées par le forgeage, tandis que la classe 4 semble plutôt provenir des étapes de post-réduction.

7.2.4.2. L'échantillon P.VCh12/10//142/106

Quatre classes d'inclusions ont été distinguées. Deux sont dominées par la silice et le phosphore, avec des teneurs notables en Cr et Mn, des rapports K_2O/CaO élevés ($\sim 0,6-0,7$) et des corrélations Al_2O_3/SiO_2 faibles. La classe 1, la moins représentée, réunit des inclusions à forte proportion de fer qui se rencontrent surtout le long des soudures. La classe 3, plus abondante au centre, présente une meilleure cohérence du rapport MgO/Al_2O_3 ($R^2 \approx 0,6$). Ces signatures, ainsi que leur association spatiale aux lignes de soudures internes, suggèrent une origine due aux processus de forge/soudure avec potentiels ajouts, tandis que les classes 2 et 4 correspondent plutôt à des scories de réduction issues d'un minerai phosphoreux, étirées lors du corroyage.

7.2.5. *Analyse comparative des inclusions par rapports CNR*

Le premier graphique montrant les comparaisons des rapports CNR ($w\%Al_2O_3/w\%SiO_2 / w\%K_2O/w\%CaO$) entre PPM (Fig.57a) montre un groupement principal rassemblant les classes 1, 2 et 3 de l'échantillon 125/43, les classes 1 et 3 de l'échantillon 84-2, la classe 1 de l'échantillon 84-1 ainsi que la classe 2 de l'échantillon 142-106. Ce groupement suggère une origine commune de ces lots, traduite par des rapports

chimiques similaires dans les inclusions et donc par des systèmes de réduction probablement proches. Un second regroupement peut être identifié entre la classe 5 de l'échantillon 142-106, les classes 1, 2 et 3 de l'échantillon 79-5, les classes 2 et 3 de l'échantillon 57-5 ainsi que la classe 2 de l'échantillon 84-2. Les inclusions de la barre à douille ne s'intègrent pas clairement à ces groupements : si la classe 2 se rapproche du second groupe, la classe 1 en est nettement distincte.

Le deuxième graphique (Fig.57b), montrant les rapports $w\%Al_2O_3/w\%SiO_2 / w\%MgO/w\% Al_2O_3$, met également en évidence deux grands ensembles. Le premier regroupe les classes 1, 2 et 3 de l'échantillon 125/43, les classes 1 et 3 de l'échantillon 84-2, la classe 1 de l'échantillon 84-1, la classe 1 de l'échantillon 70-27 et la classe 2 de l'échantillon 78-7. Le second regroupe les classes 1 et 3 de l'échantillon 79-5, les classes 2 et 3 de l'échantillon 57-5, la classe 2 de l'échantillon 70-27 ainsi que la classe 5 de l'échantillon 142-106. Les observations relatives à la barre à douille rejoignent celles faites pour le premier graphique : ses classes ne s'intègrent pas de manière nette aux groupements identifiés.

En conclusion, ces regroupements suggèrent que plusieurs échantillons partagent une origine commune et relèvent de systèmes de réduction proches, tandis que d'autres, comme la barre à douille, apparaissent plus marginaux et témoignent de procédés distincts ou d'apports de matières premières différentes. Les rapports ne semblent pas indiquer d'origine commune entre la barre à douille et le reste du corpus.

7.3. Discussion

Les analyses réalisées dans le cadre de ce mémoire avaient pour objectif de caractériser techniquement les objets du corpus, afin d'identifier d'éventuels liens technologiques entre eux et de rechercher des indices d'une chaîne opératoire commune (conditions de réduction communes, traitements post-réduction, qualité du métal, utilisation des minerais, etc.). Ces observations visaient également à explorer la possibilité d'une activité de post-réduction localisée sur le site ou dans ses environs.

Les résultats obtenus mettent en évidence plusieurs traits marquants. D'une part, certains échantillons présentent des profils métallographiques complexes, avec par exemple

une soudure fer/acier de grande qualité ou des assemblages de plusieurs masses distinctes. Les teneurs en carbone sont généralement faibles à moyennes. Hormis un échantillon aciéré, l'acier fortement carburé n'apparaît que ponctuellement, sur de petites zones, et reste largement minoritaire face au fer doux et à l'acier faiblement carburé. La plupart des pièces comportent des soudures entre masses distinctes, témoignant d'un recours plus fréquent à l'assemblage plutôt qu'à l'étirement d'une masse unique, ce dernier cas étant plutôt retrouvé dans les clous. Toutes les fiches, en revanche, résultent de soudures de plusieurs masses, exécutées avec une qualité variable. Dans l'ensemble, le corpus reflète un travail poussé de forge : replis successifs, corroyages, inclusions fortement martelées, propreté inclusionnaire allant de moyenne à bonne. Aucun traitement thermique ou thermochimique n'a été détecté, à l'exception possible de l'échantillon aciéré P.VCh11/8/1/57/5. Toutefois, compte tenu du travail intensif de corroyage et de replis observé sur de nombreuses pièces, l'hypothèse d'un recours ponctuel à la chauffe afin de limiter l'écrouissage des grains ne peut être totalement écartée. Enfin, les analyses chimiques révèlent une certaine hétérogénéité, avec des groupes d'inclusions parfois bien différenciés, parfois totalement mélangés, traduisant des origines ou des histoires métallurgiques variées.

Ces observations peuvent à présent être confrontées aux données issues de la littérature, afin d'évaluer dans quelle mesure le corpus étudié s'inscrit dans des contextes ou des tendances déjà documentées pour des objets similaires. Les études métallographiques menées sur des pièces de quincaillerie ou sur des demi-produits comparables, qu'elles proviennent de contextes de production, de dépôts ou de contextes d'habitat ou défensifs offrent en effet un cadre pertinent pour interpréter les choix techniques, les procédés de forge et la qualité métallurgique observés sur les échantillons de Pont-de-Bonne.

Pour les fiches, la littérature scientifique disponible sur ce type d'objets demeure extrêmement limitée, en particulier pour la Belgique. A ce jour, une seule étude métallographique a été menée sur ce type de matériel pour l'âge du Fer dans le pays. Elle porte sur deux fiches, l'une issue de la fortification en éperon barré du site d'Olloy-sur-Viroin et l'autre provenant du site de Pont-de-Bonne (Modave), toutes deux analysées par A. Fontana en 1981. Les résultats de cette étude indiquent que, pour l'exemplaire de Modave, la microstructure est constituée presque exclusivement de ferrite, avec une faible précipitation de perlite aux joints de grains. La teneur en carbone est inférieure à 0,02%, à l'exception de quelques zones localement plus riches en perlite, atteignant 0,2% de carbone. L'exemplaire d'Olloy-sur-Viroin présente quant à lui une microstructure plus hétérogène,

avec de zones de ferrite en périphérie et des zones plus riches en perlite au cœur de la pièce. Les teneurs en carbone sont également faibles, entre 0,02% et 0,15%. Selon Fontana, cette hétérogénéité résulte très probablement du procédé de fabrication par réduction directe, caractéristique de la période. L'échantillon d'Olloy présente également une large cavité en forme de V traversant la section de la pièce, que l'auteur interprète comme un défaut dû au mode d'élaboration des objets en fer de cette époque (Fig.58). Aucun indice ne permet de supposer que ces fiches aient subi un ou des traitements ultérieurs particuliers (Fontana, 1981).

Dans l'ensemble, les observations rapportées par Fontana correspondent à celles obtenues pour le corpus étudié dans ce travail (matrice essentiellement ferritique, présence de porosités et occurrence de certains défauts dû à la réduction directe), à l'exception de la cavité en V observée sur l'échantillon d'Olloy, absente ici. Il est toutefois possible que les coupes métallographiques de Fontana aient été réalisées perpendiculairement et non longitudinalement, ce qui pourrait influencer la lecture microstructurale. En revanche, Fontana ne mentionne aucune soudure, ni assemblage de loupes multiples, ni replis successifs, ce qui empêche toute comparaison sur ces points. De même, l'absence de données chimiques inclusionnaires dans son étude ne permet pas de mettre en parallèle la composition des échantillons. Seul l'échantillon P.VCh11/8/1/57/5 se distingue nettement à la fois des caractéristiques observées dans le présent travail et celles décrites par Fontana.

La barre à douille de Pont-de-Bonne correspond à la variante BAD2 définie par Berranger à partir de quatre exemplaires étudiés par métallographie (Berranger, 2014). Selon l'auteure, ce type de demi-produit présente une qualité d'épuration bonne à excellente, avec une faible proportion d'inclusions, souvent fortement écrasées. Ils peuvent être obtenus soit par la déformation d'une masse de métal unique, soit par l'assemblage de plusieurs feuilles de métal repliées ou non sur elles-mêmes. Leur microstructure est généralement hétérogène, majoritairement ferritique (un seul exemplaire sur quatre étant constitué principalement d'acier), et ne montre pas de traces de cémentation. Ces produits résultent de techniques de fabrication similaires et d'un travail de forge d'épuration abouti. L'exemplaire étudié dans ce travail présente une propreté inclusionnaire supérieure à celle du reste du corpus, avec un métal homogène, faiblement carburé et des inclusions très étirées, traduisant un travail de forge intense.

Des résultats similaires ont été obtenus pour les barres à douille du bassin versant du Crould (Bauvais et al., 2018b). Les auteurs décrivent un métal peu carburé (< 0,4 % de C),

souvent ferritique, parfois légèrement aciéré, avec un recours au recyclage et des soudures visant à homogénéiser la matière. Les auteurs rappellent qu'un demi-produit peut circuler à différents stades de finition : sous une forme encore grossière, avec une épuration incomplète, ou déjà proche de l'ébauche d'un objet, les étapes finales étant alors réalisées sur un autre site. Le choix du produit par les artisans dépendait de leurs besoins et de leurs moyens. Dans ce contexte, les barres de type BAD2 apparaissent comme l'une des formes les plus qualitatives disponibles (Fig.60) (Berranger, 2014). L'étude de chutes métalliques issues des mêmes productions a également montré des indices de séquences d'étirement et de replis visant à homogénéiser la matière et d'un recours fréquent au recyclage d'objets comme nouvelle source de métal. La découverte de ratés de fabrication de petits objets (fibules, etc.) suggère que les barres pouvaient alimenter des productions variées de petits objets (Bauvais et al., 2018b).

Dans l'ensemble, les données issues de la littérature s'accordent pour souligner la qualité métallurgique élevée des barres à douille, obtenue grâce à un travail de forge soigné et à des procédés d'épuration poussés. L'exemplaire étudié dans ce mémoire s'inscrit pleinement dans ce cadre, confirmant que ce type de demi-produit constituait une matière première de choix pour la fabrication d'objets en fer à l'âge du Fer. À l'inverse, les clous et fiches étudiés apparaissent de facture plus hétérogène, avec des indices de remplois et de recyclages. D'un point de vue technique, rien n'exclut que les clous et fiches aient pu être produits à partir d'une telle barre, mais cette hypothèse nous fait nous interroger compte tenu de la valeur marchande et des propriétés recherchées pour ce type de demi-produit, généralement destinés à des fabrications exigeant de meilleures performances que celles requises pour de simples éléments de quincaillerie. C'est pourquoi, les clous et les fiches du corpus semblent davantage relever d'un recyclage, de l'utilisation de métal disponible localement, ou d'imports, bien qu'il soit difficile de déterminer si ces pratiques résultent d'un manque de matière première, d'un recyclage opportuniste ou d'expérimentations ponctuelles.

Au-delà de l'analyse technique des objets, ces résultats invitent à s'interroger sur l'organisation et la nature des activités métallurgiques susceptibles d'avoir eu lieu à Pont-de-Bonne. Comme le rappellent Bauvais *et al*, « *les formes d'organisation interne que peuvent revêtir les activités d'un atelier de post-réduction ou d'un site producteur peuvent être multiples suivant leur intensité et leur vocation.* » Elles peuvent aller d'une production

spécialisée, avec division du travail et espace artisanal dédié à des activités ponctuelles, intégrées à un habitat, voire itinérantes (Bauvais et al., 2018b).

L'interprétation fonctionnelle et contextuelle reste néanmoins délicate. À ce jour, peu de témoins directs d'une activité de forge sont disponibles sur le site de Pont-de-Bonne : quelques scories et culots de forge ont bien été découverts mais dans des niveaux très perturbés, ce qui limite leur interprétation, et les sédiments n'ont pas été fouillés assez de manière systématique pour détecter des résidus fins comme des battitures. En l'absence de ces témoins et de structures clairement associées, il est difficile d'attester formellement d'une activité de forge *in situ* à la fin de La Tène. En effet, les études expérimentales (Crew, 1991; Leroy *et al.*, 2000) montrent que la forge d'un objet à partir de demi-produits entraîne des pertes métalliques de 10 à 20%, réparties entre battitures et résidus dans le foyer (Bauvais et al., 2018b). Les données techniques sur les demi-produits complètent cette lecture. Nous savons qu'ils proviennent d'une loupe initialement hétérogène, épurée puis étirée et homogénéisée, avant la mise en forme finale (Berranger, 2007). Le compactage initial produit déjà d'importantes pertes, auxquelles s'ajoutent celles générées lors des étapes suivantes. Si une production avait donc eu lieu sur place, de tels déchets devraient logiquement être retrouvés, sauf si un traitement particulier d'évacuation des déchets a été mis en place. Dans ce cas, la présence ponctuelle de scories pourrait correspondre à une activité limitée, irrégulière ou itinérante, comme le décrivent Bauvais et al. pour certaines occupations domestiques saisonnières ou pour des interventions de forgerons extérieurs (Bauvais et al., 2018b).

L'intégration de ces observations dans le cadre théorique proposé par Bauvais *et al.* conduit à envisager le site de Pont-de-Bonne dans un système d'acquisition et de transformation où il correspondrait à un niveau 3, c'est-à-dire un lieu recevant des demi-produits déjà bien épurés pour transformation, voire à un niveau 4 si la présence de ces éléments relève uniquement d'un dépôt sans activité de forge associée (Bauvais et al., 2018b). Les données disponibles ne permettent pas de trancher entre ces deux hypothèses.

Cette étude présente des limites qui tiennent principalement à la nature du corpus et au contexte de découverte : une partie du matériel provient probablement d'un dépôt, l'autre partie provient d'une structure en place, et non d'un atelier en activité ou d'une zone de production. Cette situation restreint la possibilité de restituer de manière fine les chaînes opératoires. Par ailleurs, l'analyse inclusionnaire, bien qu'utile pour identifier des masses distinctes ou confirmer certaines soudures, ne suffit pas à établir des liens précis entre les

pièces. Des analyses complémentaires, notamment par ICP-MS sur les éléments traces, croisées avec l'étude des scories, des chutes métalliques et des objets associés, offriraient une meilleure compréhension de l'origine et de la circulation des matériaux.

La présence de demi-produits de type barres à douille en contexte de dépôt terrestre sur un site isolé comme Pont-de-Bonne constitue également une limite pour l'interprétation. Ce type de découverte, encore assez peu étudié et compris (*supra* section 2.2.3), ne permet pas de trancher clairement entre une fonction utilitaire, symbolique ou liée à des pratiques de stockage. En l'état, leur statut reste donc difficile à déterminer et restreint la portée des conclusions que l'on peut tirer de ce corpus. Toutefois, ce constat ouvre une perspective de recherche importante : l'étude comparée d'autres dépôts similaires, en Belgique comme dans les régions voisines, pourrait permettre de mieux comprendre le rôle et la signification de ces demi-produits dans les systèmes techniques et sociaux de l'âge du Fer.

Plus largement, il serait pertinent d'inscrire ce corpus dans un cadre comparatif élargi, en l'intégrant aux autres découvertes de fiches de *murus gallicus* en Belgique (par exemple à Rouveroy ou Lompret), mais aussi en France ou en Allemagne, ainsi qu'aux demi-produits de Marilles et Tavieres (Delye, 2022; Léva, 1957), bien que ces derniers semblent être de BAD1 (Berranger, 2014). Dans cette perspective, les données issues de ce corpus portant sur des objets finis et semi-finis devraient idéalement être mises en parallèle avec les résultats obtenus par Pagès sur les scories de la région Entre-Sambre-et-Meuse et du Condroz (Pagès, 2022). Une telle confrontation permettrait de relier les caractéristiques métallographiques et chimiques des objets étudiés aux minerais locaux, offrant ainsi des pistes sur les réseaux d'approvisionnement et les dynamiques techniques régionales. Si les scories analysées par Pagès sont datées de l'époque romaine, les signaux chimiques qu'elles révèlent pourraient néanmoins constituer des points de comparaison utiles pour la fin de l'âge du Fer. Ce type d'approche pourrait faire l'objet de futures analyses et comparaisons afin d'aller plus loin que le cadre de cette étude. Cette perspective fertile ouvrira sans doute de nouvelles pistes à creuser dans un futur proche.

Au-delà des considérations techniques et organisationnelles, la fabrication des clous et des fiches du corpus ouvre à plusieurs pistes d'interprétation. D'une part, cette étude montre que ces objets, souvent négligés en archéoméallurgie, recèlent un fort potentiel informatif. Un élargissement du corpus à d'autres ensembles comparables permettrait de mieux cerner leurs modes de fabrication et leurs contextes d'utilisation. D'autre part, plusieurs indices pointent vers des pratiques de remploi et de recyclage : assemblage de masses distinctes,

qualité variable des soudures, hétérogénéité dans le martelage et la finition. Si ces caractéristiques peuvent refléter un manque de matière première ou un approvisionnement irrégulier, elles pourraient aussi, de manière hypothétique, correspondre à des exercices pratiques réalisés par un forgeron en apprentissage. La variation dans la réussite des soudures, dans l'écrasement des inclusions et dans la qualité des assemblages pourrait en effet évoquer des essais techniques ou des pièces d'entraînement insérées ensuite dans la production courante.

De plus, il est intéressant de replacer la production de ces clous et fiches dans le contexte particulier du site. Le *Rocher-du-Vieux-Château* correspond à un site fortifié de l'âge du Fer en Gaule, implanté en hauteur entre la fin du III^e et le I^{er} siècle av. J.-C (*supra* section 4.1.2) à un emplacement stratégique, à une période marquée par des tensions entre peuples, notamment avec les peuples voisins et les Germains puis, peu après, avec les Romains. Bien que l'absence de structures datées de La Tène à l'intérieur du rempart complique l'interprétation fonctionnelle du site, nous pourrions envisager que la fabrication des clous et fiches destinés à la construction du *murus gallicus* ait répondu à un besoin ponctuel lié à cet état de tensions. Dans cette perspective, le recours à des matériaux recyclés et, de façon hypothétique, à la transformation d'une barre à douille en cas de pénurie de matière première, pourrait refléter une réponse pragmatique à une demande urgente, plutôt qu'une organisation artisanale régulière. Les analyses anthracologiques réalisées sur le *murus gallicus* montrent par ailleurs l'utilisation d'essences de bois disponibles localement (Delye et al., 2016b), suggérant l'approvisionnement, tant pour le bois que pour le métal, pouvait s'appuyer sur des ressources immédiatement accessibles afin de répondre rapidement aux besoins de construction ou de réparation. Ce scénario, qui associe un besoin défensif immédiat à un approvisionnement limité et un usage optimisé des ressources locales, mériterait d'être exploré par la comparaison avec d'autres ensembles de clous de fortification étudiés dans les contextes de conflits ou de renforcement rapide des ouvrages défensifs.

L'analyse métallographique d'objets en fer permet d'appréhender le savoir-faire des forgerons, chaque procédé technique exigeant un niveau particulier de maîtrise et d'apprentissage (Bauvais et al., 2018b). Pleiner a distingué trois grandes étapes dans cette hiérarchie des compétences. Le premier niveau concerne des activités de forge simples, réalisées à partir d'une masse unique, avec martelage à chaud et éventuellement soudures élémentaires sur des fers faiblement carburés. Le deuxième niveau concerne la maîtrise de

procédés thermochimiques (comme la cémentation) et de soudures fer/acier. Le troisième niveau enfin est celui des savoir-faire d'experts, fondés sur l'enchaînement de procédés variés et complexes, tels que la fabrication d'épées ou le damasquinage. Les opérations les plus élaborées nécessitaient un apprentissage long et une pratique régulière, caractéristiques d'un artisanat spécialisé (Fig.61). À l'inverse, certains gestes plus rudimentaires pouvaient être exécutés par des praticiens occasionnels, sans constituer un indice direct de spécialisation. Le corpus de Pont-de-Bonne s'inscrit dans les deux premiers niveaux de cette classification, révélant un degré technique allant de simple à bon, sans pour autant témoigner d'un artisanat expert.

Au-delà des gestes, la qualité et la forme des demi-produits renseignent sur la place des sites dans les réseaux d'acquisition et de transformation. Bauvais *et al.* (2018) distinguent pour les zones étudiées dans le nord de la France quatre catégories de sites. Le niveau 1 correspond aux sites producteurs ou importateurs de masses brutes de réduction, chargés de leur épuration. Le niveau 2 désigne les sites recevant des demi-produits grossièrement compactés et les transformant. Le niveau 3 regroupe les sites travaillant des demi-produits déjà bien compactés pour élaborer des objets finis. Et enfin, le niveau 4 correspond aux sites consommateurs d'objets finis en fer. Les sites étudiés par les auteurs appartiennent majoritairement au niveau 3. Le cas de Pont-de-Bonne semble lui s'inscrire dans cette logique, avec un approvisionnement en demi-produits déjà transformés. Toutefois, si les barres à douille retrouvées relèvent d'un contexte de dépôt, sans indice de forge *in situ*, le site pourrait alors se rapprocher du niveau 4.

Ce constat rejoint les synthèses régionales faites par les auteurs : à partir de La Tène C1, les barres à douille deviennent un produit caractéristique du nord du Bassin parisien, issu notamment du Sénonais et de la Sarthe, et diffusé sur de longues distances (Bauvais, 2007). Leur qualité et leur large diffusion, jusque dans les sanctuaires, traduisent leur rôle central dans les échanges. Or, à partir de La Tène D1b, les petites unités de transformation disparaissent progressivement au profit d'ateliers spécialisés concentrés dans les *oppida* (Bauvais et al., 2018b), tandis que la production atteint des volumes sans précédent (ex. les Clérimois avec près de 21 tonnes annuelles (Berranger *et al.*, 2017a; Dunikowski et Cabboi, 1995). Dans ce contexte, Pont-de-Bonne ne correspond pas à un centre producteur, mais plutôt à un site consommateur ponctuel, inséré dans ces réseaux macro-régionaux. Cependant, ces réseaux sont fragiles car fortement dépendants des échanges, ce qui implique qu'une perturbation politique ou économique pouvait avoir des conséquences directes sur

l'approvisionnement (Bauvais et al., 2018b). Dans ce cadre, la réutilisation ou le recyclage de barres à douille à Pont-de-Bonne pourrait constituer un indice d'un accès irrégulier à la matière première, peut-être lié à des tensions régionales.

Bauvais *et al* (2018) font le bilan des sites de production et de transformation dans le nord du Bassin parisien, montrant que pour LT C1 à D1a, de gros centres de production de demi-produits (dont les barres à douille) destinés à l'export sur de grandes distances, et que pour LT D1b à D2, les sites de transformation de la région disparaissent, probablement en raison d'un approvisionnement direct en demi-produits dans les *oppida*, où se concentre désormais l'activité métallurgique.

Enfin, Berranger (Berranger, 2007) rappelle que les zones exactes de production des demi-produits demeurent mal connues et que la diversité de leurs formes répond sans doute à plusieurs logiques (techniques, fonctionnelles ou encore symboliques). Les barres bipyramidées semblent liées à la production de pièces massives, tandis que les barres plates ou à douille auraient pu convenir à la réalisation d'objets longs et de plus faible gabarit. Appliqué à Pont-de-Bonne, ce constat ne peut rester qu'hypothétique : le contexte de dépôt ne permet pas de démontrer que les barres aient été effectivement utilisées pour produire des objets finis. De plus, Berranger insiste sur la nécessité de confronter l'étude des demi-produits à celle des objets finis, démarche qui constitue un axe central de ce mémoire, même si les contraintes du corpus limitent la démonstration.

Plus largement, ces dépôts, souvent mal documentés, livrent peu d'indices sur la fonction exacte des demi-produits qu'ils contiennent. L'interprétation doit donc rester ouverte : les caractéristiques des barres peuvent répondre à des logiques multiples — techniques, fonctionnelles, économiques, mais aussi symboliques ou liées à des pratiques de stockage. De même, il n'est pas certain que les demi-produits déposés à Pont-de-Bonne soient directement reliés aux objets finis retrouvés dans le corpus.

En définitive, l'étude du corpus de Pont-de-Bonne suggère une intégration dans des réseaux d'approvisionnement en demi-produits déjà transformés, sans indice clair d'une production locale. La comparaison avec les dynamiques connues dans le nord du Bassin parisien est ici particulièrement pertinente, non parce que le site dépendrait directement de cette zone, mais parce qu'il s'agit de la région la mieux documentée et la plus proche géographiquement. En Belgique, les données manquent encore pour établir un modèle équivalent, ce qui justifie ce rapprochement méthodologique. Il ne faut toutefois pas exclure

l'hypothèse d'échanges à plus longue distance : les travaux récents de Pagès (2022) ont montré que, dès la période romaine, des liens existaient entre la Belgique et le sud de la France. Même si ce phénomène est postérieur à La Tène finale, il illustre la capacité des réseaux métallurgiques à fonctionner à très large échelle. Dans ce cadre, le site de Pont-de-Bonne apparaît donc moins comme un centre producteur que comme un lieu de consommation, voire de dépôt, dont le statut de place fortifiée l'insère ponctuellement dans ces dynamiques macro-régionales.

En conclusion, si le corpus étudié témoigne de savoir-faire métallurgiques variés et parfois complexes, il ne fournit pas à ce jour la preuve d'une production locale à Pont-de-Bonne à la fin de La Tène. Les données suggèrent plutôt une activité de transformation ponctuelle ou un simple dépôt, en lien avec des circuits d'approvisionnement intégrés aux réseaux celtiques de la fin de l'âge du Fer. L'organisation de ces réseaux reste encore en partie mal comprise (Bauvais et Fluzin, 2009; Berranger, 2014; Pagès, 2022), mais il est établi que certaines régions, comme le pourtour du Bassin parisien, constituaient à cette époque d'importants pôles de production de barres à douille (Bauvais et *al.*, 2018b). De nouvelles analyses, notamment sur les résidus métallurgiques et sur d'autres corpus comparables, seraient nécessaires pour affiner cette interprétation et évaluer dans quelle mesure Pont-de-Bonne pouvait s'inscrire dans de tels réseaux d'approvisionnement.

8. CONCLUSION

L'étude métallographique et chimique des objets en fer issus du *Rocher du Vieux-Château* de Pont-de-Bonne a permis d'apporter de nouveaux éléments à la connaissance des pratiques métallurgiques en Belgique à la fin de l'âge du Fer, un domaine encore largement sous-documenté. L'objectif était de mieux cerner l'homogénéité des matières premières et des techniques de mise en forme du fer. À travers l'analyse d'un échantillon diversifié, clous, fiches, produits indéterminés et un demi-produit sous forme de barre à douille, il s'agissait de déterminer si ces objets relevaient d'une production locale cohérente ou s'ils s'inscrivaient plutôt dans des dynamiques d'approvisionnement à plus large échelle.

Les résultats obtenus mettent en évidence plusieurs constantes. Tous les objets, quel que soit leur type, présentent des indices nets de martelage répété et de corroyage par replis successifs, aboutissant à l'allongement et à l'orientation parallèle des inclusions. Les soudures internes, fréquentes, témoignent d'une recherche d'homogénéisation et d'un savoir-faire technique largement partagé. Les microstructures observées, dominées par des alternances de ferrite et d'acier faiblement carburé, confirment une pratique métallurgique de type réduction directe suivie d'un travail intensif de forge. Ces caractéristiques attestent que les artisans en charge de ces objets maîtrisaient les procédés de transformation du fer et mettaient en œuvre des gestes techniques comparables à ceux documentés ailleurs en Gaule.

Cependant, au-delà de ces convergences, le corpus révèle aussi une forte hétérogénéité. Plusieurs pièces présentent des assemblages de masses métalliques distinctes, parfois de composition chimique contrastée, soudées entre elles pour former un objet composite. Le recours à des fers phosphoreux, souvent associés à des masses non phosphoreuses, est récurrent, mais la proportion et la répartition de ces matériaux varient fortement d'un échantillon à l'autre. L'examen chimique des inclusions a également mis en évidence des signatures différenciées : si certaines PPM s'intègrent dans des regroupements cohérents et traduisent des systèmes de réduction proches, d'autres, comme celles de la barre à douille, apparaissent marginales et suggèrent des apports distincts. Cette diversité exclut l'hypothèse d'une homogénéité stricte du corpus et invite à envisager des provenances multiples pour les masses métalliques mises en œuvre à Pont-de-Bonne.

Ces résultats conduisent à relativiser l'idée d'une production locale autonome. Aucune structure métallurgique (bas fourneau, scories primaires en grande quantité) n'ayant été identifiée sur le site, il paraît improbable que Pont-de-Bonne ait assuré lui-même la réduction du minerai. Les scories découvertes constituent un indice potentiel d'opérations de post-réduction, mais leur lien direct avec les objets étudiés reste à démontrer. Par ailleurs, les observations métallographiques et inclusionnaires révèlent des pratiques de corroyage intensif et de soudure de masses distinctes, parfois interprétables comme des opérations de réutilisation ou de recyclage. Si certains objets présentent des compositions chimiques suggérant des liens technologiques, l'intensité du travail de post-réduction empêche d'en tirer des conclusions définitives. Dans l'état actuel des données, Pont-de-Bonne apparaît donc moins comme un centre de production à part entière que comme un site intégré à des réseaux d'approvisionnement en demi-produits, avec un possible traitement ou remaniement local des masses métalliques, sans que la nature précise de ces activités puisse être pleinement déterminée.

Les résultats montrent que, si certains objets présentent un savoir-faire technique élaboré (soudure fer/acier, corroyage soigné, homogénéisation poussée), d'autres révèlent des caractéristiques plus hétérogènes, marquées par le remploi et le recyclage. La barre à douille analysée illustre clairement la qualité élevée de ce type de demi-produit, reconnu comme une forme standardisée et diffusée à grande échelle en Gaule, notamment dans le nord du Bassin parisien. À l'inverse, les clous et fiches apparaissent comme des productions plus probablement issues de masses recyclées et adaptées à des besoins liés à la fortification.

L'analyse comparée des inclusions met également en évidence la pluralité des systèmes de réduction impliqués, reflétant une circulation complexe de matériaux et de produits semi-finis. La barre à douille illustre bien cette dynamique : son assemblage composite, distinct du reste du corpus, suggère un apport marginal, peut-être lié à un réseau différent ou à une pratique de recyclage. Cette singularité rappelle la fragilité des réseaux d'approvisionnement, dont l'équilibre pouvait être rompu par diverses raisons (perturbations politiques, économiques, etc.) favorisant localement des solutions de réemploi. Ces observations conduisent à privilégier l'hypothèse d'un site consommateur, inséré ponctuellement dans des réseaux macro-régionaux de circulation du fer, plutôt que celle d'un centre producteur autonome. Pont-de-Bonne se situerait ainsi à un niveau intermédiaire d'acquisition et de transformation. La nature du site n'exclut pas non plus l'hypothèse d'une

activité ponctuelle de forgerons pour répondre à des besoins spécifiques, mais rien ne permet de parler d'une véritable forge en activité.

Cette recherche souligne également l'importance de confronter l'étude des demi-produits à celle des objets finis, ainsi que de maintenir une approche prudente face à la pluralité des explications possibles (facteurs techniques, fonctionnels, économiques ou symboliques). L'absence de témoins clairs d'une forge *in situ* limite l'interprétation, mais ouvre des pistes stimulantes : rôle des dépôts de demi-produits, circulation des matériaux, diversité des pratiques de recyclage et d'approvisionnement.

Le corpus de Pont-de-Bonne illustre à la fois l'existence de savoir-faire techniques communs dans la transformation du fer et la diversité des matières premières mobilisées. Loin de constituer un ensemble homogène, il témoigne de l'insertion du site dans des réseaux d'échanges régionaux ou supra-régionaux, encore mal connus en Belgique mais déjà bien documentés pour la Gaule.

Les limites de l'étude doivent toutefois être rappelées : le nombre restreint d'échantillons, l'absence de contextes métallurgiques clairement associés et les biais inhérents à la conservation des objets. Ces contraintes invitent à la prudence dans l'interprétation et justifient de maintenir ouvertes plusieurs hypothèses. La confrontation entre objets finis et demi-produits, encore embryonnaire dans ce travail, mériterait d'être développée, notamment par l'analyse des scories et des déchets de forge. Ce type d'approche, préconisée par les recherches récentes, constitue une clé indispensable pour mieux comprendre l'articulation entre réduction primaire, circulation de demi-produits et production d'objets finis.

En définitive, si le corpus de Pont-de-Bonne ne permet pas de prouver une activité métallurgique locale organisée, il contribue à enrichir la réflexion sur la place des sites fortifiés belges dans les réseaux celtiques de la fin de l'âge du Fer. Il invite surtout à élargir l'échelle d'analyse : seule la multiplication des études croisées, sur objets finis, demi-produits, scories et contextes archéologiques associés, permettra de préciser le fonctionnement de ces réseaux, leurs équilibres instables et les modalités de circulation du métal. De futures analyses, notamment sur les résidus métallurgiques et sur d'autres ensembles comparables, constituent donc une perspective essentielle pour approfondir la compréhension de ces dynamiques techniques et sociales.

Par ces résultats et par les questions ouvertes, le présent travail contribue à enrichir la réflexion sur la diversité et la complexité des pratiques métallurgiques laténiennes. Il souligne enfin la nécessité d'approches pluridisciplinaires, à la croisée de l'archéologie et de l'archéométrie, pour progresser dans la compréhension des sociétés du second âge du Fer.

BIBLIOGRAPHIE

- Arnould et De Radiguès, 1872 Arnould, G., De Radiguès, H., 1872. Notices sur Hastedon. In: Congrès International d'anthropologie et d'archéologie Préhistorique. Bruxelles, pp. 318–326.
- Bauvais et Fluzin, 2006 Bauvais, S., Fluzin, P., 2006. Réflexions sur l'organisation technico-sociale des activités de forge à La Tène finale dans l'Aisne. *ArcheoSciences* 30, 25–43.
- Bauvais, 2007 Bauvais, S., 2007. Évolution de l'organisation des activités de forge dans le nord du Bassin parisien au second Age du fer : études pluridisciplinaires de la chaîne opératoire en métallurgie du fer. Thèse de doctorat, Université de technologie de Belfort-Montbéliard et Université de Franche-Comté, Besançon.
- Bauvais et Fluzin, 2009 Bauvais, S., Fluzin, P., 2009. Archaeological and archaeometrical approaches of the chaîne opératoire in iron and steelmaking : Methodology for a regional evolution study. In: Rosen, S., Roux, V. (Eds.), *Techniques and people: Anthropological perspectives on technology in the archaeology of the proto-historic and early historic periods in the southern Levant*. De Boccard, Paris, pp. 157-178.
- Bauvais *et al.*, 2018a Bauvais, S., Berranger, M., Boukezzoula, M., Leroy, S., Disser, A., Vega, E., Aubert, M., Dillmann, P., Fluzin, P., 2018a. 'Guard the good deposit' : technology, provenance and dating of bipyramidal iron semi-products of the Durrenentzen deposit (Haut-Rhin, France). *Archaeometry* 60(2), 290–307.
- Bauvais *et al.*, 2018b Bauvais, S., Disser, A., Dillmann, P., 2018b. La métallurgie du fer à l'âge du Fer dans le bassin versant du Crould : organisation des productions et étude de provenance. *Revue Archéologique d'Île-de-France* 5, 453–506.
- Berranger, 2007 Berranger, M., 2007. Les demi-produits de fer au Ier millénaire a.C. en Europe continentale : potentialités d'études. In: Milcent, P.-Y. (Ed.), *L'économie du fer protohistorique : de la production à la consommation du métal*. Actes du XXVIIIe colloque de l'AFEAF, pp. 133–143.
- Berranger et Fluzin, 2013 Berranger, M., Fluzin, P., 2013. Structuration et contexte des échanges en métallurgie du fer durant la Protohistoire. Une approche interdisciplinaire à partir des matières premières métalliques. In: *L'âge du Fer en Aquitaine et sur ses marges. Mobilité des hommes, diffusion des idées, circulation des biens dans l'espace européen à l'âge du Fer*. Actes du 35e colloque international de l'AFEAF, pp. 609–629.
- Berranger, 2014 Berranger, M., 2014. *Le fer, entre matière première et moyen d'échange, en France, du VIIe au Ier siècle av. J.-C. Approches interdisciplinaires*. Éditions universitaires de Dijon, Dijon.
- Berranger et Fluzin, 2016 Berranger, M., Fluzin, P., 2016. Technotypologie des "Currency-bars" issus du lit de la Saône : prolongements interdisciplinaires. In: Vitali D., Goudineau Ch., *Il mondo celtico prima e dopo la conquista romana / Le monde celtique avant et après la conquête romaine*. Mélanges En l'honneur de Jean-Paul Guillaumet, pp. 281–292.

- Berranger *et al.*, 2017a Berranger, M., Bauvais, S., Boukezzoula, M., Dillmann, P., Fluzin, P., 2017a. Analyse technologique, étude de provenance et datation par le radiocarbone du dépôt de demi-produits ferreux de Durrenentzen (Haut-Rhin, France) : une vision renouvelée de l'économie du fer au premier âge du Fer. *ArcheoSciences* 41, 45–67.
- Berranger *et al.*, 2017b Berranger, M., Zaour, N., Leroy, M., Bauvais, S., Cabboï, L., Dunikowski, C., Fluzin, P., 2017b. Organisation des productions sidérurgiques en Gaule (VIIe-Ier s. a.C.) : de la réduction du métal à l'élaboration des demi-produits. Actes du 39e colloque international de l'AFEAF (Nancy, 14-17 mai 2015), Ausonius Éditions, Bordeaux, pp. 301–334.
- Berranger *et al.*, 2019 Berranger, M., Dillmann, P., Fluzin, P., Vega, E., Leroy, S., Aubert, M., Delqué-Količ, E., 2019. Du produit d'échange à l'objet symbole : de nouvelles données sur les demi-produits de type currency-bar du Val de Saône et de l'Arc jurassien. *Gallia* 76, 165–189.
- Berranger *et al.*, 2021 Berranger, M., Dillmann, P., Fluzin, P., Vega, E., Aubert, M., Leroy, S., Delqué-Količ, E., 2021. A new understanding of the chronology, circulation and function of Iron Age (8th–1st c. BC) ferrous semi-products in north-eastern France. *Archaeological and Anthropological Sciences* 13(6), 102.
- Berthier, 1822 Berthier, P., 1822. Sur la nature des scories de forges catalanes et des foyers d'affineries. *Annales des Mines* 7, 377–402.
- Blakelock *et al.*, 2009 Blakelock, E., Martín-Torres, M., Veldhuijzen, 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* 36, 1745–1757.
- Buchsenschutz *et al.*, 2014 Buchsenschutz, O., Ralston, I., 2014. Nouvelles remarques sur les muri gallici. *Cahiers d'Archéologie Romande* 151, 171–178.
- Buchsenschutz, 2015 Buchsenschutz, O., 2015. L'Europe celtique à l'âge du Fer (VIIIe-Ier siècles). Presses universitaires de France (PUF), Paris.
- Buchwald *et al.*, 1998 Buchwald, V.F., Wivel, H., 1998. Slag Analysis as a Method for the Characterization and Provenancing of Ancient Iron Objects. *Materials Characterization* 40, 73–96.
- Cabboï *et al.*, 2007 Cabboï, S., Dunikowski, C., Leroy, M., Merluzzo, P., 2007. Les systèmes de production sidérurgique chez les Celtes du Nord de la France. In: Milcent, P.-Y. (Ed.), *L'économie du fer protohistorique : de la production à la consommation du métal*. Actes du XXVIIIe colloque de l'AFEAF. Bordeaux, pp. 35–62.
- Cahen-Delhayé *et al.*, 1984 Cahen-Delhayé, A., Duval, A., Leman-Delèrive, G., Leman, P., 1984. Les Celtes en Belgique et dans le Nord de la France : les fortifications de l'âge du Fer. Actes du sixième colloque tenu à Bavay et Mons. Lille.
- Caley, 1964 Caley, E.R., 1964. Analysis of ancient metals. International series of monographs of analytical chemistry. Pergamon, Oxford.
- Caumartin, 1863 Caumartin, L., 1863. Promenade archéologique sur les bords du Hoyoux. *Bulletin de l'Institut Archéologique Liégeois* 2, 1–18.

- Charlton *et al.*, 2012 Charlton, M.F., Blakelock, E., Martín-Torres, M., Young, T., 2012. Investigating the production provenance of iron artifacts with multivariate methods. *Journal of Archaeological Science* 39, 2280–2293.
- Coustures *et al.*, 2003 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 Martyrs, Montagne Noire, and Les Ferrys, Loiret)*. *Archaeometry* 45, 599–613.
- Crew, 1991 Crew, P., 1991. The experimental production of prehistoric bar iron. *Historical Metallurgy* 25, 21–36.
- Crew, 1994 Crew, P., 1994. Currency bars in Great-Britain, Typology and Function. In: Mangin, M. (Ed.), *La sidérurgie ancienne de l’est de la France, dans son contexte européen : archéologie et archéométrie. Actes du colloque de Besançon, 10-13 Novembre 1993*, ALUB. Diffusion Les Belles Lettres, Paris, pp. 345–350.
- Daubrée, 1868 Daubrée, A., 1868. Aperçu historique sur l’exploitation des métaux dans la Gaule. *Revue Archéologique* 17, 298–313.
- Delye *et al.*, 2011 Delye, E., Gilson, S.-P., Wathélet, C., 2011. Modave/Vierset-Barse : campagne de fouille 2009 sur le « Rocher du Vieux Château », Pont-de-Bonne. *Chronique de l’Archéologie Wallonne* 18, 174–175.
- Delye, 2013 Delye, E., 2013. Modave/Vierset-Barse : campagne de fouille 2011 sur le « Rocher du Vieux-Château » à Pont-de-Bonne. *Chronique de l’Archéologie Wallonne* 20, 199–200.
- Delye *et al.*, 2014 Delye, E., Lucon, Y., Schaus, A., 2014. Modave/Vierset-Barse : campagne de fouille 2012 sur le site du “Rocher du Vieux-Château” à Pont-de-Bonne. *Chronique de l’Archéologie Wallonne* 21, 208–209.
- Delye *et al.*, 2016a Delye, E., Lucon, Y., Schaus, A., Bolland, F., 2016a. Modave/Vierset-Barse : campagne de fouille 2015 sur le site du “Rocher du Vieux-Château” à Pont-de-Bonne. *Chronique de l’Archéologie Wallonne* 24, 219–220.
- Delye *et al.*, 2016b Delye, E., Marion, J.-M., Poty, Demelenne, M., Bossiroy, D., Dagrain, F., Van Parys, Poirier, P., Roche, E., Burnez-Lanotte, L., De Longueville, S., De Waha, M., Gautier, A., Gilson, S.-P., Martin, F., Schaus, A., 2016b. Les fortifications celtique et carolingienne du Rocher du Vieux-Château à Pont-de-Bonne (Modave, Belgique). *Bulletin du Cercle Archéologique Hesbaye-Condruz* 32, 164.
- Delye *et al.*, 2017 Delye, E., Bolland, F., Schaus, A., Stock, S., Frankinet, P., Désert, R., 2017. Modave/Vierset-Barse : campagne de fouille 2016 sur le site du “Rocher du Vieux-Château” à Pont-de-Bonne. *Chronique de l’Archéologie Wallonne* 25, 107–108.
- Delye *et al.*, 2018 Delye, E., Bolland, F., Stock, S., Frankinet, P., 2018. Modave/Vierset-Barse : campagne de fouille 2017 sur le site du “Rocher du Vieux-Château” à Pont-de-Bonne. *Chronique de l’Archéologie Wallonne* 26, 138–139.
- Delye *et al.*, 2019 Delye, E., Stock, S., Delye, A., Bolland, F., Jaminon, A., Wymmersch, G., Frankinet, P., Gava, G., Witvrouw, J., 2019. Modave/Vierset-Barse : découverte d’un édifice religieux carolingien sur le site du “Rocher du Vieux-Château” à Pont-de-Bonne. *Chronique de l’Archéologie Wallonne* 27, 181–182.

- Delye, 2022 Delye, E., 2022. Demi-produits de fer découverts anciennement sur le site du Rocher du Vieux-Château à Pont-de-Bonne (Modave, province de Liège, Belgique). In: Doyen, J.-M. (Ed.), *De l'Escaut au Nil. Bric-à-Brac en hommage à Eugène Warmenbol à l'occasion de son 65e anniversaire*. Guides Archéologiques Du Malgré-Tout. Editions du Cedarc, Treignes, pp. 373–375.
- Díaz-Andreu, 2024 Díaz-Andreu, M., 2024. *The Oxford Handbook of The history of Archaeology*. Oxford University Press, New-York.
- Dillmann et L'Héritier, 2007 Dillmann, P., L'Héritier, M., 2007. Slag inclusion analyses for studying ferrous alloys employed in French medieval buildings: supply of materials and diffusion of smelting processes. *Journal of Archaeological Science* 34, 1810–1823.
- Dillmann et al., 2015 Dillmann, P., Leroy, S., Disser, A., Bauvais, S., Vega, E., Fluzin, P., 2015. Dernières avancées des études sur la production, la circulation et la datation des métaux ferreux archéologiques. *Les Nouvelles de l'Archéologie* 139, 1–15.
- Dillmann et L'Héritier, 2016 Dillmann, P., L'Héritier, M., 2016. Archéométrie et histoire des techniques : les procédés direct et indirect en sidérurgie (XIVe-XVIIe siècle). *Artefact* 4, 63–81.
- Disser et al., 2014 Disser, A., Dillmann, P., Bourgain, C., L'Héritier, 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* 42, 315–333.
- Disser et al., 2020 Disser, A., Bauvais, S., Dillmann, P., 2020. Transformations of the chemical signature of slag inclusions throughout experimental refining and first shaping of bloomery iron: New methodological developments. *Journal of Archaeological Science: Reports*. 34, 1–11.
- Dunikowski et al., 1995 Dunikowski, C., Cabboi, S., 1995. *La sidérurgie chez les Sénons : les ateliers celtiques et gallo-romains des Clérimois (Yonne)*, Documents d'Archéologie française. Éditions de la Maison des Sciences de l'Homme, Paris.
- Féliu et al., 2020 Féliu, C., Fichtl, S., 2020. L'architecture des remparts à l'âge du Fer : l'expression de différences régionales?. In: *Unité et diversité du monde celtique. Actes du 42e colloque international de l'Association Française pour l'étude de l'âge du Fer (Prague, 10-13 Mai 2018)*. Collection AFEAF. AFEAF, pp. 131–146.
- Fichtl, 2005 Fichtl, S., 2005. Murus et pomerium : réflexions sur la fonction des remparts protohistoriques. *Revue Archéologique du Centre de la France* 44, 55–72.
- Fluzin, 1983 Fluzin, P., 1983. Notions élémentaires de sidérurgie. In: Échard, N. (Ed.), *Métallurgies africaines. Nouvelles contributions. Mémoires de la Société des Africanistes*. Société des africanistes, Paris, pp. 13–44.
- Fluzin et al., 2000 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* 57, 101–121.
- Fluzin, 2002 Fluzin, P., 2002. La chaîne opératoire en sidérurgie : matériaux archéologiques et procédés. Apports des études métallographiques. In: Bocoum, H. (Ed.), *Aux origines de la métallurgie du fer en Afrique. Une ancienneté méconnue. Afrique de l'Ouest et Afrique Centrale*. Éditions UNESCO, Paris, pp. 59–91.

- Fluzin *et al.*, 2012 Fluzin, P., Berranger, M., Bauvais, S., Pagès, G., Dillmann, P., 2012. An archaeological and archaeometrical approach of ferrous semi-product: a diachronic qualitative typology (VIIth c. BC. - IIInd c. A.D.). In: Cucini, C. (Ed.), *Acta Mineraria et Metallurgica - Studi in Onore Di Marco Tizzoni*, Notizie Archeologiche Bergomensi. Bergamo, pp. 195–204.
- Fontana, 1981 Fontana, A., 1981. Examen métallographique de deux éléments en fer prélevés respectivement à Olloy sur Viroin et à Modave. In: *La Fortification Protohistorique d'Olloy Sur Viroin*. Club Archéologique Amphora. pp. 42–44.
- Gosselin, 2021 Gosselin, M., 2021. Qualités des alliages ferreux : une approche diachronique et statistique. Thèse de doctorat, Université Paris Nanterre, Paris.
- Guillaumet, 2003 Guillaumet, J.-P., 2003. Paléomanufacture métallique: méthode d'étude. Vestigia. Infolio, Gollion.
- Kastowsky *et al.*, 2007 Kastowsky, K., Mehofer, M., Ramsel, P.C., 2007. Analyses métallographiques d'objets de fer laténiens autour du massif de la Leitha. In: Milcent, P.-Y. (Ed.), *L'économie du fer protohistorique : de la production à la consommation du métal*. Actes du XXVIIIe colloque de l'AFEAF, Toulouse, 20-23 mai 2004, Aquitania Supplément. Fédération Aquitania, Bordeaux, pp. 305–317.
- Krausz, 1998 Krausz, S., 1998. Un murus gallicus à Saint-Marcel (Indre) : nouvelle approche de l'oppidum biturige d'Argentomagus dans le contexte européen. *Revue Archéologique du Centre de la France* 37, 81–97.
- Lam *et al.*, 2020 Lam, W., Zhang, Q., Chen, J., Wu, S.Y., 2020. Provision of iron objects in the southern borderlands of the Han Empire: a metallurgical study of iron objects from Han tombs in Guangzhou. *Archaeological and Anthropological Sciences* 12, 1–22.
- Leroy *et al.*, 2000 Leroy, M., Mangin, M., Laurent, H., Boukezzoula, M., Raïssouni, B., 2000. La sidérurgie dans l'est de la Gaule. L'organisation spatiale de la production de l'âge du fer au haut Moyen Âge. *Gallia* 57, 11–21.
- Leroy, 2010 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 de technologie de Belfort Montbéliard, Belfort.
- Leroy *et al.*, 2012 Leroy, S., Cohen, S.X., Verna, C., Gratuze, B., Téreygeol, F., Fluzin, P., Bertrand, L., Dillmann, P., 2012. The medieval iron market in Ariège (France). Multidisciplinary analytical approach and multivariate analyses. *Journal of Archaeological Science* 39, 1080–1093.
- Léva, 1957 Léva, Ch., 1957. Le site gallo-romain de Tavier. I. Les trouvailles de 1848, *Archaeologica Belgica*. Annales de la Société archéologique de Namur, Bruxelles.
- L'Héritier *et al.*, 2003 L'Héritier, M., Dillmann, P., Benoît, P., 2003. Analyse métallographique de fers à cheval médiévaux. Mise en forme et origine du métal. *Revue d'Archéométrie* 27, 193–206.
- Lucon *et al.*, 2014 Lucon, Y., Schaus, A., Delye, E., 2014. Modave/Vierset-Barse : campagne de fouille 2013 sur le site du "Rocher du Vieux-Château" à Pont-de-Bonne. *Chronique de l'Archéologie Wallonne* 22, 205–207.

- Mangin *et al.*, 2004 Mangin, M., Dabosi, F., Domergue, C., Fluzin, P., Leroy, M., Merluzzo, P., Ploquin, A., Serneels, V., 2004. Le fer, Collection "Archéologiques." Errance, Paris.
- Mariën, 1970 Mariën, M.-E., 1970. Le Trou de l'Ambre au bois de Wérimont à Eprave. Musée Royaux d'Art et d'Histoire. Bruxelles.
- Meyer-Roudet, 1999 Meyer-Roudet, H., 1999. A la recherche du métal perdu. Les nouvelles technologies dans la restauration des métaux archéologiques. Éditions Errance, Paris.
- Pagès *et al.*, 2008 Pagès, G., Long, L., Fluzin, P., Dillmann, P., 2008. Réseaux de production et standards de commercialisation du fer antique en Méditerranée : les demi-produits des épaves romaines des Saintes-Marie-de-la-Mer (Bouches-du-Rhône). *Revue Archéologique de Narbonnaise* 41, 261–283.
- Pagès, 2011 Pagès, G., 2011. L'acier, une variété de fer parmi d'autres? Approches méthodologiques des demi-produits des épaves romaines des Saintes-Maries-de-la-Mer (Bouches-du-Rhône, France). In: Dillmann, P., Pérez, C., Verna, C. (Eds.), *L'acier en Europe avant Bessemer. Actes du colloque international*, Paris, 2005. Publications du CRAHM, Caen, pp.
- Pagès *et al.*, 2011 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* 38, 1234–1252.
- Pagès, 2014 Pagès, G., 2014. Productions, commerces et consommation du fer dans le Sud de la Gaule de la Protohistoire à la domination romaine. *Gallia* 71, 47–67.
- Pagès, 2022 Pagès, G., 2022. Le commerce du fer à grande distance depuis la Gaule Belgique : les pistes qui mènent à la Méditerranée. *Signa Romana* 11, 115–118.
- Pleiner, 2000 Pleiner, R., 2000. *Iron in Archaeology: The European Bloomery Smelters*. Praha : Archeologický ústav AVČR, Prague.
- Scott, 1977 Scott, B.G., 1977. Metallographic study of some early iron tools and weapons from Ireland. *Proceedings of the Royal Irish Academy* 77C, 301–313.
- Scott et Schwab, 2019 Scott, D.A., Schwab, R., 2019. *Metallography in Archaeology and Art*, 1st ed, Cultural Heritage Science. Springer, Cham.
- Smith, 1905 Smith, R., 1905. The ancient british iron currency. *Proceedings of the Society of Antiquaries of London* 20, 179–195.
- Soullignac, 2017 Soullignac, R., 2017. *Les scories de forge du pays Dogon (Mali) : entre ethnoarchéologie, archéologie expérimentale et archéométrie*. LIBRUM Publishers & Editors, Bâle/Hochwald.
- Tylecote et Gilmour, 1986 Tylecote, R.F., Gilmour, B.J.J., 1986. *The metallography of early ferrous edge tools and edged weapons*, BAR British Series 155. Archeopress, Oxford.
- Vega *et al.*, 2002 Vega, E., Dillmann, P., Fluzin, P., 2002. Contribution à l'étude de fers phosphoreux en sidérurgie ancienne. *Revue d'Archéométrie* 26, 197–208.

BIBLIOGRAPHIE

Source antique

César, J., 1994. Guerre des Gaules., Trad. Constans L.-A., Imprimerie Nationale, Paris.

Source internet

Arcraft Plasma, 2016. Forge welding process. [WWW Document]. URL <https://arcraftplasma.blogspot.com/2016/10/forge-welding-process.html> (consulté le 14 août 2025).