

LA SIDÉRURGIE ANCIENNE EN BRETAGNE RECHERCHE DES ATELIERS DE PRODUCTION FILIACTION MINÉRAIS/OBJETS

Cécile Le Carlier de Veslud

UMR 6566 CReAAH

Laboratoire Archéosciences, Rennes Beaulieu

Résumé

Cette publication correspond à une présentation de la chaîne opératoire ancienne. Elle est surtout abordée par le côté « étude des matériaux », plus que par la présentation des installations métallurgiques. Elle est agrémentée par quelques exemples régionaux tirés de la bibliographie disponible, bien que non exhaustive. La seconde partie présente les études paléométallurgiques que l'on mène à partir de ces vestiges : d'abord l'approche spatiale avec la typologie, la datation et la localisation des sites, puis les études en laboratoire. Ceci montre toute l'importance de prendre en considération l'étude des déchets. Ils apportent autant de renseignements que les données de terrain lors de la fouille des ateliers. Les analyses chimiques associées à une typologie fine des scories apportent des données fondamentales quand il s'agit de reconstituer l'histoire métallurgique de la région.

Introduction

L'intérêt pour les études de la sidérurgie ancienne est né il y a déjà fort longtemps, dès la première moitié du XIX^e siècle. Ainsi, les Annales des Mines ont-elles présentées des descriptions de vestiges de « travaux anciens » découverts par des ingénieurs, travaillant dans les mines, ou prospectant les régions à la recherche de nouveaux gisements. On citera pour le Massif armoricain en particulier, Davy (1913) ou Kerforne (1920), qui nous ont laissé quelques publications dont certaines permettent la localisation, encore aujourd'hui, de quelques ateliers anciens, du fait de la présence des scories, ou de travaux miniers anciens.

Cependant, malgré cet intérêt précoce, c'est seulement depuis trois décennies que l'étude des métallurgies anciennes présente un plein développement, avec sa pleine intégration dans le domaine de l'histoire des techniques. Ce développement a été assuré par la mise en place d'une méthodologie basée sur la collaboration entre archéologues, historiens, géologues, géochimistes, métallurgistes et physiciens. Les données qui permettent une meilleure compréhension des procédés anciens et de leur intégration dans les sociétés concernées proviennent de la fouille des ateliers, de la prospection, du dépouillement des sources historiques, des données analytiques, de reconstitutions expérimentales et des observations ethnographiques.

Les buts recherchés sont multiples. Tout d'abord il s'agit de reconstituer les procédés de fabrication des objets métalliques, tout le long de la chaîne opératoire, de la mine à la forge, et cela pour chaque époque concernée. Il s'agit également de connaître l'ampleur de production à chaque époque et de savoir quels pouvoirs contrôlaient ces productions. Il s'agit enfin de connaître la destination des produits fabriqués et ainsi reconstituer les circuits d'échanges et de commercialisation au sein, ou entre, les territoires politiques, culturels et économiques.

Dans l'Ouest, des érudits se sont intéressés dès le début du XX^e siècle aux amas de scories dispersés sur l'ensemble du territoire. Cependant, ils ne sont pas allés au-delà de leur mention et leur localisation, approximative la plupart du temps. On citera Davy (1913), Marcille (1923) ou Aveneau de la Grancière (1913). Les premiers travaux archéologiques concernant des ateliers de production se sont déroulés à Quimper (Le Bihan et Galliou 1974). Puis des bas fourneaux à Quimper et dans la forêt de Paimpont ont été fouillés presque dans le même temps (Menez et al. 1988) (Andrieux et al. 1993). A partir de 1984, le CeRAA a engagé des prospections systématiques sur le nord de l'Ille-et-Vilaine et de très nombreux sites ont été trouvés. A la même période, des prospections ont été engagées dans la forêt de Paimpont, souvent menées par G. Larcher, révélant là aussi de très nombreux sites. Depuis le milieu des années 1990, J.B. Vivet s'est investi dans cette étude et a sondé de nombreux fours de réduction dans le nord de l'Ille-et-Vilaine (Vivet 1997, 2001) puis dans la forêt de Paimpont (Vivet 2009). Une autre zone géographique a bénéficié de nombreuses prospections : c'est le sud est de l'Ille-et-Vilaine, sous la direction de J. C. Meuret, et cela depuis la fin des années 80 (Meuret 1989). L'auteur met en plus en relation les découvertes archéologiques avec les textes médiévaux existants, les cartulaires notamment. L'est du Massif armoricain a de plus bénéficié des vastes prospections de M. Hubert (Hubert 2005) et des travaux de recherche de F. Sarreste (Sarreste 2008). Les périodes historiques ont été étudiées (Belhoste et Maheux 1984; Andrieux 1988) et ainsi l'histoire récente de la sidérurgie de l'Ouest est mieux appréhendée, ainsi que son intégration dans l'économie des sociétés concernées (Herbaut 2009). Enfin, depuis 2007, la métallurgie ancienne est pleinement revenue au programme de l'UMR 6566 CReAAH. Des prospections sont engagées dans le nord-est du Morbihan et dans le Centre Ouest (thèse Jouanet Aldous en cours). Des interventions sont réalisées sur quelques sites (Molac, étang de Néal, forges de Paimpont). Depuis peu, l'INRAP, les services départementaux d'archéologie, le CERAM et le CERAPAR apportent une contribution importante à cette recherche. Enfin, l'étude fine en laboratoire des déchets de productions de ces sites est engagée avec la mise en place d'une banque de données chimiques et des datations régulières, afin de caractériser ces différentes zones de production.

Rappel de la chaîne opératoire

Fondamentalement, toute métallurgie est une transformation de matière. A chaque étape successive de la chaîne opératoire, la matière (le minerai) subit des transformations jusqu'à l'obtention des objets métalliques fonctionnels. Les produits « élaborés » seront exportés et il ne restera sur place que les déchets spécifiques qui marquent de l'activité.

Au cours des prospections, et même au cours des fouilles, ce seront ces déchets que l'on retrouvera en plus grand nombre. Leur étude fine en laboratoire, en relation avec les observations archéologiques, permet dans une majorité de cas de cerner l'activité qui a eu lieu sur le site. Notons que dans certains cas, nous ne savons pas donner la réponse, car cela fait partie du domaine de la recherche, de ce qui reste encore à définir.

On distingue cinq grandes étapes dans la chaîne opératoire : (1) l'extraction du minerai ; (2) la préparation du minerai ou traitements minéralurgiques ; (3) l'extraction

métallurgique ou la transformation du minerai en métal ; (4) la préparation du métal ou phase d'épuration; (5) la mise en œuvre du métal ou travail de la forge.

1 - La notion de minerai

Il est important de définir dans un premier temps cette notion de minerai, car elle varie avec le temps et donc avec les contextes. Les études de terrain montrent que ce ne sont pas les mêmes gisements qui ont forcément été exploités à différentes époques.

Un minerai est une roche particulière formée par une association de minéraux, dont un au moins, est suffisamment abondant (riches en éléments métalliques convoités) et dont on sait extraire ce métal dans des conditions satisfaisantes du moment. On les considère comme des minerais à condition que ce métal soit techniquement et économiquement récupérable. Les minerais exploitables dans le passé ne sont donc pas les mêmes que ceux qui le sont de nos jours, en raison de l'évolution des techniques et des conditions économiques. Aujourd'hui, seuls des gisements de très grand volume possédant des teneurs élevées sont exploités. Aux XVIII^e et XIX^e siècles, des gîtes plus petits et plus pauvres étaient utilisables à condition de se trouver dans des régions proches des centres industriels. Aux périodes anciennes, quelques tonnes à quelques dizaines de tonnes de minerai pouvaient alimenter une activité sidérurgique sur quelques décennies.

Du point de vue métallurgique, la qualité d'un minerai dépend avant tout de sa teneur en métal, mais également de la nature et de la concentration des autres éléments présents. Ceux-ci peuvent faciliter ou entraver le processus métallurgique ou bien influencer la qualité du métal produit. Dans ce cas également, l'innovation technique permet de valoriser des ressources. Par exemple, les minerais phosphoreux ont été peu prisés en sidérurgie au XIX^e siècle car ils donnaient une fonte phosphoreuse de moindre qualité. Après l'invention d'un procédé de déphosphoration, ils sont brusquement devenus utilisables.

La reconnaissance des gisements exploités ne se fait donc pas uniquement à la lecture de la carte géologique, nombre de ces petits gisements locaux n'étant pas mentionnés. Il s'agit de reprendre la lecture des travaux de prospections géologiques réalisés dans les années passées, et de réaliser soit même des prospections sur des zones pouvant présenter un potentiel du fait de la géologie environnante.

2 - L'extraction minière

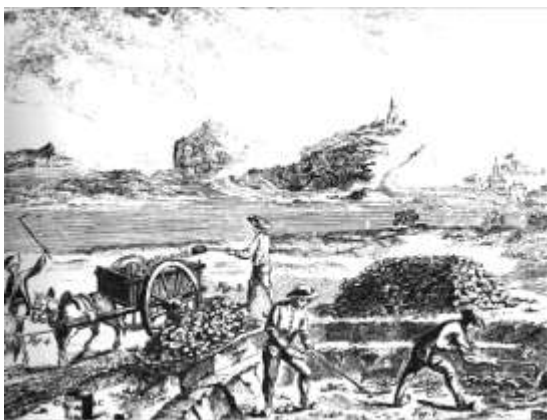


Fig. 1 : Ramassage des minerais en rognons dans les couches superficielles du sol (Diderot et d'Alembert 1751-1772)

L'extraction des ressources minérales remonte à la Préhistoire. Au cours des millénaires, les mineurs ont mis au point des techniques de plus en plus sophistiquées pour résoudre les principaux problèmes de la mine : La généralisation de l'outillage en fer est certainement un progrès décisif dans l'art des mines. Une certaine mécanisation apparaît dès l'époque romaine mais c'est aux XI^e-XII^e siècles puis plus largement aux XV^e-XVI^e siècles que la maîtrise de l'énergie hydraulique rend possible une généralisation de l'utilisation des machines. Un autre palier est atteint avec l'utilisation de la machine à vapeur, à partir du XVII^e siècle. L'introduction de la poudre, puis des autres explosifs, modifie complètement les techniques

d'abattage.

Le repérage et l'identification des gisements de minerais de fer ont sans doute été fondés sur les colorations des roches (principalement teintes rouges, jaunes ou brunes) et la densité des matériaux. Le plus souvent, l'exploitation est techniquement simple car beaucoup de minerais de fer sont superficiels et constitués de roches relativement meubles. Parfois, le simple ramassage de surface des champs ou dans le lit de rivière a pu suffire. Cette technique simple est mentionnée dans l'Encyclopédie de Diderot et d'Alembert (1751-1772), ce qui montre qu'elle a perduré longtemps (figure 1).

Dans les gisements affleurants ou situés à faible profondeur, les mineurs ont pu creuser également de simples excavations à ciel ouvert : les minières, parfois allongées en tranchées. Elles peuvent avoir des dimensions de quelques mètres à quelques centaines de mètres. Les déblais sont rejetés en périphérie (haldes). Les minières sont souvent juxtaposées formant un paysage chaotique de bosses et de fosses pouvant couvrir plusieurs km². La datation de ce genre de vestiges est difficile, car cette forme d'exploitation a sans doute été utilisée à toutes les époques.

Pour atteindre des couches plus profondes (minerais en couche ou remplissage karstique), des puits et des galeries ont dû être creusés et il a fallu mettre au point des techniques appropriées pour différentes tâches : il faut assurer l'abattage de la roche (outils, utilisation du feu, etc.), le soutènement des galeries (boisage, muraillement, etc.), l'aération (puits d'aération, faux plafonds, ventilation artificielle, etc.), le drainage (galerie d'exhaure, système de pompage, etc.) et le transport vertical ou horizontal des stériles et du minerai (treuils, voie de roulage, etc.). Ces techniques minières sont connues depuis la protohistoire pour les minerais non ferreux. Il faut attendre le Moyen Âge pour en avoir de réelles preuves en sidérurgie.

En Bretagne assez peu de travaux souterrains sont véritablement attestés. On pourra citer les mines de Glenac, mais elles sont d'exploitation relativement récente. L'exploitation des minerais de fer semble s'être faite en très grande majorité sous la forme de minières à ciel ouvert. Leurs tailles sont extrêmement variables, allant de la petite fosse de deux ou trois mètres de côtés à des excavations de plusieurs kilomètres de long comme c'est le cas dans la forêt de Paimpont. Une grande quantité de ces travaux anciens ont été répertoriés. Pour beaucoup, ceux-ci l'ont été par les géologues des XIX^e et XX^e siècles (par exemple, Chauris et Garreau 1990). Depuis, comme l'indique J.C. Meuret (Meuret 1989) pour le sud-est de l'Ille-et-Vilaine, ces excavations ont été remblayées et les terrains reconquis pour l'agriculture. Seules les minières situées en forêt ont été conservées. Comme le dit si bien cet auteur : « les forêts sont des conservatoires archéologiques ». Enfin, certaines zones géographiques présentent des nodules de minerai à l'affleurement en si grand nombre, que des travaux d'excavation ne sont pas nécessaires, notamment pour les périodes les plus anciennes. Deux exemples reconnus il y a peu : dans certains champs de la commune de Tourc'h ou de Moréac, on marche littéralement sur les fragments de minerai.

3 - Le traitement minéralurgique des minerais

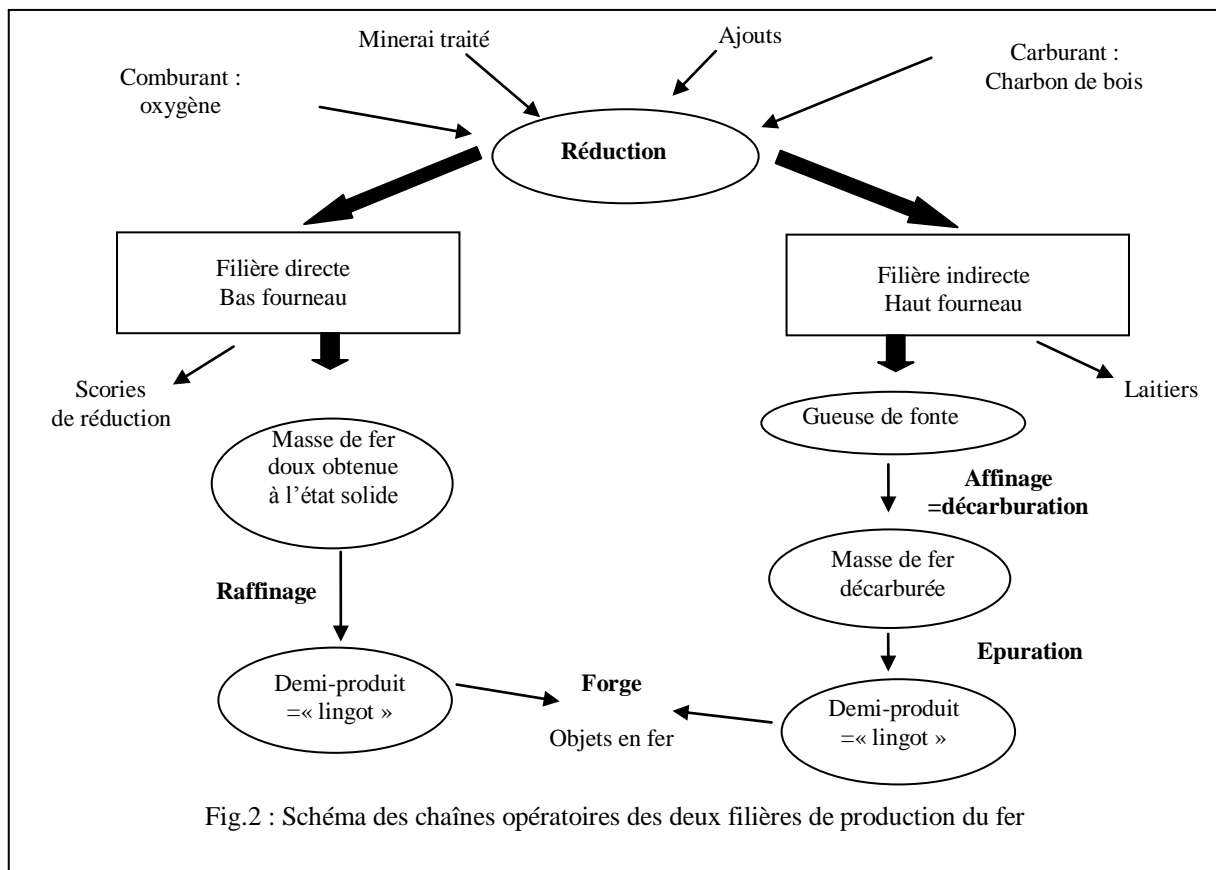
Entre la mine et le fourneau, dans la plupart des cas, le minerai doit subir différents traitements qui ont pour but d'enrichir sa teneur ou d'améliorer ses qualités, et également de le calibrer pour son enfournement. Le tri commence dès l'abattage. Le minerai extrait est déjà plus ou moins différent du minerai géologique. C'est la technique la plus simple pour séparer les parties riches en fer de celles qui sont plus pauvres. Pour enrichir un minerai constitué par des concrétions ferrugineuses prises dans une gangue meuble de sable ou d'argile, le lavage est très efficace. Pour un petit volume de minerai, une simple auge remplie d'eau dans laquelle on agite un panier contenant le minerai permet d'obtenir une bonne séparation au prix d'un

effort minime. Lorsque les quantités traitées deviennent plus importantes, on aménage des bassins alimentés en eau courante.

Pour préparer le minerai, on peut aussi recourir à des traitements thermiques simples. A des températures de quelques centaines de degrés, en atmosphère oxydante, les minéraux qui contiennent le métal exploité subissent déjà des transformations. Lors du chauffage, le soufre, le dioxyde de carbone et l'eau sont partiellement évacués sous forme de gaz et le métal se combine avec l'oxygène de l'air pour former des oxydes. La teneur globale du minerai traité de cette manière augmente. Mais, l'effet principal est une fracturation microscopique des grains de roche. D'une part, en rendant le minerai friable, cet éclatement facilite une opération ultérieure de concassage. D'autre part, cette fracturation favorise la pénétration du gaz réducteur pendant le processus métallurgique. Les effets sont donc complexes et variables en fonction de la nature du minerai de départ. On utilise souvent le terme de "grillage" pour désigner tous les traitements thermiques préliminaires des minerais métalliques. Ceci se fait généralement dans des fosses peu profondes creusées à même la terre.

4 - La réduction

Il s'agit de la séquence majeure de la transformation de la matière minérale en fer métal. En France, nous mettons derrière ce terme la notion de perte progressive d'oxygène des oxydes de fer du minerai. Le mot anglais "**smelting**", qui implique l'idée de fusion (melting) mais avec également l'idée de transformation de la matière, est généralement traduit par "réduction".



Arrivé à ce niveau de la chaîne opératoire, il est nécessaire de faire la différence entre deux filières (utilisant des procédés techniques différents) qui se sont succédé dans le temps (figure 2) : la filière directe, puis la filière indirecte. La filière directe est exclusive en Europe durant la protohistoire, l'Antiquité et le Moyen Âge. La filière indirecte apparaît localement au XII^e siècle (exemple de la Suède) et se généralise au XVI^e siècle. Les renseignements obtenus sur la filière directe proviennent exclusivement de résultats archéologiques. Concernant la filière indirecte, des données bibliographiques sont disponibles, que ce soit des archives de fonderies ou des traités métallurgiques.

Dans l'Ouest, le passage entre le bas fourneau et le haut fourneau se fait aux XV^e - XVI^e siècles. En effet, les ateliers de la forêt de Paimpont datés du XV^e siècle ont encore l'usage de bas fourneaux (Vivet 2009) et sont renommés pour la fabrication des armes telles que l'arbalète ou les armes d'haste. Par contre ils n'apparaissent plus dans les comptes des villes au XVI^e siècle, alors que celles-ci s'équipent en boulets à canon en fonte (nécessité d'un fonctionnement à l'hydraulique pour couler la fonte). Par exemple, de premiers hauts fourneaux se sont installés dans les Pays de la Loire au début du XVI^e siècle, voire à la fin du XV^e siècle (Herbaut 2009). L'état des connaissances pour le reste de la péninsule est encore plus ténu. Ce que l'on sait, c'est que le passage ne s'est pas fait de manière brutale, des ateliers avec bas fourneaux ont côtoyé pendant plusieurs décennies sans doute, voire pendant un siècle des installations plus modernes basées sur l'utilisation de l'énergie hydraulique. Avec le XVII^e siècle, ce ne sont plus que des hauts fourneaux qui sont installés sur le territoire semble-t-il. De nombreuses forges sont fondées à cette époque. La sidérurgie bretonne a conquis d'un coup une modernité qui la projette parmi les premiers rangs de la nation (Andrieux 1988).

Le fonctionnement du bas fourneau : la filière directe

Il s'agit donc de la première technique de réduction mise en place en Europe pour réduire les minerais de fer et obtenir une masse de métal.

Après un préchauffage du four (le four est donc rempli de charbon), on introduit par le haut, alternativement, des couches de minerais et des couches de charbon de bois. L'opération va se dérouler pendant plusieurs heures, parfois pendant plusieurs jours (pour les très grands fours à ventilation naturelle), jusqu'à ce que le four se mette à « gronder », à « ronfler », la cuve du four sera pleine de métal et de scorie. Ceci marque la fin de l'opération.

Les oxydes de fer du minerai, en partie, perdent peu à peu leur oxygène et se transforment en fer métallique : ceci se passe en phase solide grâce à la diffusion des gaz réducteurs dans le minerai poreux. Le carbone se charge en oxygène tandis qu'une partie des oxydes de fer perdent progressivement le leur. La diffusion des gaz réducteurs est facilitée par la présence des charbons de bois qui fournit en même temps la chaleur et le carbone nécessaire à l'installation d'une atmosphère très réductrice, ceci dans l'ensemble de la colonne du four ce qui permet une certaine aération de la charge. Les réactions démarrent à basses températures, en haut de colonne, par une déshydratation et une décarbonatation (s'il y a de l'eau et des carbonates dans le minerai).



Lorsque le minerai atteint un certain seuil de température (variable d'un minerai à un autre), les autres minéraux de la gangue se ramollissent et se combinent avec le reste des oxydes de fer (début de la fusion) pour former

Figure 3 : Masses brutes de métal produites en bas fourneau. A gauche, une reconstitution ; à droite : un exemple archéologique (masse de l'Âge du fer trouvée dans une cave à Bourges)

une pâte, la scorie. Dans les bas fourneaux, ce phénomène marque la fin du processus de réduction : aux températures de fonctionnement de ces fours, les silicates ferrifères formant la scorie ne pourront plus être réduits. Le fer ainsi piégé sera perdu. La scorie formée sera plus ou moins liquide et pourra s'écouler soit à l'intérieur, soit à l'extérieur du four, selon le type de four employé.

Les parcelles de métal, à ce moment elles aussi ramollies, s'agglutinent au niveau de l'arrivée d'air (face aux tuyères) en formant une masse (figure 3). La température moyenne de fusion de ce type de scorie est de l'ordre de 1150-1250°C. L'écoulement de la scorie permet aux différentes parties de la masse métallique de se rapprocher et de se souder. Il est donc nécessaire d'obtenir une scorie assez liquide. Il peut être nécessaire pour cela de perdre une quantité non négligeable de fer : le fer s'associe avec la silice (qui, elle, fond à très haute température) pour former un silicate de fer fondant à température modérée (température largement atteinte par ces fours).

Certains éléments chimiques peuvent prendre la place du fer lors de la formation de la scorie, c'est typiquement le cas du calcium. Ce calcium peut se trouver directement dans le minerai (c'est le cas du minerai sédimentaire marin qu'est la Minette de Lorraine). Il peut être ajouté également. Ceci est extrêmement rare en bas fourneau. Un seul cas est actuellement reconnu (Mahé-Le Carlier et al. 1998). Il s'agit d'un atelier de réduction gallo-romain situé dans le Berry. Il y aura alors moins de fer qui passera dans la scorie qui sera alors plus « légère » et présentera alors un aspect moins métallique, plus vitreux ou plus pierreux. Le calcium ajouté n'est pas un fondant, car pour que ce type de scorie soit aussi fluide que les scories « denses » classiques, il est nécessaire que la température du four soit plus élevée (autour de 1450°C). Ceci peut impliquer un four plus grand et/ou une ventilation plus puissante. L'intérêt de cet ajout, c'est qu'il y a moins de fer qui passe dans la scorie, et donc plus de fer qui reste dans la masse brute.

Si les minerais arrivent trop tôt en fusion (la gangue du minerai fond), la réduction des oxydes de fer n'a pratiquement pas lieu. Il faut donc conduire la réduction de telle façon que la charge minérale reste suffisamment longtemps au contact des agents réducteurs (le gaz formé suite à la combustion du charbon). Le forgeron peut agir sur un certain nombre de paramètres qui sont fonction des techniques mises en œuvre : préchauffage du four, calibrage des éléments de charge, porosité des matériaux, rythme de la ventilation, morphologie de la cuve, rapport entre quantité de minerai et quantité de charge de bois...

Le fonctionnement du haut fourneau : la filière indirecte

Dans cette filière, il s'agit de fabriquer du fer métallique très carburé (fonte), en phase liquide, dans un haut fourneau. L'ensemble de la charge fond : il y a deux types de coulée, d'une part la fonte (figure 4), et d'autre part la scorie liquide autrement appelée « laitier ». Ils pourront être séparés grâce à la différence de densité (la fonte plus lourde reste en partie inférieure).

Dans la partie haute du haut fourneau, les oxydes de fer perdent leur oxygène et se transforment peu à peu en fer métallique, comme c'est le cas dans les bas fourneaux. Du fait de la plus grande hauteur du four (temps de résidence plus important), de la plus forte température atteinte, du changement de composition chimique globale de la charge (grâce à des ajouts, essentiellement de la chaux appelée « castine », voire de la silice appelée « erbue »), le processus de



Figure 4 : Gueuse de fonte trouvée à l'avant du haut fourneau de Plouasne

séparation en phase solide est beaucoup plus important que dans le bas fourneau. De plus, d'autres processus doivent avoir lieu à de telles températures, telle que la démixtion du fer et de la scorie en phase liquide : le fer (sous forme d'oxyde de fer FeO) qui s'est tout de même associé à la scorie continue à être réduit au sein de la scorie même : les atomes de fer métallique se rassemblent alors pour former des gouttes métalliques de plus en plus grosses. Il faut prendre en compte aussi un autre processus physico-chimique qui a lieu dans ce type de four : du fait de la plus haute température, la diffusion du carbone dans le fer se fait beaucoup plus rapidement, ce fer carburé fond à des températures plus faibles. Le fer passe donc à l'état liquide dans le four (ce qui lui permet de se carburer encore plus).

Les premiers hauts fourneaux ne sont pas connus. Au fur et à mesure, des améliorations techniques ont été apportées aussi bien dans la forme que dans la hauteur, dans les techniques de soufflerie et dans la nature des combustibles (d'abord charbon de bois puis coke) ou la nature du mélange « minerai + ajouts ». C'est une période très peu connue archéologiquement.

L'enfournement du combustible et du minerai se fait de manière similaire au bas fourneau en les alternant en couches depuis le gueulard. La particularité de ce four vient aussi de la durée de fonctionnement. Ce sont des fours qui fonctionnent en continu sur plusieurs mois, lors de campagnes : on enfourne d'un côté (en haut), on fait couler de l'autre (en bas). Le four est arrêté soit pour cause d'accident, soit par fin de campagne (manque de combustible, de minerai, d'eau dans les rivières pour faire tourner les roues qui actionnent les soufflets). Quand le four est arrêté, des réparations peuvent être faites à l'intérieur de la cuve.

C'est grâce à l'étude des déchets retrouvés sur quelques ateliers très anciens que l'on peut suivre l'évolution et l'amélioration des procédés de réduction dans ces types de structure. Dans les premiers hauts fourneaux, une partie du fer est encore perdue dans la scorie (le laitier peut présenter une teneur en fer jusqu'à 15% poids FeO) et dans les billes emprisonnées dans ce laitier : ce type de laitier peut être qualifié de laitier à grenaille. On se rend compte qu'assez rapidement (aux XVII^e-XVIII^e siècles), le laitier est beaucoup plus homogène (il n'y a quasiment plus de billes métalliques visibles à l'œil nu) et la teneur de la scorie chute énormément jusqu'aux environs de 1% poids. Ils se présentent sous deux aspects : soit des laitiers vitreux de diverses couleurs (noir, violet foncé, vert bouteille, vert clair, bleu foncé ou bleu ciel), soit des laitiers cristallisés (aspect pierreux gris, blanc, brun).

Évolution des fours au cours des temps dans l'Ouest

Depuis l'apparition de la métallurgie du fer jusqu'aux derniers hauts fourneaux, la forme et la taille des fours ont très fortement évolué, les techniques de souffleries également. Nous nous basons forcément sur les renseignements des fouilles réalisées jusqu'à maintenant. Ces observations peuvent très bien ne pas correspondre à la totalité des sites de la péninsule, puisque des zones géographiques entières ne sont pas documentées.

Cependant, des caractéristiques techniques peuvent être définies pour chaque période, et ceci semble correspondre à l'ensemble du territoire. Dans les premiers temps, ce sont des fours dits « à scories piégées » qui sont utilisés (figure 5). Le principe est le suivant : une fosse est creusée dans le sol et une cuve est construite en élévation au-dessus. Des arrivées d'air sont prévues à la base de la cuve, un peu au dessus du niveau du sol. Au cours du



Figure 5 : Schéma d'un four à scorie piégée (tiré de Serneels 1998)

fonctionnement, le four est chargé par le haut en alternant les couches de charbon de bois et de minerai. Le charbon en se consumant dans le four permet à la charge de minerai de descendre dans la cuve. En se rapprochant des zones les plus chaudes, il se transforme doucement mais partiellement en métal. La gangue du minerai et une partie des oxydes de fer, en se rapprochant des arrivées d'air, fondent et se transforment en scorie, qui s'écoule doucement dans la fosse la remplissant totalement ou partiellement.

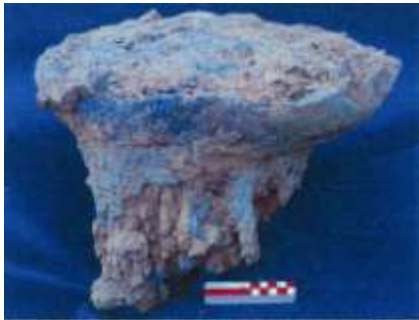


Figure 6 : Scorie piégée provenant du site du Bois Jacob (tiré de Vivet 2007)

diamètre, la fosse quant à elle semble avoir un diamètre d'environ 25 cm. Le second Âge du fer est mieux documenté, du fait aussi que le nombre d'ateliers de réduction est plus important à cette période est que l'on a plus de chance de les trouver. Pour cette période, le diamètre des fours devient bien plus important, dépassant régulièrement le mètre. Ils fournissent des scories piégées de très gros calibre que l'on retrouve très régulièrement dans les talus des champs, les agriculteurs les ayant évacués. Ils ont été reconnus dans le Nord de l'Ille-et-Vilaine (Vivet 1997) et en forêt de Paimpont (Vivet 2007) (figure 7). Des



Figure 7 : Four du second Âge du fer à scories piégées de l'étang du Perray (Plélan le Grand en forêt de Paimpont) (tiré d'Andrieux et al.)

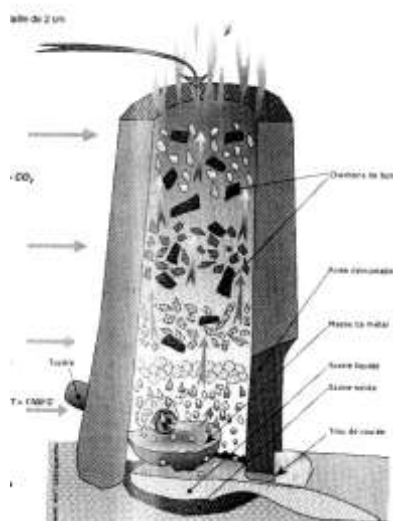


Figure 8 : Schéma d'un four à scorie écoulée (DAO Paul Merluzzo)

scories piégées de très grosses dimensions ont également été repérées dans le Finistère (aucune publication disponible actuellement). Un four de ce type a été fouillé à Quimper (Le Bihan et Galliou 1974). Des scories piégées ont également été repérées sur la commune de Moréac. Il n'y a aucune raison que là où le minerai est présent en quantité suffisante, des fours de ce type ne soient pas repérés. C'est une question de prospection. Actuellement, il n'est pas possible de réellement définir le type de ventilation, naturel ou forcé, de ces fours. L'évidence serait la ventilation naturelle mais aucune preuve ne vient étayer cette hypothèse.

A la fin de l'Âge du fer, une autre technique apparaît bien que cela ne change pas fondamentalement le principe de réduction du minerai. Les scories, à la place d'aller se concentrer dans une fosse sous le four, sont évacuées par

écoulement en dehors du four. Ces fours sont appelés « four à scories écoulées » (figure 8). Il serait aisé de penser que cette évolution technologique soit liée à l'arrivée des Romains. Cependant, il semblerait bien que des fours à scories écoulées aient fonctionné avant la conquête (de telles scories ont été retrouvées sur le site de Paule). De même, cette transition n'a pas été brutale : des fours à scories piégées ont continué à fonctionner alors que l'autre



Figure 9 : Four de Creac'h Gwen
(tiré de Menez et al. 1988)

technique était déjà apparue, sur l'exemple de l'atelier de Couédouan dans la forêt de Paimpont (Vivet 2007). Les Romains semblent néanmoins avoir apporté des améliorations, car à l'instar des autres régions françaises, les scories produites sur ces ateliers sont nettement moins riches en fer indiquant un rendement plus élevé des fours. La production de ces ateliers est également importante, les ferriers composés par l'accumulation des scories sont en général imposants, tels ceux présents à l'est du Massif armoricain (Sarreste 2008).

La période du Haut Moyen Âge est très mal documentée.

Actuellement, un seul four (site à Quimper) a été fouillé et publié (Menez et al. 1988) (figure 9). Il se différencie des fours romains par sa forme quadrangulaire alors que les précédents présentent une cuve arrondie. Cela montre cependant, que la production du fer a continué dans la péninsule à cette période. Mais il semblerait que ces ateliers aient eu une production nettement moindre que ceux de la période précédente. Pour le Moyen Âge central, aucun site d'atelier n'a été fouillé, mais les scories trouvées correspondent à des scories de bas fourneaux et il est fort probable que les fours de cette époque n'aient subi qu'une faible évolution par rapport à la période précédente. Aucun site n'a été repéré à l'Ouest. Par contre, dans le sud de l'Ille-et-Vilaine, dans la Mayenne et la Loire-Atlantique, ce seraient des monceaux de scories qui seraient encore présents dans les forêts, à l'image de la forêt de Domnaiche (Meuret 2010), sans compter les scories qui ont été évacuées aux siècles précédents pour le fonctionnement des hauts fourneaux (Davy 1913). C'est la documentation historique, notamment les cartulaires, qui permettent de faire le lien entre les vestiges archéologiques et la période concernée. Une fois encore, l'absence de sites à l'Ouest ne semble être que le reflet du manque de prospection thématique. Dans certaines forêts, telle la forêt de Loudéac, des amas de scories assez importantes seraient encore présentes. Devant l'absence de description de ces scories, ces



Figure 10 : Four du Vert Pignon (tiré de Vivet 2009)

Devant l'absence de description de ces scories, ces

sites pourraient correspondre à cette époque, à moins qu'ils ne correspondent à la période suivante.

Au Bas Moyen Âge, la production semble très importante. Cette impression vient des amas de scories imposants encore présents dans certaines forêts. Cette production est parfaitement identifiable, les scories écoulées devenant très bulleuses. Elles sont appelées « scories spongieuses ». Les amas de cette époque sont reconnaissables dans plusieurs régions françaises. On aurait pu imaginer qu'à la veille du passage au haut fourneau et face à la demande accrue en fer, les fours seraient devenus de taille plus imposante encore. Les fouilles menées ces dernières années ont démontré le contraire (Vivet 2009, Vivet et Girault 2009). Ce sont de petits fours à deux compartiments (figure 10) comprenant un compartiment rond de faible diamètre (aux alentours de 30 cm) avec une paroi verticale dans laquelle est percée l'arrivée d'air, et une paroi s'évasant sur l'extérieur. Cela donne un profil de four ressemblant aux fours à la catalane, fours qui ont perduré dans les Pyrénées jusqu'au XIX^e siècle. La scorie produite s'écoule dans le second compartiment trapézoïdal. Il semblerait qu'il s'agisse de petits fours dont la fabrication est aisée et rapide. Les scories sont nettement moins riches en fer que les scories de bas fourneaux classiques (même celles produites à la période gallo-romaine) impliquant un fort rendement qui ne peut être obtenu que par une température plus importante (l'analyse des scories de ce type ne montre aucune évidence d'ajouts permettant d'améliorer le rendement). Les fours ont donc dû subir des dommages importants. Il était alors facile de les détruire et d'en reconstruire rapidement. Les textes mentionnent des productions de fer de cette époque à l'Ouest, dans la forêt de Loudéac notamment (Andrieux 1988).

La forme et la taille des premiers hauts fourneaux ne sont actuellement pas connues. Ce sont essentiellement des mentions historiques qui localisent ces premières installations. Pour un grand nombre, ces fours ne seront jamais retrouvés, se situant alors sous les fondations des hauts fourneaux suivants. Pour certains, cependant, les installations ont été déplacées et le site a été abandonné tel quel. C'est le cas notamment pour le site du Pas du Houx dans la forêt de Paimpont (Vivet 2009). Les installations suivantes ont été déplacées sur le site actuel des forges. De ces hauts fourneaux précoces, beaucoup disparaissent des textes

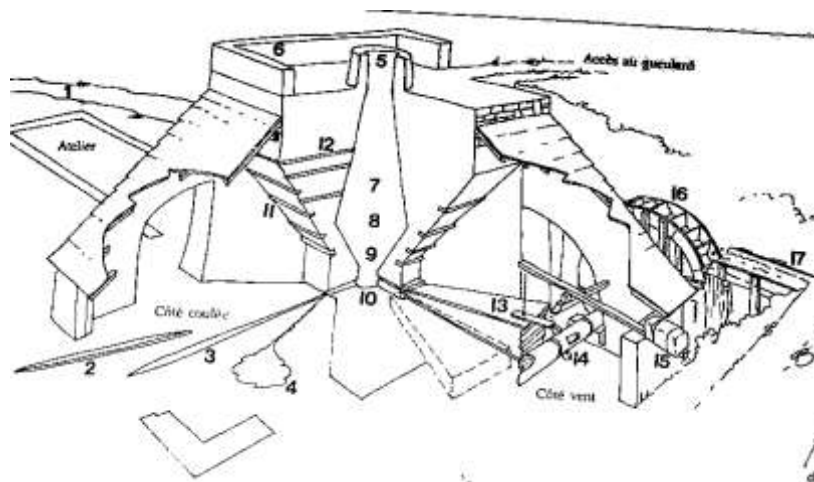


Figure 11 : Schéma d'un haut fourneau du XVIII^e siècle (tiré d'Andrieux 1988)

(livres de compte des villes par exemple) pour ne plus jamais reparaître laissant penser que ces installations ont totalement périclité. Ceci serait lié à la tourmente qui s'abat sur la région dans la seconde moitié du XVI^e siècle (Andrieux 1988).

Les hauts fourneaux qui s'installent dans les périodes suivantes, sont beaucoup mieux documentés (Andrieux

1988), soit par des textes existants, soit par des relevés d'installations encore visibles (figure 11). Ces fours en bâtis de pierre présentent une hauteur d'environ 5 m, voire un peu plus, et

une largeur externe de même valeur. Leur évolution technique au cours du temps ne semble pas être importante, sinon une taille plus importante (les derniers hauts fourneaux de Paimpont font environ 10 m de haut). L'évolution principale de ces installations sidérurgiques vient de l'étape de l'affinage de la fonte (on passe de l'affinage en foyer ouvert à l'emploi de convertisseurs) et du traitement du métal produit (inventions de machines outils permettant de fabriquer des tôles, des barres ou des fils).

5 - La préparation du métal

Le raffinage de la masse brute en filière directe

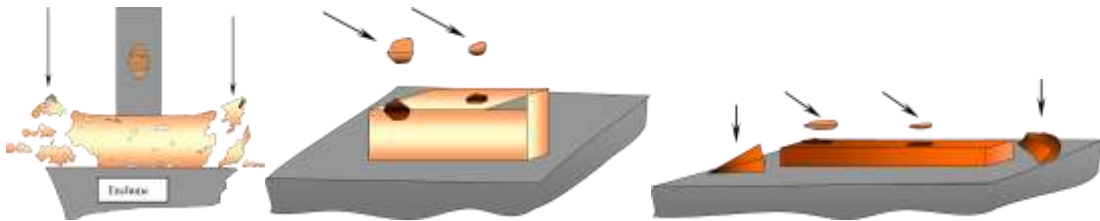


Figure 12 : Schéma théorique du raffinage de la masse brute (DAO : Paul Merluzzo).

Le métal produit par cette filière est une masse de fer doux (non carburé) plus ou moins compacte et contenant plus ou moins d'inclusions. Il s'agit donc de l'amener progressivement à l'état de matière forgeable, elle-même transformée ensuite en objets manufacturés.

Le raffinage consiste donc en un martelage à chaud ou cinglage de cette masse sur une enclume. On ne sait pas exactement dans quelles conditions ce travail est effectué, et s'il est toujours nécessaire.

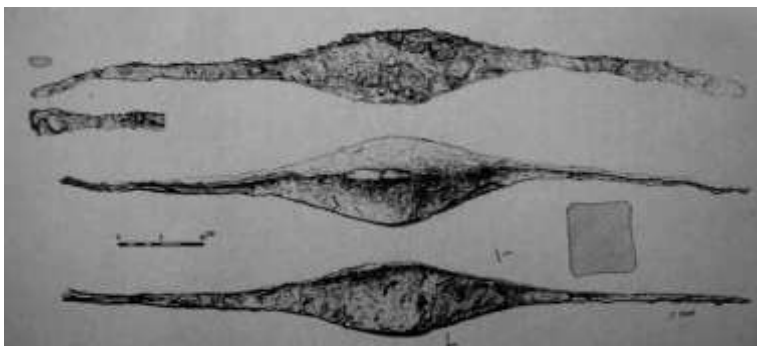


Figure 13 : Lingots de Saint-Connan (tiré de Giot 1964)

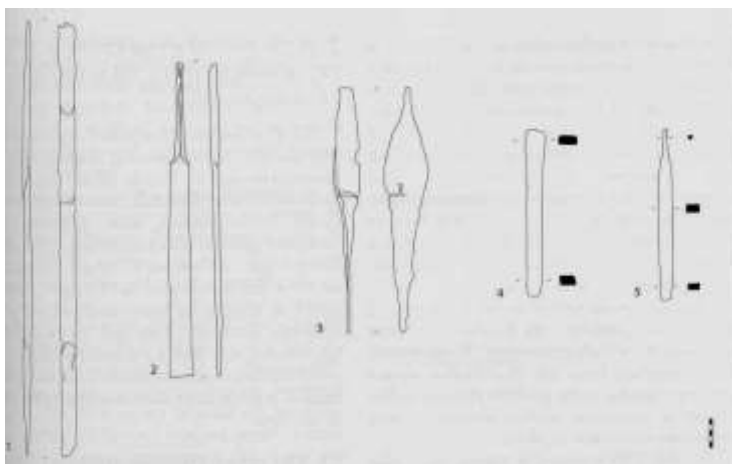


Figure 14 : Exemples de barres en fer.
Les « *currency bars* » correspondent au n°2.

Certaines masses peuvent sortir du four de réduction sous un aspect très compact et contenant peu d'inclusions ne nécessitant qu'un travail limité. Le travail de la masse peut se faire directement à la sortie du four de réduction et / ou après réchauffage dans un foyer ou four spécifique.

Dans ce dernier cas, un premier martelage à froid débarrasse la masse des scories périphériques (figure 12) voire des parties métalliques trop filamenteuses pour pouvoir ressouder par la suite. Le réchauffage permet de fluidifier les scories de manière à ce qu'elles coulent. Le métal peut alors

se regrouper en réduisant les vides et en se ressoudant sur lui-même. Durant ce travail, la carburation du métal peut se renforcer (phénomène de cémentation ou diffusion du carbone dans le fer).

Le produit issu de l'épuration est un demi-produit (car produit non fini) plus ou moins bien mis en forme et de formes variables : fragments de masse sommairement épurés, barres, feuilles repliées, bipyramides effilées, *currency bars*. A l'instar du reste du continent, des demi-produits ont été découverts dans l'Ouest. On citera le dépôt de « lingots » bipyramidaux de Saint-Connan (Giot 1964) (figure 13) et le dépôt de « *currency bars* » à Visseiche (Meuret 2006) (figure 14).

La décarburation de la fonte en filière indirecte ou étape d'affinage

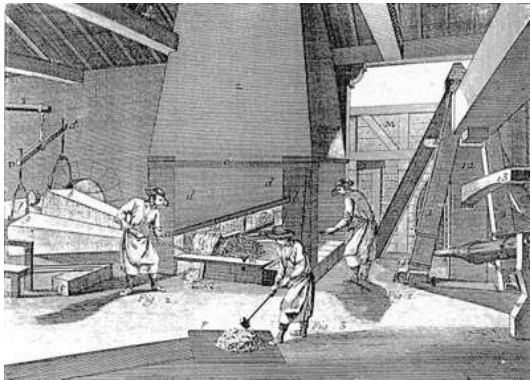


Figure 15 : Épuration de la gueuse de fonte, le métal repasse sous forme d'une grosse masse qui ressemble à une masse brute de bas fourneau.

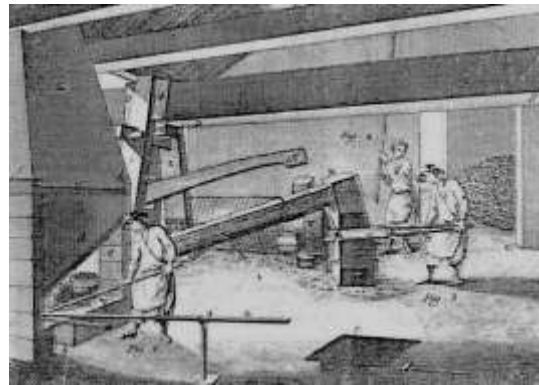


Figure 16 : Cette dernière doit être ensuite compactée à l'aide d'un marteau hydraulique (tiré de Diderot et d'Alembert).

Les méthodes de décarburation dans la filière indirecte ont nettement évolué dans le temps depuis l'apparition des premiers hauts fourneaux. Il reste que le métal passe toujours par un état liquide ou pâteux à ce stade. Les premières méthodes ont consisté à remettre la gueuse de fonte sur un foyer ouvert (figure 15). En même temps que le métal fond, il se décarbure sous le courant d'air. Par la suite, ont été mis au point des fours à réverbère (four fermé dont le plafond réverbère la chaleur, le fer se trouve dans le four en même temps que le combustible), puis des fours à puddler (le fer n'est plus en contact avec le combustible).

Le métal obtenu suite à cette opération est une masse de métal qui ressemble à une masse obtenue par un bas fourneau en filière directe. Il s'agit donc ensuite de compacter la masse obtenue (figure 16) pouvant contenir des charbons et des impuretés, afin de produire un demi-produit qui pourra être diffusé dans les forges d'élaboration ou servir presque tel quel, sur l'exemple des tirants de cathédrale.

6 - La forge

Cette phase est pratiquée par le forgeron sur l'enclume pour mettre en forme les objets de fer. Le matériau de départ peut être un lingot, une ébauche d'objet, ou un lopin issu du recyclage de plusieurs fragments métalliques.

Ce travail se fait dans un foyer ouvert dans lequel une ventilation peut être assurée sur le côté. Sur le plan archéologique, les ateliers de transformations et de forgeage sont moins bien connus que les ateliers de réduction. Cependant quelques-uns de l'Âge du fer ou de la période gallo-romaine ont été fouillés (Bocquet et al. 2004 ; Coulthard et al. 2005 ; Menez et

al. 2007). L'iconographie montre qu'il existe des foyers de « forge » dits « sur table » autour desquels les forgerons travaillent debout. C'est le type de foyer traditionnel en Europe moderne et contemporaine. On connaît assez peu l'organisation de l'atelier de forge pour les périodes anciennes pour lesquelles n'existent pas de source bibliographique. Les vestiges archéologiques sont souvent des foyers installés à même le sol (figure 17), généralement

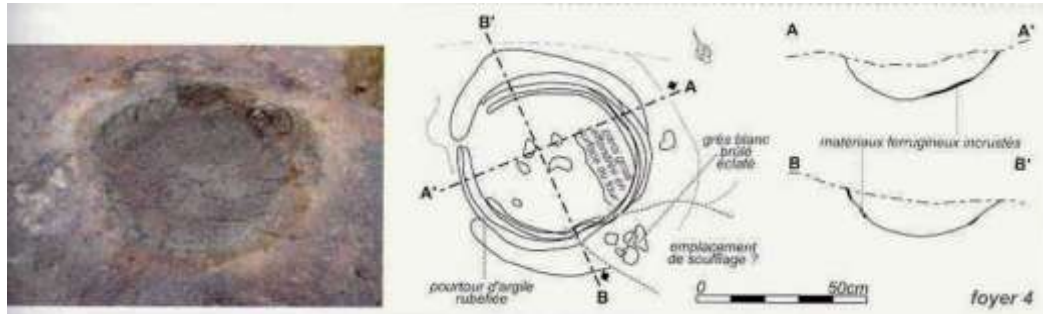


Figure 17 : Photo et schémas du foyer de forge de l'oppidum de Paule (tiré de Menez et al. 2007)

légèrement excavés, autour desquels le forgeron va travailler assis ou accroupi, comme on peut encore le voir dans certaines sociétés traditionnelles africaines ou asiatiques.

Le métal est mis à chauffer dans le foyer dans lequel se consume du charbon de bois. Mais en présence d'air, le fer chauffé a tendance à se retransformer en oxydes sur les parties extérieures. Pour l'éviter, car cela peut provoquer une très importante perte en métal, on jette des «ajouts» sur la surface de l'objet qui protègent de l'oxydation.

Les déchets les plus caractéristiques de cette étape sont les battitures : ce sont des croûtes qui se forment en surface de l'objet et qui seront éjectées au cours du martelage. Ces battitures se situent autour de l'enclume sur le sol de forge. Elles sont formées soit uniquement d'oxydes de fer issus de l'oxydation du métal, soit d'un mélange de l'ajout avec les oxydes de fer.

Ces croûtes peuvent tomber aussi au fond du foyer de forge, fondre complètement, et former une masse scorifiée moulant le fond du foyer de forge : ce sont des culots. A savoir, que le travail de l'étape précédente, le raffinage, produit également des déchets scorifiés en forme de culot. Leur aspect est plus hétérogène que les culots d'épuration et leur taille moins importante : ils peuvent être composés soit de scories grises denses, soit d'argilo sableux fondus, soit un mixte des deux. Attention, ces culots de forge sont parfois très difficilement différenciables des culots d'épuration, d'autant plus qu'il est possible que ces deux types d'opération puissent avoir lieu dans le même atelier.

Investigations paléométallurgiques

1 - La reconnaissance et la cartographie des sites

C'est par la présence des déchets, les scories, que les sites métallurgiques vont être repérés. Certains sites présentent des scories en amas, ce sont donc des élévations qui seront susceptibles d'être vues dans le paysage lors de prospections. C'est particulièrement vrai pour l'époque gallo-romaine ou pour les époques plus modernes avec le fonctionnement des hauts fourneaux. Ces amas vont correspondre à des scories de réduction qui se sont écoulées en dehors des fours, donc des fours ayant fonctionné depuis la fin de l'Âge du fer. Cependant, ce n'est pas toujours aussi facile, les amas peuvent être naturellement très petits. Ou alors, ils ont

été ré-exploités à la période moderne, notamment à la fin du XIX^e et au début du XX^e siècle en tant que minerai entrant dans la charge des hauts fourneaux, en Lorraine en particulier, mais aussi à Trignac (Davy 1913). D'autres scories, notamment les laitiers de hauts fourneaux, ont servi, et servent encore, pour renforcer les chemins creux. Troisième cas possible, les amas de scories ont pu être dispersés dans les champs lors des travaux agricoles plus ou moins récents. Les sites de production de métal protohistoriques avec utilisation de fours à scories piégées conduisent à la formation de scories plus imposantes mais le nombre d'individus est cependant limité. Celles-ci restent souvent fichées en terre sous la couche végétale, dans les champs et encore plus dans les bois. Cependant, les charrues modernes les déterrent régulièrement. Elles sont alors repoussées dans les talus et abandonnées.

En ce qui concerne les ateliers de post-réduction, il est extrêmement rare de les trouver en prospection. Quelques uns peuvent être vus au sein de quelques enclos, mais cela reste anecdotique. Les sites actuellement connus et étudiés de post-réduction proviennent des décapages extensifs des fouilles préventives.

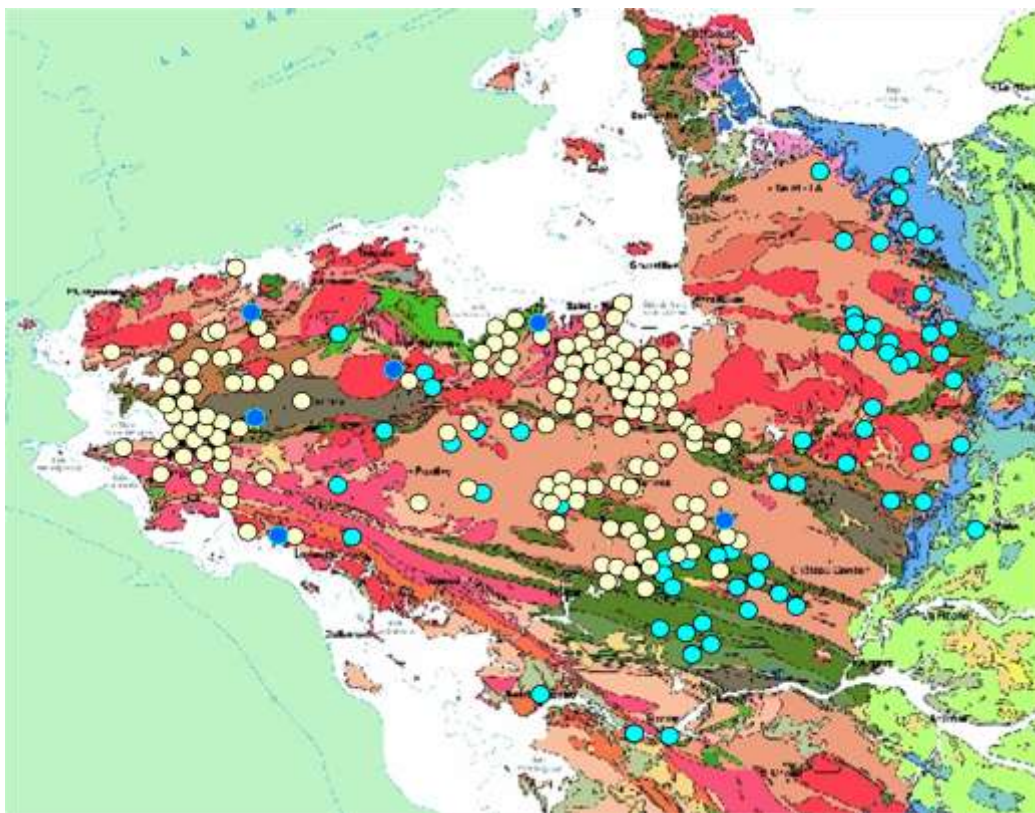


Figure 18 : Carte de répartition des sites paléosidéurgiques répertoriés sur le Massif armoricain (état de la base en 2008, tiré de Jouanet 2009). Points blancs : sites à scories denses (piégées et écoulées) ; en bleu clair : forges établies avant 1800 (d'après Guigues et Devismes 1989) ; en bleu foncé : dépôts de lingots de fer.

Pour orienter la prospection, il est possible d'utiliser plusieurs types de données. Certains chercheurs des XVIII^e et XIX^e siècles ont mentionné des sites à scories dans leurs travaux (Davy 1913) (Marsille 1923). Ils avaient bien conscience de la nature de leurs découvertes, c'est-à-dire la reconnaissance de sites de production du fer, mais les archéologues de l'époque n'ont pas jugé bon de pousser plus loin les investigations, les fouilles des sites préhistoriques ou antiques les intéressant beaucoup plus. Cependant, ces

quelques mentions nous aident actuellement à retrouver ces sites oubliés. Autre voie de recherche : la toponymie. De tout temps, le nom donné aux parcelles et lieux dits correspondent à l'environnement proche : nombre de parcelles sont nommées, forge, terres noires, ferrières pour le pays gallo ou des toponymes en -houarn pour le pays bretonnant. Enfin, les photographies aériennes peuvent également apporter des données car certains sites de production se présentent sous forme de tâches noires tandis que d'autres sont rouges. Cependant, nombres de sites ne sont pas visibles.

L'ensemble des sites métallurgiques repérés est rassemblé dans une base de données. Bien que basée à l'Université de Rennes 1, au Laboratoire Archéosciences, elle est consultable par toute personne qui souhaiterait obtenir des renseignements sur la métallurgie d'une zone sur le Massif armoricain. Cette base a pour but de collecter et de centraliser les informations concernant les métallurgies anciennes sur ce massif. Actuellement, beaucoup de données existent mais sont dispersées dans différents ouvrages et publications.

Cette cartographie a bénéficié du travail de nombreux bénévoles, notamment les membres du CeRAA qui ont prospecté durant plusieurs années dans le Nord de l'Ille-et-Vilaine et l'Est des Côtes d'Armor. C'est près de 200 sites de production du fer, d'époques protohistorique et gallo-romaine principalement, qui ont été repérés, et pour certains fouillés (Vivet 2001). La forêt de Paimpont a déjà été assez intensivement prospectée, mais du fait du couvert végétal important qui masque les ateliers, plusieurs sites continuent d'être découverts chaque année. Ce sont plus de 250 sites, de l'Âge du fer en majorité, qui ont été ainsi découverts. Le sud-est de l'Ille-et-Vilaine a bénéficié des prospections de J.C. Meuret (Meuret 1989). Cette région riche en minerai de fer a également permis des études historiques à partir de sources écrites. Ainsi, un grand nombre de hauts fourneaux anciens ont été répertoriés (Belhoste et Maheux 1984). Cette zone se prolonge en Loire-Atlantique, en Maine-et-Loire, en Mayenne et dans la Sarthe. Un grand nombre de sites ont été repérés grâce aux travaux de M. Hubert (Hubert 2005) et Florian Sarreste (Sarreste 2008). Nombre de ces sites n'ont pas encore été entrés dans cette base, faute de temps. Ce sera fait dans les mois ou les années à venir. Dans l'Ouest, une prospection avait débuté dans le Finistère et de nombreuses scories protohistoriques ont été trouvées dans le bassin du Porzay et dans le bassin de Châteaulin. Ce travail a été arrêté et actuellement aucune publication n'a été produite. Un travail de thèse est en cours dans le Centre-Ouest Bretagne faisant suite à des travaux de master (Jouanet 2008, 2009), et certaines zones d'ombre commencent à être comblées, montrant ainsi que sur la carte actuelle (figure 18), le manque de sites de production est bien souvent lié à un manque de prospection thématique sur la métallurgie. Enfin, un travail de prospection est en cours dans le Sud Finistère, au nord de Concarneau, centré sur la commune de Tourc'h, par D. Duvollet qui repère une quantité incroyable de sites de production du fer protohistoriques, gallo-romains et sans doute médiévaux, alors que très peu de sites archéologiques étaient référencés jusqu'alors. D'autres mentions, plus ponctuelles sur l'ensemble du massif, viennent compléter doucement cette cartographie.

2 - La description macroscopique des scories : une étape importante pour la typochronologie de ces déchets et la datation des sites.

Après avoir repéré le site, il est important de noter s'il y a un ou plusieurs types de scories présents, et si elles ont des répartitions spatiales différentes. Pour noter ces différences, il faut alors savoir reconnaître les types de scories, de pouvoir les rattacher à une étape de la chaîne opératoire, et si possible à une période chronologique. Un premier travail de typologie avait été réalisé, basé sur l'observation d'un grand nombre de sites en France (Mahé-Le Carlier et Ploquin 1999). Cependant, c'est une étude régionale fine qui donne les meilleurs résultats.

On regardera donc les échantillons une fois lavés, de tous les côtés, afin de voir s'ils sont orientables. Il sera alors possible de définir une surface supérieure, une surface inférieure et des surfaces latérales. Avant de prendre les mesures, il est important de noter s'ils sont entiers ou s'il s'agit de fragments. Il faut estimer aussi la densité. Ensuite, chaque surface sera décrite avec un maximum de détail, concernant la couleur, l'aspect général, la planéité ou alors la courbure, la rugosité ou au contraire le fait d'être lisse, la présence de vacuoles, d'inclusions (la nature si possible de ces inclusions), la forme des écoulements etc. et si les



Figure 19 : Grosses scories piégées que l'on retrouve fichées dans les champs ou déplacées dans les talus

mots manquent, les parallèles imagés peuvent très bien être utilisés : « comme des écoulements de cire de chandelle »...

Ainsi, par l'étude détaillée des scories provenant de sites fouillés et datés, la caractérisation des déchets de différentes époques s'affinent et une chrono-typologie se met doucement en place.

Les scories de réduction

Les scories denses piégées, qui s'écoulent dans une fosse sous la cuve du four peuvent présenter plusieurs formes selon la taille du four, mais aussi en fonction du déroulement de l'opération de réduction. Cependant, ces scories vont être regroupées en trois sous catégories. La première correspond aux scories les plus grosses qui forment une masse plus ou moins compacte, qui se situe juste au-dessous de la masse de métal (qui se forme au niveau des arrivées d'air) (figure 19). Il s'agit d'une scorie noire qui peut être assez compacte, mais qui peut être aussi très vacuolaire et posséder de très grands fragments de charbon de bois. La présence de ceux-ci fragilise d'ailleurs souvent la scorie. La seconde catégorie correspond à des écoulements plus ou moins verticaux dans lesquels les cordons d'écoulement se présentent les uns par-dessus les autres à la manière de la cire qui coule le long d'un bougeoir (figure 20). La dernière catégorie correspond à des écoulements individualisés d'une forme pouvant ressembler grossièrement à des vers de terre. Dans les



Figure 20 : Coulures de scorie piégée que l'on peut retrouver dispersées en surface

deux dernières catégories, les formes sont très contournées et on y observe souvent l’empreinte de grands charbons de bois. Si pour tous les fours à scories piégées, ces trois types de scories sont globalement présents, leurs proportions relatives varient nettement d’une structure à une autre. Ainsi, les scories de la période hallstattienne retrouvées à Bois Jacob (Paimpont) (Vivet 2007) se présentent-elles sous la forme de très grosses masses car la scorie a pris possession de la quasi-totalité de l’espace de la fosse (qui est assez réduite en terme de diamètre). Les écoulements sont assez peu visibles, sur certains échantillons, restant accolés à la masse principale sus-jacente. Les fours de plus grand diamètre, présentent généralement une masse supérieure en forme de galettes (épaisseur moyenne de 20 cm). Cette masse ne correspond pas à la hauteur totale de la fosse, si bien que de nombreux écoulements sont présents en dessous. La présence de nombreux charbons fragilise cette masse, et ce sont plutôt des fragments de celle-ci que l’on retrouve en prospection (actuellement dans le Nord de l’Ille-et-Vilaine, en forêt de Paimpont, dans la région de Tourc’h, dans la région du Porzay et bassin de Châteaulin). Il peut arriver que la totalité de cette grande fosse soit comblée de scorie : le résultat est impressionnant car ce sont des scories compactes larges de 120 cm sur une hauteur de 50 à 60 cm, pesant plusieurs centaines de kilogrammes qui seront charriées dans les talus (actuellement cas uniques dans le Finistère).

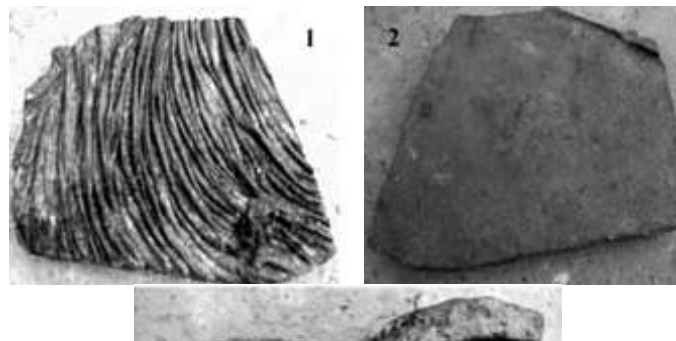


Figure 21: Scorie dense interne

Les scories denses écoulées.

Sous l’appellation « dense » nous parlons de scories encore très riches en fer (comme pour les scories piégées) produites par un bas fourneau. Comme les précédentes, elles sont de couleur noire en règle générale. Ce sont des scories qui ont été produites depuis la fin de l’Âge du fer, date à laquelle, le procédé consistant à faire couler au moins une partie des scories en dehors des fours. Ceci implique que les scories écoulées sont des scories externes, à l’opposé des scories internes qui peuvent rester à l’intérieur après défournement (figure 21). Ces scories internes peuvent être quasi-inexistantes. Quand elles sont présentes, elles peuvent avoir deux aspects. D’une part, des scories de fonds de

four qui moulent parfaitement le fond de la cuve. Elles présentent donc une forme plano-



convexe et peuvent être très facilement confondues avec des scories de post-réduction. C’est l’étude pétrographique et chimique qui déterminera vraiment leur nature. En général, les scories internes sont totalement informes, cassées de tous côtés, relativement poreuses avec des cavités irrégulières et anguleuses. Souvent elles sont très denses et présentent un aspect

rouillé dû à la présence de fer métallique. Ce sont des scories qui se trouvaient très proches de la masse de métal dans le four. Les scories écoulées présentent, quant à elles, des écoulements sur un sol horizontal ou dans un canal d'écoulement. Plusieurs types peuvent être actuellement définis pour la Bretagne en fonction de la manière qu'elles ont de s'écouler hors du four. Ceci est en lien direct avec la conduite des fours, et plus précisément la température atteinte.

Les scories denses écoulées en plaquette proviennent d'une liquide en fusion extrêmement fluide qui s'écoule en dehors du four en continu, si bien qu'ils n'y a pas plusieurs cordons d'écoulement visibles (figure 22). Un seul cordon d'alimentation existe entre le four et la zone d'accumulation du liquide en fusion, qui peut se faire soit sur un sol relativement plat soit dans un espace canalisé. Ce qui est obtenu, c'est une masse, épaisse de quelques centimètres, de scories denses et peu bulleuses. Il y a seulement présence d'une très grosse vacuole arrondie et aplatie prenant place au centre. Après refroidissement, on retire la scorie pour la jeter dans la zone de rejet. Elle se brise alors en morceaux. A cause de la vacuole centrale, la partie supérieure de la scorie se casse sous forme de plaquette, de même pour la partie inférieure. Ce type de scories a été repéré dans le Nord de l'Ille-et-Vilaine



Figure 23 : Scories denses en succession de cordons. En haut à gauche : écoulement lors d'une expérimentation ; à droite : échantillon archéologique. En bas : elles peuvent se retrouver dispersées dans les champs ou former de petits amas.

(Vivet 2007) et dans la Sarthe (Sarreste 2008). Il était à chaque fois associé à du matériel gallo-romain.

Les scories denses écoulées en succession de cordons. Elles sont produites de la même manière que pour les scories en plaquette, mais la température de sortie de four est sans doute moins importante et l'écoulement hors du four est alors plus ou moins intermittent. Ainsi, la masse de scorie a le temps de se refroidir suffisamment avant une nouvelle coulée, pour qu'une solidification ait lieu en surface. Le cordon suivant ne se mélange pas à ceux sous-

jacents. La surface supérieure de ces scories est donc marquée par la présence de ces cordons qui se succèdent (figure 23). La production de ces scories est systématique au Haut Moyen Âge et au Moyen Âge Central. Cependant, ce sont de mêmes scories en cordon qui ont été retrouvées sur le site de Paule (Menez et al. 2007) dans les niveaux du second Âge du fer. Egalement, les scories provenant de l'atelier jouxtant la villa gallo-romaine de Surzur présentent un aspect comparable. Une description plus fine de ces scories permettra peut-être un jour de préciser si elles peuvent être caractéristiques d'une époque plus précise, ou si elles



Figure 24 : Exemples de scories spongieuses provenant de sites situés en forêt de Paimpont. Leur accumulation forme de gros ferriers

ont pu être produites sur un aussi large créneau chronologique, de la fin de l'Âge du fer à la fin du Moyen Âge central.

Les scories spongieuses. Ce sont des scories qui ont été produites encore une fois dans des bas fourneaux. Cependant, leur aspect est très différent par rapport aux précédentes scories à cause de la très forte porosité (figure 24). Non seulement la présence des bulles fait que la scorie enfle, mais elle éclate en surface, crevant la surface supérieure, ne laissant place qu'à une succession de cratères. De plus, ces scories sont moins riches en fer, elles perdent leur noirceur au profit d'une couleur assez indéfinissable variant entre le brun, le violacé et le

gris foncé. Etant très fragiles, dans les amas, ce sont presque toujours des fragments de scories qui sont ramassés. Les fouilles des dernières années dans les ferriers composés de ces matériaux ont permis de mettre au jour les fours ayant conduit à la production de ces



Figure 25 : Laitiers de haut fourneau produits aux environs du XVI^e-XVII^e siècle

montagnes de déchets (Vivet 2009). Quelle surprise de constater que ceux-ci sont de taille très réduite. Ces scories spongieuses sont caractéristiques de l'époque du Bas Moyen Âge et se retrouvent dans plusieurs régions françaises. On les retrouve en Sarthe (Sarreste 2008), en

Lorraine, en Bourgogne (forêt de Puisaye) ou en Charente. Il s'agit maintenant de comprendre leur aspect vacuolaire.

Les laitiers de haut fourneau. A partir du moment où l'on a utilisé la force hydraulique pour faire fonctionner les soufflets des fours, les rendements ont nettement augmenté. Une plus grande quantité de fer a pu être retirée des minerais. Évidemment, les déchets produits ont donc été nettement moins riches en fer. Se sont alors écoulés en dehors des fours, de gros écoulements (plus de 10 cm de large pour 2 à 3 pour les cordons des scories denses) vitreux ou pierreux de couleur vert, blanc, brun, gris, beige (figure 25).

Tout un assemblage de couleurs claires. En très grande majorité ces échantillons correspondent à des fragments cassés, mais quelques écoulements presque entiers peuvent parfois être trouvés, montrant que ceux-ci forment des écoulements évasés sur plus de 30 cm de largeur. Les laitiers des hauts fourneaux les plus anciens que l'on connaisse sont



Figure 26 : Laitier de haut fourneau avec gros charbon de bois produits aux environs du XVI^e-XVII^e siècle

hétérogènes, comportant encore des charbons de bois qui peuvent être de très grosse taille (près de 8 cm de largeur sur plus de 10 cm de longueur) (figure 26), des fragments de minerais mal réduits, des fragments de castine non fondue et des billes de métal qui n'ont pas pu rejoindre la masse métallique principale du fait de la viscosité importante de la scorie. Ce sont des déchets qui peuvent encore contenir de 5 à 20% de fer, soit sous forme métallique, soit au sein de la matrice scoriacée. Des anciens laitiers ont été retrouvés tapissant le fond de l'étang de Néal (22). Elles proviennent du haut fourneau situé juste à proximité. Quantité de vieilles installations de haut fourneau sont ainsi oubliées et peuvent être retrouvées grâce à la présence des

laitiers.

Cependant, une fois encore les choses ne sont pas aussi simples. Il existe des laitiers produits par des bas fourneaux (figure 27). Il en a été trouvé sur le site gallo-romain d'Oulches dans le Berry. Il s'agit d'une production faible comparée à la quantité de scories denses trouvée, cependant, il a bien été démontré qu'elle a été pensée et voulue. Pour cela, les forgerons de l'époque ont dû augmenter la chaleur dans le four en soufflant plus fort, et dû ajouter du calcaire dans le four pour améliorer le rendement (Mahé-Le Carlier et al. 1998). Il est possible aussi que des laitiers aient été produits à la période gallo-romaine, ailleurs, en

Bourgogne, en grande quantité, mais cette fois-ci peut être, sans volonté de les produire. En effet, les minerais sont naturellement riches en calcium et en manganèse, éléments qui prennent la place du fer dans la scorie. Pour l'instant, seuls quelques sites de la période gallo-romain ont produits ce type de déchet en France.



Figure 27 : Laitier de bas fourneau d'Oulches (tiré de Mahé-Le Carlier 1997)

Les scories de post-réduction

Les scories de raffinage de la masse brute obtenue dans un bas fourneau. On pense que cette étape existe de manière quasi-obligatoire. Nous ne savons par contre dans quelles conditions elle se déroule : est-ce qu'elle a lieu tout de suite à la sortie du four de réduction, quand la masse est encore incandescente, à ce moment là il n'y a pas besoin de l'utilisation du foyer pour la réchauffer ? Ou attend-on qu'elle soit refroidie pour être déplacée ? Dans un second temps, elle est alors réchauffée dans un foyer de type forge. Dans le premier cas, il y a peu de déchets formés, plutôt des petites coulures qui peuvent passer inaperçues sur un site de réduction. Dans le second cas, il se forme une scorie plano-convexe en forme de culot qui moule le fond du foyer. La masse peut aussi être refroidie et travaillée par la suite, ce qui fait que l'on pourra trouver des scories de forme plano-convexe sur les sites de réduction.

Il est très difficile de les identifier. Dans un atelier de forge, elles vont se confondre avec les scories de forge issues de la fabrication des objets. Seuls les échantillons sur les sites de réduction peuvent être interprétés comme du raffinage. Actuellement, en Bretagne, seuls les sites médiévaux de Paimpont présentent ce type de matériel sur les ateliers de production de fer. Des suspicions sont également faites sur des sites situés dans le nord de l'Ille-et-Vilaine. Pour les rechercher et les identifier, il faut à chaque fois qu'un site d'atelier est fouillé, qu'une étude typologique extensive soit réalisée.



Figure 28 : Scories d'affinage de gueuse de fonte

Les scories d'affinage en foyer ouvert des gueuses de fonte obtenues dans un haut fourneau. Les procédés d'affinage ont très fortement évolué dans le temps. Cependant, l'affinage dans un foyer ouvert est une technique qui a été longtemps employée, depuis les débuts des hauts fourneaux jusqu'au XVIII^e siècle environ (elle est encore représentée dans l'encyclopédie de Diderot et d'Alembert). La forme de ces déchets dépend globalement de la forme du foyer. Des scories trouvées dans une grande fosse sur le site des forges à Paimpont ont une forme globalement plano-convexe mais le diamètre de celles-ci dépasse les 30 cm pour approcher les 40 cm (figure 28). Les scories plano-convexes citées précédemment n'atteignent jamais ces dimensions. Ce sont également des scories très lourdes et en même temps assez vacuolaires. Elles ont donc une couleur sombre du fait de la grande perte en fer lors du traitement de la fonte.

Les scories d'affinage de la fonte du procédé par convertisseur. A partir du XIX^e siècle, l'affinage de la fonte se fait selon une nouvelle technique dont le principe est de fondre totalement la fonte et de la brasser ensuite. Il y a donc encore perte de fer par oxydation, mais le déchet ici passe véritablement sous forme liquide et est évacué du four par écoulement. Les scories produites correspondent donc à des successions de cordons très riches en fer. Elles

ressemblent alors à s'y méprendre aux scories denses écoulées produites en bas fourneaux. C'est seulement par la reconnaissance du site, qu'il sera possible de dire s'il s'agit bien de ce type de scories. En effet, elles ne se retrouveront que dans un contexte d'ateliers récents, proches d'un haut fourneau. Des laitiers devraient donc être retrouvés également en grande quantité.



Figure 29 : Scories plano-convexes de forge

Les déchets produits par les forgerons lors de l'élaboration des objets. Plusieurs types de déchets vont être produits. Ce sont des scories, des battitures et des fragments métalliques. Actuellement, il est assez difficile de faire la différence entre les déchets de forge produits à différentes époques. Lorsqu'il y aura plus de sites étudiés, peut-être, régionalement, verrons-nous des différences en fonction de la chronologie.

Les scories vont être de deux types, bien que tous les intermédiaires entre ces deux types existent. Il y a en premier des scories en forme de culot plano-convexe (figure 29), qui sont généralement assez lourdes à cause de la perte en fer assez importante liée à l'oxydation de la pièce de métal (accélérée par l'augmentation de la chaleur). Les autres scories sont beaucoup plus légères, prenant assez rarement une véritable forme plano-convexe. Ce sont plutôt de petites masses informes, aux contours arrondis de couleurs claires, vert, beige, bleuté, jaunâtre etc., on les appelle des scories argilo-sableuses (figure 30). Des travaux de laboratoire ont été effectués afin de tenter de décrypter ces matériaux et les faire « parler » le plus possible (Le Carlier et al. 2007).



Figure 30 : Scories argilo-sableuses de forge

Les battitures correspondent aux étincelles qui giclent quand le forgeron travaille la pièce métallique sur l'enclume. Ce sont en fait des paillettes d'oxyde de fer plus ou moins mélangées à de la masse scoriacée (formée par la fusion d'ajouts, comme du sable ou de l'argile, que l'on met sur le métal pour l'empêcher de trop s'oxyder) (figure 31). Elles peuvent être plates quand la température atteinte par l'objet est modéré, ou rondes quand la température est très forte (l'ajout et l'oxyde sont éjectés dans l'air alors qu'ils sont liquides, ils prennent donc une forme d'équilibre qu'est la sphère). Leur taille est également en relation avec la taille de la portion de métal chauffé.

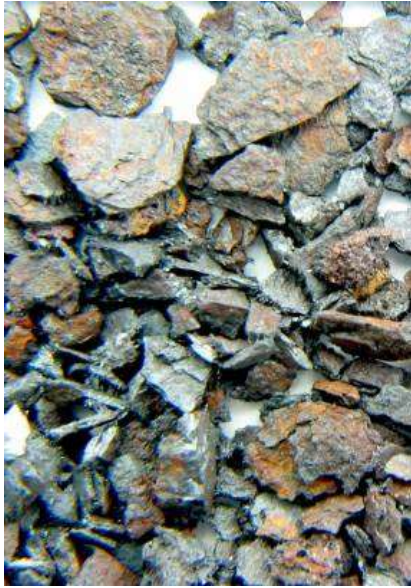


Figure 31 : Quelques battitures après lavage et tri

Ce n'est pas obligatoire, mais il peut arriver que dans les sédiments du sol de la forge de nombreux fragments métalliques soient présents. Ils peuvent correspondre à plusieurs choses : 1) des soies de préhension des objets tenues par les pinces et « chutées » à la fin de l'élaboration de la pièce ; 2) des chutes faites intentionnellement au cours des différentes étapes de l'élaboration de l'objet ; 3) des ébauches perdues ; 4) des ratés, c'est-à-dire des objets presque finis qui ont cassé avant la fin. Nous voyons bien que cette dernière catégorie d'objets est essentielle à étudier quand elle existe, car elle nous permet d'approcher d'au moins une partie de la nature de la production de la forge. Cependant, sur le site archéologique, c'est assez difficile de les reconnaître du fait de leur altération. Ils se présentent plutôt sous forme de rognons informes boursoufflés et rouillés mélangés à de l'argile. Leur signe de reconnaissance, c'est leur poids.

3 - L'observation microscopique : la confirmation de la nature des scories

Comme on peut le voir dans les paragraphes précédents, la description morphométrique fine des scories, en association avec la description générale du site, permet dans un premier temps de définir un créneau chronologique et préciser la ou les étapes de la chaîne opératoire concernée. Cependant, il arrive que les scories présentent des formes particulières pour une raison inconnue, et il devient alors difficile de réaliser la détermination. Pour aider à cela, nous réalisons systématiquement des observations au microscope sur des scories choisies afin de valider une banque de données.

Une scorie est issue de la fusion de matière minérale : les oxydes de fer du minerai, la gangue du minerai de fer (argiles, grains de quartz...) et souvent une partie de la paroi des fours (des argiles essentiellement). La matière passe donc par un état totalement fondu (certaines zones peuvent n'être que partiellement fondues, on peut y observer certaines fois des reliques du minerai) puis lorsqu'elle s'écoule dans une zone de dépôt, elle refroidit plus ou moins rapidement, telles des roches volcaniques. Pour un refroidissement extrêmement rapide, la scorie sera entièrement vitreuse ; pour un refroidissement plus lent, des minéraux vont apparaître, les uns après les autres, jusqu'au moment où la scorie se figera : tout ce qui n'aura pas eu le temps de cristalliser se figera en verre. La nature des minéraux qui vont apparaître sera fonction de la composition chimique de la scorie. Nous n'allons pas rentrer dans les détails de la minéralogie des scories, mais nous allons juste donner un exemple ou deux de ce que peut apporter ce type d'étude.



Figure 32 : Battiture tombée dans la scorie liquide au fond du foyer de forge. Elle a été figée alors qu'elle était en cours de fusion

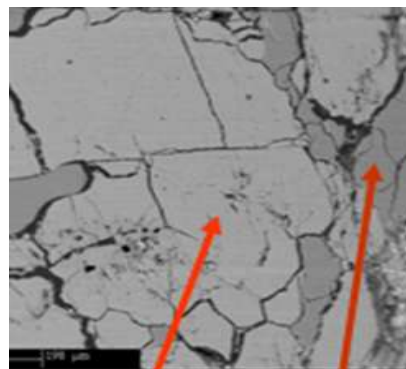


Figure 33 : Ajouts identifiés dans une scorie de forge (tiré de Le Carlier et al. 2007)

L'observation microscopique des scories permet donc de déterminer la nature de celles-ci quand l'apparence morphologique ne le permet pas. Ainsi, certaines scories de forge (des scories lourdes du fait d'une perte importante en fer) trouvées en contexte de réduction peuvent être difficiles à reconnaître comme telles. L'observation au microscope des battitures (quand il y en a) dans une scorie permet de confirmer leur nature liée aux travaux de post-réduction (figure 32). Il est également possible de déterminer la nature des ajouts que le forgeron a utilisés. En effet, dans un lot de scories de forge, il y en a toujours une présentant des passées non fondues (figure 33) dans lesquelles il sera possible de déterminer la nature minéralogique (Le Carlier et al. 2007).

4-Les analyses chimiques : la recherche de la signature des districts métallifères ; les volumes de production ; les courants de distribution

Les différents types de minerais et leurs compositions chimiques

Les minerais à base d'oxydes et d'hydroxydes ont été largement utilisés dès l'origine pour produire du fer. Il en va de même pour les minerais contenant une forte proportion de carbonates. Pour la production de fer, on préfère éviter l'utilisation des sulfures (pyrite) car la présence de soufre abaisse la qualité du métal.

Ces minéraux riches en fer sont souvent fortement et intimement associés à d'autres minéraux et sont alors difficilement séparables de leur gangue. Celle-ci est elle-même composée par d'autres minéraux tels que le quartz ou les argiles. On voit donc que les minerais utilisés ne sont pas purs et qu'il y a présence d'autres éléments chimiques.

Il y a les minerais sédimentaires marins. Les plus fréquents sont les minerais oolithiques. Ils sont formés par l'accumulation sur le fond de la mer de concrétions ferrugineuses millimétriques, les oolithes (diamètre inférieur à 0.5 mm). Ces gisements forment des couches continues sur plusieurs centaines de mètres et jusqu'à quelques kilomètres d'extension. Les épaisseurs sont importantes, souvent plusieurs mètres. Les teneurs moyennes sont relativement basses (souvent moins de 20 % Fe) mais certains horizons peuvent être très enrichis (parfois plus de 50 % Fe). Les minerais briovériens que l'on rencontre dans la région de Segré sont de cette nature. Généralement, ces minerais sont enrichis en chaux et en phosphore (accumulation des débris d'organismes marins). Les minerais de couche de Paimpont se sont formés également de la même manière, seulement ces

gisements ont subi un métamorphisme important qui a conduit à une transformation physique et chimique, les teneurs en chaux et en phosphore sont quasi-nulles.

Les latérites se développent en raison de la forte altération en milieu continental et sous un climat chaud et humide. Hormis le fer qui reste sur place sous forme d'oxydes, tous les autres constituants des roches de surface sont lessivés et transportés par les rivières. Dans ces conditions, les oxydes fer forment des concrétions irrégulières centimétriques, les pisolithes. Ce sont des minerais riches en alumine et en titane autres éléments chimiques difficilement lessivables. Des latérites se sont formées sur le socle armoricain mais elles ont été elles-mêmes érodées pour la plupart au cours des âges.

Les minerais sidérolithiques résultent de la remobilisation par l'érosion des cuirasses latéritiques. Les gisements sont souvent très discontinus, constitués par des successions de poches métriques ou décamétriques et de remplissages de failles dans des roches plus anciennes. Les pisolithes peuvent être séparées de la gangue argileuse par lavage et la teneur du concentré atteint environ 50 % Fe. Ces minerais ont été reconnus dans le nord de l'Ille-et-Vilaine, et également dans le secteur de Paimpont. L'absence d'études paléométallurgiques étendues dans les autres secteurs géographiques du Massif armoricain n'a pas permis pour l'instant de véritablement identifier leur présence. Du fait de leur origine liée à l'altération des sols, ces minerais perdent beaucoup de leurs spécificités chimiques.

Les minerais d'origine hydrothermale sont le plus souvent liés à la mise en place de roches magmatiques ou à des déformations de la croûte terrestre. Le fer est amené par des solutions hydrothermales et se dépose dans des fractures (veines ou filons) ou imprègne les roches plus anciennes. Les minéralisations peuvent être variées, à base d'oxydes, de carbonates ou de sulfures accompagnés par des gangues divers (quartz, calcite, barytine, etc.). Dans le Massif armoricain, ce sont surtout des filons constitués d'hématite ou de magnétite qui sont présents. Des filons importants sont liés à la mise en place des granites hercyniens, notamment ceux situés le long du cisaillement sud-armoricain. On pensera notamment aux mines de Glenac à l'ouest de Redon. Des fragments de minerai trouvés dans les champs au nord de Locminé pourraient être de même origine. Du fait du manque d'analyse de ces minerais, il est difficile de savoir s'ils ont des spécificités chimiques, notamment d'un réseau filonien à un autre.

Les chapeaux de fer résultent de l'altération météorique des filons sulfurés métalliques et provoquent l'accumulation d'hydroxydes de fer sur des épaisseurs pouvant atteindre plusieurs dizaines de mètres d'épaisseur. Cette zone oxydée fournit un minerai d'excellente qualité. Ces minerais sont souvent très riches en métaux divers (essentiellement Pb, As, Ni, Zn...), car les oxydes de fer qui se forment vont capter ces éléments dans les réseaux cristallins.

Si le fer passe en solution (eaux pauvres en oxygène), il peut migrer dans la nappe phréatique et précipiter sous forme de concrétions lorsque les conditions physico-chimiques s'y prêtent, notamment à la faveur des battements de la nappe. Ces minerais n'ont quasiment aucune spécificité chimique. Il va se former des rognons d'oxyde de fer, de taille diverse allant jusqu'à plusieurs dizaines de centimètres de long. Ils s'accumulent dans une couche uniquement. Ce sont ces minerais en particulier qui ont été exploités dans la région du Mans. Nous nous trouvons là par contre dans les terrains sédimentaires du Bassin parisien.

Il faut mentionner les minerais qui se forment dans les marais et les tourbières. Lorsque les eaux pauvres en oxygène qui circulent lentement dans le substrat arrivent à l'air libre, le fer dissout qu'elles transportent subit une oxydation et précipite. Ce phénomène est fréquent dans les régions périglaciaires du nord de l'Europe. Il est également présent sur le Massif armoricain. Cependant, ici les teneurs en fer ne sont pas suffisantes pour considérer ces formations comme de véritables minerais.

La filiation chimique « minerai / scorie de réduction » / scories de raffinage / objets métalliques

Lors d'une transformation en système clos «rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme», et cette phrase est parfaitement applicable à la métallurgie. Le système est constitué par l'ensemble des produits entrant dans l'appareil (four de réduction ou foyer de forge) et l'ensemble des produits sortants. Les produits entrants sont l'air injecté, le charbon, la paroi fondue, le minerai, les ajouts. Les produits sortants correspondent aux différents types de déchets, au métal, aux fumées.

Les différents éléments chimiques proviendront d'un ou plusieurs produits entrants et iront dans un ou plusieurs produits sortants. Certains éléments sont dit sidérophiles, car leur préférence ira vers le fer (Ni, Co, Cu). Les éléments lithophiles ont une préférence pour les roches silicatées (K, Na, Ca, Be, Y, Th, terres rares) et se concentreront dans les scories. Cependant, comme rien n'est jamais simple, le comportement des éléments peut varier en fonction des conditions physico-chimiques à l'intérieur du four. Ainsi, le phosphore se concentre dans la scorie dans les bas fourneaux, et va dans la fonte dans les hauts fourneaux.

Pour pouvoir réaliser des raisonnements grâce aux analyses chimiques, il est nécessaire d'étudier les déchets, mais également les minerais potentiels, les ajouts potentiels et les parois de four. Plusieurs analyses sur chaque type de déchets sont nécessaires, car ceux-ci peuvent présenter des variabilités qui pourraient fausser les interprétations si le nombre n'était pas suffisant.

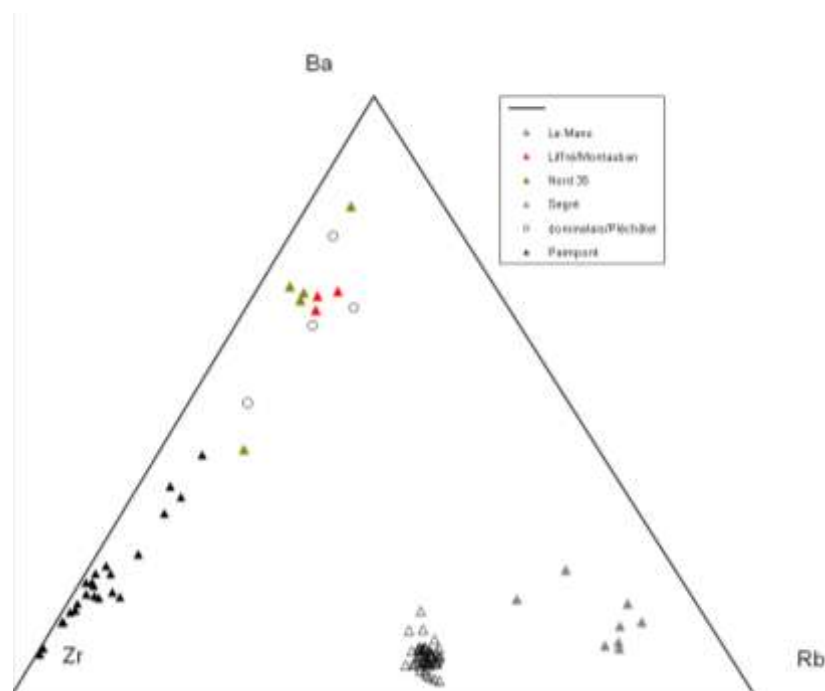


Figure 34 : Diagramme chimique montrant des différences entre les scories de réduction en bas fourneaux provenant de différentes régions du Massif armoricain. Il faut remarquer que certaines zones sont difficilement différenciables

L'analyse chimique d'un matériau silicaté permet de connaître la teneur d'environ 56 éléments chimiques. Certains sont présents dans les minerais et les scories en tant qu'élément majeur, ce sont les éléments qui vont former les principaux minéraux présents. La majorité des éléments chimiques sont présents à l'état de trace, intégrés au réseau cristallin des minéraux. Cependant, c'est grâce à la présence de ces éléments que nous pourrions dans

certain cas réaliser un lien chimique entre les déchets de production et le minerai, car les rapports des teneurs dans les scories seront de même grandeur que dans le minerai, pour ces éléments chimiques qui entrent intégralement dans la composition des scories. Si ces éléments sont particulièrement abondants dans le minerai, ils le seront également dans les scories de réduction, ce seront des marqueurs hérités du minerai. En fonction des modes de formation des minerais et de la nature des roches dans lesquelles ils sont apparus, la composition de la gangue ne sera pas la même. Les rapports entre éléments chimiques seront donc différents d'un minerai à un autre, et il sera possible de faire la différence entre eux via des analyses chimiques. Les scories de réduction auront donc elles-mêmes des compositions chimiques différentes. Cependant, un type de minerai peut être présent dans une aire géographique réduite, mais il peut présenter les mêmes caractères chimiques sur plusieurs centaines de kilomètres. Par exemple, nous n'observons pas de différences nettes entre des minerais récoltés à Montauban (Nord Ouest de Rennes, 35) et dans la forêt de Liffré (Nord Est de Rennes, 35) (figure 34). Le traitement des données chimiques via la réalisation de diagrammes binaires ou ternaires (ou par traitements statistiques plus élaborés) permet de savoir quel minerai a été choisi à une époque donnée et s'il y a eu changement des approvisionnements en fonction du temps.

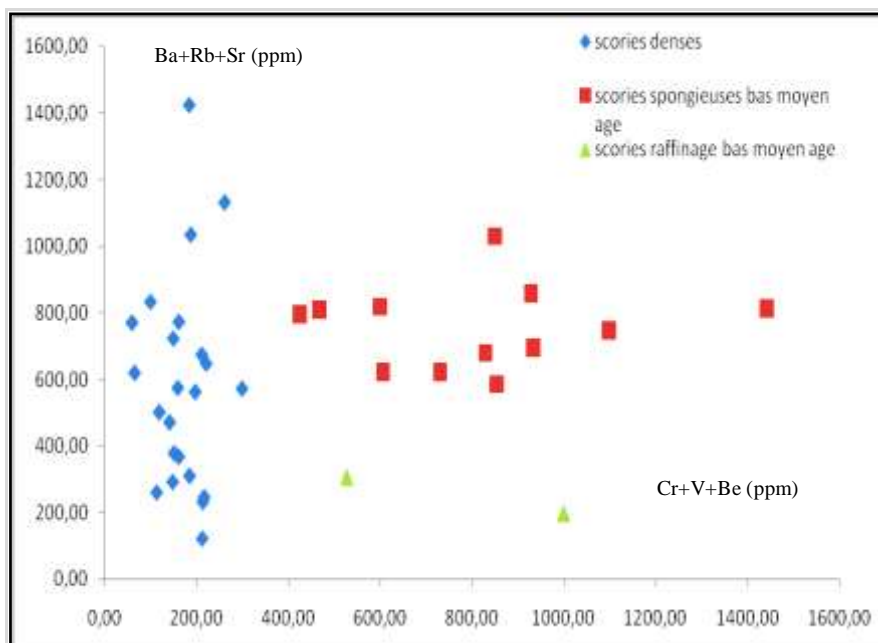


Figure 35 : Différence scories de réduction et scories de raffinage des scories de la forêt de Paimpont

Autre résultat attendu, c'est la reconnaissance des scories de raffinage de la masse brute obtenue en bas fourneau (figure 35). Comme on l'a dit, les scories issues de cette opération ressemblent beaucoup aux scories de forge d'élaboration des objets.

La chimie permet une discrimination efficace, car les scories de raffinage sont en partie composées par de la scorie de réduction s'écoulant de la masse brute. Elles conservent donc encore un peu de l'héritage chimique venant du minerai. Les scories de forge se sont formées à partir des ajouts. Ces scories ont donc perdu tout lien avec les minerais.

Enfin, le but de cet ensemble d'analyses, c'est de réussir à faire le lien entre les zones de production et les objets métalliques produits. Pour cela, nous n'utilisons pas les éléments chimiques qui auraient tendance à se concentrer dans le fer. En effet, ceux-ci ont tendance à se répartir inégalement dans le métal, ce qui donne des analyses trop variables. Une autre solution existe : l'étude des inclusions de scories emprisonnées dans le métal. En effet, même un objet beaucoup travaillé et devant être très propre possède encore des inclusions (figure 36). Certaines proviennent des ajouts déposés sur l'objet au moment du forgeage, mais d'autres correspondent à des reliquats de scories de réduction restées emprisonnées dans la masse de métal même après le raffinage. La comparaison des analyses de ces dernières inclusions avec les analyses des scories de réduction devraient permettre un jour de connaître l'origine de ces objets manufacturés. Pour pouvoir réaliser ces travaux, on se rend bien compte que les différents secteurs de production doivent être connus, et donc analysés, avec

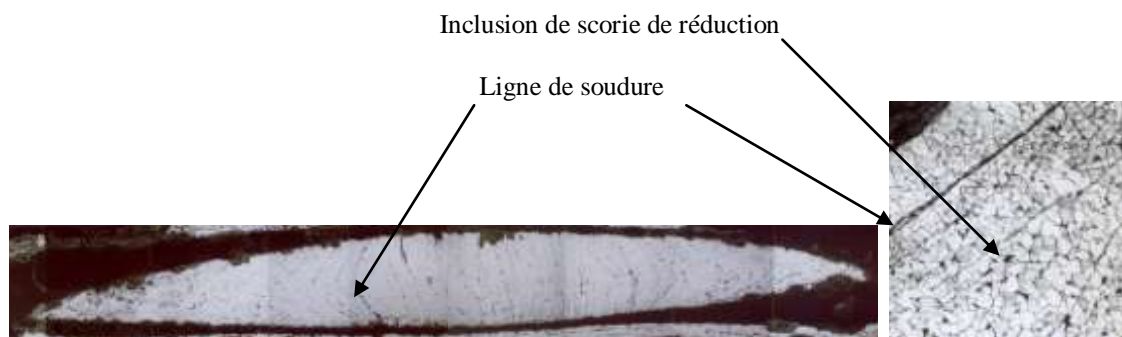


Figure 36 : Inclusions visibles dans la coupe d'une épée dans les objets. Les lignes de soudure sont visibles par l'alignement des inclusions formées au moment du forgeage de l'objet

précision.

C'est un travail qui a débuté. J.B. Vivet a fait réaliser un certain nombre d'analyses sur le nord de l'Ille-et-Vilaine, la forêt de Paimpont et quelques-unes concernant le sud de l'Ille-et-Vilaine du côté de Pléchâtel. La forêt de Paimpont est maintenant bien connue. Le nord-est de Rennes possède aussi quelques analyses. Il faut également prendre en compte des analyses associées aux fouilles de l'autoroute A28 et les analyses réalisées par F. Sarreste qui correspondent à la limite est du Massif armoricain et le début du Bassin Parisien. D'autres analyses sont venues depuis compléter cette banque de données ces dernières années, analyses réalisées à l'initiative du Laboratoire Archéosciences. C'est surtout la région de Segré qui bénéficie de cet apport, mais quelques sites épars en Bretagne ont également été concernés, ainsi que la forêt de Paimpont.

Calcul de rendement et ampleur de la production

En connaissant la composition chimique du minerai et celle des scories produites, il est possible de calculer le rendement des fours, c'est à dire, pour une quantité connue de scories produites, il est possible de remonter à la quantité de minerai utilisée et de connaître donc la quantité de fer produite sur le site. Pour cela il est nécessaire aussi de pouvoir estimer le volume du tas de scories. C'est une donnée qu'il est difficile d'estimer, d'autant plus que ce sera toujours une donnée sous évaluée, à cause notamment de l'utilisation ultérieure des

scories pour remblayer les chemins ou comme charge dans les hauts fourneaux des XIX^e et XX^e siècles, ceux des pays de la Loire par exemple.

Les données ainsi obtenues ne seront que des estimations. Cependant, il sera possible de comparer l'ampleur de production de différents sites. En connaissant le poids de métal des objets, il est possible de proposer des productions « équivalent objets ». C'est ainsi qu'un site que l'on considère « tout petit » peut avoir permis de produire 3000 couteaux ou 500 épées. Ce style de comparaison permet de relativiser la production, car discuter de la production en termes de tonnage de scories ou même de fer, n'est jamais très parlant en tant que tels.

Des perspectives en guise de conclusion

Cet essai de synthèse montre que de nombreux travaux archéométallurgiques sur le Massif armoricain ont déjà été réalisés et que d'autres continuent d'être engagés, plus particulièrement sur la Haute-Bretagne. Dans l'Ouest, des prospections sont également en cours. Le nombre des sites découverts sera certainement moindre que dans les grands secteurs très riches en minerai de fer situés à l'Est. Il ne faut cependant pas les négliger, leur présence est importante pour appréhender l'économie du fer dans ces régions à différentes périodes. Les vides actuellement présents sur la carte de répartition des ateliers métallurgiques ne sont sans doute que le reflet d'un manque de prospection thématique paléométallurgique.

Pour pouvoir reconstituer un jour les courants de diffusion du métal et des objets, on peut se rendre compte que seule une étude régionale permet d'obtenir ces résultats, avec une approche pluridisciplinaire alliant l'archéologie de terrain avec la fouille et la prospection, l'archéométrie avec l'étude pétrologique des scories, l'analyse chimique des objets et les datations C₁₄ sur charbon, l'histoire avec le dépouillement des sources écrites. C'est la prise en compte de l'ensemble de ces données et leur confrontation site à site qui permettra d'avoir une vision globale de l'activité métallurgique époque par époque.

Beaucoup de données sont déjà acquises, mais il reste tant à faire, et cela pour toutes les disciplines. Ce projet doit être envisagé sur de nombreuses années.

BIBLIOGRAPHIE

- ANDRIEUX J.Y. (1988) La métallurgie en Bretagne. Forges et hauts fourneaux du Moyen-Âge à nos jours, Ar Men, 18, pp 2-19.
- ANDRIEUX J.Y., BRULE A., COIGNARD J., FONTUGNE M., HERBAUT C., LARCHER G., LOYER S., MOINERAI M., PLAINE J. (1993) Fouille d'un bas fourneau et de ses structures annexes à l'étang du Perray en Plélan le Grand (Ille-et-Vilaine), Revue Archéologique de l'Ouest, pp 101-111.
- AVENEAU de la GRANCIERE. (1913) [Les "ferriers" ou amas anciens de scories de fer dans le Morbihan](#), Revue Morbihannaise, pp 1-6
- BEHOSTE J. F. et MAHEUX H. (1984) Les forges du Pays de Châteaubriant, Cahiers de l'Inventaire, 3, Inventaire général des monuments et richesses artistiques de la France, Pays de la Loire, Département de la Loire Atlantique, Nantes.
- BOCQUET A., CHUNIAUD K., NAVEAU J. (2004) Le quartier antique de la Grande Boissière à Jublains (Mayenne), Revue Archéologique de l'Ouest, 21, pp 131-174.
- COULTHARD N., DEMAREST M., JARDEL K. (2005) Deux forges de la cité des Viducasses, Actes du 39^e congrès des Sociétés Historiques et Archéologiques de Normandie (octobre 2004), Caen, pp 255-284.

- CHAURIS L. et GARREAU J. (1990) Les anciennes exploitations ferrifères des environs de Belle Ile en Terre, *Annales de Bretagne*, pp 133-146.
- DAVY (1913) Etude des scories des forges anciennes éparses sur le sol de l'Anjou, de la Bretagne et de la Mayenne, pour servir à l'histoire de la Métallurgie. *Bulletin et Comptes rendus Mensuels de la Société de l'Industrie Minérale*, pp 397-409.
- DIDEROT, D'ALEMBERT (1751-1772) *Encyclopédie. Recueil des planches sur les sciences, les arts libéraux et les arts mécaniques avec leur explication*, rééd. Henri Veyrier, Genève, 1985.
- GIOT P. R. (1964) Les lingots de fer bipyramidaux de Bretagne, *Annales de Bretagne*, pp 51-60.
- HERBAUT C. (2009) Aperçu des sources écrites concernant les forges de la forêt de « Brécélien » XVI^e siècle) pp 17-22, in VIVET J.B. (2009) *Métallurgie médiévale et forêt en prélude aux Grandes Forges de Paimpont* (35). *Les Dossiers du Centre Régional d'Archéologie d'Alet*, n°AF, 221p.
- HUBERT M. (2005) La métallurgie ancienne en Mayenne : recherche autour de La Gravelle, *MAH*, 28, pp 290-311.
- JOUANET N. (2008) Evaluation du potentiel sidérurgique de la Bretagne à l'Âge du fer : de la réduction à l'objet fini, *Mémoire de Master 1*, Université de Rennes 2.
- JOUANET N. (2009). *Prospection paléométallurgique autour des lingots bipyramidaux de fer de Saint Connan (Côtes d'Armor)*, *Mémoire de Master 2*, Université de Rennes 1.
- KERFORNE F. (1920) Contribution à l'étude des minerais de fer du département des Côtes du Nord, *Bulletin de la Société Géologique et Minéralogique de Bretagne*, 1, (4), pp 292-332.
- LE BIHAN J. P. et GALLIOU P. (1974) Un groupe de bas fourneaux antiques découverts près de Quimper, *Bulletin de la Société Archéologique du Finistère*, 52, pp 17-32.
- LE CARLIER C., LEROY M., MERLUZZO P., (2007) L'apport de l'analyse morphologique, microscopique et chimique des scories en forme de culot à la restitution des activités de forges, *Archéosciences*, 31, pp 23-35.
- MAHÉ-LE CARLIER C., DIEUDONNÉ-GLAD N., PLOQUIN A. (1998), Un laitier obtenu dans un bas fourneau ? Étude chimique et minéralogique des scories d'Oulches (Indre), *Revue d'Archéométrie*, 22, pp 91-101.
- MAHÉ-LE CARLIER C., PLOQUIN A. (1999) Typologie et caractérisation des scories de réduction de la métallurgie du fer, *Revue d'Archéométrie*, 23, pp 59-69.
- MARSILLE L. (1923) L'Âge du fer dans le Morbihan. *Bulletin de la Société Polymathique du Morbihan*, pp 3-107.
- MENEZ Y., VIVET J. B., CHANSON K., DUPRE M. (2007) La forge de Paule (Côtes d'Armor), in « L'économie du fer protohistorique : de la production à la consommation du métal, actes du XXVIII^e colloque de l'A.F.E.A.F., Toulouse 2004, suppl. 14/2 Aquitania, pp 213-237
- MENEZ Y. et BATT M. (1988) L'habitat du Haut Moyen Âge de Creac'h Gwen à Quimper (Finistère), *Revue Archéologique de l'Ouest*, pp 123-140.
- MEURET J. C. (1989) La métallurgie ancienne au Sud Est de l'Ille-et-Vilaine, *Mémoires de la Société d'Histoire et d'Archéologie de Bretagne*, 66, pp 355-375.
- MEURET J. C. (2006) Un dépôt de lingots de fer de type currency-bars : Le Clos-Maugendre - Visseiche (Ille-et-Vilaine) *Annales de Bretagne et des Pays de la Loire*.
- MEURET J. C. (2010) *Archéologie, paysage et histoire d'une forêt du néolithique à nos jours : le massif de Domnaiche en Lusanger (Loire Atlantique)*. *Annales de Bretagne et des Pays de la Loire*, t 117, N°4.
- SARRESTE F. (2008) *La sidérurgie ancienne dans le Bas Maine (VIII^e avant J.C. – XV^e après J.C.)*, thèse de l'Université François Rabelais de Tours, 843p.

- VIVET J. B. (1997) Paléoméallurgie du fer à l'Est de la Rance et dans le Cambournais. Bilan interprétatif des données de prospection. Les Dossiers du Centre Régional d'Archéologie d'Alet, 25, pp 57-90.
- VIVET J. B. (2001) Le Rocher Abraham, Saint Pierre de Plesguen (35). Un témoin essentiel de l'activité sidérurgique gauloise du Nord de la Haute-Bretagne. Les Dossiers du Centre Régional d'Archéologie d'Alet, 29, pp 79-94.
- VIVET J. B. (2007) La production du fer protohistorique en Haute-Bretagne d'après les résultats des prospections, des fouilles d'ateliers et des analyses archéométriques, in « L'économie du fer protohistorique : de la production à la consommation du métal, actes du XXVIIIème colloque de l'A.F.E.A.F., Toulouse 2004, suppl. 14/2 Aquitania, pp 63-84.
- VIVET J. B. (2009) Les ateliers du Vert Pignon en Paimpont (35) : mise au jour d'installations exceptionnelles éclairant une chaîne de production médiévale du fer, pp 7-104 ; in VIVET J.B. (2009) Métallurgie médiévale et forêt en prélude aux Grandes Forges de Paimpont (35). Les Dossiers du Centre Régional d'Archéologie d'Alet, n°AF, 221p.

