

Vents et fours en paléoméallurgie du fer, Du minerai à l'objet

**Programme collectif de Recherche - SRA Bretagne,
année 2006
Rapport final**



Sous la direction d'A.-F. Garçon
Centre d'Histoire des Techniques
Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne

Qu'il nous soit permis de dédier ce travail à Jean-Jacques Chauvel, dont la chaleureuse compétence nous a si brutalement fait défaut.

Partipants au PCR « Vents et Fours »:

Anne-Françoise Garçon

Professeur Université Paris 1, Groupe Histoire de Technique, LAMOP, UMR 8589

Christophe Colliou

Docorant en archéologie, GRHIS, université de Rouen et Laboratoire Pierre Süe, CEA / CNRS, Saclay

Régis Aranda

Forgeron-métallurgiste, association Hispamébro et chercheur associé UMR 5060

Jean-Bernard Vivet

responsable d'opération archéologique de prospection thématique sur la paléoméallurgie du fer en Haute-Bretagne (1999-2006), Chercheur associé, UMR 6566

Simon Pellequer

Etudiant master histoire des techniques

Nicolas Girault

Doctorant en archéologie, université de Paris 1, équipe d'archéologies environnementales, ArScAn, UMR 7041

Philippe Dillmann

Laboratoire Pierre Süe, CEA /CNRS Saclay, UMR 5060

Jean-Jacques Chauvel

Géochimiste, président de la Société Géologique Minière de Bretagne

Alain Ploquin

Géochimiste, CRPG Nancy

Tables des matières

INTRODUCTION GÉNÉRALE	6
PREMIÈRE PARTIE	9
DU MINERAI A L'OBJET : APPROCHE METHODOLOGIQUE.....	9
I. INTRODUCTION	10
II. APPROCHE CRITIQUE DES GRANDS OUTILS DE PENSEE : LIGNEES, COMPLEXES TECHNIQUES, CHAINES OPERATOIRES.	14
A/ Qu'est-ce qu'une lignée technique ?.....	15
B/ Complexes, espaces et systèmes techniques.....	21
C/ La chaîne opératoire : intérêt, limites.....	23
III. LES GRANDES LIGNEES TECHNIQUES DE PRODUCTION DES METAUX FERREUX	26
A/ Réflexions d'ensemble sur la métallurgie	26
B/ Les grandes lignées techniques de production des métaux ferreux	28
IV. APPLICATION A LA PALEOMETALLURGIE DU FER : LE BAS-FOURNEAU ET LA VENTILATION NATURELLE	34
A/ Métallurgie d'extraction	39
B/ Métallurgie de transformation	50
V. CONCLUSION.....	60
LA VENTILATION NATURELLE : A LA RECHERCHE D'UN REFERENTIEL TECHNIQUE	69
I. APPROCHE CRITIQUE DE LA LITTERATURE TECHNIQUE ET SCIENTIFIQUE.	70
A/ Les principaux arguments de diagnostic des modes de ventilation :	72
II. A LA RECHERCHE D'UN REFERENTIEL TECHNIQUE	85
A/ Discussion sur les arguments permettant de diagnostiquer les modes de ventilation :.....	86
III. BIBLIOGRAPHIE.....	101
A/ Ouvrages historiques et techniques :	101
B/ Sites archéologiques :.....	102
C/ Expérimentations :	105
D/ Données ethnographiques :.....	106
DEUXIÈME PARTIE.....	109
PROPOSITIONS, EXPERIMENTATIONS ET REFLEXIONS AUTOUR DE LA REDUCTION DU MINERAI DE FER PAR PROCEDE DIRECT AVEC UNE VENTILATION NATURELLE	109
I. GENERALITES SUR LA REDUCTION DIRECTE	110
A/ La structure	110
B/ Principes	111
C/ Mode opératoire.....	111
II. LES ENSEIGNEMENTS D'UNE FOUILLE ARCHEOLOGIQUE SUR LE TRACE DE L'AUTOROUTE A 87.....	112
A/ La structure du four.....	112
B/ Analyse des fragments	113
C/ Le système de ventilation	113
D/ La fosse de piégeage à scories	114
E/ Discussion et propositions	114
III. LES EXPERIMENTATIONS	116
A/ Premiers essais.....	117
B/ Proposition	117
C/ Premiers résultats	118
D/ Le four d'expérimentation démontable en terre cuite	119
IV. BILAN ET PROPOSITION D'INTERPRETATION	120
A/ Discussion.....	120
B/ Perspectives.....	121
SESSION D'EXPERIMENTATION SCIENTIFIQUE - FETE DU FER 2002	127
I. INTRODUCTION	128
II. EXPERIMENTATION SCIENTIFIQUE.....	128
A/ Extraction du minerai	129
B/ Bas-fourneau à ventilation naturelle	131
C/ Bas fourneau en ventilation forcée	136
III. CONCLUSION :.....	140

ANALYSE DES PRODUITS DE LA REDUCTION DIRECTE EXPERIMENTATION 2002	142
I. LE MATERIEL ANALYSE	143
II. LES ANALYSES CHIMIQUES	144
A/ L'argile de l'enduit interne du four	145
B/ Le charbon de bois	145
C/ Le minerai	147
D/ Les scories	147
III. BILAN CHIMIQUE	148
A/ Fractionnement des éléments.....	148
IV. CONCLUSION	151
A/ Les résultats positifs	151
B/ Les problèmes résiduels	152
SESSION D'EXPERIMENTATION SCIENTIFIQUE - FETE DU FER 2003	158
I. REDUCTION EN BAS FOURNEAU A TIRAGE NATUREL DE DIMENSIONS INTERNES CORRESPONDANT AUX DONNEES ARCHEOLOGIQUES.....	159
II. CONSTRUCTION DU FOURNEAU.....	160
III. GRILLAGE DU MINERAI - CONCASSAGE	161
IV. RESULTATS.....	162
V. PERSPECTIVES ET PROJETS	163
A/ Réalisation de nouvelles opérations de réduction en ventilation naturelle dans un four de grande dimensions.	163
B/ Etude du comportement d'une minerai différent en réduction et post-réduction.....	163
TROISIEME PARTIE.....	174
QUESTIONS LIEES A L'EPURATION	174
I. INTRODUCTION	175
II. RESULTATS	178
A/ Expérimentation 1 : épuration de type « martelage »	178
B/ Expérimentation 2 : de type « grappage »	181
C/ Expérimentation 3 : de type « grappage».....	185
III. DISCUSSION DES RESULTATS ; APPORTS ET LIMITES DE L'EXPERIMENTATION	188
GLOSSAIRE.....	191

Introduction générale

La paléoméallurgie du fer est étudiée par un ensemble conséquent de disciplines : archéologie, histoire des techniques, ethnologie. Ces études, chacune dans leur domaine, ont considérablement fait progresser la connaissance des « savoirs et des savoir-faire » de la métallurgie pré-industrielle : meilleure compréhension des procédés, de l'organisation des ateliers, de l'usage des matériaux, minerai, fondant, ajout, ou outil, analyse fine de la chaîne opératoire et des objets, dont témoignent les publications les plus récentes. Mais du simple fait qu'elles ne reposent pas sur les mêmes sources, qu'elles n'interrogent pas les mêmes époques et les mêmes lieux, et qu'elles ne mettent pas en œuvre les mêmes compétences, les mêmes cultures scientifiques et techniques, elles diffèrent bien souvent dans l'approche et dans la mise en œuvre des résultats: l'archéologue met à jour les traces et restes d'ateliers métallurgiques ; l'historien décrypte et interprète ce que les énoncés techniques, fruits des cultures passées, lui offrent d'information ; l'ethnologue analyse ce qu'il voit faire sous ses yeux par des cultures différentes de la sienne. Certes, le croisement des approches existe; même il fut précoce : en 1937, le tout jeune Institut d'Histoire des Sciences et des Techniques fondé par Abel Rey célébrait l'usage conjoint de l'archéologie, de l'expérimentation, de l'analyse chimique, de l'analyse micrographique et de la radiographie par rayon X pour décrypter la technique de fabrication des lames de sabres antiques; et la mise en commun des méthodes de l'archéologie avec la linguistique, la géographie et l'histoire des techniques pour comprendre l'invention du bronze (Brunet 1936-37). Un pas considérable fut franchi dans le milieu des années 1970, avec la création du G.M.P.C.A., initialement « Groupe des Méthodes Physiques et Chimiques Contribuant à l'Archéologie » devenu en 1987 le « Groupe des Méthodes Pluridisciplinaires Contribuant à l'Archéologie », après l'arrivée en son sein des sciences de la nature. Véritable outil pluridisciplinaire, fédéré par le terme « archéométrie », le G.M.P.C.A. réunit des spécialistes appartenant à diverses disciplines (prospection, datation, analyse des matériaux, études environnementales, géologie, botanique, zoologie, anthropologie...) et contribue à la résolution de problèmes archéologiques. Plus de trente années de travaux riches et fructueux ont validé cette démarche fondamentale, désormais indispensable à l'archéologie.

Cela étant, le G.M.P.C.A. ne prend pas en charge toute la pluridisciplinarité, puisque, fidèle à son dessein scientifique d'archéométrie, il fédère autour de l'archéologie l'ensemble des sciences « non humaines » intervenant dans l'étude des témoins matériels de l'activité passée des hommes et du milieu dans lequel ils ont vécu (Tabbagh 1994). Une nouvelle étape se dessine, qui rapproche les études paléoméallurgiques, du programme fixé en 1937 par l'équipe pionnière de l'Institut d'Histoire des Sciences et des Techniques à propos du bronze : la rencontre entre l'archéologie et les sciences humaines, tout particulièrement l'histoire des techniques et l'ethnologie. Chacun sait la richesse des travaux réalisés en la matière ces vingt dernières années par Paul Benoit, Phillippe Braunstein, Philippe Fluzin, Alain Ploquin. Plus récemment, tirant tout le parti d'une pluridisciplinarité comprise dans son sens le plus large, les chercheurs africains en même temps qu'ils mettaient à jour l'importance et de la spécificité des savoirs-faire des métallurgistes à l'échelle de leur continent, faisaient franchir un pas considérable à la compréhension des changements techniques dans le domaine de la paléoméallurgie (Yandia 2001, Bocoum 2002, Coulibaly 2006). En France, dans le même esprit, le très récent colloque international sur l'acier (Verna, Dillmann 2005), les travaux sur la paléoméallurgie alpine (Braunstein, Baraldi, Belhoste 2001), les travaux sur les fers et tirants du Palais des Papes (Dillmann, Bernardi 2003), renouvellent le champ, tant au plan des méthodes qu'à celui des résultats.

Cet élargissement de la pluridisciplinarité doit beaucoup à l'émergence de l'archéologie expérimentale, comme discipline complémentaire de l'archéologie des produits et matériaux, pour résoudre les problèmes posés par la conservation et la restauration de ce patrimoine culturel. Condition nécessaire à l'interprétation des faits, l'archéométrie n'en n'est pas en effet pour autant la condition suffisante : trente années de pratique ont abouti à ce constat méthodologique. Il ne suffit pas, pour connaître un artefact, d'en détecter la composition intime même si celui-ci garde traces des gestes et des choix techniques, des erreurs et des repentirs de l'artisan. Il s'avère indispensable, en complément, d'appréhender l'intimité du procédé qui l'a fait naître, d'approcher la culture technique qui a en a autorisé la conception et la réalisation. L'archéologie expérimentale, qui tend actuellement à se généraliser, dans l'archéologie des arts du feu, du textile, de la construction terrestre et navale pour ne citer que quelques exemples, après avoir fait progressé l'archéologie pré- et proto-historique, induit de fait un rapprochement neuf entre archéologie, artisanat, histoire et ethnologie des techniques. Archéologues et artisans-praticiens, archéologues et ethnologues travaillent

le geste, les matériaux, les dispositifs en atelier ; archéologues et historiens travaillent les énoncés techniques, l'approche textuelle et contextuelle. En retour, l'historien améliore, au contact de l'archéologue et de l'ethnologue, sa compréhension des textes et des faits techniques. A sa modeste échelle, le PCR *Vents et fours : du minerai à l'objet*, dont les travaux se sont déroulés entre 2005 et 2006, s'inscrit dans cette nouvelle forme de pluridisciplinarité. Trois objectifs ont motivé sa mise sur pied :

- 1) comprendre le fonctionnement des bas-fourneaux à ventilation naturelle en prenant pour référentiel l'expérimentation, et en y rapportant les indications obtenues par la fouille archéologique, l'analyse archéométrique et l'analyse technique;
- 2) mieux appréhender la relation réduction/forge en conjuguant expérimentation et archéométrie;
- 3) déterminer une grille de lecture qui puisse être intelligible pour l'ensemble des disciplines scientifiques s'intéressant à la paléoméallurgie ;

Voilà pourquoi le rapport final comporte trois parties distinctes. Une première partie méthodologique s'attache à définir les notions et outils de pensée partageables par chacune des disciplines concernées. Elle se présente sous la forme de deux parties distinctes : une approche d'ensemble (A.-F. Garçon, N. Girault, A. Ploquin, J.-B. Vivet, C. Colliou, R. Aranda) ; une approche bibliographique et typologique plus spécifiquement centrée sur la ventilation naturelle (S. Pellequer, A.-F. Garçon). Consacrée aux résultats proprement dit, la seconde partie, présente le bilan des expérimentations et réinterprète les données de fouilles (C. Colliou, R. Aranda, J.-B. Vivet) ; enfin, une troisième partie, présente ce moment mal connu de la chaîne opératoire, qu'est la post-réduction en soulignant sa spécificité et son importance (R. Aranda, P. Dillmann).

Première partie

Du minerais à l'objet : approche méthodologique

(AF. Garçon, N. Girault, A. Ploquin, J.-B. Vivet, C. Colliou, R. Aranda)

I. Introduction

Comment à la fois comprendre les termes anciens et les restituer avec nos concepts actuels ? La question, difficile déjà lorsqu'elle s'adresse à l'archéomètre confronté à la matière, tient de la quadrature du cercle, lorsqu'elle s'adresse à l'historien, confronté à des énoncés se rapportant à cette matière, mais formulés dans le cadre de référentiels devenus obsolètes, dans le cadre de cultures techniques qui les imprègnent et déterminent leurs formes et leurs contenus tant explicites qu'implicites. Est-il alors vraiment utile de s'échiner à comprendre les termes anciens ? Oui, parce que les énoncés techniques des temps passés contiennent précisément ces référentiels obsolètes, et qu'à condition de les comprendre, de les interpréter correctement, ils permettent d'approcher les cultures techniques qui les ont engendrés. L'intérêt est dans ce double mouvement, d'éloignement, de mise à distance de la culture technoscientifique occidentale contemporaine, et de rapprochement, de mise au contact avec les régimes anciens de la technique. L'histoire, ici, se fait technologie, c'est-à-dire qu'elle produit un discours scientifique raisonné sur les pratiques et techniques du passé, en interrogeant ce qu'il reste des énoncés qu'elles ont produits. Mais une technologie d'interface, le produit d'un dialogue entre l'herméneutique et la mesure, entre la culture technique ambiante et ce que le présent comporte de différenciations et de cultures techniques peu ou pas imprégnées, modelées par la science, voire modelées ou imprégnées d'une autre manière, entre la culture technique ambiante et celle des énoncés, des époques qu'il étudie. La compréhension des énoncés anciens se rapportant aux techniques de production : textes, illustrations, index et dictionnaires, requiert un dialogue constant avec l'archéologue, l'archéomètre, l'ethnologue, le lexicographe. Et réciproquement, une bonne compréhension des énoncés techniques anciens facilite la tâche des archéologues, archéomètres, ethnologues et lexicographes.

La pluridisciplinarité requise requiert un minimum d'entente entre des disciplines qui certes s'intéressent au même objet, mais n'ont en commun ni les buts, ni les moyens. Recourir au couple archéologie/archéométrie, c'est donner la priorité à l'histoire de l'objet. Recourir au triptyque archéologie/expérimentation/archéométrie, c'est enrichir l'histoire de l'objet; c'est de surcroît interroger le procédé. Y ajouter l'étude historique des textes, c'est enrichir l'histoire du procédé; c'est de surcroît interroger la

culture technique, travailler à l'histoire de la pensée qui a usé du procédé et confectionné l'objet, qui l'a inventé et/ou l'a transmis, et/ou l'a fait évoluer (Dillmann, Bernardi 2003). L'écriture du présent rapport a confirmé ces différences de représentations et montré combien il est difficile aux chercheurs, toutes disciplines confondues, de se dessaisir tant soit peu du vocabulaire et des protocoles auxquels ils sont habitués, au motif que ce protocole, ce vocabulaire compliquent ou obscurcissent l'analyse dans une discipline voisine. La prise en compte de l'historicité d'un terme, d'une notion, d'un concept, en complément de l'historicité des fours, des procédés, complique la tâche des paléoméallurgistes. L'empirisme expérimental, celui-là même d'où est née pour partie la métallographie, choque l'archéomètre. L'historien s'offusque des anachronismes sémantiques des archéologues, à quoi ces derniers répondent qu'il leur faut bien des termes et des définitions. D'où il résulte qu'aujourd'hui encore, « le fer des historiens n'est pas celui des archéologues » (Verna 2002). Faut-il qu'il le devienne ? Pas complètement sans doute, si tant est que la pluridisciplinarité n'est pas l'interdisciplinarité et que chaque discipline a besoin de disposer des outils de pensée qui lui soient propres et ne tiennent qu'à elle. Il est indispensable, néanmoins, de travailler à la concordance des faits, de ces faits portant sur le même sujet, mais pas exactement semblables, que tentent de décrypter l'historien, l'archéologue, l'archéomètre, le linguiste, l'ethnologue ; d'élaborer à l'intersection des disciplines une culture commune - non pas unique, mais commune, une culture qui, sans créer des suppléments d'hétérogénéité, rendrait discernables des objets, des procédés, des modes opératoires identiques dans leur nature mais morphologiquement ou sémantiquement différent - ou à l'inverse des objets, procédés, techniques, modes opératoires sémantiquement semblables mais différents en nature; une culture qui donnerait accès à ces pensées techniques d'avant le XIXe siècle européen ou d'ailleurs, connues pour avoir conjugué ténuité de la scientificité et fort potentiel métaphorique et pour avoir, dans leurs dénominations, ramené la caractérisation physique à l'usage (Garçon 2002).

Le bénéfice d'une telle démarche est évident dans le long terme. A moyen terme, la démarche obligera chacune des disciplines à avancer dans la compréhension des sujets qui l'occupent. Ainsi, pour ce qui est de l'histoire des techniques, à l'instar du terme « sidérurgie », devenu générique dans notre culture technique pour désigner la métallurgie du fer, et qui, loin de la neutralité descriptive que nous lui connaissons, est

historiquement daté, qu'il est un marqueur des débuts de l'industrialisation puisque néologisme créé de toutes pièces par les savants du XVIIIe siècle désireux de construire une approche rationnelle, scientifique de la métallurgie en lieu et place des pratiques artisanales, l'histoire des termes majeurs de la métallurgie, « fonte » et « fusion » compris, l'histoire de leur emploi et de leur intégration dans le vocabulaire scientifique, reste à faire... A condition toutefois de prendre l'histoire pour ce qu'elle est, c'est-à-dire une analyse scientifique des énoncés techniques anciens et non la mise à disposition d'informations utilisables en l'état, comme de fiches techniques que nous auraient léguées les anciens métallurgistes. Arrêtons-nous un instant sur cette question : son statut de l'histoire, comme outil de compréhension de l'évolution technique est ambiguë en effet : les textes sont souvent dédaignés parce que les mots et les concepts qu'ils mobilisent ne sont plus en phase avec les mots et concepts scientifiques actuels; il en va ainsi des traités du XIXe siècle, alors même que ce siècle fondait la « métallurgie scientifique ». Souvent, au contraire, textes et images historiques sont surévaluées, utilisés de manière prédatrice; envisagées comme s'il s'agissait de photographies; il en va ainsi des textes de l'époque moderne, considérés presque des albums que l'on consulte pour comprendre la technique, le procédé, l'atelier que l'on cherche à comprendre, en oubliant que ces ouvrages sont eux-mêmes le fruit d'une intention, en oubliant qu'ils sont tributaires d'une culture technique, tributaires aussi des techniques d'impression et de figuration, des conditions de parution et de compréhension de leur époque. Qui d'entre nous ne s'est pas tourné vers le *De re metallica* d'Agricola à la recherche de la planche ultime, celle à laquelle le terrain ou le texte étudié correspondra le mieux. Qui d'entre nous n'a pas pris les planches de *l'Encyclopédie* de Diderot et d'Alembert pour argent comptant, en oubliant l'histoire du texte, ses emprunts et pillage, en négligeant les multiples erreurs qui émaillent l'ouvrage aux dires mêmes de ses rédacteurs, qui bien souvent ont profité de la reprise par Panckoucke, sous la forme d'*Encyclopédie méthodique*, pour les corriger ?

Le but de cette approche méthodologique est présenter, discuter et mettre à disposition les outils de pensée, les concepts nécessaires aux chercheurs qui rencontrent sur leur route la paléométaballurgie, qu'ils soient ou non spécialisés en ce domaine. Nous avons également travaillé à l'élaboration d'une grille de lecture qui permette l'appréhension des objets, techniques et procédés quelle que soit le lieu de l'observation : fouille, texte, enquête orale, expérimentation, et cela sans obérer la

compréhension de ces objets, techniques et procédés par les disciplines complémentaires. Pour quels objectifs ? Faciliter le travail de tous d'une part ; aider à incorporer l'approche historique à ce couple scientifiquement constitué qu'est le couple archéologie/archéométrie, à ce trio en voie de constitution qu'est le trio archéologie/expérimentation/archéométrie. Nous proposons au lecteur une démarche en trois temps. Dans un premier temps, nous mettons à leur disposition une définition critique des grandes notions qui caractérisent et environnent les procédés techniques, en usant de ce que l'expérience et le développement de l'histoire et de l'archéologie des techniques ont appris à leur propos. Dans un deuxième temps, nous resserrerons notre propos autour de l'atelier paléoméallurgique, pour opérer une approche analytique du procédé direct, en prenant soin d'y faire converger les trois grandes approches archéologiques, physico-chimiques, historiques. Enfin, nous présentons une grille de lecture qui intègre les cinq niveaux possibles d'approches et d'analyse : la fouille, le travail en archives, l'expérimentation, l'archéométrie, l'approche ethnographique. Cette grille pourra paraître simple : elle nous a paru suffisante, dans cette première tentative, pour que chacun, à commencer par le chercheur non spécialisé dans l'un ou l'autre des domaines, s'y retrouve et l'enrichisse. C'est là un début, une première synthèse, que ne manqueront pas, par la suite d'étoffer, le supplément d'expérience, la critique et le dialogue entre les disciplines concernées.

II. Approche critique des grands outils de pensée : lignées, complexes techniques, chaînes opératoires.

La difficulté, pour le chercheur consiste à situer l'atelier ou le procédé qu'il lui revient de comprendre et d'analyser en fouilles ou en archives, sur les deux plans de la diachronie, qui est l'insertion possible si ce n'est dans une chronologie, du moins dans une temporalité, et de la synchronie, qui est l'insertion possible si ce n'est dans un ensemble fonctionnel déterminé, du moins dans un environnement productif, dans un territoire qui le spécifie. Or, ces deux plans sont malaisés à se représenter et difficiles à dissocier. Des notions et des outils de pensée existent pour faciliter le travail, qui demeurent toutefois diversement voire sous-utilisés. Le concept de chaîne opératoire défini en son temps par André Leroi-Gourhan est bien connu des archéologues et des ethnologues qui le pratiquent abondamment, tandis que les historiens en font rarement usage. Les notions de complexes, lignées, systèmes techniques, qu'a largement contribué à édifier Bertrand Gille, sont principalement utilisées par les historiens, plus rarement par les archéologues et les ethnologues, alors qu'elles sont utiles.

A condition toutefois de bien comprendre le statut du concept dans le raisonnement scientifique, de ne pas lui conférer une essentialité qu'il ne possède pas. Un concept, en effet, ne définit pas l'essence des choses comme nous le verrons tout particulièrement pour la chaîne opératoire. C'est une représentation raisonnée qui fournit à un moment donné, la meilleure approche possible des faits ou enchaînements de faits analysés. Un concept peut perdre de sa pertinence lorsque l'environnement de pensée qui l'a engendré, lui ou l'interrogation à laquelle il répond, s'est modifié. Un concept est jetable, ou à tout le moins sujet à reprises, ajustements. Il ne s'agit pas de basculer dans le relativisme total, ou de transformer la discussion scientifique dans une sorte de « foire aux idées » où chacun choisirait ce qui lui semble le plus approprié en son âme et conscience. Il s'agit de construire des outils de pensée qui fassent se hisser l'approche au-delà du local vers la recherche d'une raison globale, de construire des concepts qui donnent une assise aux hypothèses unificatrices de niveau général. Car le concept induit des hypothèses, c'est son principal objet et la raison de son utilité. Et, à l'instar de ces hypothèses que

l'avancée scientifique confirme ou infirme, il est sujet après avoir été éprouvé, à modification, à confirmation ou au contraire à abandon.

A/ Qu'est-ce qu'une lignée technique ?

La lignée technique se rapporte à l'objet, et plus précisément à l'outil, à la machine. Mais il peut s'agir aussi d'un procédé, par exemple : le grillage du minerai, un type de tissage, etc. *Définissons la lignée technique comme la déclinaison d'une machine, d'un outil, d'un procédé à partir d'une souche originelle au travers du temps, des espaces, voire des systèmes techniques.* Il peut y avoir des lignées de fours, de roues, de métiers à tisser, d'instruments de percussion, d'embarcations, des lignées de brouettes ou de faucilles, des lignées de meules, de vases... L'outil est principalement diachronique donc. Il témoigne d'une genèse ; il témoigne de la prégnance d'héritages. Détecter une lignée technique dans un domaine donné et la suivre, revient à porter l'interrogation sur une évolution ou à l'inverse, sur une fixation de forme, d'usage, d'environnement sémantique et symbolique ; à comprendre les modalités d'une transplantation, de l'hybridation d'un outil, d'un machine d'un procédé dans un environnement géologique, géographique, culturel, ethnologique, social autre que celui qui l'a vu naître. Car une lignée technique évolue en fonction de l'usage, des besoins, de la culture technique, de l'expérience acquise dans tel usage, dans tels besoins, etc. et peut se subdiviser en un nombre considérable de sous-lignées, qui elles-mêmes évolueront, voire donneront naissance à de nouvelles lignées, en fonction de l'époque, du milieu, de la culture technique, de l'évolution technique, sociale, économique ou politique générale. L'approche devient indispensable lorsqu'il s'agit d'apprécier les modalités du développement technique : emprunt, imitation, invention, évolution, recouvrement, développement parallèle à partir d'un objet ou d'un outil donné, lorsqu'il s'agit de définir et d'apprécier la potentialité adaptative d'un objet, lorsqu'il s'agit aussi de repérer les foyers d'invention de lignées techniques différentes quoique destinées à la production de matériaux semblables.

Donnons pour exemple, la métallurgie du zinc, telle que l'Europe continentale la mit au point à la charnière des XVIII^e et XIX^e siècles (près de dix siècles après l'invention de cette métallurgie en Inde et en Chine) : trois filières différentes émergèrent dans trois lieux de production distincts, en pays de Liège, en Silésie et en Carinthie, chacune

prenant sa source dans une lignée de four. Or, la filière carinthienne, qui reprenait pour cet usage la lignée des fours horizontaux (fours à réverbère), bien qu'elle ait fonctionné et produit, s'avéra difficile à faire progresser. Cette filière, "née bloquée", fut une impasse technique parce que sa potentialité d'amélioration était quasi nulle à la différence des filières liégeoises et silésiennes qui reposaient sur deux autres lignées, plus flexibles (Garçon 1998). Dans ce même ordre d'idée, la notion est nécessaire pour vérifier l'hypothèse de la simplification technique, qui tend à considérer que le véritable progrès technique va dans le sens d'une simplification de l'objet et du geste, comme l'a théorisé Robert Cresswell : en termes d'efficacité technique, le signe du progrès technique, se place dans la simplification apportée à un outil, à un procédé. L'homme « en progrès technique » est celui qui tend à contrarier l'entropie du système dans lequel il évolue et que sa présence et son action tendent en permanence à accroître (Cresswell 2003).

L'usage de la notion comporte quelques risques toutefois qu'il convient de repérer, d'évaluer et de circonscrire : Le premier des risques possibles se rapporte à la typologie. Non pas que la démarche typologique soit méprisante en soi. Bien au contraire, puisqu'elle est au sens premier la « science de l'analyse et de la description des formes typiques d'une réalité complexe, permettant la classification » (TLF). L'outil, l'objet matériel, l'instrument, la machine relèvent de cette réalité complexe dont il faut faire l'analyse et la description. Il est indispensable d'en établir les formes typiques pour les interpréter et les comprendre, *a fortiori* lorsque la recherche met l'accent sur le décodage d'une lignée technique et de son comportement au travers de temps et d'espace donnés. André Leroi-Gourhan, Bertrand Gille n'ont pas procédé autrement. On conçoit donc aisément que la démarche typologique puisse aisément être ressentie comme centrale lorsque la recherche porte sur l'étude d'une lignée technique. A condition de comprendre le statut donné à cette approche : est-ce un objectif ou bien a-t-elle rang de moyen, et dans ce cas, quel est l'objectif recherché ? La question est moins aisée qu'il n'y paraît. La science de la typologie sert à l'établissement de classifications. Mais une classification est-elle pertinente en soi, entendons : porte-t-elle en soi, du simple fait qu'elle a été établie, la compréhension de l'objet, le décodage du procédé, de l'outil dont on cherche à comprendre la filiation ? André-George Haudricourt, expert en la matière, est catégorique à cet égard, et s'en explique dans les premières pages de son grand œuvre, *L'homme et la charrue* : étudier un objet

technique strictement à partir de sa typologie – il s'agissait en l'occurrence de déterminer la différence entre araire et charrue - c'est aller à l'impasse. L'étude typologique, qui est intrinsèquement morphologique, obscurcit le problème de la distinction entre les deux outils aratoires et du passage de l'un vers l'autre - en créant de fausses corrélations qui induisent en conséquence de fausses interprétations. Pire, l'usage de la seule morphologie ne permet pas d'établir un partage rigoureux entre les deux instruments, à l'échelle du globe et des temps. Haudricourt en tira pour enseignement qu'un objet technique se définit moins par son action que par sa fonction, que ce n'est pas la forme qui définit l'instrument, ni même le procédé dont il est le support, mais ce à quoi il sert ; ajoutons quant à nous, pour éviter de basculer dans un fonctionnalisme de mauvais aloi, la caractérisation physico-chimique des matériaux qui le constituent et qui lui donnent ses qualités intrinsèques. Cela ne signifie pas qu'il faille jeter la typologie aux orties. Cet outil de travail contribue à structurer les données, à soupeser les tensions solidité/fragilité, cohérences/incohérences, évolution/rupture. Cela signifie que la typologie ne fournit en soi aucun résultat, contrairement à ce qu'elle peut laisser paraître, contrairement à ce qu'elle peut faire accroire du fait qu'elle structure; c'est une étape qui doit être ensuite complétée par d'autres approches, l'une se rapportant à la fonction des outils décrits, l'autre se rapportant à l'habitus technique et à la position sociale des agents qui les mettent en œuvre, la troisième à la nature des matériaux engagés.

Insistons sur les deux premiers aspects. Dans le principal de leur usage (il n'est pas question ici des usages secondaires ou détournés), l'homme n'invente pas une forme d'outil pour ensuite lui trouver une application; il fait face à un besoin technique : frapper, tisser, coudre, etc., auquel il répond en trouvant un objet adéquat, voire en inventant une forme. Les pages magistrales d'André Leroi-Gourhan sont dans toutes les mémoires, ces pages où il dépeint l'homme au Paléolithique moyen transférer son attention du silex taillé - première forme inventée pour un besoin défini - pour s'intéresser au déchet, à l'éclat, seconde forme, ou plus exactement première bibliothèque de forme, le *nucleus*, première forme multi-usage : « le bloc initial, d'outil est devenu source d'outils » (Leroi-Gourhan : (1964) 1978 : 144-145). Il en va de même en métallurgie : l'opérateur, toutes époques et tous lieux confondus, ne construit pas un four pour faire du « direct » ou de « l'indirect », mais pour faire le type ou la quantité de métal ou de produit intermédiaire dont il a besoin pour honorer une commande reçue,

fabriquer un outil et le vendre, ou tout simplement écouler ce type de métal brut qu'il sait intéresser les marchands, qu'il pense pouvoir être écouler sur un marché. Ce four sera certes édifié en fonction des matières premières disponibles ; il aura les contours morphologiques de la culture technique ambiante, facteurs qui constituent autant de « sentiers de dépendance » que suivront les fondeurs et les forgerons. Il n'en demeure pas moins que dans la pensée anticipatrice, ce moment où le métallurgiste se décide à opérer et adopte un protocole, sa réflexion va de l'objet ou du métal que l'on veut produire vers le four qu'il va construire, et non l'inverse. « Les choix techniques visent l'obtention d'objets, de formes, dimensions et caractéristiques mécaniques voulues, c'est-à-dire tels que les utilisateurs finals – maréchaux des villages, serruriers, armuriers et autres artisans urbains du métal – réclamaient pour exercer au mieux leur métier », souligne justement J.-F. Belhoste (Belhoste 2001). Et de cela, la typologie, *stricto sensu*, n'en rend pas compte.

Mais dans la trilogie matériaux/culture/fonction qui décide de la morphologie d'un outil, la culture déborde la fonction : c'est elle qui, pour une fonction donnée, dans un territoire donné, détermine le type de four parfois, sa morphologie souvent. Jean-François Belhoste le montre à propos des nombreuses innovations que connut la métallurgie de l'arc alpin entre XIIIe et XVIe siècle : la culture technique acquise dans la métallurgie de l'argent en termes d'affinage et de pratique des soufflets, donna aux artisans métallurgistes une grammaire technique qu'ils mirent en œuvre lorsque le temps fut venu, entre fin du XIIIe et début du XIVe siècle, d'infléchir leurs pratiques vers la métallurgie du fer. Les « *furni* », les fourneaux à plomb et à fer étaient des instruments comparables – ce que ne dément pas l'organisation de la matière métallurgique par Agricola. Un même terme « *fusina* » désigna d'abord l'atelier de coupellation du plomb d'œuvre (plomb+argent), puis l'atelier d'affinage du fer, « transfert de vocabulaire qui correspondrait à un transfert d'équipement, de savoir-faire ». Il arrive, historiquement, que le statut social s'en mêle. Ainsi, chez les forgerons Moose entre XVIe et XVIIIe siècle en Afrique : au sortir d'une phase de transition qui dura près de deux siècles, les lignages de forgerons devinrent maîtres de la totalité de la chaîne opératoire aux dépens des agriculteurs-métallurgistes. Cette évolution, contemporaine de la montée en puissance du royaume du Yatenga (nord du Burkina Faso), s'acheva à la fin du XVIIIe siècle avec la codification du statut des forgerons. Sa traduction, au plan technique, fut le développement d'une lignée technique originale, la

lignée du four « *bonga* », véritables hauts-fourneaux à ventilation naturelle, mesurant 6m à 6m50 de haut, et reposant sur le principe de la combustion lente, dont les forgerons Moose gardaient jalousement la compétence technique (Martinelli 2002).

L'exemple du Yatenga est doublement intéressant, puisqu'il met à jour une évolution interne au « procédé direct », avec passage du bas-fourneau au haut-fourneau pour la production de loupe, et atteste que la lignée des « hauts-fourneaux » ne se limite pas aux fourneaux à ventilation forcée produisant de la fonte liquide (*blast-furnace*), le principe de haut-fourneau à combustion lente, également attestée au Bwamu (Burkina Faso, Coulibaly 2006), évitant sans doute sa formation, contrairement aux *Stuckhofen*, que J. Percy, en 1864, qualifiait de « *high-bloomery furnace* », littéralement : haut-fourneau produisant une loupe. Encore en usage au début du XIXe siècle en Thuringe, ces hauts-fourneaux à production de loupe donnaient de la fonte liquide en produit secondaire au grand dam des métallurgistes (Percy 1864 : 319-320). La lignée des haut-fourneaux comprend donc : des fours susceptibles de produire du cuivre et du plomb (Schlutter 1751), des fours susceptibles de fonctionner en ventilation forcée et en ventilation naturelle (Percy 1864, Bocoum 2002), des fours travaillant en phase solide et en phase liquide. Cela ne signifie pas que l'adéquation courante : bas-fourneau / procédé direct ; haut-fourneau / procédé indirect soit fausse. Cela signifie qu'elle correspond à un temps et un espace donné et qu'elle ne rend pas compte de la totalité des faits ; qu'elle est locale et non générale parce qu'elle ne s'applique qu'à la catégorie de phénomènes ressortissant à la métallurgie du fer, et parce que, y compris au sein de la métallurgie du fer, elle ne rend compte qu'imparfaitement de l'évolution technique.

On peut, certes, qualifier le four « *bonga* » de « bas-fourneaux » ces fourneaux de 6 mètres de haut et plus au motif qu'ils produisent une loupe de fer. Mais, outre que les archéologues et ethnologues africains ne font pas ce choix et qu'une telle dénomination est fautive en pure logique puisqu'elle qualifie de "bas" quelque chose de très grand, elle ne rend pas compte du saut technique que suppose la maîtrise des phénomènes physico-chimiques induits par le changement d'échelle : contrôle du feu, répartition de la chaleur, descente de la charge, usage de fondant(s), nature des produits obtenus primaires et secondaires, toute questions techniques qui ne se posent pas de la même manière selon que l'on travaille dans des fours de 1m50 de haut et dans des fours de 6m50. La question posée par l'existence du four *bonga* relève bien

de la constitution d'un *habitus* technique, celui de la gestion réussie du saut technique et de ses conditions, celui de l'acquisition de la grammaire technique qui a autorisé le changement d'échelle - à quoi s'ajoute la question plus aléatoire des possibles qu'autorise l'acquisition de la nouvelle grammaire technique. Mais elle relève aussi de l'insertion d'une lignée technique dans une filière de production, qu'elle ne suffit pas à spécifier. Toutes questions intéressantes, susceptibles d'améliorer notre connaissance des mécanismes du changement technique, au-delà de la seule question de la métallurgie du fer. Voilà pourquoi il est mal venu de poser la question de l'outil sans envisager sa fonction, d'envisager sa fonction indépendamment de la morphologie, et sa morphologie indépendamment des processus physico-chimiques, à partir de quoi se constitue la grammaire technique nécessaire à la maîtrise du procédé pour le but recherché : produire tel type de loupe ou de fonte de fer, susceptible par la suite de donner, telle sorte de fer, de fonte ou d'acier.

Il est un autre risque que fait courir la notion, celui de transformer une étude de lignée en lecture de type évolutionniste, au motif qu'il s'agit d'une analyse diachronique. André Leroi-Gourhan est catégorique à cet égard : « c'est de la confusion entre les deux mouvements (chronologique et logique) que naissent les théories les plus séduisantes sur l'évolution humaine. » (Leroi-Gourhan 1943 : 25). De même, il est dangereux de confondre trois termes, souvent pris l'un pour l'autre : changement technique, innovation, progrès technique. L'innovation est la mise au point d'un produit, d'un procédé ou d'un usage neuf, que l'on assimile souvent à une rupture. Le progrès technique est la capacité à augmenter la performance productive, l'efficacité d'un outil, d'un procédé, d'un savoir-faire. Enfin le changement technique est tout simplement, la modification que peut recevoir un outil, sans préjuger des raisons ou des résultats. Or, l'histoire des lignées techniques- qui peut être, comme nous l'avons dit, le bas-fourneau, le four horizontal, le haut fourneau, mais aussi la roue, la charrue, le métier à tisser, montre que changements, innovations et progrès techniques ne se confondent pas. Il est des progrès techniques qui s'obtiennent sans innovation à proprement parler, mais par une succession de micro-changements. Il est des innovations très régressives et pas seulement au plan social ; souvent même, dans un premier temps, l'innovation induit de la régression. Enfin, il est des changements techniques qui débouchent sur un maintien, une adaptation, sans progrès ni régression. Autre aspect tout aussi important, la longévité sans modification apparente d'une lignée technique ne doit pas être

automatiquement interprétée comme une stagnation technique. D'une part, parce que la lignée peut être l'objet de micro-changements difficilement perceptibles; d'autre part, parce que la lignée technique peut avoir atteint une maturité technique qui rend inutile voire dangereux, toute modification supplémentaire, dans un milieu donné. Ainsi, la faible évolution des marteaux, des couteaux, des allumettes, de l'aiguille à coudre, relève de la maturité technique plus que de la stagnation. C'est en ces termes donc, qu'il fut interrogé une lignée technique en apparence faiblement évolutive, en prenant bien soin de ne pas confondre « faiblement évolutive » à un temps donné, et « faiblement évoluée ». Enfin, pour dissocier du mieux qu'il est possible la lignée technique d'une approche « évolutionniste », ajoutons que la métaphore biologique qu'elle contient et sur laquelle elle s'appuie, ne saurait convenir à l'évolution technique. Ce serait même une faute, puisque la technique est, par définition, ce qui a permis à l'homme d'échapper aux lois de l'évolution; ce qui lui a permis de conjurer sa faiblesse biologique, et de devenir l'agent principal de modification des lois de la nature.

B/ Complexes, espaces et systèmes techniques.

Moyennant ces précautions, la notion de « lignée technique » est donc utile pour appréhender un outil, un objet, un procédé, sous l'angle diachronique. La notion de « complexe technique », quant à elle, renvoie d'abord à l'approche synchronique et permet de placer l'atelier découvert et analysé par la prospection ou la recherche en archive, dans sa matérialité contextuelle. Tout atelier de production en effet, quel que soit son objet, sa finalité, et quelle que soit sa taille, met en œuvre un complexe technique, qui garantit son existence, et avec lequel il tisse des liens dynamiques, avec lequel il interagit. *Qu'est-ce qu'un complexe technique ? L'ensemble des moyens matériels, intellectuels, financiers, culturels, économiques, juridiques, politiques nécessaires pour la mise en place d'un procédé, qu'il soit viable et productif, l'ensemble des moyens nécessaires au développement d'une lignée technique, à l'obtention d'objets.* Tout atelier, quelque soit sa taille, requiert pour sa mise en œuvre et son fonctionnement, un complexe technique. Pour appréhender un procédé, comprendre l'évolution d'une lignée, il ne suffit pas de s'en tenir à l'examen des dénominations, au relevé topographique, à la détermination des composants de l'atelier, de l'outil ou de l'objet. L'atelier, l'outil, l'objet, sont au centre d'un réseau qui les approvisionne en

matières premières, minerai, combustible, y compris l'alimentation des ouvriers, observe J.-F. Belhoste dans son étude sur la métallurgie alpine (Belhoste 2001). Elargir l'approche à celle du complexe technique, c'est percevoir l'horizon de travail de l'atelier, c'est ajouter à l'observation la dimension spatiale, penser en termes de territoire, c'est mesurer une emprise (Voir schémas des complexes techniques en annexes p.30 et 31). Ce complexe peut être minimal lorsqu'il s'agit d'ateliers temporaires, transitoires comme les forges volantes; il sera au contraire lourd, géologiquement et géographiquement déterminé, dans le cas d'atelier persistant, voire à demeure. Le complexe intègre des éléments qui relèvent isolément de la géologie, ou de toute autre forme de géographie physique : le minerai, l'eau pour le lavage ou la trempe ou pour la mécanisation du soufflage, le bois à charbonner, le bois pour les outils, le cuir pour les soufflets, l'argile pour le four et la brasque, les fondants, les ajouts, pour la métallurgie. Il intègre des éléments relevant de la géomorphologie, de l'histoire ou de la géographie sociales : facilités de circulation au sein d'un territoire donné, droit de propriétés sous toutes leurs formes : directe, éminente; droits d'usages, de taxation, etc.. Il intègre enfin des éléments relevant strictement de l'immatériel et cristallise de fait un bassin de compétences, si petit soit-il : compétence de métallurgiste et/ou du forgeron, compétence de charbonnier, de potier, de charpentier, de soufflage, de marchand, de transporteur, etc., ce qui pose la question de la continuité – ou de la rupture - par les savoir-faire à côté de la continuité – ou la rupture - par l'environnement. Encore faut-il le déceler, ce qui requiert l'approche pluridisciplinaire.

L'archéologie est pionnière en la matière. Tout récemment, par exemple, le PCR Plomb Ancien du Mont Lozère (Alain Ploquin, Marie-Christine Bailly-Maître, travaux en cours) qui a découvert un procédé de production de plomb datant du Xe siècle, non documenté en archives, totalement inédit, sommaire en apparence puisqu'il s'agit de forges volantes, mais remarquablement pensé au regard de l'espace mis en œuvre et... toujours polluant ! La découverte s'est faite en mobilisant conjointement la fouille, l'analyse chimique des tourbières, la palynologie, la prospection des charbonnières, les relevés de terrain, l'expérimentation. Et ces moyens ont abouti à la mise au jour du complexe technique : charbon de bois, minerai, route, type de four utilisé. Il n'est pas étonnant cependant que l'étude des complexes techniques ait été ainsi pris en charge par les archéologues. Elle est particulièrement utile en effet pour élargir les perspectives, penser les à-côtés de la structure fouillée, et lorsque les particularités de la structure fouillée ont été bien mises en évidence, pour s'en abstraire, les mettre à

distance, interroger ses relations avec l'environnement – le milieu physique- en soulevant les questions du savoir et des savoir-faire - le milieu technique.

C'est ainsi que l'on passe du complexe technique aux notions supérieures d'espaces et de systèmes techniques. De quoi en effet se compose un espace technique si ce n'est d'un agrégat de complexes techniques? Loin s'en faut toutefois que ces agrégats s'ordonnent en système. Contrairement à ce qu'écrit Bertrand Gille, la question de la mise en système des agrégats techniques, évidente par exemple pour le XVIIIe siècle - ou de nos jours - reste ouverte pour de nombreuses périodes : avant le XIIe siècle, en Europe, ou encore l'Empire romain, en dépit du développement technique remarquable des 1er et 2ème siècles BC. D'où la nécessité de disposer d'une notion intermédiaire, plus souple à employer que celle de système, la notion d'espace technique. Parler d'espace technique, avant que de parler de système, présente le double avantage d'évaluer la profondeur et/ou l'extension d'une culture technique et de mesurer les différences qui peuvent exister entre lieux, régions, nations, au sein d'un même système technique.

C/ La chaîne opératoire : intérêt, limites.

La chaîne opératoire est un concept indispensable, le seul à la vérité, qui puisse aider l'archéologue et l'historien des techniques à comprendre les étapes d'élaboration d'un procédé. *La chaîne opératoire, c'est l'ensemble ordonné des gestes individuels et/ou collectifs mis en œuvre pour obtenir un objet. C'est une décomposition gestuelle du processus d'obtention du résultat.* Le concept est indispensable parce qu'il est le seul qui permette de suivre mentalement le déroulement d'un procédé, d'en comprendre les phases, et de l'appliquer mentalement à une étude sur le terrain, en archives, de donner sens à une analyse métallographique. Et, il donne sens à l'étude sociale des corps et communautés professionnelles, en posant la question de la maîtrise de telles ou telles phases par des groupes professionnels aux dépens d'autres (Martinelli 2002). Mais, c'est un concept très dangereux lorsqu'il est pris à la lettre. En fait, la chaîne opératoire à l'état pur n'existe pas. Le concept est le fruit d'une mentalisation de la technique, telle qu'elle s'est développée au XVIIIe siècle, tout particulièrement, alors qu'émergeait la technologie, qui est au sens propre, un discours savant sur la technique. Diderot participe de ce courant de pensée, lorsque dans

L'Encyclopédie, il propose d'abstraire de la technique, la rationalité qu'elle contient, pour en faire un objet en soi, en faire une science... A cette fin, le philosophe met le geste technique en images, il le transcrit en lui retirant toutes différences régionales, en ne s'intéressant qu'au tronc gestuel commun. Et s'en explique, à l'article « chamoiseur » : « Nous avons exposé l'art de mégisserie et de chamoiserie avec la dernière exactitude; on peut s'en rapporter en sûreté à ce que nous venons de dire : le peu qu'on trouvera ailleurs sera très incomplet et inexact... Il suffit d'avoir décrit exactement un art tel qu'il se pratique dans un lieu et tel qu'il se peut pratiquer partout. »... Diderot est sûr de lui, catégorique : « décrire exactement un art tel qu'il se pratique dans un lieu et tel qu'il se peut pratiquer partout... » suffit pour que la description remplisse l'objet qu'il se fixe : perfectionner l'industrie. De fait, l'*Encyclopédie* regorge de « chaînes opératoires », qui sont autant d'abstractions, qui réduisent la succession des gestes techniques à l'épure d'un geste idéal et rationalisé.

Cette volonté réductrice traduit malgré elle la complexité des procédés techniques qu'elle cherche à dépasser. Si l'on considère la chaîne opératoire comme la décomposition gestuelle du processus d'obtention du résultat, force est de constater que chaque étape pose une problématique à laquelle l'opérateur donne un ensemble de réponses. Chaque étape est à la naissance d'une arborescence de réponses qui se déploient selon la culture technique de l'opérateur, sa capacité d'invention, la richesse de sa grammaire technique, les potentialités du complexe technique qui l'environne et des lignées techniques dont il dispose. Prenons le forgeron : à chaque phase, il use des mêmes outils qu'il pose au même endroit. Cet ordonnancement spatial de l'atelier est l'une des conditions de son efficacité. Mais évoluant dans cet espace ordonné, et totalement mentalisé, il invente sans arrêt, de nouvelles réponses, de nouveaux gestes, pour faire face à la réactivité toujours différente de la matière... Il est utile donc, pour ne pas tomber dans le piège d'une réification, y compris temporelle, il est utile de comprendre que la chaîne opératoire générique est un outil de pensée, non une réalité, et de postuler systématiquement la possibilité de variantes. Cela vaut tout particulièrement pour les époques pré-industrielles, qui furent les moments par excellence de savoir et de pratiques locales, territorialisées. Revenons vers le forgeron : les gestes de la forge japonaise, ne sont pas ceux de la forge africaine qui ne sont pas ceux de la forge européenne.

« On peut, devant l'imbroglio des emprunts, des trouvailles locales, des influences se demander quelle précision contient une restitution de technique plus ancienne », écrit André Leroi-Gourhan alors même qu'il élabore le concept de chaîne opératoire. La notion relève pour lui d'une « technomorphologie » au plan de la méthode, et se justifie par le « caractère permanent des tendances », que nous appellerions aujourd'hui pour une grande part l'invariant technique. Et même dans ce cas : « Tout semble se passer comme si un prototype idéal de poisson ou de silex taillé se développait suivant des lignes préconcevables du poisson à l'amphibien, au reptile, au mammifère ou à l'oiseau, du silex indifférencié dans sa forme au tranchet de pierre polie, au couteau de cuivre, au sabre d'acier. Qu'on ne s'y trompe pas, ces lignes rendent simplement un aspect de la vie, celui du choix inévitable et limité que le milieu impose à la matière vivante. Il y a les tendances générales qui peuvent donner naissance à des techniques identiques mais sans lien de parenté matérielle et les faits qui, quelle que soit leur proximité géographique, sont individuels, uniques... Il y a bien identité technique, mais jusqu'à présent, aucun effort sérieux ne peut aboutir à démontrer la parenté de ces groupes humains. La charrue malaise, celle du Japon et celles du Tibet représentent trois formes voisines et certainement en rapport dans l'histoire ancienne des trois peuples : chacune pourtant, par le sol cultivé, par les détails de son montage, par le mode d'attelage, par le sens symbolique ou social qui y est attaché, représente bien quelque chose d'unique, de catégoriquement individualisé... Tout se présente comme s'il y avait à la fois une tendance « charrue » réalisée sur chaque point du temps et de l'espace par un fait unique et des rapports historiques certains sur des échelles de temps et d'espace parfois considérables. Au moindre faux-pas le spécialiste saute de l'un à l'autre et dépasse la mesure de la réalité. » (Leroi-Gourhan 1943 : 14-15). L'avertissement vaut toujours : l'identité technique ne signifie pas en soi une influence, une diffusion ou une transmission; elle peut exprimer tout simplement la matérialité de la technique, le fait qu'à une question technique, répond un outil, et qu'à un outil, répond un ensemble de gestes et d'agencements inévitables autant qu'obligés. La gamme d'outils et de gestes fondamentaux pour abattre un arbre, scier ses branches, mettre le tronc en bûches, est somme toute relativement étroite; de même que la gamme d'outils et de gestes fondamentaux pour fabriquer du métal. C'est à cette gamme étroite que renvoie la notion de chaîne opératoire, un schéma dont tout artisan-métallurgiste, dont tout forgeron chevronné savait - et sait toujours - s'échapper lorsque cela était nécessaire. Et de l'échappée, émerge l'invention et le renouvellement.

III. Les grandes lignées techniques de production des métaux ferreux

A/ Réflexions d'ensemble sur la métallurgie

La culture technique européenne opère traditionnellement une distinction nette entre métallurgie du fer et métallurgie des non-ferreux. Cette distinction, une opposition presque, est apparue dans les traités métallurgiques du courant du XVIIIe siècle, à l'orée de la révolution industrielle; elle reflète l'entrée en force du secteur de production des ferreux - fer, fonte, acier- dans les secteurs les plus dynamiques et les plus innovants de l'économie, rôle qui était jusque là imparti à la métallurgie de l'argent, du cuivre et du plomb (Garçon 1998). Au moment où s'effectuait ce renversement de position au sein de la métallurgie, un autre mouvement s'enclenchait intellectuel celui-là, de prise en main des savoir-faire par les savants et les experts, ingénieurs, entrepreneurs : Réaumur, Buffon, Jars, Dietrich, Grignon, etc., avec la volonté clairement affirmée d'aboutir à une définition rationnelle et savante de la métallurgie, de transformer les pratiques en science afin de maîtriser au mieux la production quantitativement et qualitativement. Ce mouvement intellectuel s'est traduit, entre autres, par la multiplication des traités, et par un important effort lexicographique avec la mise au point d'un vocabulaire neuf, indemne de symbolique, franchement technique, qui est devenu notre vocabulaire courant. Alors apparurent, entre autres, les termes : sidérurgie, technologie. Alors aussi le sens du terme « fonte » s'est précisé, non sans difficultés et atermoiements. Signe de l'importance réelle et perçue du devenir économique de ce secteur de production - mais l'Angleterre montrait le chemin avec un demi-siècle d'avance sur l'Europe continentale -, cette transformation sémantique volontariste s'est portée essentiellement sur la métallurgie du fer – qui devint la sidérurgie. Mais, de toutes les métallurgies existantes en Europe à la charnière des XVIIe et XVIIIe siècles, elle fut seule à se trouver ainsi rebaptisée. En regard, la métallurgie des non-ferreux ne bénéficia pas de cet effort de remise en forme, et de ce fait, évolua « naturellement », c'est-à-dire lentement, en adoptant progressivement les termes issus de la métallurgie « scientifique » au gré de l'évolution socio-technique.

C'est seulement dans les années 1860, avec l'apparition de nouveaux outils de production, que les termes de la métallurgie industrielle se généralisèrent dans ce secteur de production (Garçon 1995 et 1998). Les historiens suivirent avec un temps de retard. A partir des années 1970, le vocable « métallurgie » régnait en maître pour désigner exclusivement... la métallurgie du fer ! Peu d'historiens se préoccupaient alors de Techniques, et encore moins, de métaux non ferreux. Les années 1980 modifièrent la donne ; le développement conjoint de l'archéologie minière et métallurgique et de l'archéométrie, de l'archéologie industrielle et de l'histoire technique amenèrent à distinguer entre sidérurgie – qui désigna alors toute la métallurgie du fer, et la métallurgie des non-ferreux. On sait aujourd'hui que la sidérurgie désigne historiquement la métallurgie du fer dans sa phase industrielle telle qu'elle s'élabore à partir du XVIIIe siècle ; on emploie les termes paléoméallurgie du fer ou paléosidérurgie pour désigner les métallurgies ferreuses pré-industrielles.

Cette double réalité historique et historiographique nous apprend qu'un certain nombre de distinctions doivent être faites:

- Distinction entre culture technique industrielle (rationalisation consciente des termes et des procédés, prédominance de la compréhension scientifique), et culture technique pré-industrielle (prédominance de la sensorialité, constitution des savoir-faire et apprentissage par la pratique et l'expérience).
- Distinction entre lignées filières et procédés. *Une filière est une notion globale, qui désigne l'ensemble des entreprises qui interviennent dans le processus de fabrication, de la matière première au produit final. Le procédé – terme qui a pour synonyme : formule, méthode, recette – désigne, quant à lui, les suites d'opérations mises en œuvre pour le traitement ou l'élaboration d'un objet, d'un produit industriels.* Ainsi, en termes d'histoire des techniques, et indépendamment des héritages dont il faut savoir parfois s'éloigner, des habitudes de désignation qu'il faut savoir parfois dépasser, la métallurgie du fer pré-industrielle s'est exprimée dans deux grandes lignées techniques : celle des bas-fourneaux, celle des hauts-fourneaux. Elle s'est organisée en deux filières grandes distinctes : la filière « loupe/fer-acier » et la filière « fonte/fer-acier » ; à quoi s'ajoute, comme nous le verrons, une filière mixte, la filière « loupe-fonte/fer-acier » (« *radwerk* » et « *radmeister* », fourneau à ventilation hydraulique, dont la mention apparaît en 1430 en Styrie et qui produisaient à la fois des « Masse », loupes hétérogènes d'environ 350kg et du « *Graglach* », fonte liquide

surnageante, l'un et l'autre commercialisés et travaillés pour fer et acier (Belhoste 2001 :565-567 et 572); « *Stuckhofen* » (Percy 1864)..

- Distinction entre procédés et processus physico-chimiques. En termes physico-chimiques, la filière loupe/fer-acier peut s'exprimer en deux lignées : celle du bas-fourneau, qui fut le chemin suivi par la métallurgie européenne ; bas-fourneau et/ou haut-fourneau à combustion lente, qui fut le chemin de la métallurgie africaine. Par contre, les contraintes physico-chimiques associent inévitablement la filière « fonte/fer-acier » à lignée des hauts-fourneaux à ventilation forcée.

B/ Les grandes lignées techniques de production des métaux ferreux

La métallurgie des ferreux consiste, on le sait, à partir du minerai de fer, trois produits ferreux différents : deux alliages fer-carbone, l'acier et la fonte, et un métal plus ou moins pur, le fer (Bernardi, Dillmann 2003). Ces trois métaux s'obtiennent soit au bas-fourneau, soit au haut-fourneau. Dans tous les cas, l'obtention du métal s'obtient après passage par un produit intermédiaire qui est la loupe, produit hétérogène, *malleable iron* (Percy 1864), encore appelée masse brute de réduction (Mangin 2004) et/ou éponge de fer (Fluzin 2002) lorsque la réduction du minerai s'effectue en phase solide (filrière loupe/fer-acier). Dans ce cas, il n'y a à proprement parler de fusion, la température de travail étant située entre 1200 et 1400°). Lorsque la réduction se déroule en phase liquide, donc à une température de travail située entre 1400 et 1500, le produit intermédiaire est la gueuse, produit homogène, *cast-iron*, plus souvent appelé fonte (filrière fonte/fer-acier).

Ceci dit, que le semi-produit soit une loupe de fer ou une « gueuse » de fonte, il doit subir une transformation pour rendre fer ou acier : ce sera une épuration pour la loupe, une décarburation pour la fonte.

1) Dans le cas de la loupe, la procédure différait en fonction du minerai d'origine et du type de métal ferreux que l'on voulait obtenir : l'obtention d'un fer grossier se faisait par martelage à chaud de la loupe. Quand on voulait obtenir des fers de meilleure qualité et des aciers, on brisait la loupe et on procédait à un tri soigneux des parties semblables. Le forgeron procédait à ce que l'on appelle aujourd'hui un

« grappage », c'est-à-dire un martelage à chaud qui donnait des « masseaux » — aujourd'hui appelé « lopins » - ou des barres. Quant aux aciers, on les obtenait après cassage et tri des parties appropriées de la loupe en suivant divers procédés : liquation et cémentation dans les vallées brescianas aux XIIIe et XIVe siècles, « cuite » et cémentation dans l'Italie du Nord envisagée plus largement au début XVIe siècle, par exemple. Ces carburations étaient ensuite suivies d'un cinglage et d'un soudage en « trousses », selon les des différentes sortes d'acier que l'on voulait obtenir, une phase qui s'appelait « raffinage » dans la France du XVIIIe siècle (Belhoste 2001 : 572). D'où il résulte que le travail de la loupe était un art de l'assemblage, un « grappage » qui conduisait à l'obtention de fers ou d'aciers de qualités diverses à partir d'un semi-produit fortement hétérogène.

2) Dans le cas de la fonte, cela se faisait par une décarburation qui s'appelait dans la France du XVIIIe siècle, « affinage » : dans le cadre du procédé wallon, le plus courant avant la mise au point du procédé comtois au XVIIIe siècle, il s'agissait d'une décarburation au bas foyer par contact avec des scories d'affinage et cinglage ; dans le cadre du procédé bergamasque, pratiqué en Italie du nord au XVIIe siècle, en Dauphiné au XVIIIe siècle, en Thuringe au début du XIXe siècle, procédé intéressant parce qu'il mêlait, pour cette phase, les manières de faire présentes dans les deux filières « loupe/fer-acier » et « fonte/fer-acier », et prend de ce fait l'allure d'un procédé de transition, la fonte était soumise à une « cuite » préalable dans le foyer même de la forge, réduite en plaques minces qu'on brisait ensuite en morceaux et qu'on soumettait à l'affinage proprement dit et au cinglage. Dans tous les cas, le travail de la fonte se présente comme l'art d'obtenir des produits divers : fers, aciers, à partir d'un seul produit : la fonte, l'art donc, de faire de l'hétérogène avec de l'homogène (Belhoste 2001 : 586 et *passim*).

Dans l'espace technique européen pré-industriel, l'obtention de la loupe s'est faite le plus souvent, mais pas exclusivement, dans des bas-fourneaux à ventilation forcée ; l'obtention de la gueuse dans des hauts fourneaux à ventilation mécanique. A partir du XIXe siècle, « afin de le distinguer du procédé « moderne » ou « indirect » dans lequel, la fonte *-cast-iron-* est obtenue en premier », explique John Percy, le premier procédé s'est appelé « procédé direct, *direct extraction of Iron in malleable state from ore* », (Percy 1864). De là est née la tendance naturelle dont nous sommes héritiers à assimiler la lignée bas-fourneau et le procédé direct, la lignée haut-fourneau

et le procédé indirect.

Trois réflexions s'imposent dès lors :

1) L'histoire de ces lignées n'est pas la même selon les espaces (ou cultures) technique : l'espace technique chinois a maîtrisé précocement les allures très chaudes, que ce soit en hauts-fourneaux ou en fours à creuset. Ce fut un espace de la « fonte de fer » bien avant l'espace technique européen. L'espace technique africain a privilégié le travail avec allure modéré, explorant sous toutes ces facettes, la réduction en phase solide. En position intermédiaire, l'espace technique européen a pratiqué la réduction tantôt en phase solide, tantôt en phase liquide, conjuguant qualité de métal recherché et qualité de minerai disponible, avec une préférence marquée pour la ventilation et le martelage hydraulique. Culture des allures fortes, culture du moteur hydraulique, culture de la combustion lente : ces démarcations ont nécessairement rejailli sur le destin des lignées et leurs évolutions, comme sur le destin des procédés.

2) L'adéquation est patente entre lignée haut-fourneau, ventilation forcée et production de fonte. Mais l'implication n'est pas réciproque. Les d'indices sont là d'une plus grande plasticité technique : Costanza Custini Tizzoni a mis en évidence la présence de culot de fonte dans le Val Gabbia (Italie) dans des fours à fer datant de la période lombarde, c'est-à-dire avant l'an 1000 (Braunstein 2001). Et Terry Childs a montré que les artisans-métallurgistes Luba d'Afrique centrale savaient produire et affiner la fonte (Maret 2002). Le haut-fourneau européen à fonte de fer serait-il né de cette plasticité ? L'hypothèse s'impose, au regard des fourneaux intermédiaires, tels le *Stuckhofen* déjà cité, tels en Styrie, grande région productrice d'acier, ces *Radwerk* ou *Radmeister*, détectés entre fin du XVe et début du XVIe siècles, qui produisaient des *Masse*, loupe de grande taille, et le *Graglach*, fonte liquide surnageante, qui était commercialisée et était l'objet de pratiques spécifiques d'affinage sur un mode proche du traitement de la loupe dont J.-F. Belhoste a analysé le fonctionnement et la postérité dans le procédé bergamasque (Belhoste 2001 : 565 et 570, 572, 586-587).

3) La lignée bas-fourneau apparaît à beaucoup plus d'égards plus ancienne, plus « primitive » que la lignée haut-fourneau, et elle l'est indubitablement, ne serait-ce que parce qu'elle est la matrice des autres lignées. Mais l'émergence puis le développement de la lignée haut-fourneau n'eut pas eu pour effet l'extinction de la lignée mère. La lignée bas-fourneau a continué à se développer jusqu'à la fin du XIXe siècle, et pas uniquement à titre de rémanence : elle s'est franchement industrialisée. Nous avons trois témoignages historiques de cet état de fait:

a) Celui apporté par l'étude historique des « moulines » et des « forges à la catalane ». Dans une démonstration magistrale Catherine Verna retrace l'évolution de l'espace technique pyrénéen au Moyen-âge. Organisé autour de la ville de Foix (Ariège) qui fut le lieu de transit et de marque du fer, « le temps des moulines » dura deux siècles, entre XIIIe et XVe siècle. Alors, le fer fuxéen se fraya une place entre le fer basque et le fer catalan. Les produits exportés étaient pour une part des produits finis : socs, outils, et pour l'essentiel des produits semi-finis : *merlaria* (fer en barres) et *scapolanes* (fer en morceaux). Le développement de cette métallurgie hydraulique eut pour effet l'organisation de son espace : eau, combustible, minerai, la législation comtale ayant fourni un cadre propre à ménager l'approvisionnement au mieux des intérêts des maîtres de moulines, seigneurs et notables villageois; garde-forestiers, désignation des arbres à charbonner, réduction du nombre de feux par moulins. Et de conclure : « la technique qui se répète est une technique en équilibre. La réussite de la mouline permet... de balayer... la notion d'archaïsme technique dont a été affublé le procédé de réduction directe. La méthode indirecte ne s'implante pas dans les Pyrénées centrales ». Au temps des moulines, succéda le temps des « forges à fer », « expression de la capacité d'adaptation de la réduction directe », une adaptation qui « prouve définitivement que le procédé de réduction directe n'est ni intemporel, ni figé » (Verna 2001: 321-324 et *passim*).

b) Celui apporté par le Cours de métallurgie donné par l'ingénieur des Mines Jabin dans le début des années 1830 à l'Ecole des Mines de Saint-Etienne. Jabin ne traite pas l'affaire autrement. La période est cruciale pourtant. La période 1827-1830 est celle de l'installation définitive en France de la sidérurgie au coke, avec tous les problèmes techniques que suppose la mise en place d'un nouveau procédé. L'Ecole des Mineurs de Saint-Etienne est alors une toute jeune école, fondée depuis une dizaine d'années, et de par sa position, dans un centre industriel actif, spécialisé dans la production d'acier en particulier, de par son projet pédagogique : proposer des ingénieurs praticiens aux industriels, de par son personnel pédagogique : cette fraction du corps des Mines totalement impliqué dans l'innovation industrielle. On s'attend donc à un cours de métallurgie innovant, ce qu'il est assurément. Les élèves-ingénieurs découvrent et apprennent la théorie et la pratique du haut-fourneau au coke, alors qu'il y en a moins d'une dizaine à fonctionner en France à ce moment. Mais cela n'efface

pas, loin s'en faut, la connaissance du procédé direct : les élèves apprennent aussi, de la même manière, et sans qu'à aucun moment cela soit donné pour rétrograde, la théorie et la pratique du bas-fourneau, décrit sous la forme du fourneau catalan (Garçon 2002).

c) Celui apporté par John. Percy. Dans le volume II Part 1 de son grand œuvre, *Metallurgy. The Art of extracting metals from their ores, and adapting them to various purposes of manufacture*, volume consacré au fer et à l'acier, Percy consacre près d'une centaine de pages au procédé direct (Percy 1864 : 254-348). Je cite ici, à peu près *in extenso*, son introduction, traduite par mes soins (AFG) : « Le fer était toujours extrait de ses minerais, dans les temps anciens, à l'état de fer malléable (*malleable iron*) ; et encore aujourd'hui, cette méthode est pratiquée en Inde, Bornéo et en Afrique; elle n'est pas encore complètement éteinte en Europe; et on dit qu'elle est encore considérablement employée dans Vermont et le New Jersey, US » (*The Manufacture of Iron in all its various branches*, by Frederick Overman, Philadelphia, 1854, p. 245). « On appelle cette méthode « procédé direct », pour le distinguer du procédé « moderne » ou « indirect » dans lequel, la fonte (*cast-iron*) est obtenue en premier. [...] L'équipement utilisé est des plus simples; il consiste en un petit fourneau ou foyer, (*furnace or hearth*) et une machine soufflante. Seuls, les minerais riches sont employés, et le combustible est invariablement du charbon de bois. Une loupe (*lump*) de fer malléable est obtenue directement, que l'on martèle en une masse solide plus ou moins rectangulaire, appelé « *bloom* », qui est ensuite allongée sous le marteau en barre. Le terme « *bloom* » est encore d'un emploi courant; il est clairement dérivé du mot saxon *Bloma*, qui est défini par Bosworth, comme : « metal, masse, loupe ». Les fourneaux anciens dans lesquels on conduit le procédé direct étaient appelés : « *bloomeries* » » (*Contributions to literature, Historical, Antiquarian and Metrical*, By Mark Antony Lower, M.A.,F.S.A., London, 1854, p. 117). « L'expression « *bloma ferri* » apparaît plusieurs fois dans le *Domesday Book*. L'échelle de l'opération est extrêmement insignifiante, comparée avec le procédé indirect moderne. Je décrirai ce procédé, tel qu'il est utilisé dans les différentes parties du monde. » (Percy 1864 : 254). L'auteur, ensuite, explicite chacune des formes connues du procédé : en Inde, à Bornéo, en Afrique, en Birmanie, il s'arrête longuement sur le procédé catalan puis il décrit le procédé corse, le *stuckhofen* allemand. Il termine cette partie en

présentant les formes de procédés directs mis au point au XIXe siècle : les procédés Clay, Renton, Chenot et Yate. En voici la substance :

- le procédé Clay (*Patents* A.D. 1837, Dec. 19, N° 1758; A.D. 1840, *March* 31, N° 8459), « n'a pas encore réussi ». Percy le présente cependant « parce qu'un procédé est rarement arrivé à un résultat sans avoir connu des échecs répétés. » : La capacité à souder du fer métallique spongieux, cru, obtenu en chauffant l'hématite riche, dans de la poudre de charbon, était le point essentiel des brevets pris par William Neale Clay, en quoi, il proposa de faire du fer forgé directement à partir du minerai sans l'intervention du haut-fourneau. Le procédé était des plus simples : les meilleurs sortes d'hématite rouge était écrasées en morceaux (lumps) pas plus grands qu'une noisette, et mélangés à un-cinquième de leur poids de charbon de bois, coke, poussier (*coal-slack*) et autres matières charbonneuses, étaient soumise au rouge brillant, dans une cornue d'argile, ou tout autre récipient approprié, jusqu'à ce que le minerai soit réduit à l'état métallique. Quand la réduction était complète, le fer spongieux était transféré directement dans un four à puddler, avec ou sans l'addition d'environ 5% de coke en plus, où il était mis en boule (*balled*), puis forgé en *blooms* sous le *tilt-hammer*. Ensuite les *blooms* étaient roulés et formés en fer marchand de la manière habituelle. Le procédé fut essayé expérimentalement dans une petite forge près de Glasgow, et ensuite sur une large échelle à Liverpool. Commercialement parlant, ce fut un échec complet. Le fer produit était d'une excellente qualité, possédant une très grande ténacité, et convenait parfaitement pour les câbles de fer, mais il n'était pas uniforme et trop fréquemment « *red-short* » pour que les forgerons acceptent de le travailler (Percy 1864 : 330-334) .

- le procédé Renton, breveté en 1851, aux Etats-Unis par James Renton, décrit par le Professeur Wilson à l'occasion de la *New York Industrial Exhibition*. Le procédé a été développé à une échelle commerciale à Cincinnati (Ohio) et Newark (New Jersey). Le fourneau ressemble à un four à puddler ordinaire. On y traitait un mélange de 20 à 25% de minerai et 75 à 80% de charbon (*coal*) finement cassé. Le minerai était une hématite à 35% de fer. Le procédé fut abandonné en 1855. (Percy 1864 : 334-335).

- le procédé Chenot : Exposé à la première exposition internationale à Londres en 1851, où furent présentées des « éponges métalliques » (en français dans le texte) avec des spécimens de fer et d'acier fabriqués à partir de ces

éponges. Les éponges consistaient en fer métallique obtenu par la réduction directe d'hématite brune par cémentation dans le charbon de bois. Le procédé a gagné une médaille d'or à l'exposition de Paris en 1855. Et Frédéric Le Play, le qualifia de « plus grande découverte métallurgique de l'époque ». Chenot prit quatre brevets en Grande-Bretagne en 1856 et présenta des spécimens à l'exposition de Londres en 1862. Divers usines adoptèrent le procédé : Baracaldo près Bilbao en Espagne, 1852; Clichy-la-Garenne, 1855; Couillet près Charleroi, 1856; Pontcharra en Isère, 1856; Hautmont, dans le Nord, 1857. Il fut également utilisé en Russie (Percy 1864 : 335-345).

- le procédé Yate reposait sur le même principe, de réduction du métal effectué en le chauffant avec admission d'un dosage de matière carbonatée. En fait, c'était une modification du procédé Chenot, avec remplacement des chambre de réduction rectangulaire par des fours gazogènes (*gaz-furnaces*) : oxyde carbonique produit par des générateurs, succession de trois récipients ovales d'argile réfractaire installés verticalement l'un sur l'autre et unis par des *socket-joints* (Percy 1864 : 345-348).

L'apport des écrits des métallurgistes du XIXe siècle est instructif. A leurs yeux en effet, une lignée technique ou un procédé n'est ni ancien, ni nouveau : il est, tout simplement, et en tant que tel, il doit être signalé, étudié, car ils contiennent autant de solutions techniques possibles, d'idées utilisables, réutilisables. Tout procédé, y compris ceux en apparence les plus primitifs, sont envisagés comme une potentialité. Cela fait du « diffusionnisme » une réalité historiographique, que contredisent l'histoire et l'archéologie (Bocoum 2002). Mais cette réalité historique contredit également l'évolutionnisme, autre réalité historiographique : il est évident qu'au XIXe siècle, les deux lignées techniques bas-fourneau et haut-fourneau cohabitaient dans les filières de production fer/acier et qu'elles cohabitaient dans les espaces techniques très industrialisés : Grande-Bretagne, France, Etats-Unis.

IV. Application à la paléoméallurgie du fer : le bas-fourneau et la ventilation naturelle

Notre objectif, dans cette partie, est de proposer une grille de lecture spécifique à

la filière « loupe/fer-acier » qui dans la métallurgie du fer européenne, relève de la lignée bas-fourneau. Grâce aux recherches conduites depuis plusieurs décennies par les archéologues et les archéomètres (Benoit, Cabboï-Dunikowsky, Fluzin, Leroy, Ploquin, Serneels), les grandes lignes de la chaîne opératoire qui ordonne l'agencement des phases sont bien connues. Le but est de ce fait désormais moins de comprendre cette chaîne opératoire en soi, que d'en approcher les variantes et de comprendre la manière dont elle était appréhendée par les opérateurs. C'est pour cela que nous avons donc envisagé l'approche d'un point de vue fonctionnel en décomposant chacune d'entre elles. Pour avancer dans la compréhension fine des choix techniques - c'est-à-dire pour comprendre la chaîne opératoire, pas seulement d'un point de vue physico-chimique ce qui est absolument indispensable, mais pour déterminer les contours qu'elle adopte aux deux plans historique et/ou ethnographique, pour avancer dans la détermination des modalités d'évolution, nous avons envisagé chacune des étapes comme autant de questions, de nœuds techniques. Nous avons défini chacun de ces phases techniques, chacun de ces nœuds, en estimant à quels moments l'on passait d'un état A de la matière à un état B. Et, pour chaque phase, nous avons adopté la grille de lecture suivante :

a) Définition de la phase avec détermination des objectifs recherchés par l'opérateur.

b) Lexicographie qui met en regard de ce que nous savons des dénominations historiques ou ethnographiques et les dénominations scientifiques actuelles. Il ne s'agit absolument pas de proposer de nouveaux vocables, encore moins de préconiser l'usage de vocables anciens. Il s'agit de faciliter la compréhension des textes en faisant se coïncider les multiples expressions se rapportant au même fait ou moment du procédé, et celles-ci avec les vocables actuellement en vigueur. Rappelons à ce propos qu'au plan historique, c'est-à-dire pour les sources textuelles, la caractérisation des procédés et des produits ne pouvait s'effectuer à partir des déterminants physico-chimiques, qui ne furent connus que très tardivement avec le développement de la métallurgie de la seconde industrialisation, ce qui correspond globalement à la mise au point et au développement de la métallographie. Elle ne s'effectuait pas non plus à partir des déterminants morphologiques. Les spécifications et les caractérisations

reposaient à la fois sur la fonction - en ce sens, elles témoignent d'un état de compréhension, et sur l'usage, c'est-à-dire à quoi servaient les matériaux, les instruments. Autre précision : la détermination métaphorique de ces matériaux, procédés, outils, à peu près générale tout espaces techniques et civilisations confondues tant que le procédé s'élabore, se modifie et se transmet par voie orale et dont il arrive que la transcription historique garde trace, cette détermination métaphorique exprime à la fois une représentation du monde et la nécessité d'exprimer et de mémoriser par la dénomination, le geste technique, le processus qu'elle désigne. En d'autres termes, l'usage de la métaphore dans les pratiques opératoires est à la fois symbolique : insertion du mode opératoire dans une culture et technique : réponse à la nécessité de la mémorisation et de la transmission.

c) Analyse. Ce dernier point est le plus conséquent et nous l'avons organisé de la manière suivante

- au plan générique : définition du but recherché par les opérateurs; définition du produit obtenu; détermination du complexe technique qui l'accompagne et lui donne existence; les traces archéologiques que l'opération est susceptible de donner en les référant aux sites présents sur le terrain de travail du PCR, savoir le Massif de Paimpont et les sites avoisinants quand cela était possible; questionnements que soulève la phase définie, en cours ou envisagés. L'idéal, en ce qui concerne les complexes techniques, aurait été de distinguer entre les complexes techniques, selon les périodes : par exemple : « type 1 » pour préhistoire, âge du fer, Tène finale jusqu'au haut-moyen-âge; « type 2 » pour l'époque pré-industrielle, XIe - XVIIIe; « type 3 » pour l'époque industrielle. Cela n'était pas possible dans le cadre de ce travail.
- spécification des opérations qui compose la phase envisagée avec quand cela est nécessaire présentation des étapes intermédiaires et/ou des choix techniques possibles dans ce cadre.

Nous ne saurions trop insister sur le fait que l'établissement de cette grille de lecture a pour principal objectif de réduire l'écart entre « le fer des historiens » et le « fer des archéologues et des archéomètres », c'est-à-dire de faciliter la rencontre entre

données physico-chimiques et géo-chimiques, traces archéologiques, données expérimentales, sources textuelles et données ethnographiques. Elle vient en complément de ce qui existe, non en remplacement. Il n'est pas douteux à cet égard que l'apport de l'archéologie des cultures métallurgiques tant européennes que non européennes sera capital, en archéométrie, en expérimentation mais aussi en histoire. L'approche historique fait cruellement défaut, particulièrement dans la période moderne et le début de l'époque contemporaine, en raison des difficultés que présentent l'interprétation des textes, et une telle grille peut contribuer à la relance des recherches en la matière. Rappelons à cet égard que le système technique pré-industriel disparaît définitivement en Europe dans la période 1750-1850, et que nous disposons, à condition de savoir les décrypter et les utiliser, de vastes gisements de descriptions des procédés métallurgiques antérieurs, actuellement très peu exploités.

Toutes filières confondues, la chaîne opératoire qui aboutit à la transformation du minerai en métal, puis en objet, se décompose, on le sait, en deux grandes phases distinctes: une première dite ; métallurgie extractive, une seconde dite : métallurgie de transformation. La différenciation est importante : ces métallurgies sont fréquemment le fait d'opérateurs différents, et les enjeux quant à leur maîtrise technique et sociale, ne sont pas toujours les mêmes. Lorsqu'on se fixe sur la filière loupe/fer-acier, qui est l'objet de notre étude, cette chaîne opératoire peut se résumer ainsi :

		Etape	Etat A	Etat B	Appareil	Ventilation
Métallurgie extractive						
	Phase 1	Préparation	Minerai brut	Minerai marchand		
	Phase 2	Réduction	Minerai marchand	Loupe	BF	Naturelle ou forcée
Métallurgie de transformation						
	Phase 3	Epuration/ frittage	Loupe	Lopin	BF	Ventilation forcée
	Phase 4	Elaboration	Lopin	Objet en fer dur, fer fort, fer aciéré	BF	Ventilation forcée

Elle comprend quatre nœuds techniques, repérables parce qu'ils donnent chacun un produit spécifique : le minerai marchand, la loupe, le lopin, l'objet. Dans chacun de ces nœuds techniques, et c'est la raison de cette dénomination, le passage de l'état A à l'état B, pour chacune de ces phases comporte un nombre non négligeable de choix techniques, qui peuvent se transformer en bifurcation et passage vers une autre chaîne opératoire, celle de la production d'acier, par exemple.

A/ Métallurgie d'extraction

Phase 1 de "préparation" : Minerai brut ==> minerai marchand

Définition : C'est la phase d' « enrichissement » du minerai. Les objectifs sont les suivants :

- 1) débarrasser le minerai de tout ce qui est susceptible de gêner l'opération de réduction : saletés, boues, gangue (encore appelée « stérile »);
- 2) lui donner le calibrage nécessaire à l'opération de réduction ;
- 3) éventuellement, lui faire subir un premier traitement « par le feu », de manière ensuite à faciliter l'opération de réduction.

Lexicographie.

a) L'analyse lexicographique reste à faire pour l'essentiel. Il est courant dans les sources précédant le XIXe siècle, et même dans les descriptions de procédé au cours du XIXe siècle, d'utiliser pour désigner cette phase, les divers noms des opérations qui la composent : lavage, débourbage, cassage (et pas : concassage, qui est un terme très récent) , triage, criblage, grillage, bocardage... Le terme de « préparation mécanique », est apparu relativement tardivement pour désigner l'ensemble des opérations qui la compose. Le terme « minéralurgie », qui sert également à désigner cette phase, tous métaux confondus, a été créé par Hassenfratz à la fin du XVIIIe siècle, pour la distinguer scientifiquement de la « métallurgie ». La dénomination du minerai une fois lavé reste à étudier : les sources des époques modernes et contemporaines (XVIe-XVIIIe siècles) parlent de « minerai bon à fondre », communément. Mais il existe certainement d'autres dénominations. Au XIXe siècle, il est habituel de considérer que le but de cette phase est de transformer le minerai brut en minerai « marchand », qui seul possédait une valeur commercialisable.

Cela renvoie implicitement à une phase préliminaire, non mentionnée ici, mais attestée historiquement depuis au moins le XVIe siècle et archéologiquement peut-être antérieurement, la phase dite de l'essai, c'est-à-dire de l'évaluation avant traitement de la valeur des minerais (Tereygeol, Gauthier, travaux en cours).

b) Actuellement : en géochimie, archéologie et archéométrie, il est habituel de distinguer entre le « minerai géologique » qui est le minerai en place et le minerai extrait et/ou « minerai archéologique » : minerai trouvé en place dans les sites d'extraction archéologique, qui donnera ensuite, après préparation mécanique, le minerai préparé ou marchand. Cette distinction s'explique par le fait que le minerai subit toujours une première préparation grossière et un premier tri sur le lieu même de son extraction, en galeries ou à la sortie de la mine : en mine, le plus gros de la gangue, le « stérile », ou les parties les moins riches, difficiles à traiter parce que trop mélangées sont laissées sur place et servent souvent de remblai ; à la sortie de la mine, elles sont abandonnées sous forme de haldes.

Analyse. Cette phase est réalisée soit près du lieu d'extraction, soit près de l'atelier de réduction. Elle comporte plusieurs opérations, dissociables en deux suites d'opérations : lavage-débouillage/Cassage-triage-grillage. A l'intérieur des blocs, toutes ne sont pas obligatoirement présentes. Et leur déroulement dans un bloc n'est pas intangible. La pratique varie en fonction du minerai et/ou d'autres variables techniques, sociales ou géographiques.

Opération 1. Lavage, encore appelée débouillage.

But : nettoyage du minerai

Produit obtenu: minerai lavé

Éléments du complexe technique correspondant. : « patouillots », rables.

Traces archéologiques : puits de lavage : point d'eau/ avec éventuellement présence de minerai.

Questionnements : relation site d'extraction/lavage/site de cassage/atelier de réduction.

Opération 2. : Broyage/cassage/grillage

But : mettre le minerai en forme et l'améliorer en qualité. Forme : mettre le minerai au bon calibre - dont il faut savoir qu'il dépend du minerai : ce peut être en poudre, ou en noisettes, en noix. L'adéquation entre la nature du minerai et son calibrage entre dans les savoir-faire de base du métallurgiste. On sait aujourd'hui qu'un calibrage identique minerai-charbon de bois facilite le passage des gaz. Il faut que la charge du four soit aérée et pas trop compacte. Il n'y a pas

de réponse en soi, avant l'époque industrielle, il n'y a que des adaptations locales. C'est là que le questionnement archéologique et historique est important. Qualité : élimination des « produits étrangers », que l'on sait aujourd'hui être les éléments chimiques gênants pour le déroulement de la réduction et/ou la qualité du métal obtenu : eau, terres ?, soufre ? Et le grillage permet de rendre plus poreux le minerai, ce qui, là aussi facilite le passage des gaz.

Note : Le grillage pose problème. Il peut se dérouler avant le cassage, ou après; il peut aussi ne pas exister. Cela dépend de la nature du minerai.

Produit obtenu : minerai préparé (poudre, noix, noisette).

Éléments de complexe technique correspondant. Type 1 : outils utilisés : percuteurs, table de pierre (« Banc de cassage »), enclumes...exogène; Type 2 : marteau, banc de cassage, voire ateliers; Type 3 : bocard, hydraulique. Il convient d'être attentif à la nature de la pierre pour les percuteurs, tables et bancs de cassage, qui peut être hétérogène par rapport au substrat géologique.

Traces archéologiques : 1) aires de broyage et/ou de cassage : résidu de minerais, percuteurs; 2) aire de grillage : sols qui ont chauffés, pas forcément rubéfiés, cendres, charbons, restes de minerai.

Questionnements : trois questions cruciales doivent être posées systématiquement, à défaut d'être systématiquement résolues : taille et positionnement de l'atelier de préparation par rapport à l'atelier de réduction; nature du minerai archéologique et taille du minerai prêt à être réduit; économie du grillage.

Phase 2 de « réduction » : Minerai marchand==> Loupe

Définition. Il s'agit de la phase de réduction à proprement parler, c'est-à-dire d'obtention de métal sous forme brute. Cette phase débute par la préparation de la charge : charbon d'une part, minerai de l'autre, qui peut se composer d'un mélange issu de mines différentes, en fonction du résultat recherché. La masse de métal obtenue est le résultat brut de la réduction à l'état solide. Les archéologues et archéomètres l'appellent le plus fréquemment « loupe », mais aussi « massiot », « masse brute de réduction »(Mangin 2004), « éponge de fer » (Fluzin 2002). C'est une masse de taille variable, en fonction de la taille du four. Très hétérogène, elle se compose d'éléments

de fer, de zones d'alliages carburés : acier, fonte, parfois de scories et/ou de charbons de bois. C'est un produit intermédiaire, destiné par la suite à être repris et travaillé en forge. Attention toutefois : on ne doit pas déduire du caractère hétérogène, grossier de la loupe, qu'elle est de composition aléatoire. Etudes historiques et ethnographiques convergent au contraire et donnent à penser que le métallurgiste savait préparer ses charges et mener son fourneau de manière à obtenir dans la loupe, les types de produit semi-fini qu'il cherchait à produire.

Lexicographie.

1) Tout le monde s'accorde aujourd'hui pour appeler cette phase : « réduction », du nom de l'opération chimique qui s'y accomplit. Notons toutefois que ce terme n'est pas attesté dans les textes historiques, premier XIXe siècle compris. Les termes authentifiés dans les sources sont multiples : « *fondag* », « *fonte* », « *cuit* », « *cotta* »..., voire même « *forge* » ou encore « *fusion* » au XIXe siècle.

2) Le métal brut obtenu est appelé dans les sources de l'époque moderne : *loupe*, *massiot*, *massé*..., « *lump* » en anglais. Au XIXe siècle, on parle d'*éponge métallique*. Le terme « loupe » (*lump* en anglais) est aujourd'hui le plus communément utilisé. Il est attesté au XVe siècle, en particulier dans l'inventaire des biens de Jacques Coeur (AN KK 328, fo 211 ro) pour désigner une « masse de fer affinée qu'on passe au marteau ».

3) Sauf erreur, le terme « atelier » pour désigner l'atelier de réduction n'est pas attesté dans les textes, contrairement à l'expression « atelier du forgeron »; il conviendrait de le vérifier et de vérifier ce qu'il en est en ethnologie. Le four est appelé diversement : « *ignis* », « *foc* », foyer, fourneau, *fournel*, sans que l'on sache s'il s'agit de termes génériques ou d'une typologie implicite. Quant au terme *bas-fourneau*, communément adopté aujourd'hui, il apparaît pour la première fois dans le *Grand Dictionnaire Universel Larousse* en 1872, à l'article *fourneau*. Notons que la distinction d'usage, faite actuellement entre « bas-fourneau » et « foyer de forge » n'est pas attestée historiquement. Dans les sources historiques, les termes fourneaux et bas-foyers sont indifféremment pour désigner le four de réduction. Il conviendrait à cet égard de voir ce qu'il en est dans les espaces techniques britannique et allemand, grands espaces de références en la matière.

4) L'usage historiquement attesté dans le cadre du procédé indirect, pour l'espace technique français du moins, était de distinguer entre maître de forges, pour désigner le responsable de l'ensemble du procédé : réduction et transformation; maître fondeur,

pour désigner le responsable du haut-fourneau; forgeron, pour désigner l'artisan en charge de l'élaboration. Concernant le procédé direct, la répartition des tâches - et du capital - existait également, quoique différemment : l'on sait, qu'en 1294, à Sem, dans la vallée de Vicdessos, les rédacteurs de la charte qui définissait les usages collectifs, distinguait entre le *ferrarius*, celui qui réduit le fer et qui travaille en relation étroite avec les mineurs et le *faber*, celui qui aiguisé et effile la pointe des outils. Puis la distinction s'est établie en Pays de Foix, entre « maître de moulins », les ferratiers, *mercature ferri*, marchands de fer, et les *faures*, les forgerons (Verna 2001) ; entre forgerons, ferrons et maîtres de forges en Normandie entre XIe et XVe siècle (Arnoux 1993).

5) Il manque une enquête systématique des termes historiques utilisés pour désigner les parties et accessoires du fourneau.

Analyse : Il s'agit de la phase d'extraction du métal.

1) Dans la métallurgie du fer, cette phase consiste en la transformation d'oxydes de fer en fer métal et alliages fer/carbone plus ou moins riches en carbone et d'autres éléments chimiques. L'opération métallurgique s'effectue à une température élevée : 1200 à 1400°, température qui est toutefois inférieure à celle de fusion du fer (passage en phase liquide = 1425°; le fer pur fond à 1540°C) . Cela signifie que dans le procédé direct, le métal n'entre pas en phase liquide. La réorganisation chimique qui s'opère à cette température se traduit par la formation d'une loupe et de scories. La nature de ces dernières varie en fonction du type de minerai et du fonctionnement du four (fayalite = silicate de fer, wustite = protoxyde de fer, minéral chargé de fer inutilisable pour la métallurgie). La scorie est le plus gros produit du bas-fourneau. La proportion fer/scories dépend du minerai, des conditions de fonctionnement des fours, de la température, de la qualité plus ou moins réductrice du milieu, etc. C'était une donnée maîtrisée par l'artisan-métallurgiste, qui savait modifier charge, vent, et allure du four en fonction du produit final recherché.

2) La scorie s'écoule toujours car il faut pouvoir « assécher » la masse au maximum et éviter l'engorgement du système de ventilation. Cet écoulement peut se faire de deux manières :

a) à l'intérieur du four dans une fosse en dessous de la loupe. Dans ce cas, les fours sont qualifiés de « fours à fosse », ou de « fours à scories piégés ». On parle plus rarement, mais à tort car il s'agit de la dénomination générique des hauts-fourneaux industriels : de « fours à cuve »;

b) soit en dehors. On parle dans ce cas de « fours à scories coulées ».

3) La morphologie du four et sa taille varient en fonction des paramètres qui restent à expliciter. Le seul point qui est désormais à peu près certain est que taille et forme ne répondent pas absolument pas à des critères de progrès dans un schéma évolutionniste : du petit au grand four (par ex., plus grand = moins élaboré; plus petit = plus élaboré, ou encore : ventilation naturelle = moins élaboré, ventilation forcée = plus élaboré, etc.). Les facteurs d'évolution de la morphologie des fours sont le plus souvent locaux : géologie, culture technique régionale, *habitus* technique d'une communauté d'artisan, etc. D'où l'intérêt de l'étude morphologique, à condition de ne pas la rapporter exclusivement à des facteurs physico-chimiques, qui, d'ailleurs, s'ils étaient les déterminants uniques aboutiraient à des morphologies quasi-identiques. Une des questions est donc de voir s'il existe ou non des « faciès locaux ». Ceci dit, on s'accorde actuellement pour considérer que le four comporte (voir schémas en annexe p.32) : un foyer, une « zone de travail » située au niveau des événements, le plus souvent une cheminée, et donc une fosse de réception et/ou un « avant-bassin » ou un canal de réception des scories. Au sol, il peut être circulaire ou rectangulaire ; en élévation, il peut être arrondi ou en forme de cylindre allongé, en forme de bouteille ou de tronc de cône. La ventilation peut être naturelle ou artificielle. On parlera dans le premier cas de « ventilation naturelle », et dans le second cas de « ventilation forcée » - qui sont des expressions actuelles. Lorsqu'il y a ventilation forcée, elle peut être manuelle ou mécanisée, par l'intermédiaire d'une roue hydraulique, voire, plus tard, d'une trompe.

4) Deux approches sont possibles actuellement, sans qu'il soit possible d'établir un lien entre elles, en l'état de connaissances. La première approche, la plus récente, ressortit au mode de ventilation. L'hypothèse de l'existence de deux procédés dans la filière loupe/fer-acier européenne, l'un à ventilation naturelle, l'autre à ventilation forcée, s'impose en effet progressivement. La seconde approche, la plus ancienne et la mieux maîtrisée, ressortit à la gestion des scories. Pour ne pas obérer les recherches en la matière, nous avons choisi de présenter dans un premier temps le tronc commun à tous les bas-fourneaux, puis nous poserons ce qui se rapporte à la ventilation, puis ce qui se rapporte à la gestion des scories, dans l'état actuel de nos connaissances. Dans ces deux derniers cas, ventilation et scories, nous avons référé les traces archéologiques à celles rencontrées dans les sites du Massif de Paimpont ou dans les sites voisins.

a) Bas-foyer générique (= tronc commun à tous les bas-fourneaux) :

Produit obtenu : métal brut (*loupe, lump* en anglais) . = culots à forte teneur en métal.

Mode d'obtention : récupération en fin d'opération.

Note : Tout culot, tout « fond de four » n'est pas obligatoirement une scorie ! Le plus généralement, le métal se forme au dessus du culot de scorie, mais il n'est pas rare que la masse de métal retienne une bonne quantité de scorie sur sa partie supérieure, conformément au postulat d'histoire des techniques, en vertu duquel les conditions d'impossibilité sont plus difficiles à appréhender que les conditions de possibilité.

Éléments du complexe technique : argile (exogène possible), type d'essences charbonnées, et type de charbonnages, matériaux d'ajouts (fondants ?); outils : pinces ou bois pour sortir le métal..., eau. Ajouts : cendres, coquillage broyé, fougère, voire minerai non complètement réduit des précédentes opérations. Compétences métallurgiques : agriculteur ? artisan?

Note : Le but de l'ajout, en réduction directe, c'est de faire que l'élément ajouté, par exemple la chaux, prenne la place du fer qui sinon serait entraîné dans la scorie : la scorie produite n'a pas besoin de « prendre » du fer pour se former. Le calcium et la silice modifient aussi la structure du matériau fondu et son comportement lors du refroidissement ; l'ajout de chaux augmente généralement le point de fusion (c'est pourquoi le terme de « fondant » est très mauvais car il laisse entendre que le point de fusion est abaissé !) mais le bain fondu sera plus fluide et se solidifiera rapidement à sa température propre ; l'ajout de silice (erbue) donnera un bain fondu dont la solidification se fera avec une augmentation progressive de la viscosité quand sa température baissera.

Traces archéologiques :

1) en prospection : Amas de scories, culots de fours, scories en galettes (Le Quellec, travaux en cours).

2) en fouille :

a) restes de fours : « sole » ou « creuset » : circulaire, ovalisé, rectangulaires, dimensions intérieures de 30 cm à 1m30 (contexte breton); cheminée soit écrasée dedans, soit absente, soit basculée sur le côté, avec argile plus ou moins rubéfiée, parois de fours avec traces de clayonnage; existence possible d'un bourrelet rubéfié autour; briques, clayonnage, taille et inclinaison de l'évent (qu'on appelle au XVIIIe siècle : *ventouse*).

b) autour du four : taille de la rubéfaction, impact de la chaleur dans le sol, possibilité de fossés, de fosses à scories; canal de coulée pour scorie (four à scorie coulée), avant-creuset circulaire et/ou ou rectangulaire pour la coulée des scories; fosse de travail : aire de travail en creux devant la « porte » de l'appareil pour l'écoulement des scories, l'extraction de la masse brute de réduction et/ou pour la conduite de la ventilation ; minerai, scories, minerai en cours de réduction, charbons, argile, fondant, traces de bâti, apprentis; fossés de réception des scories; autres structures de chauffe; autres structures de travail : meules, enclumes.

Questionnement : penser en termes d'atelier et non de four. Bien penser à inscrire la structure dans son complexe technique. Interrogations : structures pérennes ou volantes ? Degré de réutilisation de la structure ? Penser qu'un four de réduction peut également servir de foyer de forge. Ne pas postuler automatiquement l'existence d'une ventilation forcée; Relecture des textes techniques anciens pour définir plus précisément les appellations d'usage et leur signification. Lien entre usage des fondants (chaux) et ventilation forcée. Compétences métallurgiques : agriculteurs ? artisans ? Insertion du procédé dans l'économie locale et/ou régionale voire au-delà. Existence de faciès techniques, c'est-à-dire de variantes morphologiques et/ou fonctionnelles propres à des espaces ou à des cultures techniques données ? Présence d'un second foyer pour le réchauffage de la loupe avant l'épuration (Verna 2001) ?

b) Approche par la ventilation

Nous partons ici, par défaut, de la typologie, en distinguant les deux approches de manière ensuite, à partir de la lecture de terrain, en fouilles. La question - non résolue - étant de comprendre la relation entre la ventilation et le mode de fonctionnement du four : à scories piégées ou à scories écoulées : où se situe le lien fonctionnel ? Du côté du procédé ou du côté du résultat: type de fer - ou d'acier, quantité de métal produit ? Du côté de la culture technique d'ensemble ? Du côté de l'habitus technique d'une communauté de fondeur ou de forgeron ? La question se pose d'autant plus qu'il est évident désormais que la ventilation naturelle, loin d'être une étape première à laquelle ferait suite la ventilation forcée, est procédé de production à part entière, susceptible d'innovations (Martinelli 2002). Son adoption peut traduire un perfectionnement technique : soit maîtrise accomplie de la combustion lente : seuil, marge de sécurité,

décision technique (Martinelli 2002), mise en dépression de la chambre, gestion de l'isolation thermique (Coulibaly 2006) soit économie de main d'œuvre (Yandia 2001, Bocoum 2002).

Fours à ventilation naturelle (spécificités par rapport au bas-fourneau générique) :

Produit obtenu: loupe (pour mémoire)

Éléments du complexe technique : fascines / claies de protection (?) pour protéger le fourneau du vent et l'empêcher de perturber le fonctionnement de tuyères.

Traces archéologiques : bouchons d'évents, multiplicité et proximité des événements entre-eux qui empêchent de reconstituer un système de ventilation assisté par des soufflets.

Attestations locales: découverte de fours et de bouchons d'évents sur les sites de Glyorels 1 et 2, découvertes équivalente dans le Combournais (Vivet 2006)

Questionnement : Les travaux d'archéologie expérimentale conduits par Christophe Colliou (Coulliou/Aranda) et Jean- Bernard Vivet (Vivet et al. 2003 et Vivet 2006), en accord avec les études antérieures menés par Sandra Cabboï et K. Dunikowski, attestent de la réalité de cette pratique. Il n'est plus possible désormais, lorsque l'on trouve un four métallurgique en fouille, de postuler obligatoirement et exclusivement qu'il s'agit d'un four à ventilation forcée. Trois hypothèses doivent être testées : four à ventilation naturelle ou four à ventilation forcée, voire procédé mixte. Le positionnement historique de la technique à ventilation naturelle demeure à évaluer connu dans d'autre procédé (travaux en cours de Christophe Colliou, Alain Ploquin; master de Simon Pellequer). En l'état, l'hypothèse la plus porteuse consiste à considérer qu'il s'agit d'un procédé spécifique, le résultat d'un « choix » technique effectué par le fondeur, soit pour des raisons d'amont: nature du minerai, spécificité du contexte local; soit pour des raisons d'aval : nature du produit qu'il cherche à obtenir. La réponse à ces questions réside dans une approche croisée archéologie/ethnographie, d'une attention portée en fouilles, au complexe technique environnant, autant qu'à la chaîne opératoire proprement dite.

Fours à ventilation forcée (spécificités par rapport au bas-fourneau générique)

Produit obtenu: loupe (pour mémoire).

Éléments spécifiques du complexe technique : cuir pour les soufflets, charpente en bois en cas de soufflet hydraulique ou trompe ??

Traces archéologiques : éventuellement : trous de piquets et fosses pour les soufflets, tuyères, bouchons d'évents

Attestations locales: présente d'un trou de piquet au niveau d'un évent dans une structure de combustion découverte à Trécélien qui aurait pu servir de bas-fourneau (Vivet 2004, Girault 2005).

Questionnement : inclinaison des évents ? La ventilation forcée sert-elle : À raccourcir le temps d'obtention ? A produire du métal en plus grande quantité ? A produire un métal de meilleure qualité ? Est-elle obligatoire pour certains types de minerai ? Ou dans certains environnements, dépourvus de "fondants" par exemple ? Ou, tout simplement, est-elle plus facile à maîtriser ? Est-elle liée à une catégorie de "forgeron" qui serait devenue dominante ? Y a-t-il mécanisation de la ventilation ?

c) Approche par la gestion de la scorie.

L'approche par le mode de gestion de la scorie est actuellement l'approche dominante. Une raison essentielle à cela : la base de l'étude du procédé direct est l'archéologie et l'archéométrie. Or, la gestion de la scorie dans le procédé direct laisse des traces matérielles importantes : morphologie, rubéfaction, scories en place, qui donnent sens à la fouille. Il y a donc, par rapport à l'approche par la ventilation, une surdétermination, accrue par le fait que la scorie est l'une des traces archéologiques majeures, en prospection, en fouille et en analyse. .

Fours à scories coulées (voir schéma p.32) :

Morphologie : Fours comportant en principe une porte, bénéficiant la plupart du temps d'une dénivellation sur au moins un des ses côtés, afin de faciliter l'écoulement de la scorie, et comportant éventuellement une structure de réception de cet épanchement. Le surcreusement du four n'est pas un caractère vraiment discriminant : ces fours ont souvent une fosse de travail permettant d'accéder à la partie inférieure du four (= « creuset »), qui peut être au moins en partie sous le niveau du sol (Pilleverte en Plesder (35) - gallo-romain, bas

fourneaux laténiens des fouilles préventives de l'A28).
Produit obtenu : loupe + scories : en cordons jointifs, en plaquettes, en canal + scories type « culot fond de four ». C'est la morphologie des scories, examinées sur un échantillon statistiquement représentatif (plusieurs dizaines ou mieux une centaine), qui permet de diagnostiquer véritablement le fonctionnement d'un four à scories écoulées.

Traces archéologiques : ferriers, c'est-à-dire amas de scories, qui s'accumulent lors des opérations successives, canaux d'évacuation de la scorie, envisager la possibilité de fosses à scories, d'un appareillage en pierre pour les portes de four.

Attestations locales : ferriers de Paimpont : une dizaine de sites (Girault 2005). D'autres cas en Bretagne, plus à l'Est de l'Ille-et-Vilaine, sur la commune du Teillay, scories denses en plaquettes à Plesder (Vivet 2006).

Questionnement : Ce type de four peut être conservé et rechapé régulièrement. Les questions portent donc sur la réutilisation. Combien d'opérations ? Degré de démolition, nature des reprises ? Chemisage ? En cas de trous de tuyère, bien juger de l'inclinaison.

Fours à scories piégées (voir schéma p.32):

Morphologie : fours avec surcreusement. Existence possible d'une avant fosse permettant de tirer les scories (ex. Le Mans).

Produit obtenu : loupe + scories en culot (fond de four), coulures éventuelles.

Traces archéologiques : Ferriers moins attestés. Scories type « culot de fond de four » qui peuvent se former sur un lit de charbon de bois permettant la percolation de la scorie vers le fond du four. On retrouve alors dans nombreux charbons à cœur du « culot ». Certains ferriers de ce type ne présentent en surface que de tous petits fragments de cordons cassés, les gros culots ont été jetés plus loin. Attention : la scorie « en culot » peut aussi se rencontrer dans foyers de forge : voir, pour les différences, les travaux réalisés par l'équipe de Nancy (Marc Leroy, Cécile Mahé-Le Carlier, Alain Ploquin).

Attestations locales : scories de fond de four concentrées dans certaines zones. Le Bois Jacob en cours de fouille a livré plusieurs dizaines de culots de 35 à 120 cm de diamètre. *Idem* dans le Combournais (Vivet 2006).

Questionnement : Four qui peut être détruit pour obtenir le métal s'il n'est pas équipé d'une porte ou qu'il n'est pas assez bas pour sortir la loupe par la cheminée. Dans le cas de plusieurs utilisations, il est possible d'attester un

rechapage des parois internes. En cas de four en place, question : réduction réussie ou ratée, ou interrompue ou encore, est-ce que ce qu'on trouve au fond du four correspond à la réduction ou à des étapes postérieures (réutilisation pour l'épuration)? Ce type de four convient-il mieux que le précédent pour la réutilisation en forge ?

B/ Métallurgie de transformation

Le forgeron entre en scène, à ce moment, soit qu'il succède dans la prise en charge des opérations à l'artisan ou à l'agriculteur métallurgiste, soit qu'il ait lui-même effectué auparavant la préparation et la réduction du minerai. Ce moment de la chaîne opératoire d'obtention du fer par le procédé direct comporte deux phases, deux nœuds techniques nettement distincts : une phase préparatoire de travail du métal brut jusqu'à obtention de lopins ou de barres qui pouvaient être commercialisés sous cette forme, une phase d'élaboration de l'objet final (Fluzin 2002). Quelques observations s'imposent avant la présentation de ces phases :

1) La succession des phases est incontournable, depuis la préparation du minerai jusqu'à l'élaboration de l'objet. Pour des raisons qui relèvent de la matérialité physico-chimique, le déroulement de la chaîne opératoire est irréfragable. Toutes époques et toutes cultures techniques confondues, le minerai doit être préparé, puis réduit; la loupe obtenue doit être préparée à son tour pour ensuite être travaillée jusqu'à obtention de l'objet final. Mais l'expression sociale de la technique ne renvoie pas à cette obligation physico-chimique. La société l'interprète et en fait usage à sa manière. Au plan géographique et économique, les deux phases majeures de la chaîne opératoire – réduction et élaboration – sont susceptibles d'être dissociées : rien n'oblige à ce que les ateliers de forge côtoient les ateliers de réduction; les exemples abondent, au contraire, de la circulation marchande de produits semi-élaborés qu'il s'agisse de métal brut ou d'ébauches. Les langues gardent trace de cette circulation de produits intermédiaires : « *bloma ferri* » dans le *Domesday Book* en Angleterre (Percy 1864), « *merlaria* » en Ariège (Verna 2002), « *ferrum crudum* » (fer cru, loupe brute), « *ferrum coctum* » (fer épuré et non fonte de fer comme il a été affirmé) dans la vallée alpine de la Valteline (Arnoux 2001), *Roheisen*, équivalent du *ferrum crudum*, conditionné en Mass en Styrie (Belhoste 2001). Elles gardent trace également de la distinction des

ateliers : la distinction faite en Italie du Nord entre *furnus* et *fusina* est riche d'enseignement : la distinction s'appliqua d'abord à la métallurgie de l'argent qui fut la principale activité métallurgique des Alpes jusqu'au XIII^e siècle, puis elle glissa vers la métallurgie ferreuse quand celle-ci se substitua à l'argent entre fin XIII^e et milieu XIV^e siècle. L'idée de fondre puis d'affiner se déporta d'un métal vers l'autre, et cela malgré la différence de chaîne opératoire. Après avoir désigné les ateliers de réduction et de coupellation de l'argent, les termes *furnus* et *fusina* désignèrent les ateliers de réduction et d'épuration-élaboration des métaux ferreux. A la fin du XIV^e siècle, à Bormio en Valteline, un *furnus* suffisait à approvisionner une quinzaine de *fusine* qui produisaient produits semi-finis et finis. Ceci dit, l'économie, pas plus que la technique, ne résume le social ni le politique : le social est souvent déterminant; le politique peut jeter son dévolu sur l'une ou l'autre phase de la chaîne opératoire. Ce fut le cas, on l'a vu, au Yatenga entre XV^e et XVIII^e siècle : la mise sur pied d'une monarchie centralisée dans cette région d'Afrique s'est traduite par un contrôle accru de l'Etat sur la phase de métallurgie d'élaboration, sur le travail de forge donc. Fort de cette primauté, le forgeron s'est saisi de l'intégralité de la chaîne opératoire, et a imposé un procédé particulier, celui des hauts-fourneaux de réduction directe à combustion lente, le four « *bonga* » (Martinelli 2002). En Europe, les travaux des historiens en témoignent, marchands et princes - le terme ici doit être entendue dans son sens générique de souverain - se sont disputés l'emprise sur la production du fer. Les villes jouèrent aussi un rôle majeur : à Bormio encore, dans le premier XIV^e siècle, la commune intervint dans toutes les étapes de la production et de l'organisation du secteur métallurgique, investissant dans la construction de fours et de fusine, confiant l'ensemble à bail à un groupe de six fermiers, par un véritable acte de concession qui fixait les droits et les obligations pour la fourniture en bois, la production de métal. Les installations devaient être mises au service de ceux qui voulaient produire du métal, et les heures de fonctionnement réparties entre les utilisateurs au début de la campagne (Arnoux 2001 : 220 et 229). Les exemples fournis par l'Afrique (Bwamu : Burkina Faso et Mali) de ce type d'économie doivent être gardés en tête, pour l'étude de la relation forge/travaux agricoles dans la longue durée historique en Europe : circulation à deux niveaux - hors matériel de guerre : intra-communautaire d'artisan métallurgiste à forgeron d'une part, pour la circulation du produit semi-fini ou du fer brut, avec attribution des différents types de fer à des usages précis ; inter-communautaire ensuite : évaluation à chaque campagne agricole par le doyen de famille des besoins et commande, les échanges individuels entre forgerons et

paysans se limitant à la réparation et à l'affutage d'outils (Coulibaly 2006).

2) L'étude de la « post-réduction » est souvent réduite à la capacité des forgerons à forger le métal. Or, archéométrie, expérimentations et ethnologie montrent qu'il s'agit d'un moment de la chaîne opératoire, gourmand en énergie humaine et en charbon, est capital : quelle que soit la filière empruntée, jamais le métal brut qui sort du fourneau n'est utilisable en l'état ; il doit être travaillé pour en obtenir le fer qui sera ensuite ouvré. Ceci explique en partie pourquoi le terme désignant cette phase l'a souvent emporté historiquement comme terme générique pour désigner l'ensemble de ces filières : on retrouve cette prééminence dans les termes « *martinetus* » (=martinet, terme dérivé de *martellus*) - et « *hammerwerk* », qui se répandirent au XIV^e siècle, le premier dans l'arc alpin, le second en Europe centrale pour désigner un atelier de réduction directe muni d'un marteau entraîné par une roue, à l'instar des *ferrierae* espagnoles et des *molina ferreae* languedociennes et pyrénéennes que la tradition subsumera sous l'appellation : « forge à la catalane ». Plus proche de nous, l'expression « maître de Forges », prévalait encore au XIX^e siècle pour désigner les grands chefs d'entreprises de la sidérurgie, rassemblés dans le fameux « Comité des Forges ». Cette domination sémantique reflète l'importance technique de la forge, véritable nœud technique, en Europe, point de rencontre des procédés, toutes filières confondues : « loupe/fer-acier », « fonte/fer-acier » et « loupe-fonte/fer-acier » fil, le direct et l'indirect.

3) Il faut être attentif au fait que la circulation des produits semi-finis, qu'elle soit ou non commerciale, ne recoupe pas le clivage entre métallurgie d'extraction et métallurgie de transformation. Les travaux des historiens convergent en ce sens : chacun des produits de la chaîne opératoire était commercialisable et circulait, aussi bien le *ferrum crudum*, la loupe donc, que ce soit dans sa forme première ou en boules homogènes reconstitués, que le *ferrum coctum*, le lopin épuré, sous ses diverses formes : *merlar* médiéval, *massé* moderne dans les Pyrénées ariégeoises, le *masseli* lombard ; a fortiori les fers et aciers de toutes sortes et de toute forme : un tarif styrien de 1516, par exemple, distingue cinq sortes d'acier du plus cher au moins cher, et sept sortes de fer, dont le « *zwizach* », fer dur ou aciéreux, le « *schienen eisen* », méplat, le *stangeisen*, barre fine ou verge, le *pflugblech*, plat pour charrue (Belhoste 2001) ; les ébauches enfin : de charrues, de faux, etc. et, bien évidemment, les objets. A l'inverse,

la forge ne traite pas que la loupe. Tout comme dans la *renardière* comtoise du XVIII^e siècle, la *fusina grossa* de Lecco, dans les Alpes, au XIV^e siècle, munie d'un marteau hydraulique, travaillait aussi bien à partir du *ferrum crudum*, de la loupe, que du minerai de fer et même de ferrailles. Et à Bormio, précédemment cité, le forgeron, en sus de la production communale, était autorisé à réduire son propre minerai et à en commercialiser le produit obtenu (Belhoste, Arnoux 2001).

Phase 3 : travail de la loupe => lopin

Définition. C'est au sens propre la phase de transformation de la loupe (*ferrum crudum*, *lump*) en métal forgeable (*bloom*, *lopin*). Il y a deux approches techniques possibles : soit une épuration de la loupe dans sa masse ; soit, après cassage de la loupe, un nouveau travail de tri, puis d'élaboration par « grappage ».

1) Le travail sur la loupe en masse : Il s'agit à proprement parler d'une épuration (Fluzin 2002). Au regard de ce que nous avons pu déterminer lors des expérimentations, cette épuration comporte elle-même plusieurs opérations :

- a) Un nettoyage mécanique grossier de la loupe, à température moyenne (loupe au rouge vermillon, jaune). Le travail s'effectue à la masse au bois ;
- b) Un cinglage proprement dit pour l'évacuation des scories par martelage à chaud (très haute température, loupe à blanc soudant);
- c) Un compactage: action similaire au cinglage, exécutée également à très haute température, mais avec des outils différents. Cette opération a pour but de former un bloc, forme géométrique permettant la préhension et les repères de mise en section ;
- d) Un corroyage « de base », loupe au jaune, rouge vermillon, qui permet par replis successif et soudage au feu, d'obtenir un lopin de fer forgeable. De 4 à 6 replis soudés suffisent à rendre le « lopin » ouvrable (données de l'expérimentation).

Deux observations doivent être faites, en complément :

- a) Ceci est théorique. Cinglage, compactage, corroyage sont des phases dont les frontières ne sont pas nettes. Le savoir-faire du forgeron consiste précisément à maîtriser ces frontières. Dans le cas où le forgeron procède à l'ensemble du travail de transition vers le fer « forgeable », ce qui a été testé lors des expérimentations, le passage de l'une à l'autre ne prend pas nécessairement

de matérialité technique. Le changement d'outil suffit : passage d'une masse en bois à une masse en fer. Le rythme du travail est donné par la gestion de la température du métal et donc par les chauffes dans le foyer. Au cours de l'opération d'épuration, le ou les forgerons vont modifier imperceptiblement la force de la frappe, la position de la masse de métal sur le tas.

b) le soudage : désigne l'action de solidariser à chaud des parties d'objet déjà partiellement mises en forme. C'est une pratique métallurgique importante, attestée depuis les temps anciens (Hauglustaine 1993, Fluzin 2002). En français écrit, le terme *soudage* est attesté à partir de 1459, mais de manière isolée.

2) le travail par « grappage ». Terme de création récente, le « *grappage* » désigne l'agglomération de fragments ferreux par martelage à chaud dans un foyer fermé (atmosphère réductrice). Il est pratiqué aujourd'hui par les forgerons comme forme de recyclage. Lorsqu'il est intégré à la chaîne opératoire du procédé direct, ce qui est attesté dans les espaces techniques européens, africains et asiatiques (Merluzzo et al, 1995), le grappage se présente ainsi : la loupe est brisée avec un soin particulier et les morceaux triés en fonction de leur homogénéité. Plusieurs choix sont alors possibles : travail sur place ; stockage des morceaux qu'on utilisera en fonction de la quantité obtenue et des besoins ; partage des morceaux entre les forgerons : chacun repartant avec ses morceaux de loupe qu'il forgera dans son atelier personnel ; commercialisation des morceaux. À Toulouse au XIV^e siècle, dans les statuts des « rasoirs » qui décrivent le processus d'épuration : le « *ferrum vocatur merlar* », ce fer qu'on appelle merlar, était « bouilli », *bulliatur*, puis il était brisé. Briser le *merlar* était un moment technique capital, réservé au maître ou à l'artisan confirmé. C'est à la brisure en effet : couleur, brillant, grain, profil de fracturation, qu'on jugeait des différentes qualités du métal qu'on allait regrouper et travailler (Verna 2001). Chez les métallurgistes Bassar, la loupe de fer était concassée en petits morceaux à l'aide de gros blocs de pierre; puis par des procédés complexes, les débris de la loupe étaient triés et mis en boules par catégories qualitatives; les boules étaient ensuite transformées en disques de fer dont on se servait pour fabriquer les objets (Coulibaly 206, Dugast 1986). Fait important, le découpage peut intervenir entre le compactage et le corroyage, après le cinglage donc.

Lexicographie :

a) Avec la post-réduction, on pénètre dans le domaine de compétence du forgeron,

« *faber* », « *faure* », « *febvre* ». A la maîtrise du feu, ou plus exactement à la maîtrise de la trilogie matériau/vents/feu, succède la maîtrise de la frappe (travail en percussion), plus exactement de la maîtrise de la trilogie matériau/feu/frappe. La ventilation soufflée s'impose, à telle enseigne, que dans le Bwamu, en Afrique, la forge est désignée sous le nom de « *lun-hun* », littéralement: soufflets (Coulibaly 2006). Ces compétences, qui ne se confondent pas, peuvent être le fait d'un seul homme, à la fois fondeur et forgeron, ou le fait de deux hommes, un métallurgiste puis un forgeron, formant ou non équipe, travaillant ou non dans le même atelier. Ainsi, dans le comté de Foix au XIV^e siècle, les faures reçoivent le minerai, *petrea ferrata*, et confectionnent les *merlaria* (barres de fer grossièrement martelées) et les *scapolones* (fer en morceaux) dont ils font des outils.

b) L'emploi du terme « affinage » est complexe: si ce terme, en effet, sert le plus souvent à désigner le processus de décarburation de la fonte dans le procédé indirect, il n'est pas rare de rencontrer dans les textes historiques pour désigner la phase d'épuration du procédé direct, comme une manière de terme générique, regroupant l'ensemble des opérations. C'est ce que signifie le terme « *fusina* », employé dans les vallées alpines, dont nous avons vu l'origine précédemment. Affinage pourrait bien dans cet usage historique signifier "épuration", si l'on suit la description du travail des forgers du haut Sabarthès en 1413 : « *etiam sunt ferratarii qui dicta mineralia in materias mundas ferri redigunt* » (Verna 2001) : « il y a aussi les forgers qui réduisent les dits minerais en matières pures de fer » (trad. litt. AFG), « *mundus* » signifiant littéralement : propre, net, et renvoyant à ce qui est nettoyé, purifié, élégant. Mais le terme affinage se rapporte plus couramment à la filière fonte/fer-acier. Mais quels que soient les filières ou les procédés, ce moment de la chaîne opératoire est particulièrement mal connu : les phases qui le composent laissent peu de traces archéologiques ou des traces difficiles à interpréter et même difficiles à discerner. Et s'il impose pour sa compréhension les compétences du forgeron et celles de l'archéomètre, il requiert aussi des études textuelles et lexicographiques.

c) L'appellation du semi-produit obtenu est un élément important de la connaissance historique du procédé : comment s'appelle en France le « *bloom* » anglais, le « *bloma ferri* » latin: *merlier* ou *merlaria*, « massé », « lopin », « lingot »? Contrairement aux termes « *merlar* » puis « massé » qui lui fit suite chronologiquement, on connaît mal l'histoire de l'emploi du « lopin », actuellement fréquemment utilisé par les forgerons. Ce dérivé du terme « *lope* », « morceau » - qui a également donné la forme « loupe » !-

est attesté à partir des années 1880 dans les textes relatifs à la métallurgie et à l'archéologie du métal, pour désigner un morceau de fer prêt à être forgé, un morceau de fer forgé, étiré (Jossier 1881); un « morceau de fer obtenu par la réunion de plusieurs autres morceaux soumis au travail de la forge » (Havard 1889, tome 3). J. Déchelette l'emploie dans le tome 3 de son *Manuel d'archéologie préhistorique, celtique et galloromaine* (Déchelette, t. 3, 1914, p. 29). Le terme « lingot » enfin pourrait se rapporter à une masse de métal reconstitué après cassage et triage de la loupe. Les études lexicographiques manquent à ce propos.

Analyse.

Produit obtenu: métal forgeable sous forme de barres, d'ébauches, de lingots; culot de forges; battitures.

Éléments du complexe technique: Billot en bois, enclume en pierre (= « *incus* » dans le pays de Foix) qui favorise le martelage des masses métalliques hétérogènes, maillet en bois : qui donne une grande surface de travail, et dissipe l'énergie de choc. Matériau pour les soufflets : cuir/bois/ argile. Instruments de percussion : masses en fer, galet de pierre. Ceci pour la forge manuelle. Evoquons le complexe technique du marteau hydraulique : bois, cuir, charpentier hydraulique, canaux hydrauliques. C'est lui, dans le pays de Foix, qui permettait d'obtenir les *merlaria*, barres de fer d'environ 2 quintaux, soit 84 kg.

Traces archéologiques : foyer de forge, scories de forge, battitures autour de l'aire de martelage, scories fortement métalliques éjectées (Noseck 1994), fragments de métal généralement oxydés : chutes, ébauches d'objet, soies de préhension, fragments d'outils, morceaux en attente de réutilisation (Fluzin 2002), charbon, enclume en pierre, fosse d'enclume. Atelier rectangulaire. NB. Dans le Bwamu (Afrique), l'atelier de forge est enterré dans une grande fosse circulaire de 80 cm de profondeur, avec une hauteur de 2m50 (Coulibaly 2006).

Attestations locales : Vert-Pignon, Trécelien (Girault 2005 et travaux en cours)

Questionnement : Taille limite de la masse de métal épurée ? Tri ou non des métaux ? Aspect du foyer ? Il ne faut pas éliminer d'emblée l'hypothèse d'un réemploi du fonds du four de réduction, voire l'existence d'un foyer de réchauffe. C'est le cas dans la forge catalane de l'époque moderne : le massé est réchauffé avant son épuration. Enfin, comme il a été dit en introduction de cette partie, un atelier de forge peut servir aussi, soit durablement soit occasionnellement, d'atelier de réduction. Voir donc s'il s'agit-il d'un atelier réduction/forge, ou d'un atelier de forge avec foyer de réchauffe.

Phase 4 : Elaboration: lopin ==> objet

Définition. C'est la phase d'élaboration des fers à partir de lopins, pour obtenir un objet ou une ébauche d'objet que l'on commercialisait. Cette phase comporte une succession complexe d'opérations brèves et de tours de main spécifiques qui font l'art du forgeron. Elle comporte globalement deux phases : 1) au besoin, en fonction de la qualité du ou des lopins et du type d'objet à produire, un corroyage « d'élaboration » appelé ainsi pour le distinguer du corroyage effectué dans la phase précédente ; ce corroyage peut s'accompagner d'un soudage ; 2) le forgeage de l'objet.

1) Le « *corroyage d'élaboration* » a deux finalités :

a) opérer une répartition plus fine des inclusions non métalliques dans la matrice de fer ce qui a pour but de limiter les risques de fissuration. Il y a donc une forte possibilité pour que ce second corroyage soit pratiqué pour les lames et les tôles ;

b) assembler des lopins de fer et d'acier de provenance diverses. Au cours de cette première étape préparatoire, on peut aussi évoquer, un corroyage pour « mise à la nuance » de carbone.

2) Le *forgeage* est l'action de mise en forme d'un objet en fer ou en acier ou de son ébauche par déformation plastique du matériau à chaud essentiellement, ce qui implique la présence d'un foyer, plus rarement à froid.

Lexicographie

a) On le sait désormais : chaîne opératoire et espace social de production sont fortement susceptibles de se séparer dans cette phase ultime. Ainsi, dans les Pyrénées ariégeoises au XVe siècle, une ordonnance du comte de Foix, en 1425 réserva aux seuls forgerons de la capitale le droit de fabriquer l'objet à partir de l'ébauche (*parar*), auparavant dégrossis dans les moulins du haut Sabarthès. C'était transformer en privilège exclusif, la simple autorisation qui leur avait été accordée en 1349. Ils leur revenaient de marquer des armes de Foix les socs et autres outils qu'ils recevaient dégrossis. A Toulouse, dans le même moment, c'est à partir du *merlar*, morceau extrait on l'a vu des *merlaria*, qu'était obtenu et travaillé l'acier, *calibem* (accusatif de *calibs*), pour fabriquer les rasoirs ou les carreaux d'arbalète. Cela étant, le développement de la forge urbaine n'a pas tué, loin s'en faut, la forge rurale qui produisait lames de scies,

faux, et aussi des carreaux d'arbalètes (Verna 2001). La division du travail, constante de l'histoire des techniques médiévale et moderne européenne, s'est doublée d'une mécanisation. En Styrie, au XVI^e siècle, haut-lieu de la filière « loupe/fer-acier », région productrice d'aciers réputés, célèbre en particulier pour ses faux, objet complexe dont le dos souple et résistant requiert l'emploi d'acier corroyé entre des bandes d'acier plus tendre ou de fer aciéré et le tranchant, formé d'acier fin, celui de barres corroyées et soudées sur plusieurs épaisseurs, l'opération d'élaboration fut progressivement mécanisée. « Une division s'opéra entre les *Welshämmer* qui produisaient les lingots, (« *Kloben* ») et les *Zainhämmer* dotés de marteaux plus légers sous lesquels les lames brutes (« *Sensenknüttel* ») étaient fabriquées par corroyage de barreaux choisis en fonction des qualités requises. » A la fin du XVI^e siècle, l'étirage et l'assemblage, jusque là manuels, s'effectuèrent dans un nouvel atelier, le *Sensenhütten*, sous un marteau hydraulique. Les Styriens commercialisaient les produits obtenus à chacune des étapes : *Kloben*, *Sensenknüttel*, faux et pièces semi-ébauchées (Belhoste 2001 : 576-577). A la même époque, les fabriques d'épée qui florissaient à Rives, dans le Dauphiné, forgeaient un métal composite, en fer et aciers soudés avec un acier obtenu par décarburation partielle des fontes importées de Franche-Comté. Les plats d'acier et de fer étaient soudés puis « rabattus », c'est-à-dire allongés au marteau hydraulique, puis aiguisés et pointés à la meule, également hydraulique (Belhoste 2001 : 574).

b) En histoire des techniques, le terme « corroyer » - attesté sous la forme « *conréer* » au XI^e siècle, pour signifier « apprêter, parer » à propos du corps d'un défunt - n'est pas réservé au métal : il s'emploie pour le cuir, la menuiserie, la construction. On le trouve dans le Dictionnaire de Félibien, en 1674, dans son application métallurgique : « corroyer une barre de fer ». L'attestation de l'essentiel du vocabulaire courant de la forge date de la fin du XVII^e siècle, qui fut une époque charnière dans l'histoire de la métallurgie, le passage de la pratique à une lecture technique, voire scientifique. Cela étant, beaucoup reste à faire en termes d'analyse lexicographique pour cette phase comme pour la précédente.

Analyse

Produit obtenu: objet fini : tirants de fer, goujons de statue, fer à cheval, charrue, couteaux, lames de scies, haches, clous, armures, rasoirs, carreaux d'arbalète, plats d'épée, canons et platines d'arquebuse, platine fonction du type de métal ferreux : fers doux, fers forts, diverses sortes d'aciers. Ebauche : faux, socs...

Éléments du complexe technique : matériaux pour les soufflets (*barquis*, dans les Pyrénées) : cuir, bois, argile. Eventuellement, agencement hydraulique pour actionner les soufflets, les marteaux, les meules : canaux, roues, charpentes. Marteaux de différentes formes, enclumes de différentes formes, cisailles, ciseaux, poinçons, filières, cloutières, « cisailles ». Meules, récipient d'eau. Sable ou argile pour décaper les oxydes de fer formés et empêcher une nouvelle oxydation. Sable, décapant (par ex. minerai) en cas de soudure fer/acier (Guillot et al., 1987, Fluzin 2002), matières organiques, argiles en cas de traitement thermochimiques (Fluzin 2002).

Traces archéologiques : Faibles pour les forges manuelles : le foyer est régulièrement nettoyé pour obtenir le meilleur contrôle possible du travail (estimation visuelle), et pour concentrer le feu suivant le type d'objet à travailler (Fluzin 2002). Foyers de forge, foyers de réchauffe, aire de martelage : coloration noirâtres avec battitures qui auront une morphologie « bulleuse » en cas d'utilisation d'ajouts (Dunikovsky et al, 1996), fosse d'enclume, enclume, fosse-cendrier; scories parfois au fond des foyers.

Attestations sur le terrain : foyer de réchauffe : fouilles à Le Guildo en Côtes d'Armor , II^{ème} siècle av. J.-C (Beuchet, Picault 1996). ; Habitat aristocratique de Paule en St-Symphorien en Ille-et-Vilaine, (Menez et al. 2004)

Questionnement : L'organisation de l'atelier est la question essentielle. La zone de forgeage est nécessairement proche du foyer. Quid de la vie des objets : protection contre la corrosion ? Recyclage ? Quid de la vie des forgerons : positionnement de la forge par rapport à l'habitat ? Quid de la mécanisation par hydraulique (marteau, meule, forgeage des tôles) ? Présence de traitements complémentaires pour modifier les propriétés mécaniques de l'objet : traitements thermochimiques : cémentation = carburation d'un fer par chauffage dans un milieu solide; nitruration = durcissement superficiel d'un fer ou d'un acier en faisant agir à une température relativement basse, 500°/550° une matière azotée); thermiques (recuit = chauffage puis maintien en température d'une pièce de fer ayant subi une déformation à froid, un écrouissage; trempe = chauffage à haute température d'un alliage fer-carbone puis refroidissement brutal en le plongeant dans l'eau ou dans un liquide approprié; revenu = chauffage à température plus faible que la trempe et refroidissement à l'air libre) ?

V. Conclusion

Nous espérons, au terme de ce rapport méthodologique, avoir jeté les bases d'une synthèse qui permette à chacun, à partir de sa discipline, de se repérer, de positionner au mieux ses recherches à la fois dans la chaîne opératoire et par rapport aux disciplines qui participent de cette recherche. La démarche est fructueuse et incomplète à la fois.

Fructueuse d'abord : Christophe Colliou et de Régis Aranda pilotèrent les expérimentations et assumèrent l'essentiel des risques scientifiques de ce PCR « Vents et Fours ». Mais la présence à leur côté durant les expérimentations d'un archéomètre travaillant aux mesures, obligeant à l'analyse fine des états et structures des scories, produits et métaux obtenus, les référents aux données archéométriques obtenues sur les métaux anciens (Philippe Dillmann) et d'une historienne des techniques observant le déroulement technique, l'organisation physique de l'atelier, les vocabulaires, les référant aux données historiques, a accru en termes d'interrogations, de demandes, d'exigences, le champ scientifique couvert initialement par l'expérimentation (Anne-Françoise Garçon). La mise au point de cette grille méthodologique en est l'une des résultante, et nous remercions tout particulièrement Cécile Mahé-Le Carlier et Michel Pernot, d'avoir bien voulu apporter leurs critiques, parfois vives, toujours constructives, sans lesquelles nous ne serions pas parvenus à ce résultat.

L'histoire des techniques, avec Bertrand Gille et André Leroi-Gourhan, la philosophie des techniques, avec Gilbert Simondon, ont élaboré des outils de pensée précieux : chaîne opératoire, fait technique, lignée, complexes techniques, des outils indispensables à condition toutefois de ne pas les fossiliser, d'accepter au contraire de les faire évoluer à mesure que la recherche elle-même s'approfondit et évolue. Voilà donc où nous en sommes : travaux des archéologues, des archéomètres et des géochimistes aidant, nous pouvons désormais, en historisant la question c'est-à-dire en tenant compte de l'apport des métallurgistes des XVIIIe et XIXe siècles, distinguer au-delà des appellations courantes : procédé direct, procédé indirect, nées au XIXe siècle, distinguer entre deux grandes lignées techniques : la lignée des bas-fourneaux, et la lignée des hauts-fourneaux. Ni l'une ni l'autre ne donnent du fer directement : toujours le passage se fait par un semi-produit : loupe dans le procédé direct; fonte dans le

procédé indirect, qu'il faut retravailler longuement ensuite. La lignée bas-fourneau peut donner de la fonte; et la lignée haut-fourneau peut donner des produits semi-finis de type loupe : c'est dire que l'histoire des procédés ne se résume pas à celle de la lignée d'instruments qui les supporte majoritairement; c'est dire aussi qu'un processus physico-chimique peut être conduit et maîtrisé au moyen de procédés multiples. Enfin, l'arrivée du haut-fourneau à fonte - tardive en Europe par rapport à son usage dans l'espace technique chinois - ne s'est pas traduite par l'éradication de la bas-fourneau : les deux lignées ont longuement cohabité, y compris au plus fort de l'industrialisation, y compris dans les espaces techniques en pleine expansion comme le furent les Etats-Unis d'Amérique dans les années 1860.

Le schéma évolutionniste s'estompe également lorsqu'on observe de plus près la lignée bas-fourneau, et tout particulièrement, la question de la ventilation, qui était l'objet de ce PCR : deux procédés techniques ont bel et bien existé au sein de la filière loupe/fer-acier, dont rien si ce n'est les habitudes de pensée induites par la culture technique et scientifique dont nous sommes imprégnés, ne permet de considérer que l'une est plus primitive, moins élaborée que l'autre : ventilation naturelle et ventilation forcée en matière de réduction sont deux choix techniques à part entière, deux procédés requérant chacun ses compétences, ayant chacun ses modalités innovantes. Les métallurgistes usant de la ventilation naturelle n'étaient pas moins compétents, loin s'en faut, que ceux utilisant de la ventilation forcée. Mieux, en Afrique, son adoption a signifié au plan technique une plus grande maîtrise du feu, et s'est soldée au plan économique, dans ce pays où l'eau n'est pas une force motrice aisément accessible, par une diminution des coûts de main d'œuvre. Bref, ce fut, une véritable innovation. On l'aura compris, l'étude des lignes bas-fourneau et haut-fourneau, l'étude des procédés direct et indirect, l'étude des filières de production, l'étude des procédés relèvent moins d'un schéma évolutionniste que des différences induites par les cultures techniques, par les environnements politiques, économiques et sociaux. Il n'y a pas d'histoire en soi des procédés métallurgistes... Il y a des histoires au sein d'espaces techniques.

L'ensemble est incomplet cependant, et pour cela frustrant : une telle grille méthodologique, pour être pleinement efficace, ne peut être le fait de la seule petite équipe qui s'est constituée, grâce au SRA Bretagne, sur la question de la relation entre minerai et objet, entre vents et fours. L'objectif de ce PCR n'était pas d'intégrer

l'ensemble des données disponibles sur le sujet, ni même de constituer une base de données. Nous le regrettons suffisamment pour considérer que telle elle doit être reprise, complétée, discutée, par tous. Elle s'offre à cette discussion, et se présente, de fait, comme l'élément initial à la constitution de la base de données paléoméallurgiques qui feraient se rejoindre les résultats de l'archéologie, l'archéométrie, la géochimie, de l'ethnologie et de l'histoire et que nous appelons de nos vœux.

schéma des complexes techniques métallurgie du fer, réduction en phase solide (procédé direct)

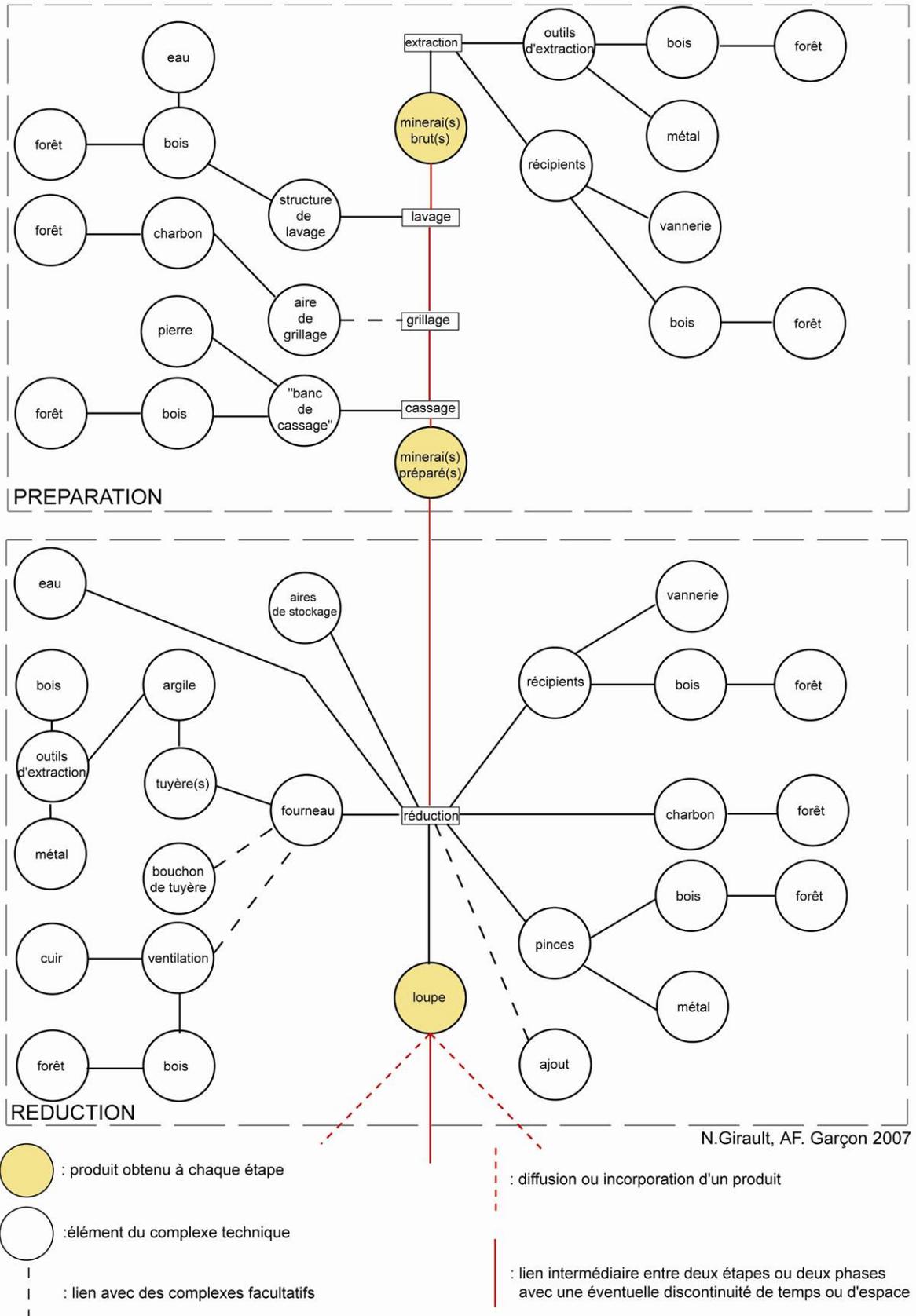
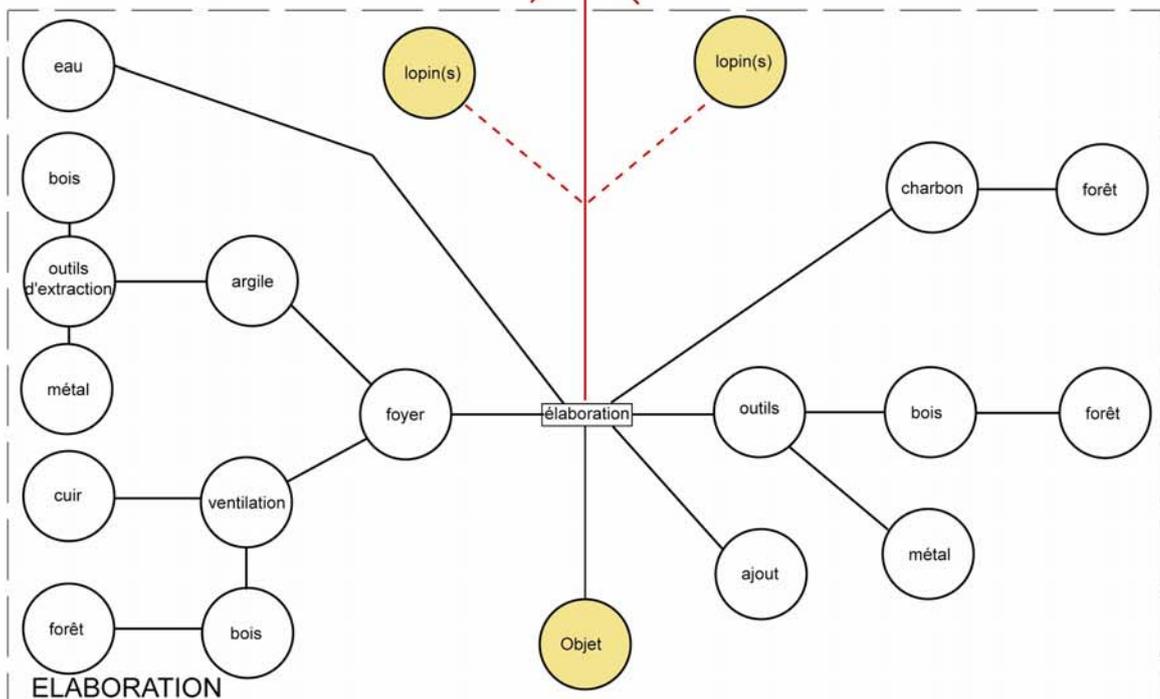
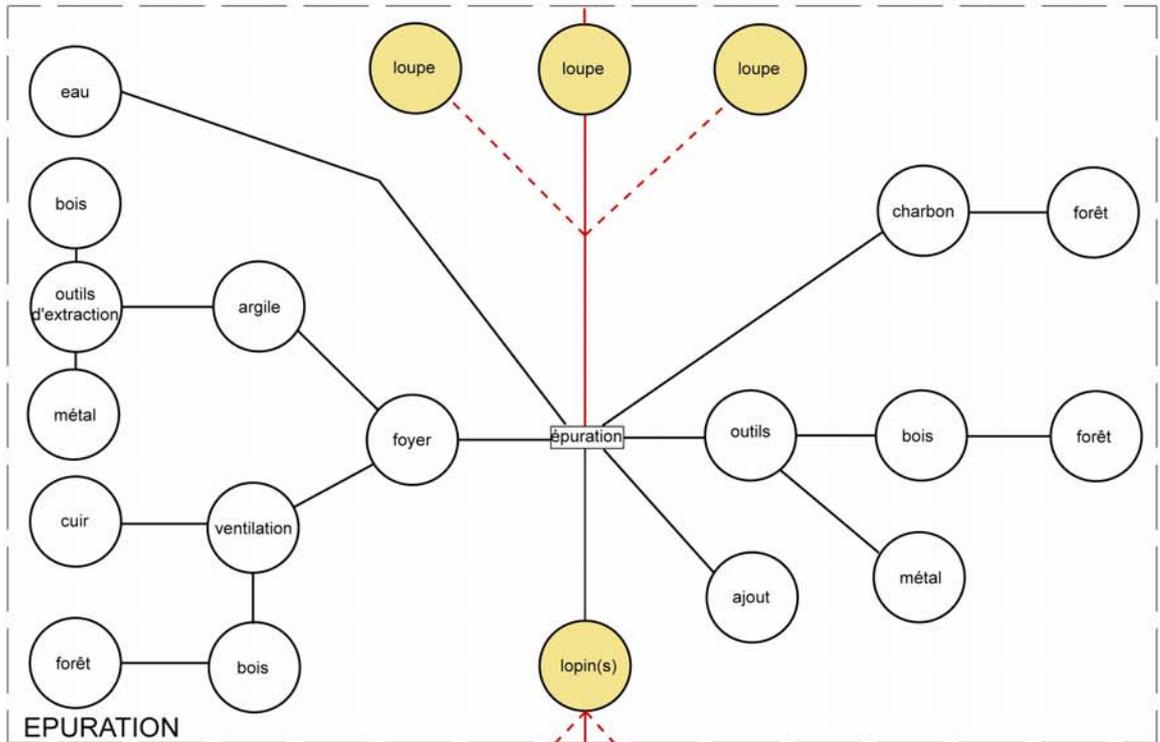


schéma des complexes techniques métallurgie du fer, réduction en phase solide (procédé direct)

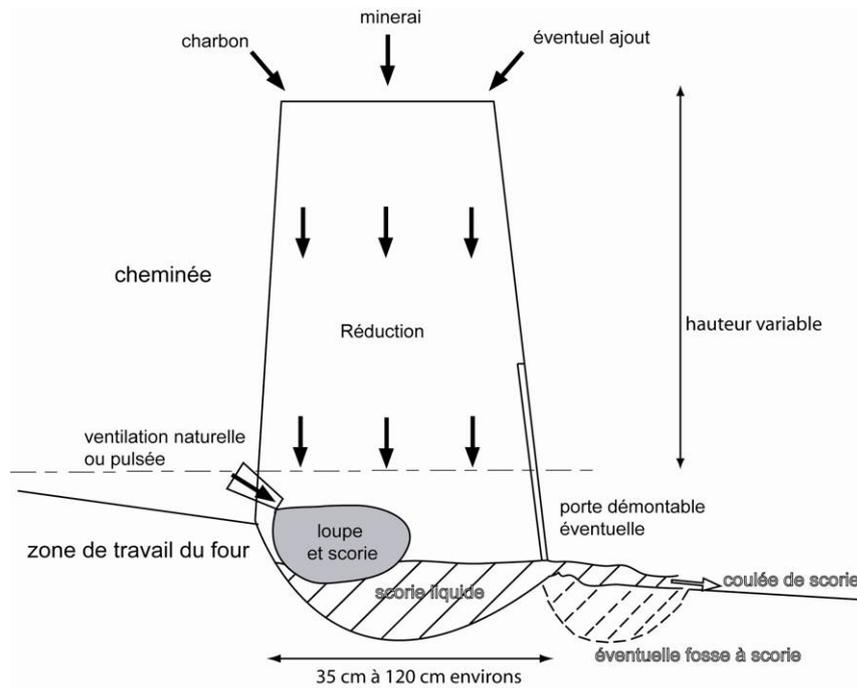


N.Girault, AF. Garçon 2007

- : produit obtenu à chaque étape
- : élément du complexe technique
- : lien avec des complexes facultatifs

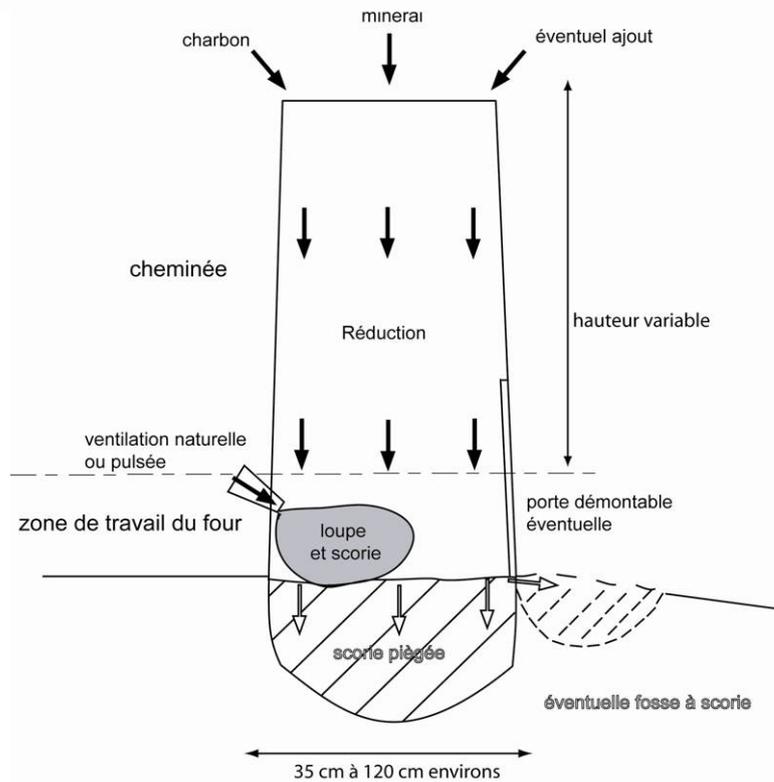
: diffusion ou incorporation d'un produit

: lien intermédiaire entre deux étapes ou deux phases avec une éventuelle discontinuité de temps ou d'espace



Coupe - fourneau générique à scorie écoulée

N.GIRAULT, A.F. GARCON 2007



Coupe - fourneau générique à scorie piégée

N.GIRAULT, A.F. GARCON 2007

Sources et Bibliographie

- ★ *Des systèmes techniques. Anthropologie et sociétés*, v. 13, no 2. Québec, Canada: Département d'anthropologie, Université Laval, 1989.
- ★ ANDRIEUX (P.) (1993), « Le poids de l'air dans les fourneaux métallurgiques et son influence sur les structures de réduction », in : MANGIN M. (éd.), *La sidérurgie ancienne de l'Est de la France dans son contexte européen : archéologie et archéométrie*, Actes du colloque international de paléoméallurgie de Besançon, 9-13 nov. 1993, *Annales littéraires de l'université de Besançon*, 536, Paris : Les Belles Lettres, p. 159-163
- ★ ARENDT (V. V.), (1936), « Sur la technique de la fabrication des lames dans l'antiquité », *Archives d'Histoire des Sciences et des Techniques*, Moscou-Léningrad : Académie des Sciences de l'URSS, p. 161-186
- ★ BALFET (H.), (1991), *Observer l'action technique: des chaînes opératoires, pour quoi faire ?* Paris : Editions du CNRS
- ★ BARON (S.) (2005), *Traçabilité et évolution d'une pollution métallurgique médiévale de Plomb Argentifère sur le Mont-Lozère*, Thèse Université de Montpellier 2/Ademe, dir. F. Elbaz-Poulichet
- ★ BELHOSTE (J.-F.) (1995) "The origins of direct reduction water-powered iron works : reflections based on the evolution of terminology", in *La farga catalana et el marc de l'arqueologia siderurgica*, p. 358-398.
- ★ BELHOSTE (J. ; -F.) (2001), « Mutations techniques et filières marchandes dans la sidérurgie alpine entre le XIIIe et le XVIe siècle », in BRAUNSTEIN (P.) (dir.), *La sidérurgie alpine en Italie (XIIe - XVIIe siècle)*, Rome : Ecole Française de Rome, p. 515-592.
- ★ BENOIT (P.), FLUZIN (P.) (dir.) (1995), *Paléoméallurgie du fer & cultures: actes du symposium international du Comité pour la sidérurgie ancienne de l'Union internationale des sciences préhistoriques et protohistoriques*, Belfort-Sévenans, Institut polytechnique de Sévenans, 1-2-3 novembre 1990. Belfort: Vulcain
- ★ BEUCHET (L.) et PICAULT (C.) (1996), « La forge du Guildo, XIVe-XVe siècle » in : *L'innovation technique au Moyen Age*, Actes du colloque du VIème congrès international de la société d'archéologie médiévale, Paris.
- ★ BIELENIN K. (ed.) (1989), « From Bloom to Knife », Actes du symposium international du comité pour la sidérurgie ancienne de l'UISPP, Kielce-Ameliowka, 18-22 sept. 1989, *Materialy archeologiczne*, 26.
- ★ BOCOUM (H.) (dir.) (2002), *Aux origines de la métallurgie du fer en Afrique: une ancienneté méconnue. Afrique de l'Ouest et Afrique centrale*. Paris: UNESCO
- ★ BRAUNSTEIN (P.) (2001) (dir.), *La sidérurgie alpine en Italie (XIIe - XVIIe siècle)*, Rome : Ecole Française de Rome
- ★ BRUNET (L.) (1937), « Les techniques et leur histoire. Essai de bibliographie pour 1936 », *Thalès*, p. 155-170
- ★ COULIBALY (E.) (2006), *Savoirs et savoir-faire des anciens métallurgistes d'Afrique. Procédés et techniques de la sidérurgie directe dans le Bwanu (Burkina Faso et Mali)*, Paris : Karthala
- ★ CRESSWELL (R.) (2003), « Geste technique, fait social total. Le technique est-il dans le social ou face à lui ? », *Techniques et culture*, n°40, *Efficacité technique, efficacité sociale*, avril 2003. [En ligne], mis en ligne le 11 juillet 2006. URL : <http://tc.revues.org/document1576.html> .
- ★ DABAS (M.), Dieudonné-Glad (N.) et Poirier P. (2002), « Caractérisation des structures d'une forge antique : approche archéologique, géophysique et anthracologique », *Revue d'Archéométrie*, 26, Rennes :Ed. G.M.P.C.A., p. 141-153
- ★ DARRE (J.-P.) (1998), *L'invention des pratiques dans l'agriculture*, Paris :éd. Karthala
- ★ DARRE (J. P.), MATHIEU (A.), LASSEUR (J.) (2004), *Le sens des pratiques: conceptions d'agriculteurs et modèles d'agronomes*. Paris, INRA
- ★ DIEUDONNE-GLAD (N.) (1999), « Métallurgie du fer et habitat rural : comment reconnaître les vestiges archéologiques ? » In : M. Polfer (dir.), *Artisanat et productions artisanales en milieu rural dans les provinces du nord-ouest de l'Empire romain* (Actes du colloque d'Erpeldange, 4-5 mars 1999) (*Monogr. Instrumentum* 9), Montagnac, p. 39-43.
- ★ DIEUDONNE-GLAD (N.), (2000), « L'atelier sidérurgique gallo-romain du Latté à Oulches (Indre) ». *Gallia* 57, p. 63-75.
- ★ DILLMANN (P.), ARRIBET-DEROIN (D.), VEGA (E.), BENOIT (P.), (2003) « Early modern cast iron and iron at Glinet », in *Proceedings of the Norberg conference : Norberg-Nora, 700 years of iron production*, Norberg.

- ★ DILLMANN (P.), BERNARDI (P.), (2003), « Premiers résultats métallographiques sur les tirants de fer du Palais des Papes d'Avignon. Eléments de réflexion sur la qualité et la provenance des matériaux ferreux utilisés dans la construction monumentale au Moyen-Age », in NOËL R., I. PAQUAY et J.-P. POSSON (dir.), *Au-delà de l'écrit. Les hommes et leurs vécus matériels au Moyen Age à la lumière des sciences et des techniques. Nouvelles perspectives*, Louvain-la-Neuve, p. 241-279
- ★ DOMERGUE (C.), LEROY (M.), (2001), « L'état de la recherche sur les mines et les métallurgies en Gaule, de l'époque gauloise au haut Moyen Âge », *Gallia*, 57, p. 3-10
- ★ DUNIKOWSKI (C.) et CABBOI (S.) (1995), *La sidérurgie chez les Sénons : les ateliers celtiques et gallo-romain des Clérimois (Yonne)*, DAF, n°51, Paris
- ★ DUGAST (S.) (1986) « La pince et le soufflet : deux techniques de forge traditionnelles au Nord du Togo », *Journal des Africanistes*, tome 56, fasc.2
- ★ ECHARD (N.) (1986), « Histoire du peuplement et histoire des techniques: l'exemple de la métallurgie Hausa du fer au Niger », *Journal Des Africanistes*, p. 21-34.
- ★ FLUZIN (P.) (2001), « Apport de l'archéométrie à la restitution de la chaîne opératoire en sidérurgie ; matériaux archéologiques et procédés. Etudes métallographiques », pp.335-365, in *L'obtencio del ferro pel procediment directe entre els segles IV XIX*, Actes del 6è curs d'Arqueologia d'Andorra 2000, Andorre
- ★ GARÇON (A.-F.) (1995), *Les métaux non ferreux en France aux XVIIIe et XIXe siècles (ruptures, blocages, évolutions au sein des systèmes techniques)*. Lille: A.N.R.T. Université de Lille III, 1995 (<http://hal-shs>)
- ★ GARÇON (A.-F.) (1999), « Fours debout, fours couchés. L'horizontalité et son apport en métallurgie », *Archives internationales en Histoire des Sciences*, n°143, vol. 49, p. 302-330
- ★ GARÇON (A.-F.) (2002) « Un (demi) métal, quatre procédés, deux filières. Comment l'Europe inventa le zinc entre XVIIe et XIXe siècles », dans : BRAUN (H.-J.) and HERLEA (A.), *Materials : Research, Development and Applications, Proceedings of the xxth International Congress of History of Science* (Liège, 20-26 July 1997), vol. XV, Turnhout : Brepols, p. 11-29.
- ★ GIRAULT (N.) (2005), *Paléoméallurgie en forêt de Paimpont : le site de Trécélien*, mémoire de D.E.A inédit., sous la direction de P. Benoit, Université de Paris 1, Paris
- ★ GRIFFON (R.) (2001), *Le dernier forgeron*, Paris: Librairie générale française.
- ★ HAUDRICOURT (A.-G.) et (Brunhes) DELAMARRE (M.), (1955). *L'homme et la charrue à travers le monde*. Géographie humaine, 25. Paris: Gallimard, 1955 (rééd. 1985, 2000)
- ★ HAUDRICOURT (A.-G.) (1988), *La technologie, science humaine: recherches d'histoire et d'ethnologie des techniques*. Paris: Editions de la Maison des sciences de l'homme
- ★ LEBLANC, (J.-C.), DABOSI (F.) (2004). « Histoire du fer - Restitution de la chaîne opératoire ancienne de forgeage manuel du fer sur la base d'une étude morphométrique et minéralogique des oxydes de fer », *Matériaux et Techniques*. 92, n°5.
- ★ LEFEVRE-BALLEYDIER (A.), (2005), « Les métaux d'hier précieux pour demain », *Journal du CNRS* - n°183. <http://www2.cnrs.fr/presse/journal/2092.htm>
- ★ LEROY (M.), MERLUZZO (P.), FLUZIN (P.), LECLERE (D.), AUBERT (M.), PLOQUIN (A.), (2000), « La restitution des savoir-faire pour comprendre un procédé technique : l'apport de l'expérimentation en archéologie du fer », *Rencontres internationales d'archéologie et d'histoire d'Antibes. Arts du feu et productions artisanales*: actes des Rencontres, 21, 22, 23 octobre 1999. Antibes: Ed. APDCA, 2000
- ★ MANGIN (M.) (2004), *Le fer*. Paris: Errance, 2004
- ★ MERLUZZO (P.), FORRIERES (C.), THOUVENIN (A.) et PLOQUIN (A.), (1995) « Les premières étapes du travail du fer en foyer de forge, selon des procédés traditionnels japonais » in BENOIT (P.) et FLUZIN (P.) (dir.), *Paléoméallurgie du fer & cultures* : actes du symposium international pour la sidérurgie ancienne de l'Union internationale des sciences préhistoriques et protohistoriques, Belfort, Sévenans, 1-3 novembre 1990, Paris, p.71-86
- ★ NOËL (R.), PAQUAY (I.), SOSSON (J.-P.) (dir.) (2003), *Au-delà de l'écrit. Les hommes et leurs vécus matériels au Moyen Âge à la lumière des sciences et des techniques. Nouvelles perspectives*. Actes du Colloque international de Marche-en-Famenne, 16-20 octobre 2002, Turnhout : Brepols
- ★ PARTINGTON (J.R.) (1936), "The discovery of bronze", *Scientia*, X, p. 197-204
- ★ PERCY (J.), (1861-1864), *Metallurgy: The Art of Extracting Metals from Their Ores*. London: J. Murray
- ★ PLOQUIN (A.) (2001), « Une introduction à la pétrographie des scories paléosidérurgique », pp. 289-234, in *L'obtencio del ferro pel procediment directe entre els segles IV XIX*, Actes del 6è curs d'Arqueologia d'Andorra 2000, Andorre
- ★ ROBERT-HAUGLUSTAINE (A.-C.), (1993), « Le soudage de l'or : étude à partir des textes antiques et médiévaux », *Outils et ateliers d'orfèvres des temps anciens*. Textes rassemblés par Christiane Eluere.

- Société des Amis du Musée des Antiquités nationales, Antiquités nationales, 2. - 304
- * SERNEELS (V.) (???), « La chaîne opératoire de la sidérurgie ancienne », in : FEUGERE (M.), SERNEELS (V.) (éds), *Recherches sur l'économie du fer en Méditerranée occidentale*, monographies *Instrumentum*, 4, Montagnac, éd. M. Mergoil, p. 7-44
 - * SERNEELS (V.) (2001), « Apport des analyses chimiques à l'étude des vestiges sidérurgiques », pp.268-288, in *L'obtencio del ferro pel procediment directe entre els segles IV XIX*, Actes del 6è curs d'Arqueologia d'Andorra 2000, Andorra
 - * TABBAGH (A.) (1994), « Notes pour servir à l'histoire du G.M.P.C.A », *Histoire & Mesure*, IX-3/4, p.404-408.
 - * VEGA (E.), DILLMANN (P.), L'HÉRITIER (M.), FLUZIN (P.), CREW (P.), BENOIT (P.), (2003), "Forging of phosphoric iron. An analytical and experimental approach", *Archaeometallurgy in Europe*, Milan: AIM.
 - * VERNA (C.) (2001), *Le temps des moulins: fer, technique et société dans les Pyrénées centrales, XIIIe-XVIe siècles*. Paris: Publications de la Sorbonne, 2001
 - * VIVET (J.-B.) (2004), « PAIMPONT (Ille et Vilaine), le ferrier de Trécélien », *Archéologie Médiévale*, 34
 - * VIVET (J.-B.), 2006, « La production du fer protohistorique en Haute-Bretagne d'après les résultats des prospections, des fouilles d'ateliers et des analyses archéométriques », actes du colloque de l'A.F.E.A.F., Toulouse - mai 2004 (en cours de publication, éd. Ausonius)
 - * VIVET (J.-B.), CHAUVEL (J.-J.), NICOLLIN (F.), (2003), « Productions de fer à La Tène ancienne en vallée de Rance : La Ville Pierre II en Quévert (22) », *Les Dossiers du Ce.R.A.A.*, 31, p. 77-99.
 - * WILLIAMS (A.) (2003), *The Knight and the Blast Furnace: A History of the Metallurgy of Armour in the Middle Ages & the Early Modern Period. History of warfare*, v. 12. Leiden: Brill.
 - * YANDIA (F.), (2001), *La métallurgie traditionnelle du fer en Afrique centrale (Société, économie et culture)*, Paris : l'Harmattan.

La ventilation naturelle : à la recherche d'un référentiel technique

(S. Pellequer)

Parties I et II du Mémoire de Master en Histoire des Techniques, réalisé sous la direction du professeur Anne-Françoise Garçon, dans le cadre du PCR « Vents et fours en paléoméallurgie du fer : du minerai à l'objet », SRA Bretagne/Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne.

I. Approche critique de la littérature technique et scientifique.

Force est de constater que les sources écrites anciennes ne mentionnent pas de fourneaux de réduction de minerai de fer à ventilation naturelle pour l'Europe. Les sources antiques, bien avarées en détails techniques, ne font que très rarement état de la ventilation des fourneaux métallurgiques, et lorsque ceci est le cas, il s'agit de ventilation forcée. Ainsi, Quinte Curce (Quintus Curtius Rufus) au I^{er} ou II^e s. ap. J.-C. et Junius Phylargyrius au V^e s. ap. J.-C. évoquent la réduction du minerai de fer dans des fourneaux activés par des soufflets (*folles*)¹.

Dans les traités techniques que nous avons étudiés, les fourneaux de réduction de minerai emploient la ventilation forcée. Ainsi, dans le traité le plus ancien du corpus, écrit par le moine Théophile au XII^e siècle, la réduction du minerai de cuivre est décrite en ces termes : « *cassée menu, elle (la pierre employée comme minerai) se met au fourneau ; à l'aide de charbons et de soufflets, on chauffe incessamment jour et nuit.* »². Le chapitre décrivant la réduction du minerai de fer³ n'évoque pas la soufflerie. Les autres sources écrites médiévales relatives à la métallurgie du fer (actes, comptes, baux notamment) ne semblent évoquer que des systèmes de soufflerie lorsque la ventilation est abordée⁴.

Les traités plus tardifs ne mentionnent également que des fourneaux de réduction dotés de soufflets, manuels ou entraînés par l'énergie hydraulique⁵. Les traités métallurgiques de G. Agricola et V. Biringuccio, au XVI^e s. font ainsi état de bas fourneaux ventilés par des soufflets actionnés par des roues à eau. Le procédé indirect de fabrication du fer en haut fourneaux, qui se répand à partir du XIV^e siècle en Europe, s'accompagne de la soufflerie mécanique, hydraulique jusqu'au XIX^e

¹ Curtius Rufus, 39 : « *cum fornacibus quod ferrum excudi oportebat, impositum esset admotisque follibus igne flatu accenderant* » ; Phylargyrius ad Aen. IV, 172 : « *folles taurini habent cum liquescant petrae ubi ferrum fit* », cités dans Pleiner, 2000, p. 195.

² Cf. Theophilus (De l'Escalopier), Livre 3, chap. 62, p.183. Le texte originel latin est « *Deinde minutatim contractus imponitur fornacis, et follibus atque carbonibus adhibitis incessantur die ac nocte conflatur* », d'après Theophilus (Dodwell), Livre III, chap. LXIII, p. 127.

³ Cf. Theophilus (Dodwell), Livre III, chap. XCI, p. 162.

⁴ Voir par exemple Arnoux, 2000.

⁵ La soufflerie hydraulique, peut être plus ancienne, est attestée sans équivoque à partir au XIV^e s. Elle existe par exemple pour la réduction du cuivre argentifère en 1392 en Navarre (Cf. Verna, 1995). Elle apparaît dans l'iconographie à partir du XV^e s, dans le *De ingeneis* de Mariano Taccola par exemple.

siècle. Le succès de ce procédé donne la prépondérance à un procédé à ventilation forcée mécanisée pour la production du fer. Pour autant, le procédé direct ne disparaît pas pour autant, il poursuit sa propre évolution. Les procédés de réduction directe ayant existés en Europe aux XVIII^e-XIX^e siècles qui nous sont connus emploient une soufflerie forcée : trompe à eau pour les procédés catalan⁶ et corse⁷, soufflets hydrauliques pour le procédé basque⁸ et le *stückofen* allemand⁹, paire de soufflets actionnés au pied pour le procédé suédois « osmund »¹⁰.

L'absence de mentions de fourneaux à ventilation naturelle pour la réduction du minerai de fer dans les sources écrites et iconographiques européennes ne peut être prise comme preuve de leur inexistence. En effet, pour la Protohistoire, l'Antiquité et le Moyen Age les sources écrites concernant la métallurgie sont peu nombreuses ou peu précises, voire inexistantes. Pour la période Moderne, les sources sont plus abondantes, avec des traités techniques, mais on ne peut affirmer qu'elles décrivent l'ensemble de la métallurgie de leur temps. Un certain nombre de procédés ont été décrits ou évoqués dans ces sources, mais nombre d'autres ont probablement existés sans jamais laisser de trace écrite.

Devant les faiblesses des sources écrites et iconographiques, le recours à l'archéologie s'impose, de par sa capacité à mettre au jour des fourneaux appartenant à des espaces techniques non décrits par les textes.

Les exemples ethnographiques de la ventilation naturelle, démontrant son efficacité et son existence aux côtés de fourneaux à ventilation forcée, obligent à considérer la possibilité de l'existence de ce procédé en Europe. L'interprétation des vestiges archéologiques de bas fourneaux doit tenir compte de cette possibilité.

C'est donc à l'archéologie que revient la tâche de montrer si la ventilation naturelle a été appliquée à la réduction du minerai de fer en Europe, quelle était la place de cette technique à différentes époques et comment fonctionnaient les procédés à ventilation naturelle. Se pose alors le problème de savoir comment reconnaître le mode de ventilation des fourneaux fouillés, sur quelles données archéologiques s'appuyer pour diagnostiquer la ventilation naturelle ou la ventilation forcée. Car sans des méthodes de distinction sûres, il est vain de vouloir retracer l'évolution historique et technique des fourneaux à ventilation naturelle.

⁶ Cf. Percy, 1864, p. 278-315.

⁷ Cf. Percy, 1864, p. 315-319.

⁸ Cf. Arbide Elorza, Urcelay Urcelay, 1995.

⁹ Cf. Jars, 1774, p. 37-41.

Nous avons tenté de faire le point sur les arguments avancés par les archéologues pour définir le mode de ventilation, et en présentons les principaux ci-dessous. Ils proviennent de 18 publications¹¹ qui considèrent la ventilation naturelle possible, et où une justification du diagnostic du mode de ventilation est avancée ou dont la raison implicite est suffisamment devinable. En effet nombre de publications parlent de ventilation forcée pour le four fouillé sans justifier cette interprétation. Des exemples parlants sont donnés pour chaque grande raison et leurs occurrences sont récapitulées dans un tableau¹².

A/ Les principaux arguments de diagnostic des modes de ventilation :

Présence de tuyère = ventilation forcée :

Un des arguments les plus récurrents dans les diagnostics du mode de ventilation est la présence ou l'absence de tuyères sur le site métallurgique. Il est souvent implicitement considéré que l'emploi de tuyères est lié à celui de soufflets, à tel point que cette relation ne fait que rarement l'objet d'explications. Pour le site des Boulies à Boécourt (Jura Suisse, période mérovingienne), par exemple, il est affirmé que « *La présence de tuyères parmi les scories permet de reconnaître que l'on est en présence de fourneaux à tirage artificiel, c'est-à-dire fonctionnant à l'aide d'une soufflerie.* »¹³. De même pour le site de Tarjánpuszta-Vasaföld (Hongrie, VII^e-IX^e s.), R. Pleiner nous dit que « *Tous les fourneaux semblent avoir fonctionné en employant la ventilation forcée, comme l'indiquent les découvertes de tuyères tubulaires.* »¹⁴.

¹⁰ Cf. Percy, 1864, p. 320-326.

¹¹ Parmi celles-ci l'ouvrage de R. Pleiner *Iron in archaeology. The european bloomery smelters*, faisant la synthèse des découvertes de réduction directe en Europe, permet de balayer des dizaines de sites.

¹² La présentation sous la forme « argument X = ventilation forcée ou naturelle » peut gommer la complexité de certaines approches, mais elle est utilisée pour mieux visualiser les grandes tendances parcourant la littérature archéologique.

¹³ Eschenlor, Serneels, 1991, p. 58.

¹⁴ « *All the furnaces appear to have been operated using forced draught, as indicated by finds of tubular tuyeres.* », Pleiner, 2000, p. 177-178.

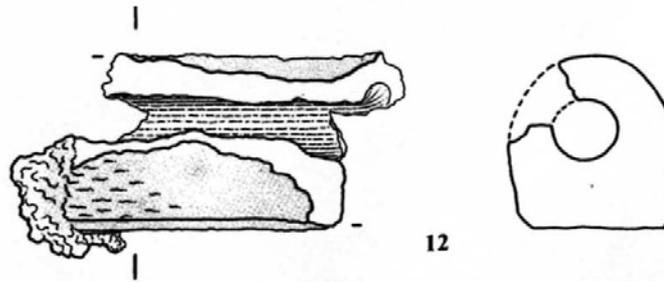


Fig. 1- Exemple des tuyères découvertes sur le site des Boulies, considérées comme des marqueurs de la ventilation artificielle. Longueur conservée : 15,7 cm ; largeur au niveau du conduit : 6,5 cm ; diamètre interne : 2,7 x 2,9 cm. Source : Eschenlor, Serneels, 1991, p. 61-62.

Absence de tuyère ou présence d'évent = ventilation naturelle :

L'absence de tuyère sur un site constitue dans la même logique un indice de ventilation naturelle. Ce mode de ventilation est régulièrement avancé pour la zone sidérurgique des Montagnes Sainte Croix, où aucune tuyère ne semble avoir été trouvée dans les multiples fouilles effectuées¹⁵. En effet, il est considéré que si la ventilation forcée se fait par des tuyères, la ventilation naturelle se fait par des événements, des orifices dans la paroi du four. Ainsi aux Clérimois (Yonne, France, II^e av.-IV^e ap. J. -C.) : « Si les deux embrasures latérales qui communiquent avec les deux petites fosses rectangulaires...n'ont pas été aménagées dans le but de recevoir des tuyères, il est possible que ces orifices permettaient une prise d'air dans un système de ventilation par tirage naturel. »¹⁶. L'absence de tuyères permet donc de conclure à la ventilation naturelle par des événements, comme sur le site de Meråker (Trøndelag, Norvège, période romaine): « Nous n'avons **pas trouvé de tuyères** et pensons que **la ventilation** était faite de façon **naturelle par des trous dans la cheminée** »¹⁷.

¹⁵ Voir Bielenin, Nosek, Mazur, 1991, p. 148 ; Orzechowski, 1994, p. 352-353 et Pleiner, 2000, p. 162 : « No tuyeres have been found anywhere in the whole area, which invites the conclusion that the furnaces were operated by induced draught. ».

¹⁶ Cabboi, Dunikowski, 1995, p. 47.

¹⁷ Espelund, 1994, p. 286.

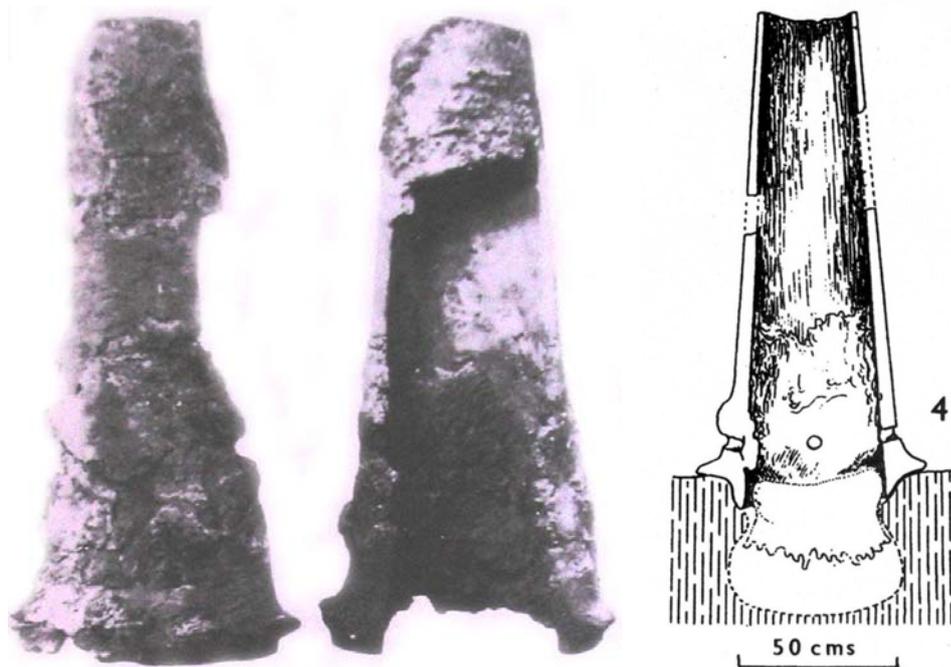


Fig. 2- Fourneau découvert à Scharmbeck (Allemagne), doté d'au moins 3 évents et régulièrement interprété comme ayant fonctionné en ventilation naturelle. A gauche : Photographies du fourneau remonté. Source : Craddock, 1995, p. 245. A droite : Restitution du four en situation. Source : Pleiner, 2000, p. 151.

Tuyères multiples = ventilation naturelle :

Certains archéologues s'appuient sur la présence de plusieurs arrivées de ventilation, tuyères ou évents, sur un même four pour diagnostiquer la ventilation naturelle. Il y a là contradiction avec l'idée précédemment affirmée que les tuyères marquent l'existence d'une soufflerie. Cette interprétation est probablement fondée sur les comparaisons avec les fourneaux à ventilation naturelle et tuyères multiples africains sub-contemporains. On la rencontre dans l'archéologie africaine, par exemple sur le site de Juude-Jaabe (Sénégal, V^e-XIV^e s.) : « *Le fonctionnement du fourneau, particulièrement en ce qui concerne le mode de ventilation, est difficile à établir à partir des seules données de la fouille parce que les tuyères n'étaient pas en place. Toutefois, on peut supposer, à partir d'observations similaires, que la ventilation se faisait par induction naturelle, avec probablement un nombre de tuyères plus important que celui révélé par la fouille.* »¹⁸. Mais elle est également

¹⁸ Bocoum, Fluzin, 2000, p. 109.

employée pour des sites européens, tels Ewersbach (Allemagne, XIII^e-XIV^e s.)¹⁹, et sri lankais, tel Kogama (site SM 200, région de Samanalawewa, IV^e av. – I^e ap. J. – C.) : « l'utilisation de tuyères multiples, comme indiqué par cet artefact et d'autres issus des sites faisant face à l'ouest, doit être pris comme preuve de la non-utilisation de soufflets, comme fréquemment rencontré dans les observations en Afrique. »²⁰. Pour le site de Grigorovka (Ukraine, X^e s.), où un four possède 4 tuyères insérées dans une arche frontale, la ventilation naturelle est diagnostiquée du fait de l'apparente difficulté d'y connecter des soufflets²¹. Ceci rejoint les dires de D. Killick pour qui le seul critère sûr pour prouver un fonctionnement au moins partiel par tirage naturel est la présence de tuyères multiples dans chaque orifice de ventilation, dans la mesure où il serait impossible de connecter chacune des tuyères à un soufflet²².



Fig. 3- Base d'un fourneau de Grigorovka (Ukraine), possédant une arche munie de 4 tuyères.

Source : Pleiner, 2000, p. 202.

Diamètre interne des conduits de ventilation :
important = ventilation naturelle ; faible = ventilation
forcée :

Un autre argument concernant les arrivées d'air est celui basé sur le diamètre des conduits de ventilation. Paul-Louis Pelet, notamment, affirme dans son ouvrage sur

¹⁹ « ...several air-inlets at the base indicate that it was operated by natural, induced draught. », in Pleiner, 2000, p. 175.

²⁰ Juleff, 1998, p. 158.

²¹ « It is difficult to imagine how four bellows could have been operated simultaneously on this furnace, and so another explanation must be found.[..] Multiple tuyeres in front arches, will always arouse suspicions of the use of induced draught. », in Pleiner, 2000, p. 200.

²² Cf. Killick, 1995, p. 61.

la métallurgie du fer dans le pays de Vaud (Suisse) que « Les fourneaux à fer se divisent en deux types fondamentaux dont les différences les plus marquantes résultent du système de ventilation adopté : les uns se contentent d'un tirage naturel, les autres exigent une soufflerie. La présence parmi les scories de conduits de glaise dont le diamètre est constamment supérieur à 5 cm, ou celle de tuyères (d'un diamètre minimal inférieur à 5 cm) permet de reconnaître, avant même de les avoir dégagés, les fourneaux de chaque type. »²³. Plus prudent, R. Pleiner rapporte que la plupart des tuyères avec des diamètres internes de 15-30 mm sont interprétés comme étant faites pour recevoir l'extrémité d'un soufflet²⁴, tout en admettant que « Les tuyères d'un diamètre interne de 2-3 cm peuvent être considérées comme une indication de ventilation forcée »²⁵. Les raisons pour lesquelles ces chiffres sont avancés ne sont pas données.

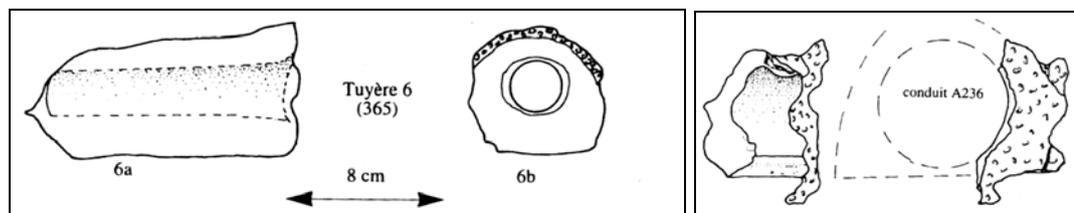


Fig. 4- Exemples de conduits de ventilation trouvés sur le site des Bellaires I : A gauche : Tuyère intacte d'un diamètre interne de 3 à 2,5 cm, considérée de ce fait comme un marqueur de la ventilation forcée ; A droite : conduit d'un diamètre interne de 8,5 cm, considéré comme marqueur d'une ventilation naturelle. Source : Pelet, 1993, p. 18 et 20.

Placement du four dans un lieu venté ou supposé comme tel = ventilation naturelle :

Dès le XIX^e siècle, l'utilisation du vent pour la ventilation des fours métallurgique est considérée comme une possibilité²⁶, voire comme la ventilation habituelle des fours

²³ Pelet, 1993, p. 18.

²⁴ « Most tuyeres with small bores (internal diameters) of 15-30 mm are interpreted as being nozzles for receiving the ends of bellows-tubes which were probably made of organic materials (wood, horn, bone, etc.). », Pleiner, 2000, p. 198.

²⁵ « Tuyeres with internal diameters of 2-3 cm can be considered as an indication of forced draught », Pleiner, 2000, p. 141.

²⁶ Cf. Quiquerez, 1866, p.44.

anciens qui auraient été préférentiellement situés sur les montagnes²⁷. L'idée d'une ventilation naturelle liée au vent est avancée, en autres, pour les sites des Montagnes Sainte Croix (Pologne) : « *la réduction ancienne du fer dans les Montagnes Sainte Croix était effectuée en employant des fourneaux de haute taille à ventilation naturelle. Cette conclusion est soutenue par l'emplacement des fourneaux sur des pentes ou des terrains élevés et également par l'absence de tuyères d'argile issues des fouilles.* »²⁸.

Mais cela reste une idée, basée sur l'évidence que le vent ventile. Il n'y a pas d'explications sur fonctionnement des fours, sur le rôle respectif des événements, du vent et de la hauteur des cuves. Ce discours sans fondements explicités conduit d'autres chercheurs à dénier la possibilité de la réduction grâce au vent²⁹.

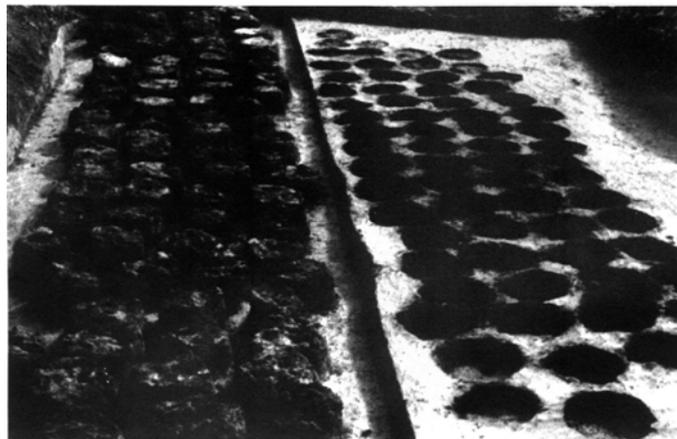


Fig. 5- Site de métallurgie du fer des Monts Sainte Croix (Pologne), caractérisé par des dizaines d'emplacements de fourneaux arasés, marqués par des fosses remplies d'un bloc de scories.

Cuve haute par rapport au diamètre (profil allongé) = ventilation naturelle :

Un ratio hauteur/diamètre important, c'est-à-dire un profil de four allongé, est un argument courant pour avancer l'hypothèse de la ventilation naturelle. Il évoque en effet les cheminées hautes, connues pour produire un tirage important. A Ashwicken

²⁷ Cf Grande Encyclopédie, 1887, p. 234.

²⁸ « *The results of our experiments have led us to the conclusion that the ancient iron smelting in the Holy Cross Mountains was carried out using tall furnaces with the natural draught. This conclusion is supported by the sitting of furnaces on sloping or high ground and also by the absence of clay tuyere from the excavations* », Bielenin, Nosek, Mazur, 1991, p. 148.

(Royaume Uni, II^e s.) par exemple, une hauteur d'origine estimée à 1,5-2 m, pour un diamètre de 30 cm, « suggère que nous pourrions avoir affaire à des fourneaux de taille suffisante pour être capable de fonctionner par tirage naturel. »³⁰, et à Igolomia (Pologne, II^e-III^e s) : « Les dimensions de la cheminée, en particulier le ratio hauteur/diamètre, sont telles que l'utilisation du tirage naturel ne peut être écarté, particulièrement dans la mesure où aucune tuyère n'a été mise au jour. »³¹. Cet argument de hauteur relative peut se combiner avec les arguments présentés précédemment : absence de tuyère à Igolomia, action supposée du vent dans les Montagnes Sainte Croix, ou encore présence de plusieurs événements dans la cuve, comme à Scharmbeck. Ce site du nord-ouest de l'Allemagne, daté du II^e s. ap. J.- C, est fameux car la cuve du bas fourneau a pu être reconstituée presque entièrement d'après des fragments trouvés dans une fosse de rejet (voir photographies ci-dessus). Il s'agit d'une cuve à parois fines d'un diamètre interne de 35 cm à la base et de 22,5 cm au gueulard. Trois orifices de ventilation sont placés régulièrement, à 90° l'un de l'autre dans la partie basse, un quatrième orifice ayant sans doute existé dans la partie endommagée. L'arrangement global est évocateur du tirage naturel pour R. Pleiner³².

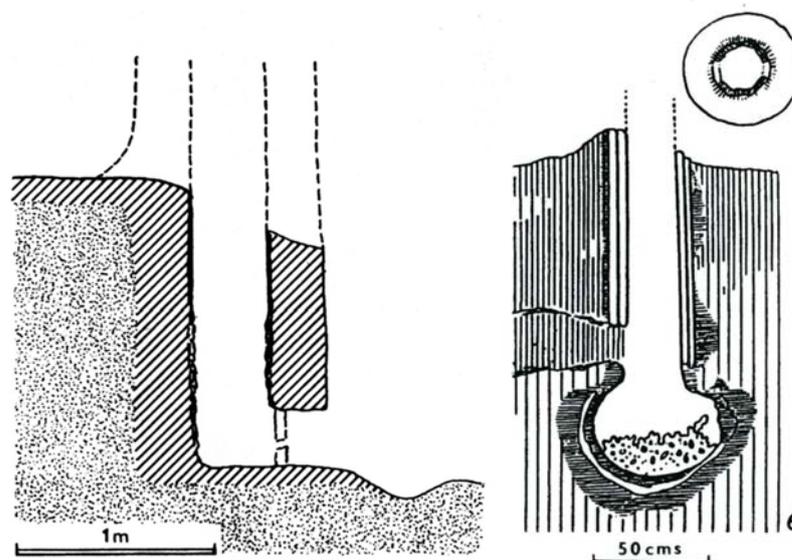


Fig. 6- A gauche : Fourneau d'Ashwicken. Source : Pleiner, 2000, p. 169. A droite :

²⁹ Cf. Craddock, 1995, p. 174-176.

³⁰ « The height at both Ashwicken and Pickworth suggested that we might be dealing with furnaces of sufficient height to be capable of working by induced blast. », Tylecote, Austin, Wraith, 1971, p. 353-354.

³¹ « The dimensions of the shaft, in particular the height-to-diameter ratio, are such that the use of induced draught cannot be ruled out, particularly since no tuyeres came to light. », Pleiner, 2000, p. 156. Ce four possède un foyer en bulbe de 45 cm de large et de 35 cm de haut, surmonté d'une cheminée de 15 cm de large conservée sur 80 cm et ayant pu dépasser originellement les 130 cm, en tenant compte de l'arasement dû aux labours.

Fourneau d'Igolomia. Source : Pleiner, 2000, p. 151.

Diamètre du four important = ventilation forcée :

C'est pour le site du Perray à Paimpont (Ille-et-Vilaine, France, IV^e av. J. -C.- II^e ap. ?, fin Moyen Age ?) qu'un diamètre de four important est mis en avant pour conclure à la ventilation forcée : « *De même, on a dépassé le stade d'une ventilation naturelle. Il ne fait aucun doute, en effet, vu le **diamètre du four** (diamètre interne : 1,25 m) **et les nombreux bouchons de tuyère** (ou bouchons de « regards » éventuellement pratiqués dans la paroi pour vérifier le processus de réduction) retrouvés à proximité, que la ventilation du bas fourneau fut artificielle et manuelle, réalisée à l'aide d'un ou de plusieurs soufflets.* »³³. Le rapport entre l'importance du diamètre et la ventilation forcée n'est pas explicité mais on peut penser qu'il est fondé sur l'idée que la ventilation naturelle est trop faible³⁴ pour ventiler une cuve large. De même, les bouchons de tuyères doivent servir cette interprétation dans la mesure où la présence de tuyères signerait une ventilation forcée. Ces « bouchons de tuyères », comme on les nomme généralement, sont des cônes d'argile au bout renflé, parfois en partie vitrifiés, qui sont régulièrement découverts dans le nord de la Haute Bretagne et dans la zone sidérurgique de la forêt de Paimpont³⁵. Leur fonction reste sujet à débat : bouchon de tuyère pour la ventilation forcée, bouchon d'évent pour la ventilation naturelle ou bouchon de regard³⁶.

³² « *The whole arrangement is evocative of induced draught* », Pleiner, 2000, p. 159.

³³ Andrieux (et alii), 1993, p. 109.

³⁴ Cette idée, comme celle d'un stade inférieur de la ventilation naturelle, est probablement empruntée à P. L. Pelet (Pelet, 1993), cité en référence peu après ce passage.

³⁵ Cf. Larcher, 1994 et Vivet, 1997.

³⁶ D'après Vivet, 1997, p. 81.

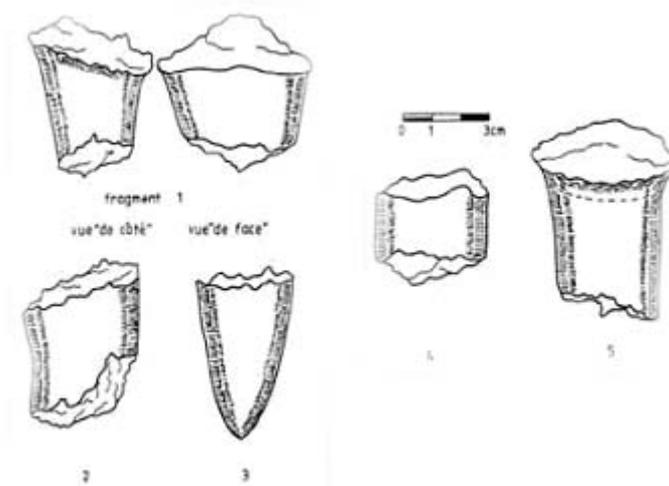


Fig. 7- Fragments de « bouchons de tuyères » issus du site du Perray (Paimpont, Ille-et-Vilaine). Source : Andrieux (et alii), 1993.

Diamètre du four important = ventilation naturelle :

A l'inverse de l'exemple précédent, un diamètre de four important et la présence de nombreuses tuyères sur le site fouillé amène C. Colliou à mettre en avant l'hypothèse de la ventilation naturelle par convection : « *C'est le nombre important de tuyères découvert sur le site qui laisse envisager un four fonctionnant à l'aide d'un système de ventilation à tirage naturel (différentes études du Grand Ouest laissent envisager l'utilisation du tirage naturel sur des structures de grands volumes). Un four de ce diamètre (1,50 m) en ventilation forcée aurait nécessité un nombre important de personnes pour générer le flux d'air. Aucun aménagement ou trou de piquet pour fixer les soufflets n'a été retrouvé.* »³⁷. L'utilisation de la convection par des tuyères multiples est considérée comme bien plus probable que la mobilisation de nombreux souffleurs, pour pouvoir ventiler l'ensemble de la cuve. A cela s'ajoute l'absence de traces de soufflets.

Tuyères horizontales = ventilation naturelle :

En renfort de son interprétation, C. Colliou avance l'idée que la convection a plutôt besoin de tuyères horizontales, ce qui est le cas sur le site : « *L'étude des tuyères a*

³⁷ Colliou, Aranda, 2005. Site de La Guyonnière à La Chaize Le Vicomte (Vendée, France), daté du haut Moyen Âge.

révélé qu'elles étaient probablement toutes perpendiculaires à la paroi et horizontales par rapport au sol. ...les fours à ventilation forcée ont généralement la tuyère orienté vers le fond du four, le flux étant dans ce cas assez puissant pour «pousser» la combustion assez loin du bec de la tuyère pour éviter sa fusion. Au contraire, le tirage naturel nécessiterait une tuyère horizontale ou dirigée vers le haut pour éviter ce problème. »³⁸.

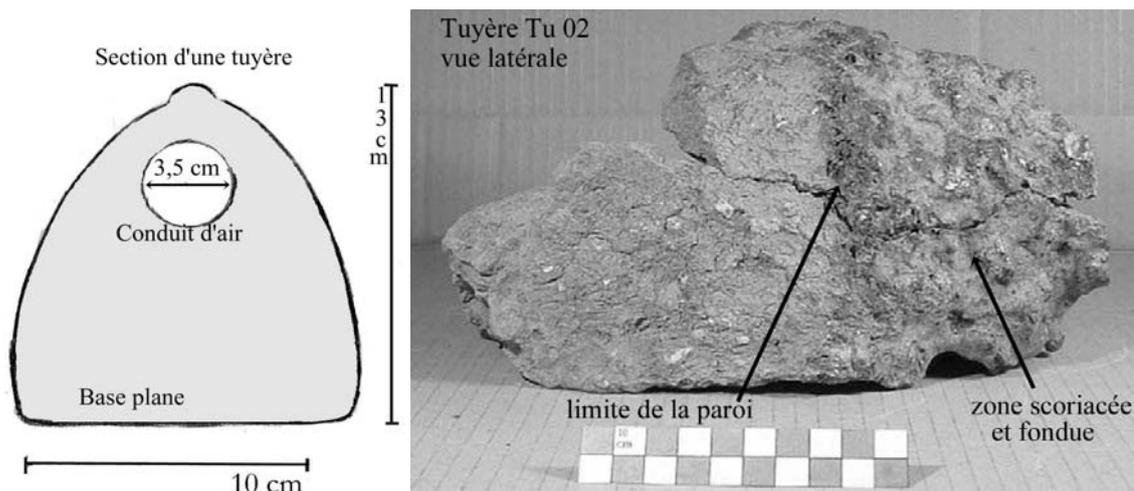


Fig. 8- Section et vue latérale d'une tuyère du site de La Guyonnière à La Chaize-le-Vicomte (Vendée, France). La limite de la paroi, marquée par l'arrêt de la scorification, est perpendiculaire à l'axe de la tuyère, indiquant une position horizontale de la tuyère. Source : Colliou, Aranda, 2005.

Scorie piégée liée à la ventilation naturelle :

De plus, le four de La Guyonnière possède une fosse à scorie, et il existerait un rapport entre les fours à scorie piégée et la ventilation naturelle : **« la scorie est piégée dans une cavité creusée sous le four (fig. 01). Sans être clairement attestée, il semble exister une relation entre ce dernier système de récupération des déchets et la ventilation naturelle. »³⁹.**

Pas de traces de soufflets = ventilation naturelle :

Nous avons vu plus haut que l'absence de traces de soufflets participe de

³⁸ Colliou, Aranda, 2005.

³⁹ Colliou, Aranda, 2005.

l'interprétation de C. Colliou en faveur de la ventilation naturelle. C'est aussi le cas chez A. Quiquerez pour les sites fouillés dans l'ancien évêché de Bâle, également en complément autres arguments : « *Dans cette seconde espèce de fourneau, comme dans ceux précédemment décrits, on ne voit **nulle trace de soufflets quelconques*** »⁴⁰.

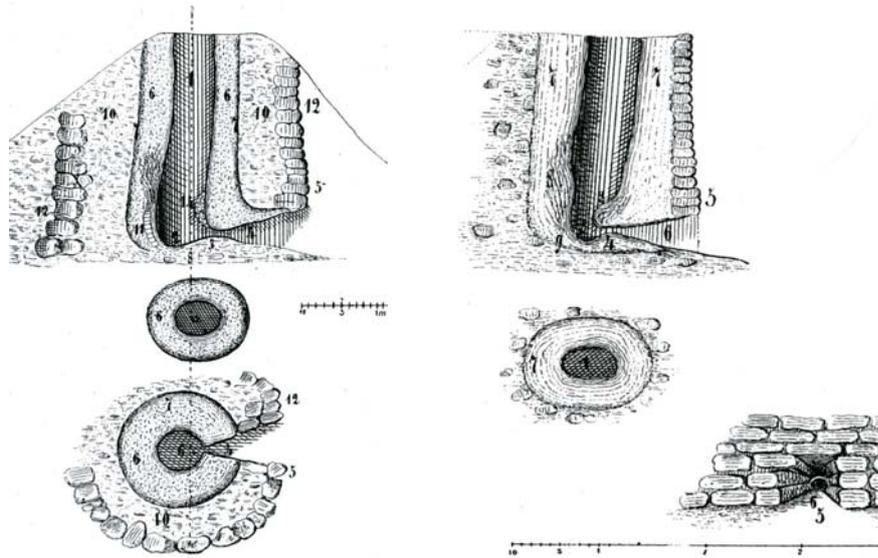


Fig. 9- Relevés de deux fours fouillés par A. Quiquerez dans le Jura suisse, caractérisé par un unique conduit d'accès à la cuve. A gauche : fourneau de la Maison Blanche ; A droite : fourneau du Chaufour. Source : Quiquerez, 1866, planches I et III.

Impacts thermiques, scorification des parois :

L'argumentation majeure d'A. Quiquerez est plutôt fondée sur les impacts thermiques dans la cuve et au niveau de l'unique conduit à sa base. Le tirage se ferait par ce conduit, qui permettrait également l'évacuation de la scorie, grâce à la hauteur de la cuve : « *Le mode de tirage que nous indiquons se révèle de la manière la plus évidente par la scorification des parois du fourneau du côté opposé à l'ouverture donnant passage à l'air, et qui a évidemment éprouvé une chaleur plus intense, tandis que du côté opposé on retrouve en général les parois beaucoup moins atteintes par le feu et parfois la mine y est encore attachée, comme elle se trouvait à l'état pâteux ou en semi-fusion, au moment où le travail du fourneau a*

⁴⁰ Quiquerez, 1866, p. 38.

cessé. ». La ventilation naturelle aurait donc pour caractéristique de produire un maximum de chaleur loin de l'arrivée d'air. De plus, cet unique conduit lui apparaît comme trop scoriacé pour avoir contenu une tuyère, marqueur de la ventilation forcée : « *Nous les avons exploré avec trop de soin pour que l'ouverture du soufflet ait pu nous échapper. La buse ou le conduit du vent n'aurait pu trouver place dans le même passage que celui des scories, car, dans une ouverture aussi étroite (15 cm), il aurait été constamment dérangé par le travail du fourneau, et la machine aurait obstrué les abords de celui-ci. Le degré de scorification que présentent ces sortes d'ouvertures ne peut laisser de doute ; il y avait impossibilité d'y maintenir un tube quelconque.* »⁴¹. Cette interprétation repose en outre sur le fait que le procédé direct nécessite le travail continu d'un ouvrier muni d'un ringard pendant l'opération, pour brasser le métal dans le creuset et sortir mécaniquement les scories, qui seraient peu liquides.

Les impacts thermiques sont aussi employés pour conclure d'un mode de ventilation à Vert-Saint-Denis (Seine-et-Marne, France, VII^e-XI^e s.), sans que soit détaillé les raisons pour lesquelles ces impacts sont liés à la ventilation forcée : « *Le four recevait un dispositif de ventilation bien que nous n'en ayons pas de témoin directs. Les traces d'impact thermique, la déformation des parois conjuguée à l'emplacement des coulées de scories, sont les indices sérieux de l'utilisation d'une ventilation artificielle.* »⁴².

**Scories lourdes = ventilation naturelle ; Scories
bulleuse = ventilation forcée :**

L'aspect des scories a été utilisé comme mode de reconnaissance du type de ventilation par P. L. Pelet, sur la base d'une vision de la ventilation naturelle comme une ventilation faible : « *compactes et lourdes, couvertes de circonvolutions analogues à celles d'un cerveau, elles remontent à une exploitation faiblement ventilée ; parsemées de bulles, et irisée, elles indiquent une combustion à plus haute température, elles sont l'indice d'une ventilation artificielle.* »⁴³.

⁴¹ Quiquerez, 1866, p. 42.

⁴² Daveau, Goustard, 2000, p. 27.

⁴³ Pelet, 1993, p. 6-7.

Argument avancé pour diagnostiquer le mode de ventilation :	Occurrences relevées dans la littérature archéologique :
Présence de tuyère = ventilation forcée	<ul style="list-style-type: none"> - Quiquerez, 1866 : p. 38 et 42. - Eschenlor, Serneels, 1991 : p. 58. - Mangin (et alii), 1992 : p. 52, p. 54. - Cabboi, Dunikowski, 1995 : p. 47, p. 51, p. 54, p. 58, p. 60-62, p. 67. - Pleiner, 2000 : p. 157, p. 176, p. 177-178, p. 186.
Absence de tuyère ou présence d'évent = ventilation naturelle	<ul style="list-style-type: none"> - Tylecote, Austin, Wraith, 1971 : p. 353-354. - Bielenin, Nosek, Mazur, 1991 : p. 148. - Mangin (et alii), 1992 : p. 52, p. 54. - Espelund, 1994 : p. 286. - Cabboi, Dunikowski, 1995 : p. 54, p. 60-62, p. 67. - Orzechowski, 1994 : p. 352-353. - Pleiner, 2000 : p. 156, p. 162, p. 163, p. 174, p. 159, p. 175.
Tuyères multiples = ventilation naturelle	<ul style="list-style-type: none"> - Bocoum, 1995, p. 145. - Juleff, 1998, p. 158. - Bocoum, Fluzin, 2000 : p. 109. - Pleiner, 2000, p. 159, p. 186, p. 175, p. 176, p. 197, p. 200. - Colliou, Aranda, 2005.
Diamètre interne des conduits de ventilation : important = ventilation naturelle ; faible = ventilation forcée	<ul style="list-style-type: none"> - Pelet, 1993 : p. 18. - Mangin (et alii), 1992 : p. 52, p. 54. - Pleiner, 2000 : p. 196, p. 141 p. 176, p. 197, p. 198.
Placement du four dans un lieu venté ou supposé comme tel = ventilation naturelle	<ul style="list-style-type: none"> - Orzechowski, 1994 : p. 352-353. - Bielenin, Nosek, Mazur, 1995 : p. 148. - Juleff, 1996 : p. 60. - Pleiner, 2000 : p. 196.
Cuve haute par rapport au diamètre (profil allongé) = ventilation naturelle	<ul style="list-style-type: none"> - Tylecote, Austin, Wraith, 1971 : p. 353-354. - Pleiner, 2000 : p. 156, p. 159, p. 197, p. 176.
Diamètre du four important = ventilation forcée	<ul style="list-style-type: none"> - Andrieux et alii, 1993 : p. 109.
Diamètre du four important = ventilation naturelle	<ul style="list-style-type: none"> - Colliou, Aranda, 2005.
Tuyères horizontales = ventilation naturelle	<ul style="list-style-type: none"> - Colliou, Aranda, 2005.
Scorie piégée liée à la ventilation naturelle	<ul style="list-style-type: none"> - Colliou, Aranda, 2005. - Colliou, Peyrat, 2007.
Pas de traces de soufflets = ventilation naturelle	<ul style="list-style-type: none"> - Quiquerez, 1866 : p. 38. - Colliou, Aranda, 2005.
Impacts thermiques, scorification des parois	<ul style="list-style-type: none"> - Quiquerez, 1866 : p. 38, p. 42. - Daveau, Goustard, 2000 : p. 27.
Scories lourdes = ventilation naturelle ; Scories bulleuse = ventilation forcée	<ul style="list-style-type: none"> - Pelet, 1993 : p. 6-7. - Andrieux et alii, 1993, p. 109.

Fig. 10- Tableau recensant les principaux arguments avancés pour diagnostiquer le mode de ventilation.

Il se dégage de la littérature plusieurs visions de ce qu'est la ventilation

naturelle, des paramètres importants pour son bon fonctionnement, et certains arguments avancés par des chercheurs différents sont contradictoires. De plus, ces visions de la façon dont fonctionne la ventilation naturelle restent largement implicites, et les arguments de diagnostic ne sont que rarement expliqués, étayés par des éléments techniques prouvés, comme des principes physiques reconnus, des expérimentations systématiques ou des observations ethnographiques. On peut également remarquer que certaines publications véhiculent des *a priori* sur l'infériorité technique de la ventilation naturelle.

Il manque donc une vision claire, explicitée, de ce qu'est la ventilation naturelle, de quelles dimensions et proportions les fours ont besoin pour créer un tirage suffisant, ainsi que du rôle du vent. De même font défaut des éléments archéologiques marqueurs, bien étayés en fonction des besoins spécifiques à chaque mode.

Il faut ajouter que cette synthèse concerne la littérature archéologique où transparaît le fait que la ventilation naturelle est possible, envisageable, mais de nombreux articles n'évoquent pas cette possibilité, ne cherchent pas à prouver qu'il s'agit de ventilation forcée et non de ventilation naturelle. La question y est plutôt de savoir où se connectait le ou les soufflets, que de comprendre quelle type de ventilation (forcée, convection, vent, mixte, ...) employait le procédé mis en œuvre dans le four fouillé. L'emploi du soufflet reste souvent l'évidence pour l'obtention de hautes températures. En témoigne cette question de Pol Defosse à Philippe Andrieux, après une intervention au colloque de Besançon sur l'importance de l'air dans les fourneaux métallurgiques : « *Faut-il faire un sort à la théorie de la ventilation naturelle qui est encore fréquemment reprise dans la bibliographie ?* »⁴⁴.

II. A la recherche d'un référentiel technique

Afin de mieux comprendre la réalité technique de la ventilation naturelle, et les paramètres nécessaires à son bon fonctionnement, qui constituent le fondement des interprétations archéologiques, nous avons constitué un référentiel technique. Celui-ci décrit en détail des procédés employant la ventilation naturelle dont l'efficacité est bien prouvée, la capacité à produire du fer en quantité suffisante bien attestée. Ces procédés sont issus de l'ethnographie et de l'expérimentation. Ils forment un corpus de 11 procédés, complété par une typologie rassemblant 40 fourneaux observés

dans la Boucle du Niger (Mali, Guinée, Côte d'Ivoire, Burkina Faso, Ghana, Togo, Niger).

Ce référentiel permet de mieux cerner les différents procédés regroupables sous le terme de « ventilation naturelle » : convection simple, ventilation forcée suivie de convection, convection provoquée par le vent, ou encore ventilation mixte. Il constitue également une base pour discuter des arguments avancés dans la littérature archéologique.

A/ Discussion sur les arguments permettant de diagnostiquer les modes de ventilation :

Présence de tuyère = ventilation forcée :

L'apport du référentiel à cette question est clair. A l'exception du procédé Bassar (Togo)⁴⁵ qui emploie des événements, la totalité des procédés du corpus reçoivent l'air par des tuyères. Les tuyères sont employées aussi bien en ventilation naturelle qu'en ventilation forcée, leur présence ne peut en aucun cas signer un mode de ventilation.

⁴⁴ Cf. Mangin (dir.), 1994, p. 177-178.

⁴⁵ Cf. Goucher, Herbert, 1996.

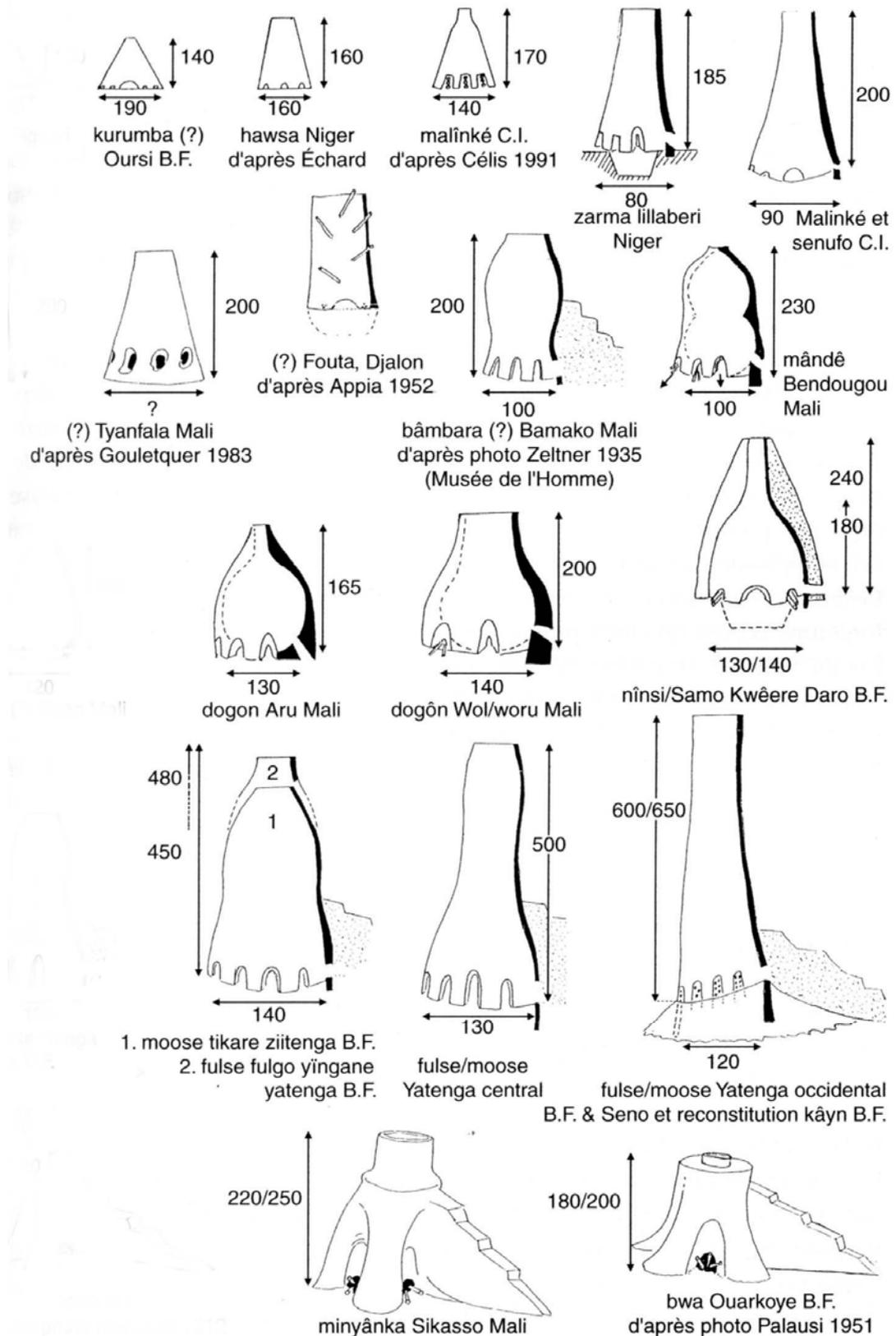


Fig. 11- Exemples de fourneaux à convection de la Boucle du Niger : tous sont ventilés par des tuyères multiples disposées de manière rayonnante à la base de la cuve. Source : Martinelli, 2000, p. 129.

Absence de tuyère ou présence d'évent = ventilation naturelle :

Tout d'abord il convient d'être prudent sur la question de l'absence de tuyères. Dans le cas des Montagnes Sainte Croix, où un grand nombre de sites d'une même zone et comportant de multiples fours ont été fouillés sans trouvailles de tuyères, il est légitime de penser que le procédé employé n'utilisait pas de tuyères. Mais à l'échelle d'un site, surtout si l'emprise de la fouille est faible ou la durée d'occupation courte, l'absence de découverte de tuyères n'est pas significative. Elles ont pu notamment être emmenées pour servir à d'autres réductions, ou être réemployées, notamment pour la construction d'autres fours, comme chez les Haya (Tanzanie)⁴⁶ ou au Sri Lanka⁴⁷.

En ce qui concerne les événements, il est important de distinguer les différentes utilisations possibles d'un orifice percé dans une paroi de fourneau, pour déduire des données du terrain l'hypothèse la plus probable.

- Il peut servir d'évent, d'arrivée d'air pour la convection, comme chez les Bassar⁴⁸.
- Il peut être connecté à un ou plusieurs soufflets pour un fonctionnement en ventilation forcée, à l'instar des expérimentations de P. Andrieux⁴⁹. On peut alors le considérer comme une « tuyère en négatif », ne pénétrant pas à l'intérieur de la cuve.
- S'il est suffisamment large, il a pu contenir une ou plusieurs tuyères, pouvant servir aussi bien à la ventilation forcée qu'à la convection, ainsi que l'indiquent de nombreux exemples africains.

⁴⁶ Cf. Schmidt, Avery, 1996.

⁴⁷ Cf. Juleff, 1998.

⁴⁸ Cf. Goucher, Herbert, 1996.

⁴⁹ Cf. Andrieux, 1991 et Andrieux, 1995.

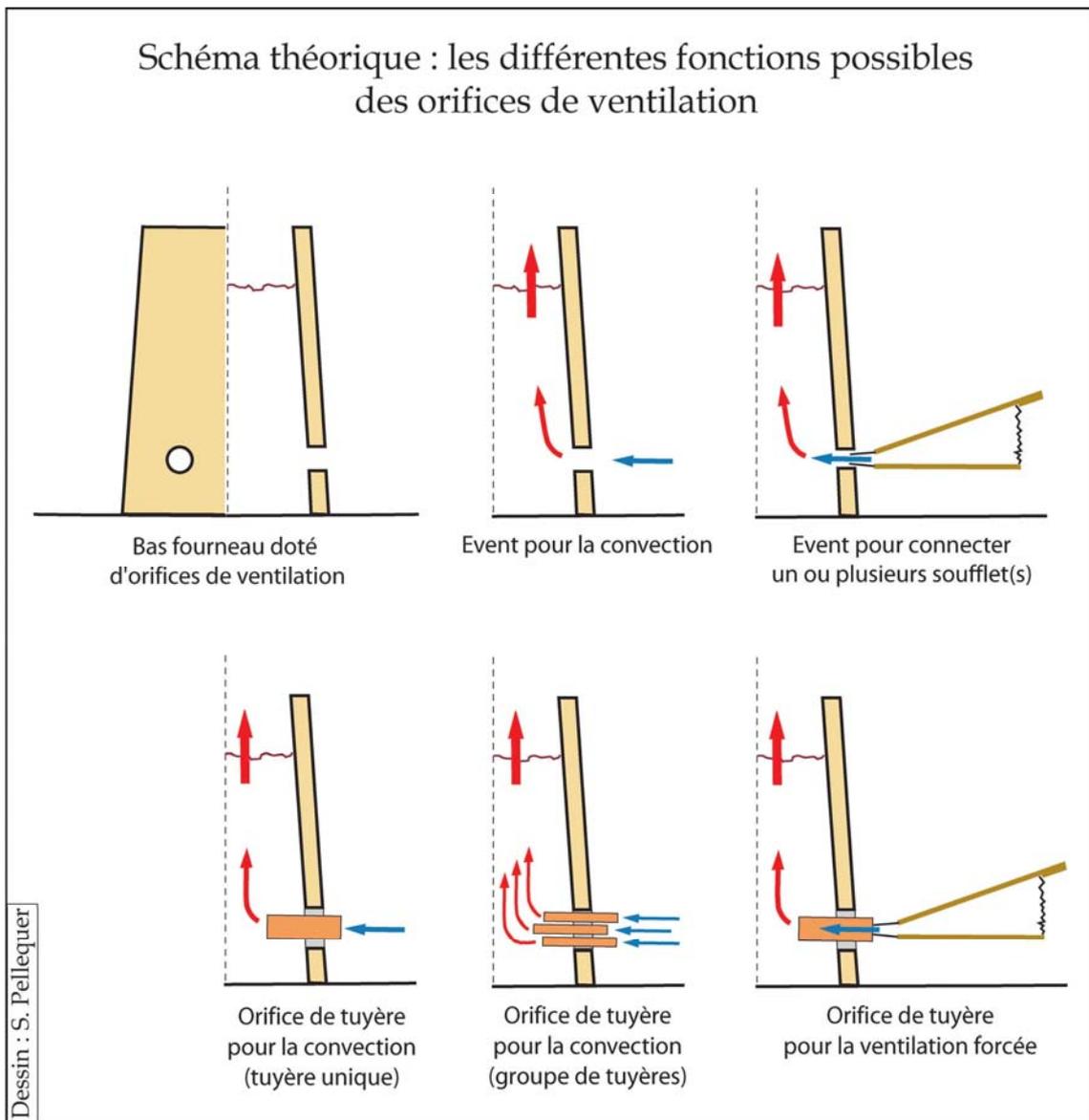


Fig. 12- Schéma théorique présentant les différentes fonctions de ventilation possibles pour un orifice dans une paroi de fourneau. Les fonctions autres que la ventilation (regard par exemple) ne sont pas représentés sur ce schéma.

Tuyères multiples = ventilation naturelle :

A l'exception d'une expérimentation de Buffon employant un dispositif peu probable pour les fourneaux archéologiques (cône de ventilation et cheminée haute connectés au four), tous les procédés du corpus emploient des tuyères multiples. La multiplicité des tuyères semble donc un indice fort d'un fonctionnement par convection. Cela s'explique par le fait que pour créer un tirage suffisant, il est nécessaire de limiter la résistance à l'écoulement de l'air entre l'extérieur et l'intérieur du four. Des tuyères multiples permettent alors une surface importante d'arrivée d'air tout en évitant

d'avoir recours à des ouvertures trop larges amenant des déperditions de chaleur. De plus, les fours du corpus étant larges (diamètre minimum de 50 cm), la multiplicité des tuyères permet donc de ventiler l'ensemble de la cuve. Et cette largeur est probablement dictée par leur fonctionnement par convection. En effet, un diamètre important de la cuve favorise la convection, car une masse de charbon importante brûle en même temps, créant une forte différence de température entre l'intérieur et l'extérieur du four. Cependant, si la hauteur de cheminée est importante, il est peut être possible de créer une bonne convection par une tuyère unique relativement large, comme pourrait l'indiquer des expérimentations de P. Andrieux⁵⁰.

En outre, si la présence de tuyères multiples est un indice fort, ce n'est pas un argument valable en lui-même, puisque des procédés de ventilation forcée emploient des tuyères multiples. Ainsi le fourneau japonais « *tatara* »⁵¹ ou, pour prendre un exemple de four de forme plus proche des vestiges européens, les fours Haya (Tanzanie) à 8 tuyères⁵² ou ceux des Barongo (Tanzanie) à 5 tuyères⁵³.

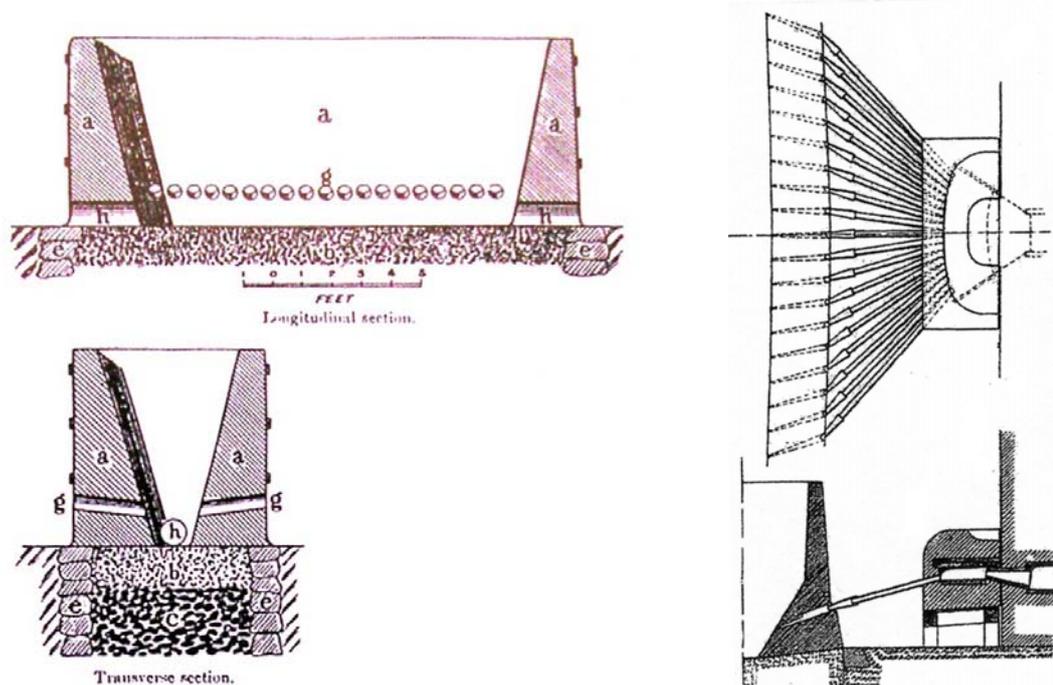


Fig. 13- Fourneau à ventilation forcée et tuyères multiples japonais « *tatara* »: A gauche : Coupes longitudinale et transversale du four. Source : Craddock, 1995, p. 249. A droite : Vues du système de raccord entre le soufflet et les tuyères sur un

⁵⁰ Cf. Andrieux, 1990, p. 66-69.

⁵¹ Cf. Le Coze, 2005.

⁵² Cf. Schmidt, Avery, 1996.

⁵³ Cf. Schmidt, 1996.

côté du four. Source : Le Coze, 2005, p. 11.

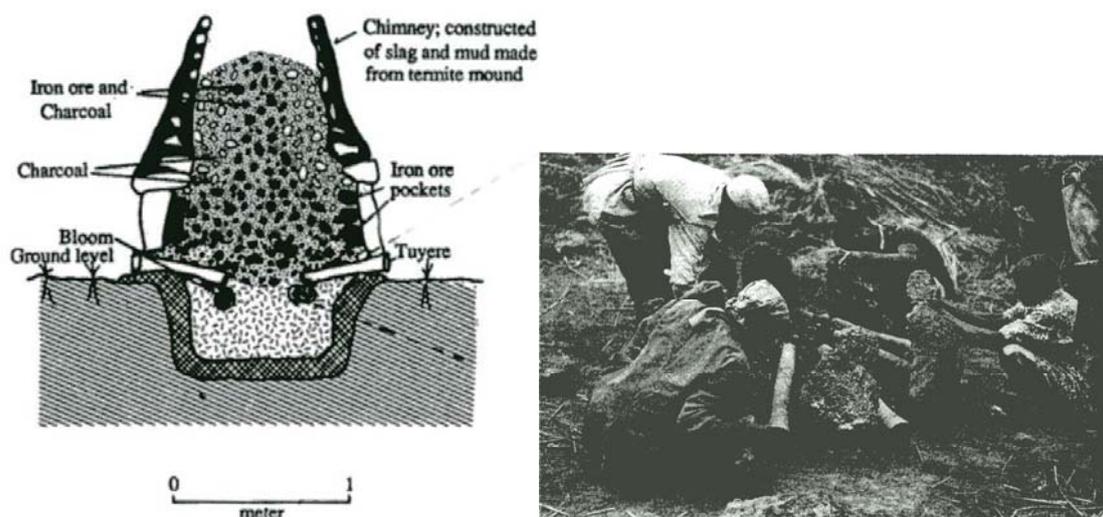


Fig. 14- Fourneau à ventilation forcée et tuyères multiples Haya (Tanzanie). A gauche : coupe du four. A droite : Mise en place des 8 tuyères lors de la construction. Source : Schmidt, Avery, 1996, p. 177.

En ce qui concerne les tuyères insérées en groupe dans un même orifice, on peut remarquer qu'en effet nombre de procédés du corpus utilisent ce dispositif. Toutefois, s'il apparaît comme difficile de connecter directement l'extrémité d'un soufflet à chaque tuyère, il n'est pas interdit d'imaginer des raccords permettant de relier un ou plusieurs soufflets aux différentes tuyères, comme pour le « *tatara* ». L'intérêt de ce dispositif pourrait être de ventiler une surface importante tout en évitant la perte de chaleur et de vitesse du flux qu'induirait une large tuyère.

Diamètre interne des conduits de ventilation :
important = ventilation naturelle ; faible = ventilation forcée :

Cet argument prend sans doute sa source dans l'idée que la ventilation naturelle nécessite une arrivée d'air plus importante que lorsque l'air est pulsé. Il est vrai que les procédés par convection déploient souvent une surface totale d'arrivée d'air importante afin d'opposer une faible résistance au courant de convection, mais faire du diamètre des tuyères un critère en soi paraît dangereux. En effet, lorsque l'on regarde les diamètres de tuyère des 5 procédés par convection du corpus pour lesquels cette indication existe (voir tableau ci-dessous), on s'aperçoit que 3 fours échappent aux critères fixés par P. L. Pelet (5 cm et plus = ventilation naturelle), et 2

fours à ceux fixés par R. Pleiner (2-3 cm = indication de ventilation forcée). De plus, dans les exemples africains, les tuyères sont souvent employées par groupes, insérées dans un même orifice, ce qui permet d'avoir une surface d'arrivée d'air importante sans avoir besoin de tuyères de fort diamètre. Il n'existe pas non plus de raison ferme pour établir que la ventilation forcée ne peut employer de tuyères larges. Il peut être intéressant de disposer de telles tuyères, par exemple si le four et/ou le soufflet est de taille importante, ou s'il faut y connecter plusieurs soufflets. Tout dépend donc de la configuration du four et des subtilités du procédé employé avec celui-ci. Il est alors nécessaire de rassembler le plus de données archéologiques possibles sur le four avant d'avancer le mode de ventilation le plus probable.

Procédé	Principe de fonctionnement	Alimentation en air
Procédé Hausa (Niger, 1967)	Convection par tuyères rayonnantes	7 tuyères hémicylindriques : <i>évaluées à ≈10 cm de large sur ≈8-9 cm de haut à l'extrémité hors du four</i>
Procédé Birman à Puppa (Birmanie, milieu XIX^e s.)	Convection par série de tuyères frontales	≈20 tuyères : Ø (externe ?) ≈5 cm
Procédé 'Bokoto (Centrafrique, 1913)	Convection par tuyères rayonnantes	5 à 7 tuyères: Ø (interne ?) 2,5 cm
Procédé expérimental à partir de bas fourneaux archéologiques sri lankais (Sri Lanka, 1994)	Convection provoquée par le vent, par série de tuyères frontales	15 tuyères : Ø interne ≈2-2,4 cm
Procédé d'Ola Igbi (Nigeria, fin XIX^e s.)	Convection par tuyères rayonnantes	18 tuyères (par groupes de 2) : Ø interne ≈3,6 cm
Reconstitution du procédé Fipa (Tanzanie, 1990-1991)	Convection par tuyères rayonnantes	évalué à 20 tuyères (par groupes de 2): Ø ?
Procédé Mandingue à Kamalia (Mali, 1796-1797)	Convection par tuyères rayonnantes	21 tuyères (par groupes de 3) : Ø ?
Reconstitution du procédé Moose à Kâyn (Burkina Faso, 1988)	Convection par tuyères rayonnantes	45 tuyères (par groupes de 5) : Ø ?

Fig. 15- Tableau indiquant le diamètre et le mode de groupement des tuyères des procédés du référentiel technique.

**Placement du four dans un lieu venté ou supposé
comme tel = ventilation naturelle :**

Le placement d'un fourneau dans un lieu a priori venté peut faire naître l'hypothèse d'une utilisation du vent, mais cette hypothèse ne peut devenir forte que dans la mesure où elle s'appuie sur une série de données significatives. A cet égard, les travaux de G. Juleff au Sri Lanka⁵⁴ font figure d'exemple. L'utilisation du vent est avancée car les fourneaux (plusieurs centaines, sur 77 sites) sont systématiquement orientés vers les vents dominants, que des mesures effectuées sur place pendant plusieurs années définissent comme puissants et réguliers. L'hypothèse de l'utilisation du vent est renforcée si la configuration du four favorise l'effet du vent, par exemples par le placement des ouvertures du côté du vent dominant ou une partie avant plane qui dirige le vent vers le gueulard pour un effet d'aspiration. L'expérimentation peut venir confirmer la possibilité de l'emploi du vent, en démontrant la capacité du procédé reconstitué à produire du métal en quantité suffisante.

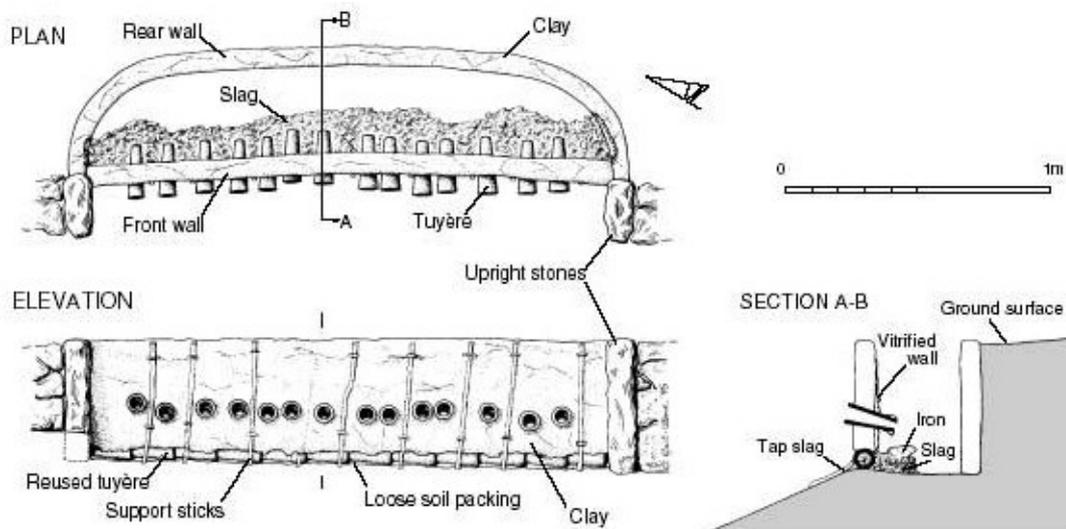


Fig. 16- Bas fourneau expérimental d'après des exemples archéologiques sri lankais systématiquement orientés face à des vents de mousson puissants et réguliers. L'emplacement et la forme du four permettent de maximiser l'effet du vent pour produire une convection par les tuyères. Source : Juleff, 1996.

⁵⁴ Cf. Juleff, 1998.

Cuve haute par rapport au diamètre (profil allongé) = ventilation naturelle :

Il convient tout d'abord d'affirmer que le fait de posséder une cuve de profil allongé, un ratio hauteur/diamètre important, n'est pas une nécessité pour créer une convection propre à la réduction du minerai de fer. Ainsi, la typologie établie par B. Martinelli pour les fours à convection de la Boucle du Niger définit un type nommé « cellulaire » regroupant les fours de 1,5 m à 2,5 m de haut et dont la largeur de la base est supérieure ou égale aux 2/3 de la hauteur. Il est intéressant de signaler que B. Martinelli précise que ce type est le plus méconnu et le plus négligé par les observateurs.

Les relations diamètre/hauteur propres à induire une convection suffisante semblent être plus complexes qu'un simple ratio. Les expérimentations effectuées par C. Colliou nous éclairent sur ce point⁵⁵. Une série d'expériences effectuées avec une cheminée d'un diamètre interne de 28 cm et d'une hauteur d'environ 130 cm au dessus des tuyères a montré que le tirage avait du mal à se faire correctement, malgré ce profil très allongé et différents nombres de tuyères testés. Par contre, un tirage efficace a été réalisé avec la même hauteur et un diamètre interne de 60 cm. Ceci s'expliquerait par le fait qu'il faille une combustion simultanée d'une masse minimum de charbon pour produire une chaleur suffisante à l'intérieur du four, la différence de chaleur entre l'intérieur et l'extérieur du four étant le moteur de la convection. Pour C. Colliou, un diamètre de 60 cm environ est un minimum, et les 130 cm de hauteur apparaissent comme suffisants. Les données du corpus rejoignent ces conclusions : le diamètre minimum y est de 50 cm et la hauteur au dessus des tuyères n'est jamais en dessous de 120 cm.

Ceci étant, l'exemple des fours à essai et de fusion d'acier du XIX^e s., qui fonctionnent également sur le principe de la convection, montre qu'il est possible d'atteindre de très hautes températures avec de faibles diamètres : sole carré de 25 cm de côté pour un four de fusion d'acier décrit par M. P. Berthier⁵⁶, sole de 34,9 x 31,6 cm pour un four d'essai de minerai de fer et d'étain décrit par Balling⁵⁷. Mais ces fours sont dotés de très hautes cheminées : 12 m pour le four de Balling. Il semble donc possible que des fourneaux à convection puissent réduire du minerai de fer avec un faible diamètre, mais ils nécessiteraient des cheminées bien plus hautes que les valeurs envisagées dans la littérature archéologique : 1,5-2 m à Ashwicken, 1,30

⁵⁵ Cf. Colliou, Aranda, 2005 et Colliou, Peyrat, 2007.

⁵⁶ Cf. Berthier, 1847, p. 137-138 et Planche VI.

m à Igolomia. La hauteur de cheminée nécessaire pour de faibles diamètres reste cependant à déterminer, il n'est pas sûr que des hauteurs aussi importantes que celles des fours d'essais du XIX^e s. soient obligatoires.

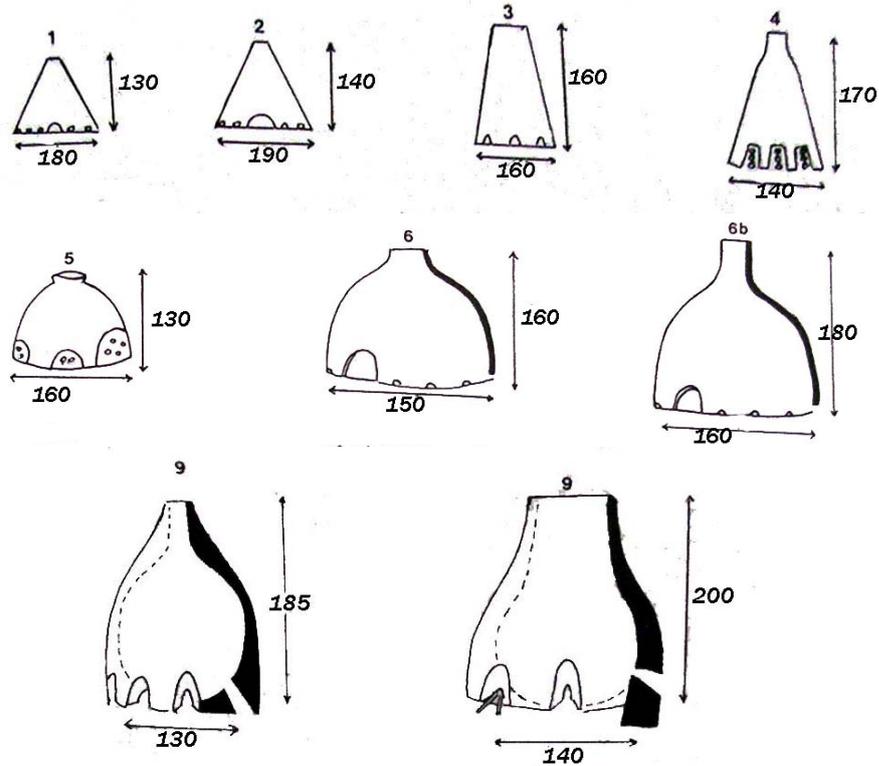


Fig. 17- Exemples de fourneaux de type « cellulaire » selon la typologie établie par B. Martinelli pour les fours de la Boucle du Niger. Source : Martinelli, 1993.



Fig. 18- A gauche : Expérimentations de C. Colliou, four de 30 cm de diamètre et four de 60 cm. Sources : Colliou, 2005 et Colliou, 2007. A droite : Four à essai à

⁵⁷ Cf. Balling, 1881, p. 37-39.

cheminée haute (12 m), sole de 34,9 x 31,6 cm. Source : Balling, 1881, p. 37.

**Diamètre du four important = ventilation forcée et
Diamètre du four important = ventilation naturelle :**

Il ressort des éléments présentés précédemment que le diamètre important du four n'est pas un indice probant de ventilation forcée. Au contraire, un diamètre important est une caractéristique récurrente des procédés du référentiel technique, et il semble favoriser la convection. De surcroît, plus le four est large, plus le volume d'air à fournir est important. Ceci ne pose pas de problème avec la convection, mais en ventilation forcée cela sous entend une augmentation de la taille ou du nombre des soufflets, et de la main d'œuvre pour les actionner. Avec des soufflets de faible capacité, on ne peut employer que des fours de taille relativement restreinte. Les fours les plus importants doivent nécessiter une mécanisation de la soufflerie s'ils fonctionnent en ventilation forcée. Mais les tailles maximales de fours ventilables par les différents types de soufflets employés en métallurgie ancienne restent à déterminer précisément. Car des exemples ethnographiques montrent que des fourneaux assez larges peuvent être ventilés par des soufflets de faible capacité. Ainsi, les Haya de Tanzanie se servent d'un four de réduction de 1,10 m de large au niveau des tuyères (voir schéma ci-dessus), ventilé par des soufflets doubles en bois (*drum bellows*) constitué de deux cuvettes peu profondes fermées par de la peau de chèvre. Il y a 8 tuyères pénétrant profondément dans la cuve, chacune étant connectée à un soufflet double⁵⁸.

En ce qui concerne les « bouchons de tuyères », dont la présence a été invoquée en renfort d'une interprétation de ventilation forcée liée à un grande taille du four⁵⁹, il nous semble intéressant de signaler que parmi les procédés du corpus, l'un fait usage de bouchons. Il s'agit du procédé Bassar observé à Banjeli (Togo) qui emploie un four à convection doté d'évents régulièrement répartis autour de la cuve. Ces évents sont dotés de bouchons de bois couverts d'argile humide qui peuvent être inséré ou retirés pour contrôler l'apport d'air, et donc la chaleur dans le four aux différents moments de la réduction.⁶⁰

⁵⁸ Cf. Schmidt, Avery, 1996.

⁵⁹ Cf. Andrieux (et alii), 1993.

⁶⁰ Cf. Goucher, Herbert, 1996.

Tuyères horizontales = ventilation naturelle :

L'argument proposé ici consistait à dire que la convection aurait plutôt besoin de tuyères horizontales ou dirigées vers le haut pour éviter leur fusion, tandis que la ventilation forcée pourrait employer une tuyère penchée vers le bas, car le flux serait suffisamment puissant pour repousser la combustion assez loin de son extrémité. Le recours au référentiel permet de montrer que toutes les positions de tuyères (horizontales, penchées vers le bas, penchée vers le haut) peuvent se être utilisées en ventilation naturelle, parfois sur le même four. De plus, la fusion de la tuyère fait partie intégrante de certains procédés, dans le but de laisser peu à peu davantage d'espace à la loupe⁶¹.

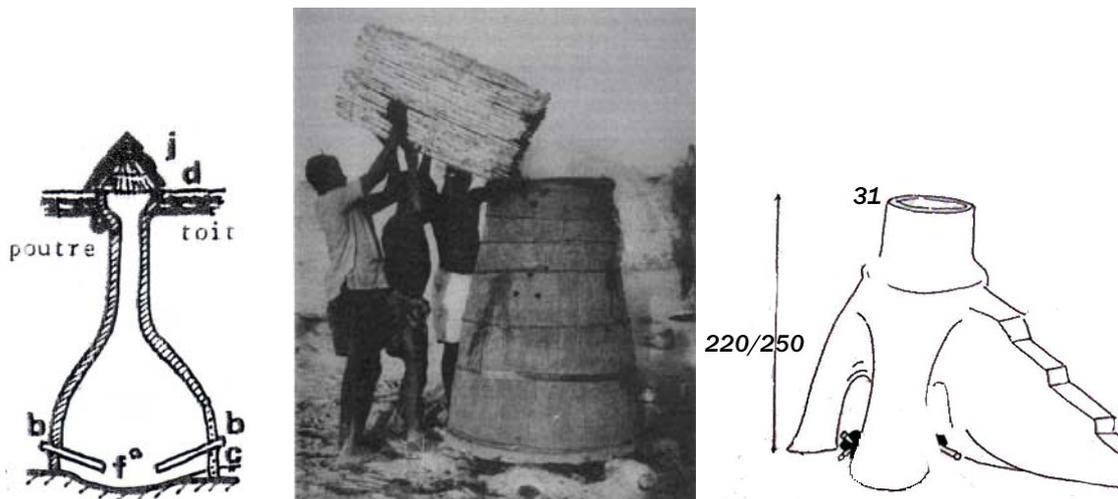


Fig. 19- Fours à convection et tuyères multiples africains. A gauche : Tuyères penchées vers le bas dans le procédé 'Bokoto' (Centrafrique). Source : Moniño, 1983, p. 290. Au centre : Tuyères horizontales dans le procédé Hausa (Niger). Source : Bernus, Echard, 1995, p. 76. A droite : tuyère penchées vers le haut et vers le bas sur un four minyânka (Mali). Source : Martinelli, 1993.

⁶¹ Voir par exemple le procédé à tuyère verticale fusible employé chez les Mafa (Cameroun), dans Killick, 1995, p. 63.

Scorie piégée liée à la ventilation naturelle :

C. Colliou remarque également qu'il semble exister une relation entre la ventilation naturelle et le piégeage des scories en fosses. Pour notre part, nous observons que les procédés du référentiel sont aussi bien à scories coulées qu'à scories piégées, comme l'indique le tableau ci-dessous. Le mode de gestion de la scorie ne peut donc être un argument en lui-même. Cet argument pose aussi la question de savoir sur quels critères la ventilation naturelle a été diagnostiquée sur les fourneaux archéologiques à scories piégées.

Procédé	Principe de fonctionnement	Mode de gestion de la scorie
Procédé Hausa (Niger, 1967)	Convection par tuyères rayonnantes	piégée dans une fosse
Procédé d'Ola Igbi (Nigeria, fin XIX^e s.)	Convection par tuyères rayonnantes	évacuée par un canal sous le four
Reconstitution du procédé Bassar à Banjeli (Togo, 1985)	Convection par événements rayonnants	évacuée
Reconstitution du procédé Moose à Kâyn (Burkina Faso, 1988)	Convection par tuyères rayonnantes	évacuée par un orifice latéral
Typologie des fours à convection de la boucle du Niger (XIX^e-XX^e siècles)	Convection par tuyères ou par événements rayonnants	piégée dans une fosse ou évacuée
Procédé Birman à Puppa (Birmanie, milieu XIX^e s.)	Convection par série de tuyères frontales	évacuée par un espace de 10 cm de haut sur tout l'avant du fourneau
Procédé expérimental à partir de bas fourneaux archéologiques sri lankais (Sri Lanka, 1994)	Convection provoquée par le vent, par série de tuyères frontales	évacuée par les interstices entre des tuyères imbriquées constituant la base du mur avant

Fig. 9- Tableau indiquant le mode de gestion de la scorie des procédés du référentiel pour lesquels cette information est connue.

Pas de traces de soufflets = ventilation naturelle :

C. Colliou et A. Quiquerez font participer l'absence de traces de soufflets à leur interprétation, tout en ayant garde d'un faire un argument valable en soi. En effet, les soufflets peuvent souvent être simplement posés sur le sol ou sur une structure légère sans marquer le terrain, bien que des aménagements plus durables puissent avoir lieu.

Impacts thermiques, scorification des parois :

L'étude des impacts thermiques sur les cuves de fourneaux a servi à fournir des interprétations en terme de ventilation. Il apparaît tout d'abord qu'on ne peut diagnostiquer la ventilation forcée sur la seule base d'impacts témoignant d'une forte chaleur, car, comme nous le montrons ci-dessous, il n'y a pas de raison fondée de présupposer une chaleur systématiquement supérieure avec une soufflerie. A. Quiquerez explique son interprétation de la ventilation des fours fouillés dans le Jura Vaudois par une différence de température entre l'avant et l'arrière du four, repérable à l'observation de la scorification dans la cuve. Le fait que la zone au dessus de l'unique arrivée d'air ait été moins chaude que l'arrière du four confirme selon lui une ventilation par convection. Il semblerait au contraire que dans le cas de la convection, le flux d'air soit aspiré dès qu'il débouche dans le four et qu'il produirait par conséquent un maximum de chaleur plutôt en sortie de tuyère ou d'évent, c'est-à-dire à l'avant du four dans le cas présent. Le fait que l'arrière du four porte les stigmates d'une chaleur plus importante serait alors plutôt lié, soit à une ventilation forcée où la vitesse du flux repousserait la zone de chaleur maximale plus loin de l'arrivée d'air, soit à une convection par une tuyère pénétrant dans la cuve jusqu'à un point proche de l'arrière du four. Mais A. Quiquerez considère qu'il était impossible de maintenir une tuyère dans l'unique conduit aboutissant à la cuve (15 cm environ à la jonction avec la cuve⁶²) et qu'un soufflet aurait empêché l'accès permanent au conduit, nécessaire à la bonne marche de la réduction. Toutefois, cette interprétation repose sur une vision erronée du fonctionnement du procédé direct, fortement influencée par le modèle du haut fourneau et de la filière fonte/fer-acier. En effet, le

⁶² Cet espace, bien que faible, pourrait être suffisant pour éventuellement placer une tuyère et faire couler la scorie quelques centimètres en dessous.

procédé direct est vu comme une réduction et un affinage en une seule opération⁶³. Le métal pâteux ou fondu s'accumulerait au fond du four, retenu par une « dame », tandis que la scorie peu liquide surnagerait et devraient être sortie par-dessus la « dame » au moyen d'un ringard. Cet outil servirait également à brasser le métal pour l'agglomérer en une masse à la manière d'un puddlage, d'où la nécessité d'avoir un conduit d'accès à la cuve non gêné par une tuyère ou un soufflet.

Scories lourdes = ventilation naturelle ; Scories bulleuse = ventilation forcée :

L'aspect des scories a été utilisé comme mode de reconnaissance du type de ventilation par P. L. Pelet : « *compactes et lourdes, couvertes de circonvolutions analogues à celles d'un cerveau, elles remontent à une exploitation faiblement ventilée ; parsemées de bulles, et irisée, elles indiquent une combustion à plus haute température, elles ont l'indice d'une ventilation artificielle.* »⁶⁴.

Cet argument repose sur le présupposé non prouvé que la ventilation naturelle est plus faible que la ventilation forcée, qu'elle génère des températures inférieures, et que par conséquent la viscosité des scories issues de fours à ventilation naturelle est supérieure. Outre le fait que cette approche ne prend pas en compte la nature chimique du minerai, qui influe sur la viscosité de la scorie, elle s'oppose aux interprétations actuelles des scories bulleuses, telles que l'expliquent M. Leroy et P. Merluzzo : « *Les scories peuvent contenir des proportions très variables de bulles. Celles-ci ne sont pas en relation avec l'existence d'une soufflerie plus ou moins forte mais expriment un phénomène de dégazage du liquide. En refroidissant, la scorie laisse s'échapper les gaz dissous qu'elle contient. Si elle n'est pas suffisamment liquide, les bulles resteront prisonnières, jusqu'à parfois former une structure très bulleuse, semblable à celle de la pierre ponce. Un dégazage complet laissera une masse compacte et dense.* »⁶⁵.

Cette approche fait également peu justice à l'efficacité de la ventilation naturelle. Les procédés par convection sont tout à fait capables de produire des températures importantes. Lors de la reconstitution du procédé Moose à Kâyn (Burkina Faso), organisé par l'ethnologue B. Martinelli, la sonde placée au dessus de l'orifice

⁶³ « Les creusets et fourneaux primitifs qu'on vient de décrire sont sans rapport avec la description qu'on nous donne ordinairement de ceux appelés à la catalane ou à l'italienne. Dans ceux-ci la réduction de la mine et l'affinage du fer, quoique faits dans une seule opération, exigeaient l'emploi d'un soufflet quelconque, tandis que ceux que nous étudions en étaient absolument dépourvus. », dans Quiquerez, 1866, p. 42.

⁶⁴ Pelet, 1993, p. 6-7.

⁶⁵ Cf. Mangin (dir.), 2004, p. 74.

d'évacuation des scories a été retirée endommagée alors qu'elle indiquait une température de 1450° C.⁶⁶. Et quand bien même la température serait relativement faible en ventilation naturelle, si elle est suffisante pour réduire le minerai de fer il n'y a pas de raison pour que les procédés à soufflerie cherchent forcément à atteindre une température supérieure à celle-ci. Les mêmes hautes températures sont accessibles soit par convection avec une configuration de four adaptée, soit par soufflerie avec un débit d'air suffisant.

III. Bibliographie

A/ Ouvrages historiques et techniques :

- **Arnoux, 2000** : M. ARNOUX, « Le fer dans les campagnes médiévales (XI^e-XV^e siècles) », *L'artisan au village dans l'Europe médiévale et moderne*, actes des XX^e journées internationales d'Histoire de l'abbaye de Flaran, 5-6-7 septembre 1997, Presses Universitaires du Mirail, Toulouse, 2000.
- **Grande Encyclopédie, 1887** : *La Grande Encyclopédie, inventaire raisonné des sciences, des lettres et des arts*, Ed. H. Lamirault et C^{ie}, Paris, 1887.
- **Mangin (dir.), 2004** : M. MANGIN (dir.), *Le fer*, Ed. Errance, Paris, 2004.
- **Verna, 1995**: C. VERNA, « Aux origines de la forge à la catalane : les moulins du Comté de Foix (vers 1300-1349) », E. TOMAS I MORERA (éd.), *La farga catalana en el marc de l'arqueologia siderúrgica*, actes du Symposium international sur la forge catalane, 13-17 septembre, à Ripoll, Ed. Govern d'Andorra, Ministeri d'Afers socials i Cultura, Andorra La Vella, 1995.

⁶⁶ Cf. Martinelli, 2000.

- **Balling, 1881** : BALLING, *Manuel pratique de l'art de l'essayeur, guide pour l'essai des minerais, des produits métallurgiques et des combustibles*, trad. de l'allemand par L. Gautier, Ed. Librairie F. Savy, Paris, 1881.
- **Jars, 1774** : G. JARS, « *Voyages métallurgiques* », t.1, Ed. Gabriel Regnault, Lyon, 1774.
- **Percy, 1864** : J. PERCY, *Metallurgy, The art of extracting metals from their ores, and adapting them to various purposes of manufacture*, T. 2 (Iron and steel), Ed. John Murray, Londres, 1864.
- **Theophilus (De l'Escalopier)** : THEOPHILUS, *Essai sur les divers arts*, traduction de C. de L'Escalopier en 1863, Ed. Paléo, Clermont Ferrand, 2000.
- **Theophilus (Dodwell)** : THEOPHILUS, *The Various Arts, De Diversis Artibus*, édité et traduit du latin par C. R. Dodwell, Oxford University Press, Oxford, 1961, 2001.

B/ Sites archéologiques :

- **Andrieux (et alii), 1993** : J-Y. ANDRIEUX, A. BRULE, J. COIGNARD, M. FONTUGNE, C. HERBAUT, G. LARCHER, S. LOYER, M. MOINERAI, J. PLAINE, « 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*, n° 10, 1993.
- **Arbide Elorza, Urcelay Urcelay, 1995** : I. ARBIDE ELORZA, J. M. URCELAY URCELAY, « Ferrerías de agua. Primeros datos sobre ellas en Legazpi y posterior evolución técnica », E. TOMAS I MORERA (éd.), *La farga catalana en el marc de l'arqueologia siderúrgica*, actes du Symposium international sur la forge catalane, 13-17 septembre, à Ripoll, Ed. Govern d'Andorra, Ministeri d'Afers socials i Cultura, Andorra La Vella, 1995.

- **Bocoum, 1995** : H. BOCOUM, « La métallurgie du fer au Sénégal, des origines au XXe siècle : Esquisses d'une évolution des techniques de réduction », P. BENOIT, P. FLUZIN (éd.), *Paléométtallurgie du fer et cultures*, actes du symposium international du Comité pour la Sidérurgie Ancienne de l'Union Internationale des Sciences Préhistoriques et Protohistoriques, 1, 2, 3 novembre 1990, à l'Institut Polytechnique de Sévenans, Belfort-Sévenans, Ed. Vulcain-AEDEH, Paris, 1995.
- **Bocoum, Fluzin, 2000** : H. BOCOUM, P. FLUZIN, « La chaîne opératoire de réduction directe à Juude-Jaabe », P. PETREQIN, P. FLUZIN, J. THIRIOT, P. BENOIT (dir.), *Arts du feu et productions artisanales*, Actes des XX^e rencontres internationales d'archéologie et d'histoire d'Antibes, Ed. APDCA, Antibes, 2000.
- **Cabboi, Dunikowski, 1995** : S. CABBOI, C. DUNIKOWSKI, *La sidérurgie chez les Senons : les ateliers celtiques et gallo-romains des Clérimois (Yonne)*, DAF n° 51, Ed. Maison de Sciences de l'Homme, Paris, 1995.
- **Daveau, Goustard, 2000**: I. DAVEAU, V. GOUSTARD, « L'extraction et la réduction du minerai de fer à Vert-Saint-Denis (Seine-et-Marne) durant le haut Moyen Age : l'émergence d'une « industrie lourde » au sein d'un habitat à vocation agricole », P. PETREQIN, P. FLUZIN, J. THIRIOT, P. BENOIT (dir.), *Arts du feu et productions artisanales*, Actes des XX^e rencontres internationales d'archéologie et d'histoire d'Antibes, Ed. APDCA, Antibes, 2000.
- **Eschenlor, Serneels, 1991**: L. ESCHENLOR, V. SERNEELS, *Les bas fourneaux mérovingiens de Boécourt, Les Boulies (JU/Suisse)*, Cahiers d'archéologie jurassienne n°3, Ed. Office du Patrimoine Historique- Société Jurassienne d'Emulation, Porrentruy, 1991.
- **Espelund, 1994** : A. ESPELUND, « Un bilan des recherches sur la production du fer en Norvège, des conditions semi-industrielles à celle d'une économie de subsistance », M. MANGIN (dir.), *La sidérurgie ancienne de l'Est de la France dans son contexte européen*, Actes du colloque tenu à Besançon du

- 10 au 13 novembre 1993, Ed. Annales littéraires de l'Université de Besançon, Besançon, 1994.
- **Juleff, 1998** : G. JULEFF, *Early iron and steel in Sri Lanka. A study of Samanalawewa area*, Ed. Verlag Philipp Von Zabern, Mainz am Rhein, 1998.
 - **Larcher, 1994** : G. LARCHER, « La zone sidérurgique de la forêt de Paimpont (Ille-et-Vilaine). Bilan diachronique », M. MANGIN (dir.), *La sidérurgie ancienne de l'Est de la France dans son contexte européen*, Actes du colloque tenu à Besançon du 10 au 13 novembre 1993, Ed. Annales littéraires de l'Université de Besançon, Besançon, 1994.
 - **Mangin (et alii), 1992** : M. MANGIN, I. KEESMANN, W. BIRKE, A. PLOQUIN, *Mines et métallurgie chez les Eduens, Le district métallurgique du Morvan-Auxois*, Ed. Annales Littéraires de l'Université de Besançon-Les Belles Lettres, Paris, 1992.
 - **Mangin (dir.), 1994** : M. MANGIN (dir.), *La sidérurgie ancienne de l'Est de la France dans son contexte européen*, actes du colloque de Besançon, 10-13 Novembre 1993, Ed. Annales Littéraires de l'Université de Besançon-Les Belles Lettres, Paris, 1994.
 - **Orzechowski, 1994** : S. ORZECOWSKI, « La sidérurgie ancienne dans les Montagnes Sainte Croix, contexte naturel et humain », M. MANGIN (dir.), *La sidérurgie ancienne de l'Est de la France dans son contexte européen*, actes du colloque de Besançon, 10-13 Novembre 1993, Ed. Annales Littéraires de l'Université de Besançon-Les Belles Lettres, Paris, 1994.
 - **Pelet, 1993** : P-L. PELET, *Une industrie reconnue : Fer Charbon Acier dans le pays de Vaud*, Cahiers d'archéologie romande n° 60, Lausanne, 1993.
 - **Pleiner, 2000** : R. PLEINER, *Iron in archaeology, the European bloomery smelters*, Ed. Archeologický ústav avčr, Praha, 2000.

- **Quiquerez, 1866:** A. QUIQUEREZ, *Monuments de l'ancien évêché de Bâle, De l'Age du Fer, Recherches sur les anciennes forges du Jura Bernois*, Ed. Société jurassienne d'émulation, Imprimerie V. Michel, Porrentruy, 1866.
- **Vivet, 1997 :** J.-B. VIVET, « Paléoméallurgie du fer à l'est de la Rance et dans le Combournais. Bilan interprétatif des données de prospection », *Les Dossiers du C.E.R.A.A*, 25, 1997.

C/ Expérimentations :

- **Andrieux, 1990 :** P. ANDRIEUX, *Prolégomènes à une étude tracéologique sur les structures d'élaboration thermiques et les parois argilo-sableuses. Applications à la paléoméallurgie du fer*, Thèse de 3^e cycle sous la direction de M. Mangin, Université de Franche Comté, novembre 1990.
- **Andrieux, 1991 :** P. ANDRIEUX, « Les problèmes et la problématique dans l'expérimentation et l'étude du comportement des bas fourneaux métallurgiques : l'exemple du fer », *Archéologie expérimentale, tome1, le feu : métal et céramique*, actes du colloque international « Expérimentation en archéologie : bilan et perspectives » tenu à l'archéodrome de Beaune les 6, 7, 8 et 9 avril 1988, Ed. Errance, Paris 1991.
- **Andrieux, 1995 :** P. ANDRIEUX, « Etude tracéologique sur les structures d'élaboration thermique et les parois argilo-sableuses, Application à la paléoméallurgie du fer, Description et traitements des expérimentations 1982-1988 », P. BENOIT, P. FLUZIN (éd.), *Paléoméallurgie du fer et cultures*, actes du symposium international du Comité pour la Sidérurgie Ancienne de l'Union Internationale des Sciences Préhistoriques et Protohistoriques, 1, 2, 3 novembre 1990, à l'Institut Polytechnique de Sévenans, Belfort-Sévenans, Ed.Vulcain-AEDEH, Paris, 1995.

- **Bielenin, Nosek, Mazur, 1991** : K. BIELENIN, E. NOSEK, A. MAZUR, « Experimental archaeology in Poland. Bilan et perspectives », *Archéologie expérimentale, tome1, le feu : métal et céramique*, actes du colloque international « Expérimentation en archéologie : bilan et perspectives » tenu à l'archéodrome de Beaune du 6 au 9 avril 1988, Ed. Errance, Paris 1991.
- **Colliou, Aranda, 2005** : C. COLLIOU, R. ARANDA, « Proposition pour une application de la ventilation naturelle à la réduction du minerai de fer par procédé direct », *Les arts du feu en Normandie*, actes du 39^e congrès organisé par la Fédération des Sociétés Historiques et Archéologiques de Normandie, tenu à Eu du 21 au 24 octobre 2004, Ed. Annales de Normandie, 2005.
- **Colliou, Peyrat, 2007** : C. COLLIOU, F. PEYRAT, « Proposition de reconstitution et expérimentation d'un four de réduction de minerai de fer en ventilation naturelle », *Journées archéologiques de Haute-Normandie*, Bulletin n° 11 du Centre de Recherche Archéologique de Haute-Normandie, fascicule 2, 2007.
- **Juleff, 1996** : G. JULEFF, « An ancient wind-powered iron smelting technology in Sri Lanka », *Nature*, vol 379, 4, Janvier 1996.
- **Tylecote, Austin, Wraith, 1971** : R. F. TYLECOTE, J. N. AUSTIN, A. E. WRAITH, « The mechanism of the bloomery process in shaft furnaces », *Journal of the Iron and Steel Institute*, vol. 209, Mai 1971.

D/ Données ethnographiques :

- **Bernus, Echard, 1995** : S. BERNUS, N. ECHARD, « Metal working in the Agadez region (Niger) : an ethno-archaeological approach », P. T. CRADDOCK, M. J. HUGHES, *Furnaces and smelting technology in Antiquity*, British Museum Occasional Paper n° 48, Ed. British Museum, 1995, Londres.

- **Goucher, Herbert, 1996** : C. L. GOUCHER, E. W. HERBERT, « The blooms of Banjeli : technology and gender in west african iron making », P. R. SCHMIDT (éd.), *The culture and technology of african iron production*, Ed. University Press of Florida, Gainesville, 1996.
- **Killick, 1995** : D. KILLICK, « Variations in african iron-smelting practice : implications for the study of prehistoric iron technology in Europe », P. BENOIT, P. FLUZIN (éd.), *Paléoméallurgie du fer et cultures*, actes du symposium international du Comité pour la Sidérurgie Ancienne de l'Union Internationale des Sciences Préhistoriques et Protohistoriques, 1, 2, 3 novembre 1990, à l'Institut Polytechnique de Sévenans, Belfort-Sévenans, Vulcain-AEDEH, Paris, 1995.
- **Le Coze, 2005** : J. LE COZE, « Le tatara et l'acier des sabres japonais », *Matériaux et techniques*, 1-2, 2005.
- **Martinelli, 1993** : B. MARTINELLI, « Fonderies ouest-africaines. Classement comparatif et tendances », *Techniques et culture*, n° 21, Atouts et outils de l'ethnologie des techniques. Sens et tendance en technologie comparée, janvier-juin 1993.
- **Martinelli, 2000** : B. MARTINELLI, « Le choix de la combustion lente. Mutation technique et mutation sociale au Yatenga, Burkina Faso », P. PETREQIN, P. FLUZIN, J. THIRIOT, P. BENOIT (dir.), *Arts du feu et productions artisanales*, Actes des XX^e rencontres internationales d'archéologie et d'histoire d'Antibes, Ed. APDCA, Antibes, 2000.
- **Monino, 1983** : Y. MONINO, « Accoucher du fer, la métallurgie Gbaya (Centrafrique) », *Métallurgies Africaines. Nouvelles contributions*, Mémoires de la Sociétés des Africanistes, 9, 1983.
- **Schmidt, 1996**: P. R. SCHMIDT, « Reconfiguring the Barongo: reproductive symbolism and reproduction among a work association of iron smelters », P. R. SCHMIDT (éd.), *The culture and technology of african iron production*, Ed. University Press of Florida, Gainesville, 1996.

- **Schmidt, Avery, 1996:** P. R. SCHMIDT, D. H. AVERY, « Complex iron smelting and prehistoric culture in Tanzania », P. R. SCHMIDT (éd.), *The culture and technology of african iron production*, Ed. University Press of Florida, Gainesville, 1996.

Deuxième partie

Propositions, expérimentations et réflexions autour de la réduction du minerai de fer par procédé direct avec une ventilation naturelle

(C. COLLIOU, R. ARANDA)

Note : les figures sont placées en annexes

Des indices d'activités sidérurgiques se retrouvent sur de nombreux sites de fouilles. Les travaux de différents chercheurs⁶⁷ ont permis de grandes avancées pour la compréhension des déchets de production et des structures utilisées pour obtenir du fer. La volonté de mettre en pratique les données du terrain et ainsi tenter d'appréhender plus avant les conditions de la réduction, a conduit les archéologues sur la voie de la reconstitution expérimentale⁶⁸. Ceci étant, les fours dont les expérimentations ont été tentées fonctionnaient majoritairement par ventilation forcée. Or, les résultats de diverses fouilles laissent envisager l'usage, à différentes époques, de structures fonctionnant en tirage naturel sur le principe de la convection. Il convenait donc d'élargir l'expérimentation en paléoméallurgie du fer à la question de la ventilation naturelle.

C'est en s'appuyant principalement sur les résultats d'une fouille réalisée en Vendée, de constatations extraites de différents rapports de fouilles effectuées sur le grand Ouest⁶⁹ et des résultats d'autres expérimentateurs, qu'une série d'expérimentations sur ce principe de ventilation lié à la réduction directe du minerai de fer fut lancée courant 2003.

Précisons que l'utilisation de la ventilation naturelle a été envisagée sur de nombreux sites de réduction fouillés à travers la France⁷⁰, pour des fours fort différents de celui présenté ici. Cet article ne prétend présenter que les prémices d'une réflexion sur les conditions de fonctionnement d'un four qui s'auto-alimente en comburant..

I. Généralités sur la réduction directe

A/ La structure

Un bas fourneau possède une cheminée dont la hauteur est variable (de 60 à 130 cm selon les études). La structure est généralement réalisée à base de terre argileuse.

⁶⁷ Mangin 2004, Fluzin 2000, Dunikowski 1995, Leroy 1993, Serneels 1993.

⁶⁸ Leroy 2000, Martinelli 2000, Dunikowski 1995, Tylecote 1971.

⁶⁹ Andrieux 1993, Colliou 2003.

B/ Principes

Le procédé direct se caractérise par une réduction sans fusion du métal. Durant cette opération le fer demeure à l'état pâteux. Ce procédé permet d'obtenir en une seule opération un métal plus ou moins homogène. C'est le seul mode opératoire possible tant que le principe des fours employés (appelés bas fourneaux) ne permet pas d'atteindre la fusion du fer, qui se situe à 1537° C.

A l'état de minerai, le fer est oxydé⁷¹. Il est combiné avec d'autres éléments dont il doit être séparé. Il faut pour cela briser les structures cristallines et les liaisons moléculaires. Cette opération nécessite de l'énergie, sous forme de chaleur et un agent réducteur, le monoxyde de carbone, qui intervient sur l'oxygène combiné au fer. Dans la métallurgie ancienne, le charbon de bois remplit ces deux conditions en brûlant.

Le minerai, outre l'oxyde de fer, contient d'autres composés dans ce que l'on appelle la gangue. Une partie de celle-ci peut être éliminée au cours d'un traitement préliminaire de la matière première. Pour obtenir la séparation physique du fer métallique d'avec les autres constituants, il faut faire fondre ces derniers. Ce mélange fondu forme la scorie. Il est indispensable d'obtenir cette fusion de manière à séparer le fer métallique de la scorie. La qualité du produit élaboré lors de la réduction dépend de cette séparation.

C/ Mode opératoire

Après un préchauffage, on introduit dans la gueule du four et suivant un rythme régulier, les constituants de la charge : du minerai et du charbon de bois. Le foyer se situe environ au quart de la hauteur du fourneau en partant de la base. Il est activé par le flux d'air qui s'engouffre par une ou plusieurs tuyères latérales situées au bas du four. Le comburant peut être amené par des soufflets⁷², en ventilation forcée. En ventilation naturelle, l'air est aspiré par les orifices du bas du four. Cette aspiration résulte du tirage qui se crée dans la cheminée par l'évacuation des gaz chauds, par un principe de convection. Une fois la réduction terminée, le métallurgiste retire du four une masse spongieuse appelée éponge de fer, qui est un agglomérat de fer, de vide, de charbon et de scories. Cette éponge doit encore subir une intervention dite d'épuration avant de pouvoir être pleinement utilisée. En effet, le fer brut n'est pas directement exploitable, un martelage à chaud refermera les porosités et une haute température fera « suer »

⁷⁰ Notons le master 2 de Simon Pellequer sur la ventilation naturelle dans la littérature archéologique et ethnologique, sous la Dir. de A.F. Garçon, Université de Paris I, en cours de réalisation.

⁷¹ Le fer ne se trouve pas sur Terre à l'état natif, seulement à l'état de minerai.

les scories encore présentes dans le métal

En ce qui concerne la scorie durant la réduction, deux techniques de gestion de ce déchet ont été retrouvées en fouille :

- une première, où le résidu, fluide à cette température, est évacué à l'extérieur du four durant la réduction par une « porte » construite à cet effet.
- une seconde, où la scorie est piégée dans une cavité creusée sous le four (fig. 01). Sans être clairement attestée, il semble exister une relation entre ce dernier système de récupération des déchets et la ventilation naturelle⁷³.

II. Les enseignements d'une fouille archéologique sur le tracé de l'autoroute A 87

C'est en Vendée, sur le tracé de l'autoroute A 87, à proximité de La Chaize Le Vicomte, qu'une fouille de sauvetage, effectuée par des agents de l'INRAP, mit au jour en 2001 les vestiges d'une structure servant à produire du fer. Ce four daté du haut Moyen Âge par la céramique et la méthode du C14, semblait isolé et si l'organisation de cette unité de production rappelait les résultats d'autres fouilles, certaines découvertes étaient pour le moins atypiques (fig. 02).

A/ La structure du four

Le diamètre interne du four avoisinait 1m50. Il était doté d'une fosse de récupération pour la scorie de 45 cm de diamètre légèrement décentrée.

Une organisation de fossés ceinturait le bas fourneau. A l'analyse, on peut faire l'hypothèse d'un usage multiple, selon les moments du déroulement du processus :

- a) L'un deux, le **Fossé E** (fig. 02), à proximité directe, avait dû servir dans un premier temps pour extraire une partie de l'argile utilisée dans la construction du four.
- b) Lors de l'opération de réduction, ils pouvaient servir de drain en cas de précipitation, protégeant la structure des coulées d'eau.
- c) Enfin, la fouille révéla qu'à la fin de la réduction les débris de paroi et les scories à très haute température furent évacués rapidement à l'intérieur (fig. 02, flèches de F vers E). Précisons que le remplissage du fossé avait été le

⁷² Différentes techniques ont été utilisées pour ce type de ventilation, suivant les lieux ou les époques.

⁷³ Cette proposition a été utilisée comme postulat pour les expérimentations en ventilation naturelle.

fait d'une seule opération, aucune stratification qui aurait résulté d'actions successives n'a été révélée. Les métallurgistes ont ainsi pu travailler après s'être débarrassés efficacement d'une importante partie de la source de chaleur et de rayonnement. Le comblement rapide du fossé protégea les éléments enterrés de la dégradation. Ainsi des fragments de paroi et des tuyères non cuites très bien préservées ont été retrouvés, alors que toutes les parties laissées à l'extérieure se sont délitées.

B/ Analyse des fragments

Une trentaine de fragments de paroi a été tronçonnée. Les différents fragments étudiés sont homogènes dans leur constitution. Ils sont essentiellement composés d'argile jaune et d'un sable grossier tirés du terrain. La paroi de la cheminée est extrêmement dégraissée. Son épaisseur varie de quatre centimètres, vraisemblablement pour les parties hautes du four, à une dizaine de centimètres pour le bas de la paroi. Cette faible épaisseur du four en élévation peut surprendre, mais un très grand nombre d'échantillons portent encore les traces de lissages à la main, et ce, de part et d'autre de la paroi. Remarque importante : majoritairement, ces fragments ne sont pas cuits⁷⁴. Les fragments qui ont subi un feu intense, jusqu'à une vitrification superficielle ont été envisagés comme des composants de la partie basse du four, à proximité des arrivées d'air. Aucune trace de rechapage n'a été retrouvée, malgré une étude soignée du mobilier.

La sole de fond de four était composée d'un mélange d'argile et de sable encore plus dégraissé que les parois. D'une épaisseur de cinq à six cm, cette sole avait été très soignée lors de sa pose. La partie conservée présentait une rubéfaction homogène, sans impact thermique localisé. Des traces de piquets ont été retrouvées au centre de la sole.

C/ Le système de ventilation

De fragments de tuyères ont été retrouvés en très grande quantité (plus de 60 kg sans que le fossé E ai été exhaustivement fouillé). Le matériau utilisé pour leur réalisation est

⁷⁴ Un fragment de paroi plongé dans un b cher d'eau se délite rapidement, et ne laisse qu'un mélange d'argile et de sable grossier.

différent de celui des parois de four. Dans le cas des tuyères, le sable grossier n'a pas été employé. Les coupes montrent néanmoins différents produits mêlés à cette argile : minerai, charbon de bois, traces de matières organiques, petits fragments de granit...

L'ensemble des tuyères semble avoir été façonné sur le même modèle : une base plate de 13 cm de large, une forme évoquant une carène de bateau (hauteur 13 cm). Cette forme extrêmement massive ne vient pas d'un moulage mais plus sûrement d'un façonnage manuel. Malgré leur utilisation pour la réduction, plusieurs exemplaires dépassent encore les 25 cm de long. Le diamètre du conduit d'air se situe autour de 3.5 cm (fig. 03).

Différents échantillons présentent la même configuration d'une fusion verticale de la face de la tuyère. Cette coulée scoriacée descendait de 15 à 25 mm jusqu'à une surface plane pour repartir dans un étalement horizontal. Ainsi, les tuyères semblent avoir été posées à plat sur un seuil de réception ceinturant la sole de fond de four.

De même, on retrouve sur de nombreuses tuyères des marques laissées par la paroi. Ces traces précisent la position des tuyères dans le four, elles encerclent les tuyères perpendiculairement à leur axe, confortant la position horizontale des arrivées d'air dans le four (fig. 04). Fait important, la largeur de ces traces corrobore les chiffres avancés pour l'épaisseur de la paroi du four.

D/ La fosse de piégeage à scories

Le fond du four était percé par un trou cylindrique (environ 40 cm de diamètre et 50 cm de profondeur). Le fond de la cavité recelait une masse scoriacée qui n'était pas le fait d'un comblement mais d'une coulée de scories. Après prélèvements, tronçonnages et étude des coupes réalisées, cette masse scoriacée de fond de fosse semblerait avoir été produite lors d'une unique réduction. Ainsi, le déchet fluide produit par la réduction du minerai se serait écoulé sur le fond du four et aurait terminé dans cette fosse de réception. Cette gestion de la scorie aurait alors évité une obturation intempestive du dispositif de ventilation durant la réduction.

E/ Discussion et propositions

C'est le nombre important de tuyères découvert dans le fossé, conjugué au diamètre relevée pour le four, à la présence d'une fosse de piégeage de la scorie et au fait qu'il semble n'avoir fonctionné qu'une seule fois, qui a orienté la réflexion sur un fonctionnement possible du bas fourneau à l'aide d'un système de ventilation à tirage naturel. Les modélisations tentées avec une équipe conséquente de souffleurs répartis

autour du four semblaient en effet peu convaincantes.

Cette proposition est cependant avancée avec de grandes précautions, compte tenu de la méconnaissance dans la sphère européenne de l'application de cette technique à la réduction. Néanmoins, suivre cette hypothèse de travail⁷⁵ permettait dans le cadre de l'expérimentation d'évaluer la possibilité d'existence de grands fours à ventilation naturelle dans l'espace paléoméallurgique européen⁷⁶ et d'avancer dans la compréhension de ce mode de production du fer.

On a noté le soin qui avait entouré la préparation de la paroi, de la sole de fond de four et des tuyères, et ce, tant dans la sélection des composants, que dans leur mise en œuvre.

L'étude des fragments de structures ne donne que peu d'indication sur la forme et l'angle que pouvait avoir le conduit de la cheminée. Les résultats de la fouille laissent envisager un four conique, cylindrique ou ovalaire à parois plus ou moins verticales. La proposition d'une paroi relativement verticale a été retenue pour l'expérimentation, elle se présente comme le principe architectural le plus à même de répondre à différentes contraintes. En effet, si la fouille n'a pas donné d'indication sur la hauteur de l'appareil, la réduction implique une certaine élévation du four. Au regard des très faibles épaisseurs relevées, il semble qu'une paroi curviligne très marquée aurait été extrêmement fragile et délicate à réaliser.

De même, un four de ce diamètre en ventilation forcée aurait nécessité un nombre important de personnes pour générer le flux d'air. Or, aucun aménagement ou trou de piquet pour fixer les soufflets n'a été retrouvé, ni aucune marque de travail au sol.

L'étude des tuyères a révélé qu'elles étaient probablement toutes perpendiculaires à la paroi et horizontale par rapport au sol. A l'examen, la sole ne recèle aucun impact thermique localisé, qu'une tuyère inclinée vers le bas n'aurait pas manqué de laisser. Cette proposition sur la position des tuyères conforte l'idée du tirage naturel. En effet, les fours à ventilation forcée déjà expérimentés ont généralement la tuyère orientée vers le fond du four, le flux étant dans ce cas assez puissant pour «pousser» la combustion assez loin du bec de la tuyère pour éviter sa fusion⁷⁷. Au contraire, le tirage naturel

⁷⁵ L'idée du tirage naturel n'est pas nouvelle, mais n'a qu'exceptionnellement été expérimentée pour la réduction du fer.

⁷⁶ Différentes études du Grand Ouest laissent envisager l'utilisation du tirage naturel sur des structures de grands volumes.

⁷⁷ Différentes fouilles et expérimentations proposent une fourchette de 10 à 30° par rapport à l'horizontal pour l'inclinaison de la tuyère en ventilation forcée. Leroy 2000, Dunikowski 1995, Tylecote 1971.

nécessiterait une tuyère horizontale pour éviter ce problème.

Les différentes tuyères retrouvées étaient majoritairement modelées sur un même format, ce qui laisse supposer qu'elles avaient le même volume. Fidèle à notre hypothèse d'un four à tirage naturel, nous avons choisi de les répartir dans la paroi, de manière à permettre une répartition régulière et ordonnée des gaz dans le four.

Les très faibles épaisseurs relevées pour les parois pourraient sembler inaptées à supporter la température nécessaire à une réduction, et surtout laisseraient craindre une déperdition de chaleur importante vers l'extérieur. Face à ce problème calorimétrique, il peut être intéressant de prendre en compte d'autres paramètres comme la pénétration des tuyères à l'intérieur du four. Les données relevées nous informent que l'échantillon le mieux préservé pénétrait encore d'environ 15 cm en fin de réduction, sans précision sur sa taille initiale. Cette avancée aurait permis d'obtenir une épaisseur d'isolation entre la paroi et la zone de réduction. Le milieu étant réducteur, ce combustible d'isolation n'aurait pas brûlé.

En effet, différentes expérimentations et des essais en forge ont bien montré que le charbon de bois est un bon isolant thermique. Le flux d'une tuyère chauffe ponctuellement, mais le feu ne se propage pas. Les essais de réduction en bas fourneau montrent assez la création de ces zones froides où dans des poches, le combustible est resté intact.

Enfin, on peut supposer que durant l'opération la gangue fondue du minerai serait passée par gravité sous l'éponge de fer en formation. Cette scorie aurait coulé sur le fond du four, très chaud car réverbérant la température de réduction et aurait fini dans la fosse de réception décentrée du four.

III. Les expérimentations

(tableaux 01 et 02)

L'équipe d'expérimentation était composée à l'origine en mai 2003 de Régis Aranda, forgeron et métallurgiste⁷⁸ et de Christophe Colliou, archéologue. Pour trouver des réponses à différentes questions et faire face à des problèmes liés à la fabrication des fours, François Peyrat, céramiste, fut intégré dans le groupe en fin d'année 2003. Les essais devaient permettre de tester en différentes étapes les divers concepts

⁷⁸ R. Aranda vendait officiellement du métal de réduction direct à l'époque de rédaction, d'où une incontestable connaissance et maîtrise dans le domaine de la réduction en ventilation forcée.

extrapolés à partir des résultats de la fouille, mais également d'amorcer une recherche sur le sujet mal connu du tirage naturel et le fonctionnement des fours de grand volume. Dans ces prémices, les données présentées ne s'attachent pas au problème du rendement en métal, encore très faible. Néanmoins, les expérimentations ont été considérées comme recevables pour alimenter la réflexion quand il y a eu production effective de fer. Plus de trente réductions en ventilation forcée ont éprouvé certains des résultats présentés.

Les conditions pour obtenir une validation archéologique d'un travail expérimental sont dépendantes de différents facteurs indispensables. Au premier titre, l'utilisation de matériaux correspondant au plus près à ceux retrouvés en fouille. Ainsi pour les essais, 1500 kg de minerai⁷⁹ ont été tirés d'une ancienne zone d'extraction, située à proximité du site de réduction et 1500 kg d'argile ont été prélevés sur les lieux même de la fouille archéologique.

De même, le combustible a été choisi pour être le plus proche possible de celui trouvé en fouille : du chêne, charbonné de façon artisanale.

Huit expérimentations en ventilation naturelle se sont déroulées de mai 2003 à juillet 2004.⁸⁰, dont un à l'échelle 1, durant la fête du fer à Paimpont en juillet 2003. Tous les fours réalisés étaient dotés d'une fosse à piégeage pour la scorie. Les préchauffages ont tous été réalisés au bois.

A/ Premiers essais

Les premières expérimentations devaient aborder la valeur de l'isolation thermique des parois fines et donner des indications sur le comportement d'un four en ventilation naturelle.

Un four cylindrique de 50 cm de diamètre monté en argile fut réalisé.⁸¹

B/ Proposition

On peut accepter que le flux sortant d'une tuyère en activité se compose de deux

⁷⁹La réductibilité du minerai récupéré sur le site a été testée en ventilation forcée.

⁸⁰L'association Hispamébro a fourni pour ces expérimentations ses locaux situés à Plélan le Grand (35) ainsi que le combustible.

⁸¹Ce premier four devait être simple à construire, et avoir une consommation faible.

grande zones : un dard oxydant inclut dans une sphère réductrice. La taille de chacun est variable, en fonction du débit d'air pénétrant dans la tuyère. Après divers essais réalisés dans un lit de charbon de bois en forge, la taille de cette sphère réductrice avait été estimée autour de 25 cm de largeur pour une ventilation « faible⁸² ».

C'est partant de cette hypothèse que deux tuyères reproduisant au plus près celles retrouvées en fouille furent placées à plat perpendiculairement à la colonne du four. Le volume envisagé pour la sphère réductrice devait remplir la zone du foyer. Dans un premier essai, elles furent enfoncées de 10 cm derrière la paroi, puis environ de 20cm pour l'expérimentation suivante. Une porte avait été taillée dans la paroi du four. Deux essais se sont succédés sur la même structure. La cheminée était complètement remplie de combustible au début de la réduction et maintenue à niveau durant toute l'opération

C/ Premiers résultats

Les expérimentations RED 01 et 02 ont montré que l'isolation de la paroi fine était suffisante pour une réduction. Seule la partie où est élaboré le métal et celle où doit se loger la scorie doivent être impérativement protégées des déperditions de chaleur. La ventilation naturelle donne un flux régulier, la dynamique du four s'auto équilibre. La hauteur de colonne du four a été déterminée avec RED 01 : le tirage ne semblait pas suffisant⁸³, RED 02 a donc été rehaussé, pour atteindre 102 cm au dessus des tuyères (fig. 05). Une hauteur allant de 100 à 130 cm semble adéquate⁸⁴. Un bain de scorie liquide fut obtenu dans les deux cas.

Il ressort des deux premiers essais que le préchauffage du fond du four est fondamental. Si la fosse de récupération de la scorie ne conserve pas une haute température, la scorie fige au niveau des tuyères et stoppe la réduction. Dans ces premiers essais, très peu de métal a été produit. Il est intéressant de constater qu'après deux réductions, les parois et une grande partie des tuyères n'étaient pas cuites et ont été réutilisées comme matière première pour la construction d'autres fours.

Durant la phase de préchauffage, il a été remarqué que plus le four se vidait, plus le

⁸² Ventilation crée à l'aide d'une soufflerie manuelle, après différents essais, les auteurs estiment que la convection devrait amener des résultats du même ordre.

⁸³ Selon l'expérience du métallurgiste.

⁸⁴ Ces constatations rejoignent les résultats obtenus avec la ventilation forcée. Leroy 2000.

tirage et la température augmentaient⁸⁵.

D/ Le four d'expérimentation démontable en terre cuite

Partant des premiers résultats constatés sur la tenue de la paroi, les expérimentateurs décidèrent de s'affranchir des problèmes de fabrication de la cheminée pour adopter un modèle de four avec une forme et un volume de foyer constants (fig. 06). Ce four d'expérimentation se composait d'une cheminée cylindrique en terre cuite constituée d'éléments assemblables⁸⁶.

Un premier essai (RED 04) réalisé avec les mêmes paramètres que RED 02 (deux tuyères à l'horizontal) et une conduite de feu similaire donna les mêmes résultats, à savoir une production de métal anecdotique.

Une température de fonctionnement trop basse fut jugée responsable du figement de la scorie.

L'essai suivant (RED 05) fut mené avec cinq tuyères, sans résultat probant. Le nombre plus élevé de tuyères n'avait pas permis d'augmenter la température dans le foyer. Il semblait nécessaire d'augmenter le tirage. Pour ce faire, et en tenant compte des observations faites lors du préchauffage de RED 02, dans l'essai RED 06 le four ne fut rempli qu'au tiers de son volume, donc, 15 à 20 cm au-dessus de la zone d'action des tuyères. La colonne était donc vide pour une grande partie, et devait alors jouer le rôle d'une cheminée de tirage. Cette partie pleine (en comparaison avec la partie vide) du four fut dénommée «zone de travail».

Le foyer fut doté de quatre tuyères et subit un indispensable préchauffage. Le four était régulièrement pigé pour vérifier le niveau. Durant la réduction, la température en sortie de tuyère et le tirage⁸⁷ augmentèrent par rapport à l'essai précédent. L'opération fut arrêtée au bout de 11 heures pour examiner les produits obtenus dans le foyer. Ainsi menée, la réduction permit d'obtenir une première éponge de fer compactable et la fusion de la scorie qui avait coulé au fond du four (fig. 07).

Pour RED 07, le four fut remonté avec six tuyères disposées en étoiles dans le but d'augmenter encore la température du foyer. La réduction fut menée avec les mêmes hauteurs pour la zone de travail et la cheminée vide. Pourtant, la température ne parvint pas à monter, la scorie figea et stoppa la réduction.

⁸⁵ La ventilation naturelle permet de suivre constamment la marche du four en regardant par la tuyère. La température fut appréciée par le forgeron en fonction de la couleur du foyer à travers les tuyères. Les couleurs allaient de l'orange clair à un blanc éblouissant.

⁸⁶ Cheminée réalisée par F. Peyrat, céramiste, hauteur totale : 120 cm, diamètre interne : 28 cm.

Partant des ces différentes constatations, les expérimentateurs menèrent une campagne de réduction en ventilation forcée pour vérifier la réalité de l'idée de cheminée vide. Trente réductions furent réalisées avec succès⁸⁸ et surtout une consommation de combustible en net recul, pour arriver dans certains cas à un rapport charbon-minerai inférieur à un.

Lors de nombreux essais en ventilation forcée, les expérimentateurs constatèrent qu'une fois la réduction bien engagée, avec une température globale du four suffisamment élevée et homogène, l'opération pouvait se poursuivre en tirage naturel.

L'expérimentation RED 08 reprenait un montage en étoile avec seulement trois tuyères, la réduction fut également menée avec la cheminée vide, mais du bois fut ajouté après chaque charge de minerai. Ce bois, en brûlant devait créer un appel d'oxygène, et par suite augmenter le tirage du four.

Ce système de « tirage artificiel » permet d'obtenir une coulée de la scorie vers le fond du four et l'élaboration du métal. Les résultats ne furent cependant pas satisfaisants : le four avait fonctionné très lentement (2 kilogrammes de charbon de bois par heure) et la température fut tout juste suffisante pour fluidifier la scorie, qui figeait rapidement.

IV. Bilan et proposition d'interprétation

Le four d'expérimentation a montré que l'idée de la cheminée vide, liée au tirage naturel peut fonctionner et que ce tirage peut encore être amélioré par l'ajout de bois sur la charge. Mais l'appareil s'est révélé extrêmement délicat à régler. Les expérimentateurs envisagent le bon fonctionnement d'un bas fourneau à ventilation naturelle comme étant directement lié à un volume minimal de la zone de travail. Dans cette idée, le four d'expérimentation, de part son volume de travail trop petit, ne pouvait préserver une température élevée et laissait figer la scorie à la moindre variation des différents paramètres.

A/ Discussion

Les expérimentations laissent supposer qu'un four colonne en ventilation naturelle devrait posséder pour fonctionner, un diamètre interne minimum de 60 cm au

⁸⁷ La qualité du tirage peut s'estimer à la hauteur des flammes au dessus du four.

⁸⁸ Ces réductions ont été réalisées dans le cadre du travail de R. Aranda, forgeron-métallurgiste, qui produit en routine du fer et de l'acier de bas fourneau. Les données du tableau 02 concernant le charbon sont des valeurs totales, préparation et charges.

niveau des arrivées d'air. Le volume nécessaire pour la zone de travail est alors estimé autour de 0.09 m³. Le volume de la zone active serait dans ces conditions suffisamment important pour permettre au four d'acquérir une inertie thermique propre à auto entretenir et équilibrer la réduction.

B/ Perspectives

Ces différentes hypothèses seront éprouvées durant la prochaine campagne d'expérimentation. Elle repose sur l'acquisition d'un four de 60 cm de diamètre, pourvu d'une cheminée de 130 cm. L'appareil devra être instrumenté pour suivre les variations de tirage en fonction des hauteurs de la cheminée et de la zone de travail. Il en sera de même avec les enregistrements des températures de la zone active en fonction du nombre de tuyères.

Bibliographie

ANDRIEUX J.-Y., BRULE. A., COIGNARD, J., FONTUGNE, M., HERBAUT, C., LARCHER, G., LOYER, S., MOINERAI, M., PLAINE, J., 1993, Fouilles 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*, 10, p. 101-114.

BENOIT, P., DILLMANN, P., TÉREYGEOL, F., COLLIOU, C., ARANDA, R., et DESCHAMPS, C., 2003, Cisterian mining and ironmaking at Fontenay (Côte d'Or, France). *Norberg-Nora, 700 years of ironmaking*. 2003. Norberg, (to be published).

BOCOUM, H., (Dir), 2002, *Aux origines de la métallurgie du fer en Afrique, une ancienneté méconnue*, ed. Unesco, 240 p.

COLLIOU, C., 2003, Recherche archéométrique sur la métallurgie par réduction directe en pays de Bray, *rapport n° 3 de prospection*, thème : métallurgie ancienne, Service Régional de l'Archéologie de Haute Normandie, Rouen.

DUNIKOWSKI, C., CABBOI, S., 1995, *La sidérurgie chez les Sénonis : les ateliers celtiques et gallo-romains des Clerimois (Yonne)*, DAF 51, Edition de la maison des

sciences de l'Homme, Paris.

FLUZIN, P., PLOQUIN, A., SERNEELS, V., 2000, Archéométrie des déchets de production sidérurgique, in : *Gallia*, n° 57, CNRS Editions, p. 101-121.

LEROY, M., 1993, *La sidérurgie ancienne en Lorraine avant le haut fourneau, étude du développement historique et des conditions techniques de l'utilisation du minerai oolithique lorrain (la minette) en métallurgie de réduction directe*. Thèse de doctorat de l'université de Franche-Comté sous la direction de M. Mangin.

LEROY, M., MERLUZZO, P., et al, 2000, La restitution des savoir-faire pour comprendre un procédé technique : l'apport de l'expérimentation en archéologie du fer, in : *Arts du feu et production artisanales, Actes des Rencontres 21-23 octobre 1999* Benoit P., Fluzin P. et al, (dir.), Ed. APDCA, Antibes, 628 p, p. 37-53.

MANGIN, M., (Dir), 2004, *Le fer*, ed. Errance, 239 p.

MARTINELLI, B., 2000, « Le choix de la combustion lente. Mutation technique et mutation sociale au Yatenga, Burkina Faso », In : *Arts du feu et production artisanales, Actes des Rencontres 21-23 octobre 1999* Benoit P., Fluzin P. et al, (dir.), Ed. APDCA, Antibes, 628 p, p. 37-53.

PETORIN, N., COLLIOU, C., *La Chaize-le-Vicomte (Vendée)*, La Guyonnière, 85046014AH, un bas fourneau du haut Moyen Âge, fouille de sauvetage urgent (à paraître).

SERNEELS, V., 1993, *Archéométrie des scories de fer, recherche sur la sidérurgie ancienne en Suisse occidentale*, Thèse de doctorat des Sciences de l'université de Lausanne.

TYLECOTE, J. N., 1971, The mechanism of the bloomery process in shaft furnace, in : *Journal of the Iron and Steel Institute*, may 1971, p. 342-363.

Annexes

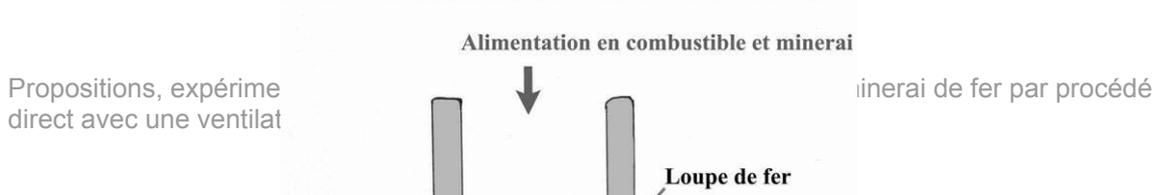
Tableau 01

	date	Nombre de tuyères	Ø du four, matière	figeage de la scorie	obtention de métal	hauteur de cheminée	avancée des tuyères
RED 01	25/05/03	2	60 cm, argile	non	oui, épars	88 cm	10 cm
RED 02	16/05/03	2	60 cm, argile	oui	non	110 cm	18,5 cm
RED 03	12/07/03	9	150cm, argile	non	oui, épars	120 cm	40 cm
RED 04	29/11/03	2	28 cm, argile cuite	oui	oui, épars	132 cm	8 cm
RED 05	10/01/04	5	28 cm, argile cuite	non	non	132 cm	8 cm
RED 06	11/01/04	4	28 cm, argile cuite	non	oui, loupe	132 cm	5 cm
RED 07	11/04/04	6	28 cm, argile cuite	oui	non	132 cm	5 cm
RED 08	10/07/04	3	28 cm, argile cuite	non	oui, épars	132 cm	5 cm

Tableau 02

	durée de la réduction	minerai total	charbon total	charge minerai	temps entre les charges	observations
RED 01	5 h	4 kg	30 kg		30 min	cheminée trop basse, manque de tirage
RED 02	7 h	47,6 kg	60 kg	2,8 kg	30 min	arrêt en cours pour vérification
RED 03	6 h	330 kg	706 kg	30 kg	30 min	arrêt prématuré
RED 04	12 h	8 kg	13 kg	500 g	15 min à 1 h	arrêt en cours pour vérification
RED 05	7 h	11.5 kg	25 kg	500 g	6 à 15 min	température de réduction non atteinte, tuyères bouchées
RED 06	11 h	20 kg	38 kg	500g	30 min	arrêt en cours pour vérification
RED 07	11 h	20 kg	42 kg	500 g	30 min	température de réduction non atteinte, tuyères bouchées
RED 08	6 h 20	8,5 kg	14 kg	500 g	30 min (variable)	arrêt en cours pour vérification

Schéma d'un four à scorie piégée



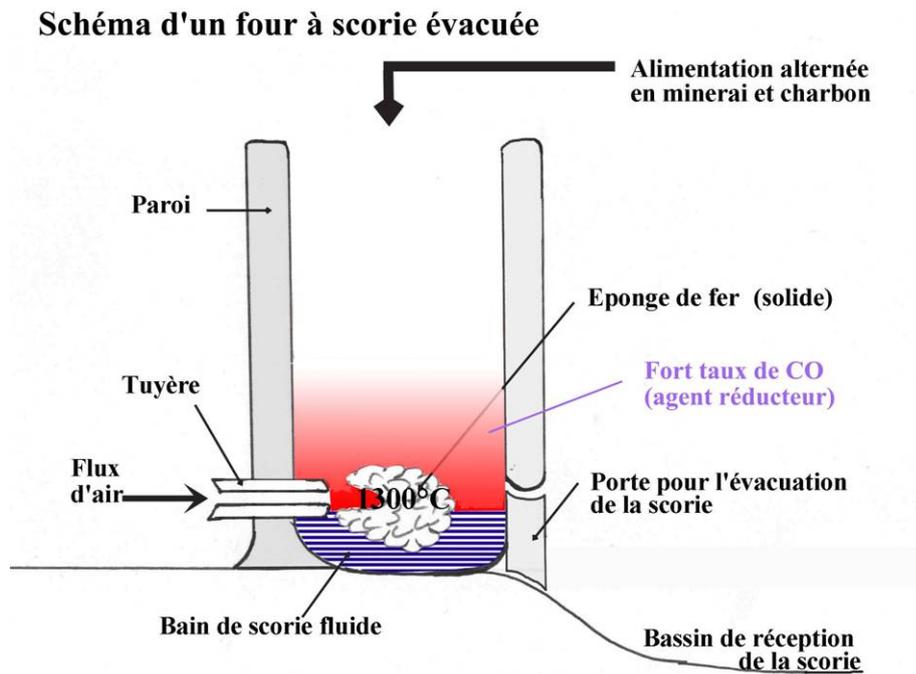


Fig. 01

Plan du site de fouille : La Guyonnière

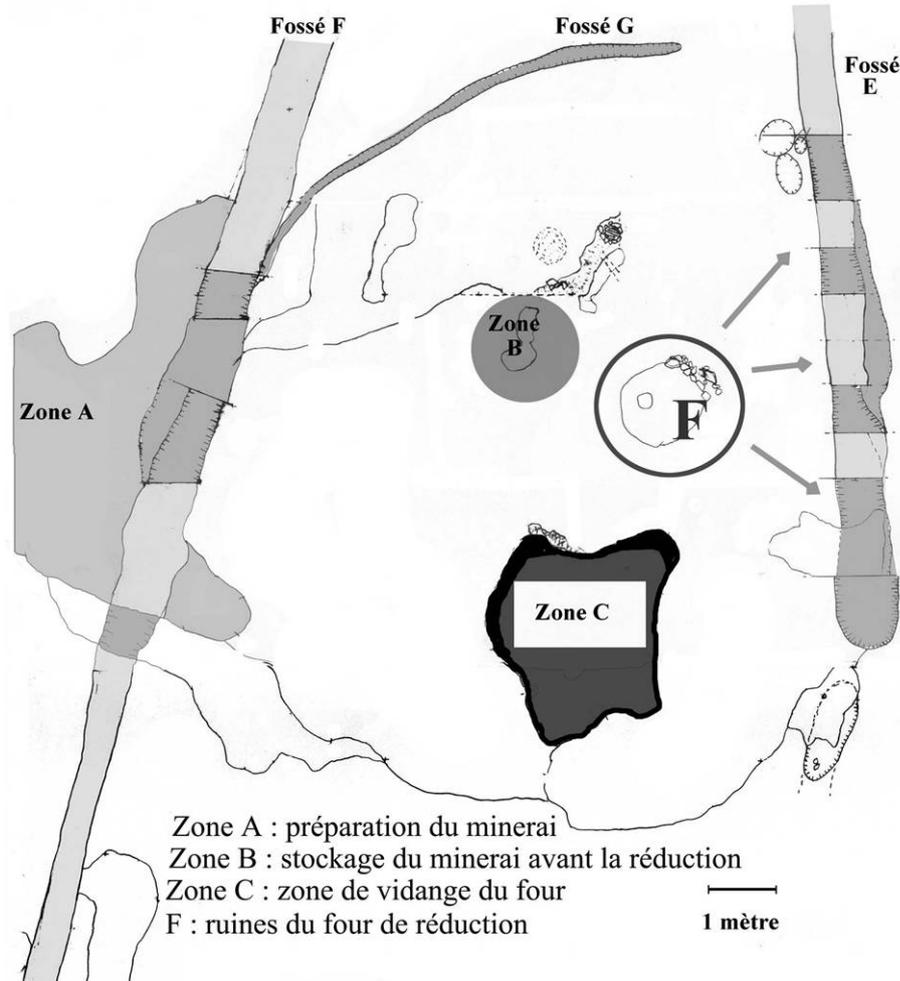


Fig. 02

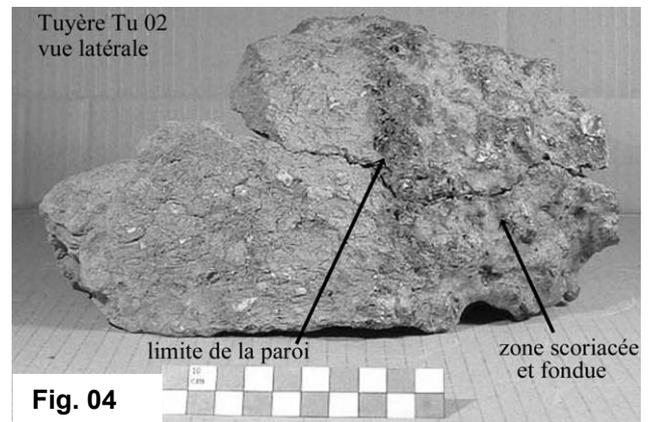
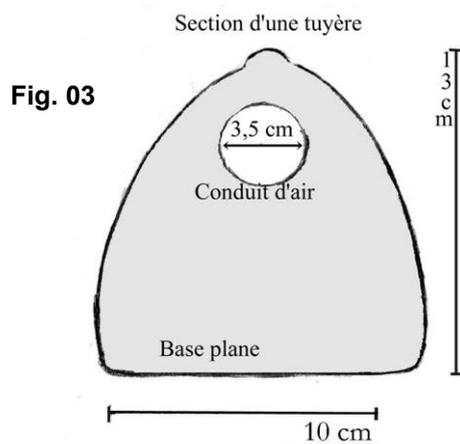




Fig. 05

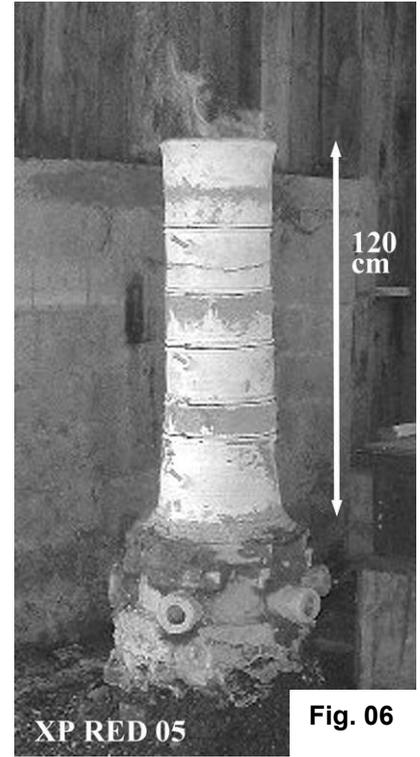


Fig. 06



Fig. 07

**Session d'expérimentation scientifique - Fête du Fer
2002**

(J.-B. Vivet)

Participants à l'expérimentation (conception, fonctionnement et mesures) :

Jean-Jacques CHAUVEL, docteur ès sciences et chercheur à l'Institut de Géosciences, Université de Rennes I, spécialiste des minerais de fer.

Le groupement des Artisans Métallurgistes (Terroret, 74 550 CERVENS), représenté par :

Philippe LERAY , forgeron et formateur, La Pronnais, 35 580 SAINT SENOUX
Ludovic MARSILLE, forgeron-coutelier, La Corne du Cerf, 35 380 PAIMPONT
Mael VAN DAALEN WETTERS, forgeron, Terroret, 74 550 CERVENS

Note : les figures sont placées en annexes

I. Introduction

Dès 1993, puis en 1994, après les premières recherches paléo-métallurgiques en Brocéliande, plusieurs tentatives de fabrication de fer en bas fourneau avaient été entreprises sous l'égide de l'Association des Amis du moulin du Châtenay, et sous la responsabilité de Guy Larcher (Larcher, 1993).

L'association Histoire, Patrimoine et Métallurgie en Brocéliande a repris cette volonté de retrouver les techniques anciennes de fabrication du fer, dès la première fête du fer en 1998, en particulier avec Ludovic Marsille, forgeron coutelier à Paimpont.

La 2^{ème} édition en 1999, puis les éditions de 2000 et 2001, ont vu se renouveler la construction de bas fourneaux, sous la responsabilité de forgerons : bas fourneaux de type japonais (tatara), qui donnent des résultats satisfaisants (obtention d'éponges de fer exploitables), mais dans des conditions expérimentales assez éloignées des données archéologiques.

II. expérimentation scientifique

La démarche qui conduit à fabriquer du fer en bas fourneau dans un cadre d'expérimentation scientifique, fournit une aide très substantielle au travail archéologique, pour plusieurs raisons :

- elle permet à l'archéologue une meilleure interprétation des données de terrain (structures de combustion découvertes, résidus métallurgiques, minerai grillé, système de ventilation ...)
- elle lui fournit également des arguments pour élaborer, face à ces données, des hypothèses de travail recevables, suffisamment éloignés des préjugés induits par les technologies actuelles, afin de faire ressurgir des savoir-faire anciens. Il faut noter à ce sujet toute la distance qui existe entre le fer obtenu aujourd'hui en procédé indirect (passant par la fonte en haut fourneau) et celui produit grâce au procédé direct en bas fourneau (avant le XV-XVI^{ème} siècle essentiellement).
- L'objet même du travail réalisé sur les sites de paléoméallurgie est quasiment toujours absent, et pour cause. On peut facilement imaginer que le temps et l'énergie mis en œuvre pour produire le métal par réduction directe du minerai de fer, en font un matériau précieux, et la loupe de fer (solide) qui sort du fourneau est exploitée à son maximum, de manière à donner naissance à un lingot forgeable, qui ne reste généralement pas sur place.

Un premier bilan de l'expérimentation 2002, peut être dressé, dans un registre extrêmement positif, allant même au-delà des objectifs fixés à l'origine.

A/ Extraction du minerai

Problématique du minerai et lieu d'extraction

Si l'on possède quelques données sur les exploitations très anciennes de l'étain et du plomb, en revanche les mines de fer exploitées avant la venue des hauts fourneaux, nous sont pratiquement inconnues. Le travail réalisé dans le bassin de Rance (Chauvel J-J., Vivet J-B. et Bonniol-Jarrier, 1999 ; Chauvel et Vivet, 2001) a permis de montrer qu'aux périodes protohistoriques et gallo-romaines, les hommes ont su reconnaître des gîtes ferrifères, très localisés, dans des secteurs où les cartes géologiques ne les mentionnent pas et où l'on ne note aucune ressource minière de grande ampleur. Il s'agit généralement d'hydroxyde de fer, du type goethite (FeO-OH), dont les

formations en boulet présentent les plus fortes teneurs en fer (50 à 60 % de fer métal). Ce minerai, d'altération de roches du tertiaire, est susceptible de se trouver en petites quantités, un peu près partout en Bretagne. Une des rares mines toujours en activité sur ce type de formation se situe à La Galivelais en Bain-de-Bretagne (fig.1). Celle-ci montre deux niveaux différenciés : un niveau inférieur se présentant sous la forme d'une sorte d'épaisse dalle ferrugineuse, et une couche supérieure argileuse, livrant du minerai de fer en boulets en grande quantité, dont le module dépasse la plupart du temps cinq centimètres (fig.2). C'est dans un front de taille de ce dernier type qu'ont été collectés, en trois heures, et à trois personnes, environ 250 kg de matière première destinée à l'expérimentation. Cette durée comprend le tri visuel avec fracture de chacun des blocs, qui a été opéré sur place. Parmi les éléments conservés, une sélection des blocs les plus prometteurs a été effectuée.

Seuls quelques rares gîtes de goethite ont pu être observés en prospection archéologique. Ils n'ont pu être aperçus qu'en tant que témoins de surface entamés par les labours. Outre une estimation de la difficulté et du temps nécessaire à l'extraction, cette opération a permis d'apprécier la façon dont peut se présenter ce minerai d'altération superficiel, dans un gîte ayant conservé des témoins exceptionnels de l'origine de sa formation (traces de phénomènes de battement au sein du grès et précipitation en boulet, dans un sol latéritique).

Réduction test en bas fourneau à Pléchâtel.

Cette opération préalable a été montée en vue d'observer, dans un premier temps, le comportement du minerai local. Le minerai a ainsi été réduit en poudre et amalgamé à l'aide d'un bocard mécanique, avec utilisation de farine comme liant. Une réduction dans un bas fourneau ventilé à l'aide d'un soufflet hydraulique à bras, a été opérée avant la fête du fer afin d'étudier la faisabilité de la réduction et le comportement du minerai. L'opération a nécessité de monter à des températures très élevées (non mesurées). Malgré cela la scorie que l'on a fait écouler un peu avant la fin de la réduction s'avère visqueuse. Elle se rapproche bien en cela de celles collectées sur les sites de l'Age du Fer et certains sites gallo-romains (Vivet, 1997, 2001, 2003, et 2006). Une masse de **21,28 kg** de minerai pur (hors liant) a été introduite. L'apport de charbon de bois (résineux) se monte en tout à 50 kg (10 kg pour le préchauffage du fourneau,

40 kg pour la réduction elle-même). Il en est résulté une loupe de fer de **5 kg** en sortie de four. La masse totale de loupe brute potentiellement exploitable se monte à **4,25 kg**. Elle se divise en un massiau métallique brut de **2,250 kg** et un ensemble de fragments contenant du métal plus disséminé, restant à grapper, s'élève à **2 kg**. Un travail de post réduction a été effectué sur le massiau de 2,250 kg obtenu. Ce travail a éliminé les parties scoriacées adhérentes au massiau brut, à rassembler le métal par compactage, en l'agglomérant en un lingot forgeable, tout en l'amenant à la nuance de carbone voulue (affinage). Il a conduit au façonnage d'un barreau de métal propre ('lingot') d'une masse de **1,450 kg**.

Dans l'attente des résultats d'analyse, cela constitue un résultat très correct (rapport loupe métallique exploitable / minerai de 20 %), surtout si l'on tient compte du fait que le fer disponible ne représente qu'une partie du minerai. En effet, le minerai utilisé ayant une teneur voisine de 64% en masse sur oxydes, soit 45 % en masse de métal pur, ce premier rendement brut de la réduction est voisin de 44 % .

Il est intéressant de noter que le métal issu du bas fourneau s'est révélé difficile à forger, nécessitant par exemple de nombreuses reprises d'un martelage très physique à chaud, d'où également une perte en matière, en combustible, et en temps, importante.

B/ Bas-fourneau à ventilation naturelle

Construction

La construction du bas fourneau a été réalisée en briques d'argile crues (fig. 3 et 4). Ce type de façonnage n'a pas réellement été observé en fouille, mais l'utilisation de pains d'argiles modelés à la main que l'on a pu observer aussi bien sur les fours de l'Age du Fer, que les fours gallo-romains (Vivet, 1997, 1999, 2001 ; Larcher, 1984 et 1989), ne s'en trouve pas très éloignée. Des impératifs de temps de montage et séchage pour la fête du fer, ont conduit à cette solution. L'argile a été prélevée sur place (à 300 m à peine du lieu d'expérimentation à Paimpont) et a été mélangée à une petite fraction de sable, jouant le rôle de dégraissant. Chaque brique a été formée

rapidement par introduction et compactage à l'aide d'un tas, dans un moule quadrangulaire, aux parois très légèrement obliques afin de permettre le démoulage. Deux cents briques ont ainsi pu être fabriquées en une journée et demi.

Le choix de l'emplacement du fourneau a été dévolu à une zone ouverte et en hauteur, autant pour permettre une libre circulation de l'air, que pour des raisons de sécurité. La préparation du terrain a consisté à creuser le sol sur 20 cm environ après avoir retiré la couche de gazon. Le sol sous-jacent présentant un aspect très caillouteux, la zone circulaire ainsi dessinée a été remplie d'une nappe d'argile dégraissée, planifiée au tas. Ce sédiment était également nécessaire au placement des sondes de température destinées à mesurer l'impact de l'opération de la chauffe sur un sol argileux (fig.5).

La construction proprement dite s'est faite par assemblage des briques à l'aide d'une fine couche d'argile, permettant à la fois de faire le joint et l'ajustement à l'horizontal des plans successifs. L'espace intérieur devant être circulaire avec rétrécissement du diamètre vers le haut, les briques ont été taillées à la forme voulue au fur et à mesure de l'élévation.

Le diamètre intérieur de la partie destinée à recevoir la loupe de fer est de 45 cm. Afin d'assurer une bonne isolation thermique, une « brasque » de 2,5 cm d'épaisseur a été apposée sur toute la surface interne du fourneau. Il s'agit d'un mélange d'argile fine réfractaire et de poussière de charbon de bois. Si l'existence d'un tel revêtement n'a pu être démontrée lors des fouilles archéologiques, elle n'est cependant pas impossible, si l'on tient compte du lessivage très aisé de ce type de matériau, par la pluie. Une série de poches de sédiment mou, blanc ou gris, charbonneux, rencontrée sur le site du Rocher Abraham en St Pierre de Plesguen (Second Age du Fer) pourrait trouver une explication dans ce type de technique (Vivet, 2001).

Au total, huit conduits d'aération rentrants, dépassant intérieurement d'une dizaine de centimètres, ont été installés régulièrement sur le pourtour du bas fourneau. Leur forme légèrement tronconique, détermine un diamètre intérieur compris entre 3 et 4 cm. Si l'observation archéologique livre plutôt un simple orifice traversant la paroi du four, le nombre et le diamètre de passage des vents, sont cohérents. Ainsi sur le site de La Ville Pierre II en Quévert (22), près de Dinan, les fourneaux mis au jour comportaient un nombre d'orifices de ventilation compris entre 6 et 12, pour la période de La Tène ancienne (Vivet, 2003). Les dizaines de fragments de ce type, découverts et dessinés (Larcher, 1989 à 1994 ; Guérisse, 1994 ; Vivet, 1997,2001, 2003) fournissent des

valeurs caractéristiques tout à fait semblables.

Fonctionnement en ventilation naturelle

Températures de fonctionnement

Les températures régnant dans les zones chaudes de combustion du charbon, puis production du gaz réducteur (CO) du bas fourneau, ont pu être évaluées grâce à un pyromètre optique permettant une visée à distance de l'ambiance interne du fourneau à travers les orifices de ventilation. Les valeurs obtenues au cours du temps sont reproduites au tableau 1.

Le four a subi un préchauffage au bois de plusieurs heures la veille au soir de l'opération. La mise en chauffe de l'appareil, qui a débuté à 14 h30, a duré un peu plus de 5 h. Au bout d'une heure, on pouvait déjà enregistrer une température de 1200 °C. Mais il a fallu encore un peu plus de 3 h de feu pour se situer au niveau des 1400 °C.

Il est particulièrement intéressant de noter que pendant deux heures on pouvait observer une dissymétrie dans la répartition des températures données par les tuyères. Les tuyères au vent fournissant des valeurs de 50 à 150 °C plus élevées que les tuyères sous le vent ou même latérales. Mais au bout de 2h30 les températures se sont parfaitement équilibrées dans tout l'appareil. Cet équilibre, régulièrement contrôlé, s'est maintenu ensuite pendant le temps restant de la réduction.

Au début de l'opération le vent était très modéré. Il est ensuite pratiquement tombé pendant toute la période essentielle de transformation.

Ces constatations sont, en soi, importantes. Elles montrent que la présence du vent n'est pas un facteur déterminant pour un bas fourneau fonctionnant en ventilation naturelle. S'il peut contribuer à son amorçage, il n'est pas indispensable à la réduction. Une telle observation avait pu être notée lors d'une session expérimentale de démonstration réalisée sur les fouilles préventives de l'autoroute A84, où abandonnant le soufflet en pleine opération, sur un four comportant une série de petits orifices en contrebas, on s'est aperçu qu'il fonctionnait tout seul (Dunikowki, Cabboï et alii, 2000).

On peut même se demander dans quelle mesure il ne peut pas être dans certains cas néfaste, s'il est trop violent par exemple, en introduisant une dissymétrie des

températures du four.

Cette considération suggère une interprétation intéressante du rôle joué par les bouchons d'argiles façonnés rapidement à la main et scoriacés, que l'on retrouve, jusqu'à présent uniquement en Haute Bretagne, et de façon récurrente sur certains bas fourneaux du Second Age du Fer (Larcher, 1994 ; Vivet, 2001 et 2006).

La température est montée dans le four à un niveau remarquablement élevé, atteignant jusqu'à 1486 °C, et s'est maintenue en moyenne à un peu plus de 1360 °C pendant toute la durée du travail de réduction du minerai, c'est à dire pendant 14 h.

Températures dans le sol

Afin d'étudier l'impact de la chauffe sur le sol sous-jacent, tel qu'on l'observe en fouille (Vivet, 2001, 2003), une série de six sondes de températures a été glissée à intervalles réguliers de 1,5 cm, sous le creuset (fond) du bas fourneau. A terme, à l'aide d'une modélisation des échanges thermiques traversant l'argile, il est envisagé de pouvoir obtenir les températures maximales atteintes dans un fourneau ancien et la durée de chauffe. En attendant les résultats de ce travail de longue haleine, l'évolution des températures qui a pu être enregistrée, s'avère très instructive . Ce type de démarche est susceptible d'intéresser les archéologues travaillant sur d'autres artisanats mettant en jeu un four, tel que celui d'un potier, saunier, ou verrier.

L'analyse des courbes obtenues (tableau 1) nécessiterait une étude plus poussée et de plus amples développements. On peut d'ores et déjà émettre un certain nombre d'observations importantes :

- On est frappé en premier abord par la faible température (quelques centaines de degrés après plus de 10 h de travail) régnant dans le sol, à quelques centimètres sous l'appareil en regard des hautes valeurs maintenues en son sein (de l'ordre de 1300-1400°C). Si la physique permet de s'attendre partiellement à un tel résultat, l'expérience seule permet de mesurer l'ampleur de l'effet constaté.
- Dans les conditions de fonctionnement réalisées, un temps de fonctionnement très long, de l'ordre d'une vingtaine d'heures est nécessaire pour produire un effet

durable dans l'argile. Notamment un effet visible de rubéfaction demande une température supérieure à 500 °C. Sans entrer dans des considérations plus complexes, ceci nous permet néanmoins d'approcher un peu mieux le temps de fonctionnement des bas fourneaux qui ont été fouillés et qui ont laissé des traces de rubéfaction bien marquées dans le sol tels que ceux du Rocher Abraham à St Pierre de Plesguen ou de La Ville Pierre II à Quévert (Vivet, 2001 et 2000). Une des limites de la méthode réside malgré tout dans le fait qu'il est difficile d'établir formellement si ces installations ont fonctionné une seule fois ou plus. On peut juste affirmer que dans ce dernier cas, que le nombre d'opérations dans la même structure reste très limité. Mais là encore l'expérimentation est susceptible de fournir une aide essentielle.

- Les courbes de température obtenues montrent très nettement un ' décollage ' des valeurs au cours du temps, en fonction de la profondeur. Après une période de montée très faible des températures, on observe une soudaine et régulière élévation de celles-ci. Comme cet accroissement a lieu juste après 100 °C, on peut conclure que le phénomène est lié aux caractéristiques de l'argile qui se trouvent modifiées par la déshydratation. Ce qui est plus étonnant est l'extrême durée du phénomène : pour la sonde 5 (11,5 cm sous le fond du creuset) il a fallu 15 h de chauffe avant qu'il n'apparaisse. Ces observations sont d'un intérêt certain pour l'examen des couches archéologiques des sols sur lesquels reposent les structures de combustion.

Résultats de l'opération

La quantité totale de minerai qui a été introduite est de **33,6 kg**. Le défournement a livré un bloc spongieux en forme de sphère aplatie épousant parfaitement le fond du creuset (fig.7). Cette loupe ferreuse a été immédiatement plongée dans l'eau du lac de Paimpont, ce qui a permis son refroidissement sans qu'on observe sa désagrégation. Un premier tri rapide sur place s'est traduit par une sélection en trois catégories de matériaux. En premier lieu du fer métal plus ou moins en réseau s'est formé, ce qui atteste, sans conteste de la réussite de l'opération. Ensuite on rencontre une matière ayant une certaine tenue, dans laquelle le fer est plus disséminé, mais récupérable, constituant un complément non négligeable. Enfin un matériau noir scoriacé, à brisure

vitreuse, correspond à la scorie, non exploitable.

Suite à cette opération de tri, la masse de loupe exploitable, sous forme de fragments contenant effectivement du métal, s'élevait à **7 kg**, pour une masse de scories rejetées, comme inutilisables, de 20 kg.

Les opérations dites de 'grappage', consistant à assembler et faire fusionner les fragments métalliques épars, ont permis d'aboutir à l'obtention d'une **masse de métal pur de 2, 350 kg**, sous forme de lingot forgeable.

Il faut souligner ici la réussite de cette opération en ventilation naturelle totale, comme un événement pratiquement jamais rapporté en expérimentation scientifique sur notre territoire avant 2002.

Il faut préciser par ailleurs que les parallèles en ce domaine, assez nombreux, renvoient aux exemples ethnologiques africains, suivis dans un certain nombre de cas par des scientifiques, avec des minerais et des méthodes sensiblement différents (LEROY, MERLUZZO, FLUZIN, LECLERE, AUBERT, PLOQUIN, 2000).

C/ Bas fourneau en ventilation forcée

Construction

De forme carrée et laissant un espace intérieur de 20 x 20 cm, sa construction, réalisée en briques cuites commerciales, s'inspire des fours japonais du type « Wakita » (fig.6). L'ensemble est serti dans une armature d'acier afin de permettre le déplacement du four et sa réutilisation ultérieure. La ventilation, forcée, consiste en un système de deux soufflets cylindriques à piston, actionnés manuellement. Une masse de 41,2 kg de charbon a été utilisée, se répartissant en 10 kg pour le préchauffage du four et 31,2 kg pour l'opération de réduction proprement dite.

Résultats bruts de l'opération

La quantité totale de minerai qui a été introduite se monte à **16,4 kg**. Le préchauffage a duré 45 minutes tandis que la réduction proprement dite a nécessité 2 h30. L'opération

de réduction s'est déroulée avec succès puisqu'elle a abouti à la formation d'une loupe au départ bien rassemblée et laissant voir le métal brillant après immersion dans l'eau d'une masse de **6 kg**. Cette belle compacité originelle n'a cependant pas résisté au premier travail d'épuration. Le grappage s'est, en effet, révélé difficile à réaliser en raison de la présence de nombreux oxydes interstitiels. Une masse proche de **1 kg** de métal a ainsi pu être rassemblée.

Tracéologie et typologie des scories.

a) Mise en place et défournement.

Devant la 'porte' du four a été aménagé un terrain comportant différents types de support, de manière à pouvoir examiner l'interaction existant entre la scorie en fusion et différents matériaux, et observer les traces laissées par ceux-ci. On a ainsi disposé successivement : un sol de cailloux de module centimétrique, un passage d'herbe rase (gazon), un lit de charbons de bois, une mare d'eau boueuse, et enfin un lit de feuilles de chêne. Le démontage de la porte ayant généré une accumulation d'argile cuite, il faut ajouter ce matériau incontournable à la liste.

La température du four, mesurée au pyromètre optique, juste avant la coulée était comprise entre 1490°C et 1507 °C. Une lecture dans l'ouverture béante du four après démontage de la « porte » donne une valeur de température ambiante du fourneau comprise entre 1250 et 1300 °C. Au cœur de l'écoulement de la scorie on obtenait une valeur de 1260 °C. Malgré la faible longueur d'onde à laquelle travaille l'appareil (0.55 µm), il est probable qu'il faille corriger cette valeur en tenant compte du facteur d'émissivité de la scorie. Si l'on peut assimiler cette matière en fusion globalement à de la fayalithe (Fe_2SiO_4), sorte de silicate de fer, le coefficient d'émissivité de ce type de matière, est, par contre, plus difficile à déterminer.

Le rayonnement de la loupe de fer, disposée sur le sol au dehors, donnait une valeur de 1150 °C, sans correction également.

Scories spongieuses

Un des aspects importants recherchés, mais que l'on pouvait difficilement prévoir, était de reconnaître dans quelles conditions pouvait se former une scorie d'aspect très bulleux telle que celle que l'on peut observer sur une série d'une douzaine de gros ferriers en élévation (plusieurs centaines de m³) présents sur le massif de Paimpont. Les récents sondages archéologiques réalisés de 2002 à 2005 sur les sites de Trécélien et du Vert Pignon permettent de les attribuer globalement à la fin du Moyen Age – début de l'époque moderne (XIV-XVI^e siècle).

L'expérimentation nous a, par chance, fourni ces scories tout à fait inhabituelles en expérimentation. Elle nous montre de plus que ce type de phénomène peut se produire au moins en deux occasions. Une première série provient des phases situées immédiatement après la porte du fourneau. On peut expliquer ce phénomène comme résultant d'une brusque détente des gaz présents au sein de la matière liquide, de température élevée. Le refroidissement, en augmentant la viscosité du milieu, provoquant une cristallisation rapide de la fayalithe en surface empêche les bulles de s'échapper à l'air libre. D'où l'aspect très spongieux, aux porosités multiples et millimétriques, observé.

Un deuxième cas peut générer également ce phénomène : le passage dans l'eau boueuse a engendré un bouillonnement spectaculaire et prolongé (quelques minutes), qui a également donné naissance à une scorie bulleuse. Contrairement à ce que l'on aurait pu s'attendre la scorie n'a pas été réduite en milliers de fragments sous cet effet, mais a conservé un aspect massif, non divisé. L'aspect bulleux constaté peut être interprété d'une manière similaire au cas précédent, mais le gaz mis en cause ici, pourrait être la vapeur d'eau (H₂O), au lieu, vraisemblablement, du monoxyde de carbone (CO) et le diazote (N₂) pour le cas précédent.

Traces observées à la surface inférieure des scories.

Le dépouillement soigné et l'étude comparative de ces traces avec celles observées sur le mobilier archéologique de différentes périodes et de différents lieux géographiques exige un temps et un recul certain. Les clichés des échantillons collectés fournissent déjà une première base de données brutes, à exploiter.

bilan massique qualitatif et quantitatif

Si la mesure des masses entrant dans fourneau (minerai et charbon) et celle de la masse de fer obtenue est couramment pratiquée en expérimentation, un relevé systématique de l'ensemble des matériaux intervenants simultanément dans le processus physico-chimique de réduction du minerai de fer et ainsi que des composants présents dans les produits métallurgiques formés (scories et fer) est rarement pratiqué.

L'objectif visé ici est de réaliser un bilan massique global au sens chimique du terme (bilan partiel, élément par élément), de manière à voir quels éléments chimiques entrent réellement en jeu (majeurs, mineurs et traces, terres rares), de préciser leur provenance et leur intégration dans la matière produite.

Il s'agit en même temps d'apprécier ce type de filiation sur un minerai représentatif, disponible localement.

Ainsi il a été décidé d'effectuer les analyses des matières suivantes :

- minerai de fer
- cendres de charbon de bois
- argile ayant servi au revêtement interne du fourneau
- scorie de réduction
- fer métal de la loupe

Les analyses réalisées (C .R .P.G. de Nancy pour les minerais et scories), sont reprises dans le chapitre analyses des produits de la réduction directe développés infra par Jean-Jacques CHAUVEL.

L'analyse du métal d'un fragment de massiau juste compacté, a été confiée aux bons soins du C.T.I.F. (Centre Technique des Industries de la Fonderie à Sèvres), qui opéré

de manière semi-quantitative en fluorescence X et par absorption Infra-Rouge des gaz formés par combustion en four à Haute Fréquence.

L'ensemble des résultats est en cours de traitement. Ils sont susceptibles de donner lieu à de futurs développements concernant divers aspects que posent l'interprétation des résidus métallurgiques mise au jour au cours des opérations archéologiques, comme par exemple :

- Rôle du charbon de bois dans le pourcentage en calcaire des scories, pour un minerai n'en contenant pas.
- Concentration d'éléments traces dans les scories ou dans le fer métal. Filiation minerai-scorie, mais aussi filiation minerai-métal pour l'identification de la provenance d'objets en fer anciens ou antiques mis au jour.

Notion de rendement du fourneau (masse de fer métal obtenue par rapport à la masse de fer existant dans le minerai introduit)...

III. Conclusion :

Il faut noter, en premier lieu, la bonne réussite des opérations de réduction, qui ont bien abouti à la production de fer à partir d'un minerai qui n'avait pas été jusqu'ici testé (de façon moderne) en bas fourneau, et dont on ne connaissait pas le comportement. Si cet aspect mérite d'être souligné c'est qu'un nombre non négligeable de reconstitutions archéologiques, partant de conditions opératoires observées sur le terrain, il s'entend, ont rencontré de grandes difficultés à produire une faible quantité de fer, voire même à ne pas en livrer la moindre once. Le bon fonctionnement obtenu à notre époque, en ventilation naturelle, peut être considéré, à ce titre, comme un exemple jusqu'ici exceptionnel dans nos régions septentrionales, et il faut louer, en la matière, toute l'expérience et la sagacité de l'équipe de forgerons dans la mise en œuvre de ce travail expérimental et scientifique.

L'expérimentation a ainsi au moins pu prouver la faisabilité d'un mode de fonctionnement de ce type à l'Age du Fer notamment, avec des minerais d'origine

semblable à celle observée pour les résidus de minerais 'grillés' archéologiques. L'hypothèse d'un travail de réduction sans utilisation de soufflets est donc recevable pour cette période en Bretagne, au moins pour des bas fourneaux de diamètre de l'ordre de 45 cm.

Les données expérimentales rassemblées fournissent amplement matière à une publication dans une revue scientifique. Par ailleurs, la démarche suivie et les principaux résultats obtenus dans le cadre de ce type d'études mériteraient sans nul doute une diffusion plus large auprès du grand public.

**Analyse des produits de la réduction directe
expérimentation 2002**

(J.-J. Chauvel)

note : Les figures et les tableaux 3 et 4 sont en annexe

I. Le matériel analysé

La réduction a été conduite dans un four de briques dont l'intérieur a été revêtu d'un enduit argileux.

La réduction a nécessité l'emploi de :

33 kilos de charbon de bois

20,60 kilos de minerai

Pour étudier les variations de typologie de la coulée de scorie, celle-ci a été dirigée, à l'issue de la réduction, soit sur sol humide, soit sur sol couvert d'herbe, soit sur sol couvert de débris de charbon de bois.

Le matériel récupéré à l'issue de la réduction comprend :

scories

massiot : 6 kilos

L'abondance de petits fragments de fer dans la scorie du massiot a rendu son analyse totalement impossible.

Les matériaux suivants ont été soumis à une analyse chimique complète (54 éléments) :

Argile de l'enduit (éch. JBV 133)

Cendre de charbon de bois (éch. JBV 134)

Minerai (éch. JBV 130)

Scorie sur sol (éch. JBV 131)

Scorie sur herbe (éch. JBV 132)

Scorie sur charbon de bois (éch. JBV 129)

II. Les analyses chimiques

Les analyses ont été confiées au Service d'analyse des Roches et des Minéraux (SARM) du Centre de Recherche Pétrographique et Géochimique (CRPG) de Nancy. Les résultats sont regroupés dans le tableau 1.

Afin d'étudier la filiation entre le minerai et les scories, ainsi que les possibles apports dus aux cendres et à l'enduit interne, les résultats des analyses ont été normalisées par rapport à la composition des chondrites, à la composition de la croûte supérieure (CCS) et à celle de la moyenne des shales d'Amérique du Nord (NASC).

Il est difficile de trouver une référence intéressante pour la normalisation des teneurs en éléments traces, dans la mesure où les scories ne correspondent pas à un matériel naturel. Compte tenu des conditions de cristallisation j'ai pris le parti d'utiliser la composition du manteau.

Les analyses de référence utilisées pour ces calculs de normalisation sont issues des travaux de :

Boyton (1984) pour les chondrites

Mc Lennan (2001) pour la CCS

Haskin *et al.* (1968) pour le NASC

Pearce & Parkinson (1993) pour le manteau

La composition moyenne des scories a d'autre part été normalisée à celle du minerai. Pour un élément donné, X, le terme « taux d'enrichissement » utilisé pour l'étude des scories est l'équivalent du terme « teneur normalisée » et est noté X_N avec : $X_N = \text{teneur scorie} / \text{teneur minerai}$

Le même type de calcul a été conduit pour l'argile et pour les cendres afin de déterminer les apports possibles.

Pour les éléments significatifs dont la teneur est située au-dessous de la limite de détection, c'est cette teneur limite qui a été arbitrairement utilisée afin de rendre possible le calcul de normalisation.

A/ L'argile de l'enduit interne du four

Dans l'argile utilisée, la somme $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ représente environ 95% du poids sec. Les teneurs en MgO et K_2O sont faibles et les éléments alcalins ne sont pas détectables. Il s'agit donc d'une argile dont la composition est très voisine de celle d'un kaolin associé à un peu de quartz (environ 6 à 7%).

La somme des éléments en traces est plus élevée (1481,41 ppm) que dans le minerai (900,03 ppm). Les teneurs normalisées aux minerais montrent des enrichissements variables, mais qui ne paraissent significatifs que pour Bi ($\text{Bi}_N = 13,88$), Sn ($\text{Sn}_N = 16,51$) et Ta ($\text{Ta}_N = 10,13$).

La somme des Terres Rares (391,43 ppm) est également supérieure à celle du minerai (110,04 ppm), mais, quel que soit l'élément considéré, la teneur normalisée reste toujours voisine de 3.

Le fractionnement des Terres Rares (TR) légère est plus accentué que celui des TR lourdes et l'anomalie en Eu_N est égale à celle du NASC (tab.3 – fig. 1)

B/ Le charbon de bois

Le charbon de bois utilisé est issu de la transformation de bois de pin en provenance d'Europe du Nord.

La combustion d'un échantillon a fourni une masse de cendre correspondant à 6,7% du combustible. L'analyse de ce matériel résiduel (tab.1) montre une perte au feu de 44,67% qui ne peut être attribuée qu'à la persistance, dans le matériel analysé, de très abondants fragments de charbon. Sur cette base, on peut calculer que le résidu incombustible représente 3,7% de la masse initiale. Il est alors possible de proposer une composition recalculée pour la cendre du charbon de bois utilisé ici.

SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	TiO_2	P_2O_5
2,31	0,20	0,63	0,49	8,25	51,42	0,11	30,6	<	5,99

La composition chimique de la cendre (ci-dessus et tab.1) est caractérisée par une grande pauvreté d'où émergent des anomalies très significatives :

- *éléments majeurs* : CaO et K₂O. Ces éléments sont absents ou très peu présents dans le minerai : CaO_N. = 514,2 et K₂O_N = 51,86. Il en est de même, mais dans une moindre mesure, pour MgO et P₂O₅.
- *Eléments en traces* : les cendres contiennent environ 3 fois plus d'éléments en traces que le minerai. Ceci est dû essentiellement aux fortes anomalies en Sn, Cu, Sr, Rb et surtout Zn pour lequel la teneur atteint 1098 ppm (Zn_N : 40,80).
- *Terres Rares* : la somme des TR est inférieure à 10 ppm et seuls La et Ce dépassent 3ppm. Le fractionnement est très accentué (48,56) et l'anomalie en Eu_N est accompagnée d'une faible anomalie en Ce_N (tab.3 – figé.1)

La comparaison des résultats de l'analyse de cendre avec les quelques autres analyses disponibles (tab.2) est extrêmement instructive et mérite de retenir brièvement

l'attention. Deux remarques s'imposent :

- quelle que soit l'essence, les cendres sont toujours significativement riches en P, K, Ca et Mg et, moins systématiquement, en Si, Al et MN ; elles sont toujours pauvres en Ti et Na.
- La composition des cendres est très variable, non seulement d'une essence à l'autre mais également au sein d'une même essence

En aucun cas l'étude précise des produits obtenus par réduction directe ne peut donc se satisfaire d'une analyse moyenne de cendre tirée de la littérature.

		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	Total
cendre de chêne	C. Bonniol	34,74	3,33	2,78	0,8	6,02	12,57	0,92	34,67	0,09	4,07	100
cendre de chêne	De Montmollin	14,51	8,71	0,92	3,36	8,4	54,39	0,76	6,95	0,31	1,68	100
cendre d'orme	De Montmollin	19,85	2,2	1,11	0	4,02	57,77	0,57	8,08	0,14	6,27	100
cendre d'érable	De Montmollin	14,67	2,45	1,24	0,09	3,97	61	0,31	10,76	0,16	5,35	100
cendre d'aubépine	De Montmollin	7,79	1,17	0,69	0	4,57	70,07	0,42	9,76	0,06	5,47	100
cendre de charme	De Montmollin	4,21	1,63	0,46	7,49	3,42	66,98	0,21	9,49	0,09	6,01	100
cendre de pin	JBV 134	2,31	0,2	0,63	0,49	8,25	51,42	0,11	30,6	<0,05	5,99	100

Tableau 2 : analyses de cendres

(Sources : C. Bonniol, Thèse de l'Université de Toulouse [1993] - de Montmollin, communication personnelle)

C/ Le minerai

Le minerai provient de la minière de La Galivélais (Saint-Sulpice-des-Landes [35]) et après pulvérisation a été amalgamé avec un liant organique. La présence de ce liant se traduit par une perte au feu (18,37%) plus élevée que dans les minerais de ce type (environ 10 à 12%). Comme dans la plupart des minerais de cuirasses superficielles en Bretagne, les seuls éléments majeurs significativement présents, outre Fe, sont Si et Al. La teneur en phosphore est de 1%.

La faible teneur en traces (900 ppm) et en TR (110 ppm) est également très caractéristique de ce type de matériel.

La courbe de normalisation au manteau (fig.3) montre que si les teneurs en TR lourdes sont voisines de celles du manteau, les TR légères sont, par contre, très enrichies. Le profil de la courbe de normalisation aux chondrites (fig.3) est très voisin de celui de la courbe fournie par la CCS avec cependant une anomalie en Eu_N nettement plus accentuée.

D/ Les scories

L'examen du tableau 1 et de la figure 1 amène les remarques suivantes :

- les 3 échantillons de scories ont des compositions quasi identiques, sauf en ce qui concerne la teneur en Pb qui est significativement plus élevée dans la scorie coulée directement sur le sol. On peut penser que l'origine de cette anomalie est à rechercher dans l'enrichissement en Pb des sols actuels, en zones rurales, du fait de la présence des plombs de chasse;
- le profil de la courbe de normalisation au manteau est très voisin de celui de la courbe fournie par le minerai, sauf en ce qui concerne Pb et P ;
- le profil de la courbe de normalisation aux chondrites est voisin de celui de la courbe fournie par le minerai et les taux de fractionnement sont équivalents (tab.3).

On peut donc en conclure que si les scories coulées sur des supports différents ont des caractères morphologique différents elles sont, par contre, remarquablement homogène sur le plan de la composition chimique.

Pour la comparaison entre les scories et le minerai dont elles sont issues on utilisera donc la composition moyenne des 3 échantillons analysés.

III. Bilan chimique

L'un des plus importants problèmes posés par l'étude des chantiers paléosidérurgiques est le suivant : à partir des échantillons de scorie préservés peut-on se faire une idée précise du minerai utilisé et de l'utilisation possible d'un fondant ?

Les outils disponibles pour tenter de répondre à cette question sont nombreux, mais aucun d'entre eux ne permet à lui seul de fournir une réponse fiable. Le bilan chimique d'une opération de réduction directe est l'un de ces outils, sans doute l'un des plus précis, mais aussi certainement l'un de ceux dont la manipulation demande le plus de précautions.

L'opération réalisée à Paimpont en Juillet 2002 permet de tenter une première estimation du bilan de matière, estimation encore imprécise et incomplète qui devra être précisée ultérieurement, en particulier en ce qui concerne la caractérisation chimique des divers types de scories

A/ Fractionnement des éléments

Lors de la réduction directe, les interactions entre les constituants de la charge sont nombreuses et souvent complexes (fig.2).

La masse active pour les constituants essentiels de la charge s'établit comme suit :

Minerai :

Masse brute : 20.600 g

Perte au feu : 3.800 g

Masse active : 16.800 g

SiO₂ : 1910

Al₂O₃ : 1320

Fe₂O₃ : 13190 (soit 9225 g de Fer métal disponible)

Combustible :

Masse brute : 48.300 g

Masse active : 1800 g

MgO :	149
CaO :	926
K ₂ O :	551
P ₂ O ₅ :	105

Soit au total :

Masse brute : 68900 g

Masse active : 18600 g

		% de la masse active
SiO ₂ :	1910 g	10,25
Al ₂ O ₃	1320 g	7,10
Fe ₂ O ₃	13190 g	70,90
MgO	149 g	0,80
CaO	926 g	4,97
K ₂ O	551 g	2,96
P ₂ O ₅	105 g	0,56

Ce simple calcul montre à l'évidence que l'apport dû au combustible est loin d'être négligeable puisqu'il représente presque 10% de la charge active.

Le calcul des coefficients de partage entre la loupe et les scories peut théoriquement être établi à partir de ces données. Il se heurte toutefois dans l'état actuel des données disponibles à plusieurs difficultés :

- il est impossible de chiffrer les apports de la paroi même si les données obtenues ailleurs inclinent à penser que ces apports restent très faibles et localisés aux scories de parois ;
- il n'a pas été possible de peser avec précision l'ensemble des scories et en particulier d'évaluer la part qu'elles occupent dans le massiot de 6kg ainsi que l'importance des scories restes accrochées aux parois.

Pour lever en partie cette difficulté les teneurs fournies par les analyses de scories ont été normées à celles qui sont fournies par l'analyse du minerai (fig.3 – tab.4). L'examen des résultats est particulièrement instructif et l'on doit noter les faits essentiels suivants :

- * le taux d'enrichissement des TR varie très peu autour d'une valeur moyenne de 2,55
- * la plupart des éléments en traces ont un taux d'enrichissement identique (2,4 à 2,7) sauf en ce qui concerne (fig.4):
 - a. As, les éléments dont le n° atomique est compris entre 23 et 32, ainsi que Sn et Cs dont le taux d'enrichissement est inférieur à 1,7
 - b. Sr, Be
- * on retrouve ce même taux de 2,55 pour Al_2O_3
- * Sr, CaO et K_2O ont des taux d'enrichissement très nettement supérieurs à 2,55.

La synthèse de ces données conduit à l'interprétation suivante :

- lors des phénomènes de fusion qui accompagnent la réduction du minerai, les éléments constitutifs des différentes phases minérales se concentrent plus ou moins aisément dans la phase fondue, les éléments dits compatibles quittant aisément les réseaux cristallins. C'est à ce groupe qu'appartiennent tous les éléments, majeurs, en traces et TR, pour lesquels le taux d'enrichissement est voisin de 2,55. Ces éléments incompatibles ont donc tendance à se concentrer dans les scories.
- Les métaux de transition (N° atomique de 21 à 30) et les sidérophiles n'appartenant pas à ce groupe (Ga, Ge et Sn) ont tendance à suivre le fer et vont l'accompagner lors de sa concentration dans la loupe.
- As est aisément sublimable. Aux températures atteintes lors de la réduction, As disparaît très vite du cortège des éléments en présence.
- Sr, CaO et K_2O étant apportés par le combustible la normalisation par rapport au minerai n'a guère de sens, les coefficients d'enrichissement traduisant uniquement l'absence de ces éléments dans le minerai et sa présence exclusive dans la cendre.

Il est donc possible de considérer que le taux d'enrichissement calculé sur les TR et les incompatibles correspond à l'enrichissement des scories résultant du départ de l'eau de constitution et du piégeage du fer dans la loupe.

La charge de minerai correspond à environ 9 k de fer disponible. La loupe ayant piégé au maximum 6 k de fer, on peut penser que les scories en ont retenu au minimum 3 k.

Compte tenu de leur composition moyenne, le poids des scories devrait atteindre 8k. La masse active étant de 18,6 k et le poids de la loupe de 6 k, on doit estimer le poids des scories à environ 12,6 k. Cette différence est due au fait qu'on surestime très certainement le poids du fer de la loupe, dans la mesure où il est accompagné par un poids inconnu de scories. A titre de test, et si on estime à 4,5 k le poids de fer du massiot, on peut calculer un poids total de scorie de 12k, très cohérent avec les données.

Dans l'état actuel des données disponibles, il est donc difficile de vérifier quelle est la validité de l'outil géochimique et en particulier des coefficients d'enrichissement scorie/minerai.

IV. Conclusion

Cette première approche avait pour but de tester l'utilité et la validité des outils géochimiques dans la compréhension des phénomènes de réduction directe et dans les procédés de reconstitution des chaînes de traitement à partir des données fournies par les chantiers palæosidérurgiques.

Les résultats obtenus sont de valeur inégale, mais sont de première importance pour la conduite des expérimentations ultérieures.

A/ Les résultats positifs

- La contribution du combustible est significative en particulier en ce qui concerne les éléments alcalins. Dans le cas étudié ici les apports par le charbon de bois représentent environ 10% de la masse active.
- Les modifications induites par le support dans les scories coulées ne sont accompagnées d'aucune variation significative de la composition
- Lors de la réduction, les éléments sont fractionnés de la manière suivante :
 - o élimination des éléments volatils (H₂O) et sublimables (As, Zn)
 - o concentration d'une partie du fer dans la loupe où il est accompagné par les éléments incompatibles et par les sidérophiles. Le taux de

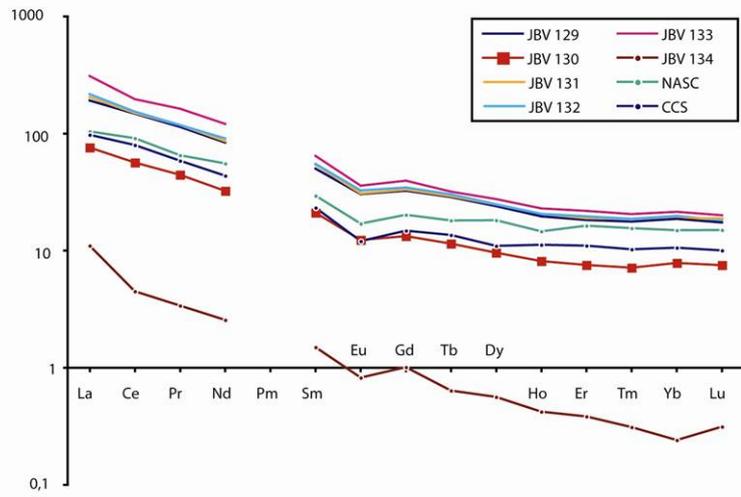
concentration est constant pour tous ces éléments. *Cette interprétation est basée sur le postulat suivant : il n'y a pas de fractionnement entre les divers types de scories.*

B/ Les problèmes résiduels

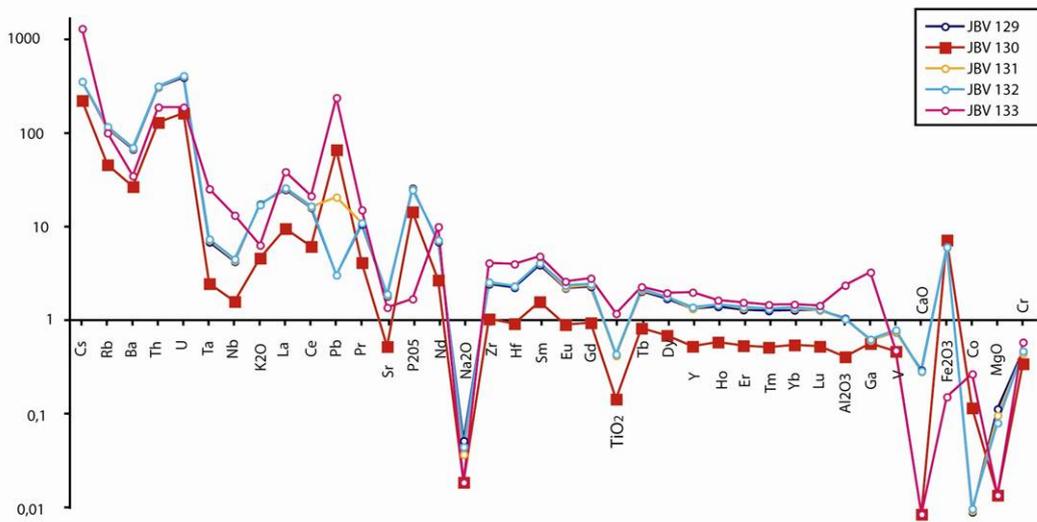
Lors des prochaines opérations de réduction, il est absolument indispensable de faire le nécessaire pour pouvoir approcher au plus près :

- le poids des divers types de scories
- la composition de chaque type de scorie
- une évaluation plus précise du rapport cendre/charbon de bois

Nota : dans l'étude qui précède les teneurs normalisées au minerai (ou taux d'enrichissement) sont établies sur les teneurs en % du matériel utilisé. Pour les transformer en coefficient de partage (quantité de Fe des scories/quantité de Fe du minerai) il est nécessaire de les pondérer en fonction du poids total de chacun des matériaux intervenant dans le bilan.



Normalisation aux chondrites C1



Normalisation au manteau

JBV 129 : scorie sur charbon de bois
 JBV 130 : minerai
 JBV 131 : scorie sur sol
 JBV 132 : scorie sur herbe
 JBV 133 : argile de l'enduit interne
 JBV 134 : cendres de charbon de bois
 NASC : North American Shale Composite
 CCS : CroÛte continentale supŽrieure

Figure 1 : Normalisation des analyses

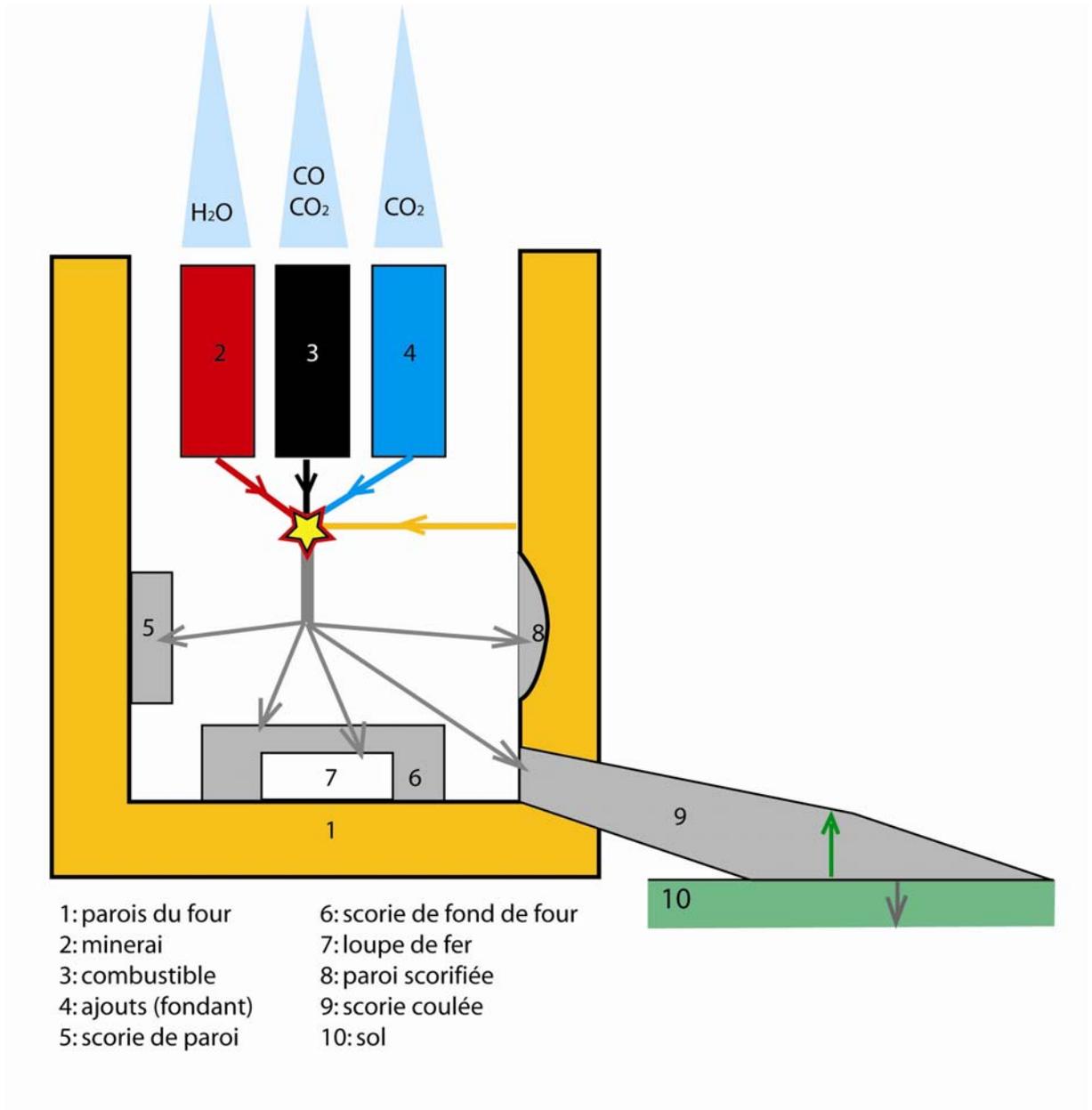
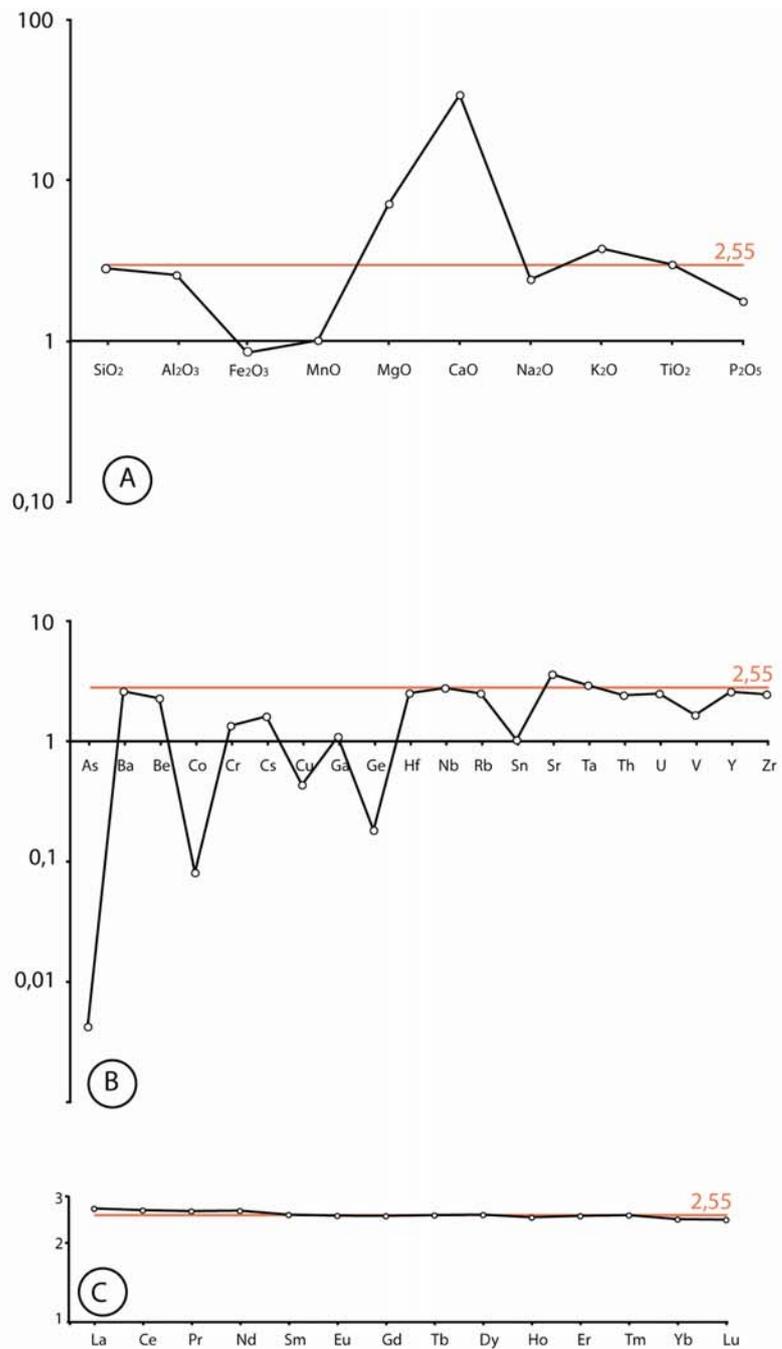


Figure 2: Bilan schématique du fractionnement des éléments lors d'une opération de réduction directe



Les variations du taux d'enrichissement en Terres Rares sont faibles (de 2,44 à 2,69). La valeur moyenne (2,55) est utilisée ici comme une référence pour la comparaison avec les taux d'enrichissement des éléments en traces et des éléments majeurs

Figure 3: Composition chimique moyenne des scories normalisée à la composition chimique du minerai

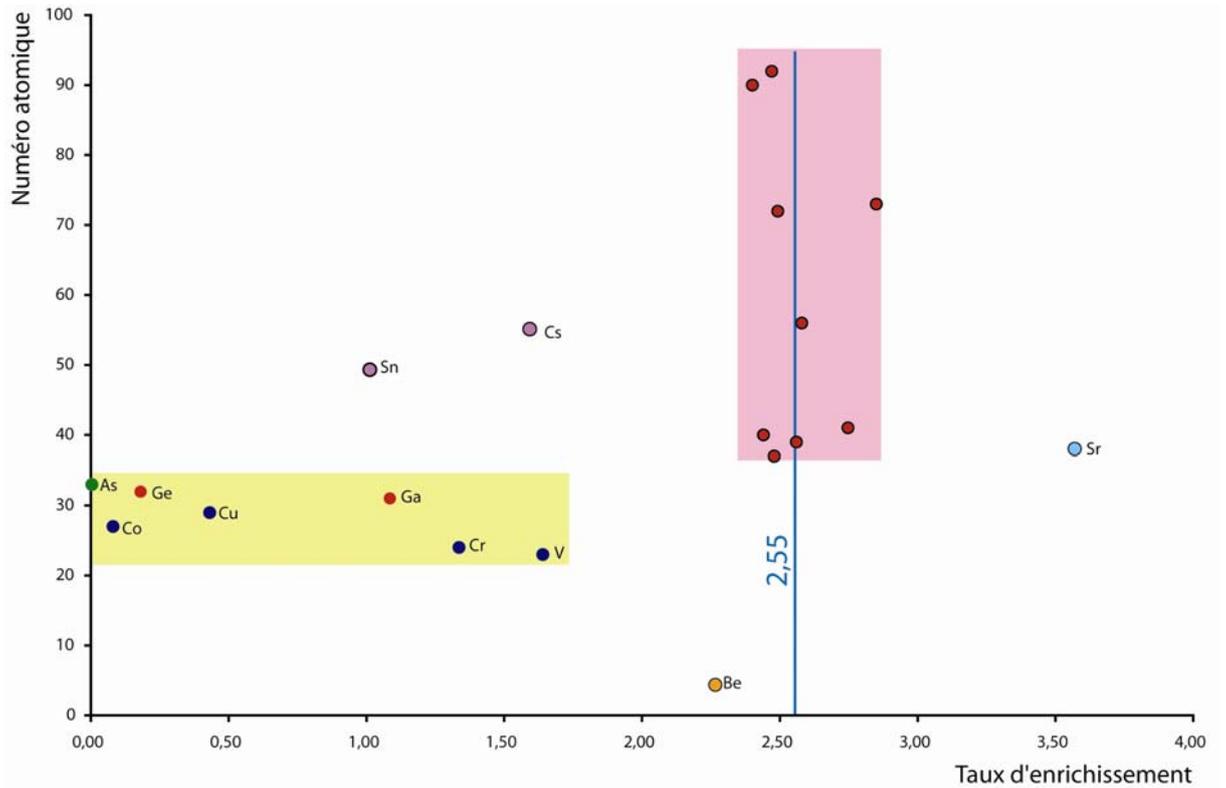


Figure 4: Relation entre le taux d'enrichissement des éléments en traces et leur numéro atomique

		(La/Yb)N	(La/Sm)N	(Gd/Yb)N	Eu/Eu*
argile de l'enduit interne	JBV 133	14,43	4,80	1,84	0,71
cendres de charbon de bois	JBV 134	48,56	7,47	4,53	0,61
minerai	JBV 130	9,65	3,61	1,69	0,74
scorie sur charbon de bois	JBV 129	10,75	3,83	1,74	0,74
scorie sur herbe	JBV 132	10,46	3,77	1,74	0,75
scorie sur sol	JBV 131	10,60	3,78	1,72	0,73
moyenne scories		10,60	3,79	1,74	0,74
<i>NASC**</i>		6,96	3,53	1,35	0,70
<i>CCS</i>		9,19	4,19	1,39	0,65

Tableau 3

**Session d'expérimentation scientifique - Fête du Fer
2003**

(J.-B. Vivet)

Participants à l'expérimentation (conception, fonctionnement et mesures) :

Jean-Jacques CHAUVEL, docteur ès sciences et chercheur à l'Institut de Géosciences, UNIVERSITE DE RENNES I, spécialiste des minerais de fer.

Frédéric MASCHIO, 139, rue des fresnes, 01 580 IZERNORE

Le projet s'inscrit dans la continuité de celui réalisé lors de la fête du fer 2002, et vise à valider les acquis obtenus tout en se rapprochant au mieux des faits archéologiques observés en Haute-Bretagne.

Note : les figures sont placées en annexes

I. Réduction en bas fourneau à tirage naturel de dimensions internes correspondant aux données archéologiques.

L'objectif visé est de construire et faire fonctionner en ventilation naturelle un bas fourneau présentant les principales caractéristiques des appareils de l'Age du Fer (gaulois) qui ont été mis au jour en fouille dans le massif armoricain :

Site	Commune	Diamètre(s) interne(s)	Datation	Responsable opération
La Ville Pierre II	Quever	80 cm (deux fours)	- 503 à - 391 av. JC	J.B. Vivet
Etang du Perray	Plélan le Grand	125 cm	358 à - 114 av. JC	G. Larcher
Le Rocher Abraham	St-Pierre-de-Plesguen	91 cm et 97 cm	- 349 à - 65 av. JC	J.B. Vivet
Kermoisan	Quimper	95 cm, 80 cm, 90 cm ?	- 210 à -30 av. JC	JP Lebihan
La Ville d'Ahaut	Meillac	73 cm	- 35 à 323 av/ap. JC	J.B. Vivet
Couesdan	Plélan le Grand	45 cm, 47 x 53 cm, 75x 80 cm	127 à 370 ap. JC	G. Larcher
Pilleverte II	Pleder	1,30 m puis 0,70 m	Ile - IIIe siècle ap. JC	J.B. Vivet

Il est actuellement impossible de dire si ces fourneaux fonctionnaient en ventilation naturelle ou forcée (soufflet). Le bon fonctionnement obtenu en ventilation naturelle en 2002, nous incite à renouveler l'expérience, afin de démontrer la faisabilité de ce mode de conduite, dans des conditions les plus proches possible de celles fournies par les

données archéologiques. L'expérimentation s'est faite dans un appareil de diamètre interne plus grand (90 cm au lieu de 45 cm), sans revêtement interne spécifique (brasque), avec simplement de l'argile rapportée et lissée. Dans toute la mesure du possible, on utilisera pour la ventilation, des buses simulant de simples orifices traversant (et non des tuyères pénétrant à l'intérieur du creuset du fourneau).

Les mesures de bilan massique, très instructives pour l'interprétation archéologique des résidus métallurgiques, ont été reconduites.

De même, le relevé des températures dans le sol (thermocouples), sous le creuset du fourneau a été renouvelé, parallèlement à celui des températures dans le four (pyromètre optique). Elles sont de nature à améliorer la compréhension de la conduite des structures de chauffe, bas fourneaux et autres fours, de manière plus générale.

II. Construction du fourneau

Les caractéristiques géométriques du fourneau (fig.8) s'appuient le plus possible sur les données de fouilles archéologiques concernant en particulier les bas fourneaux gaulois de Bretagne (en particulier le fourneau n°1 de La Ville Pierre II en Quévert, près de Dinan et des fourneaux 1 et 2 du Rocher Abraham en St Pierre de Plesguen, et fourneau de l'Etang du Perray en Plélan-le-Grand).

- Diamètre interne du fourneau à la base : 90 cm
- Construction en moellons d'argile façonnés à la main.
- Forme et dimensions typiques des moellons : plus ou moins parallélépipédiques, $h = 6,5$ cm (hauteur),
 $L = 11$ cm (longueur selon l'arc de cercle), $e = 6$ à 12 cm (épaisseur entre face interne et face externe du four)
- Epaisseur des parois les plus épaisses : 12 cm à 15 cm (les parois les plus épaisses conservées ont 12 cm, mais on n'est pas sûr que la face externe, fragile, soit préservée).
- Rétrécissement de section au dessus des orifices de ventilation, suite d'observations

sur les parois trouvées en fouille sur le site de La Ville Pierre II en Quévert (Vivet, 2000 et 2003) : tronc de cône, d'angle prononcé pouvant atteindre 20 °.

- Hauteur de four voisine de 1,50 m. Cette dimension reste toujours délicate à déterminer archéologiquement. Compte tenu du rétrécissement décrit précédemment la hauteur de la cheminée pourrait s'avérer assez faible.

- Ventilation : simples orifices cylindriques ou coniques ménagés dans l'épaisseur de la paroi.

- Diamètre moyen des orifices de ventilation observé : 38 mm. Certains orifices mieux conservés (Rocher Abraham, montrent une conicité). Or, c'est la partie la plus scoriacée, de plus faible diamètre qui est toujours conservée. De ce fait, cela tend à minorer les valeurs. La forme conique a été retenue : 45 x 33 mm.

- Nombre d'orifices : 13 disposés régulièrement sur le pourtour du four.

- Hauteur des orifices par rapport au sol (côté interne) : 25 cm (minimum).

- Inclinaison des orifices par rapport à la verticale : 10 ° vers le bas (intérieur du four).

Une porte d'accès a été ménagée, pour donner la possibilité de créer un appel d'air en cas d'insuffisance des orifices, pour réaliser au besoin une coulée de scorie, et surtout pour faciliter le défournement. Celle-ci a été réalisée exceptionnellement en briques crues (récupérées l'an dernier). Ouverture : 30 x 30 cm environ.

III. Grillage du minerai - Concassage

Celui-ci a été mené en foyer ouvert, à feu très vif : il faut dépasser 500 °C et atteindre le plus possible les blocs à cœur. L'aire de grillage consiste en un foyer légèrement excavé, entouré de pierres. Du bois recouvrant entièrement les blocs de minerai, a servi de combustible. La durée de chauffe a été de 4 à 5 h au minimum pour tous les blocs placés dans le foyer. Le concassage s'est fait à l'aide de masses, marteau et pierres.

Suite aux observations obtenues sur le site de La Ville Pierre en Quévert et à Pilleverte en Plesder, le module retenu a été fixé à une valeur inférieure à 1 cm (ou 8 g). La poudre de minerai grillé a été récupérée et utilisée au même titre comme matière première. Les zones argileuses ou schisteuses (en feuillet) et les concentrations de quartz (blanc laiteux) ont fait l'objet d'un tri visuel au moment du broyage.

IV. Résultats

Les expérimentations archéologiques réalisées lors de la fête du fer de Paimpont en 2002, avaient prouvé la faisabilité de conduire un bas fourneau permettant la réduction d'un minerai de fer régional, sans recourir à un instrument de soufflage, avec production conséquente, en terme de rendement, de métal forgeable (J.-J. Chauvel, Ph. Leray, L.Marsille, J.-B. Vivet). La conduite à nouveau cette année d'un fourneau fonctionnant en ventilation libre visait à valider les acquis obtenus tout en se rapprochant au mieux des faits observés sur les appareils de l'Age du fer mis au jour lors de fouilles archéologiques en Bretagne. Ainsi, un diamètre interne encore un peu plus important, de 90 cm, a-t-il été choisi (moyenne sur huit fourneaux ayant fonctionné entre le VI^{ème} siècle av. J-C. et la fin de l'indépendance gauloise). De même, aucune tuyère rentrante n'ayant été collectée, les entrées d'air dans le four se sont limitées à de simples orifices traversant la paroi, et le revêtement interne spécifique (brasque) de l'an dernier a été supprimé. S'est ajouté également, suite toujours aux observations archéologiques, un profil de cheminée à fort rétrécissement, en forme de bouteille.

Si l'expérimentation n'a pas permis d'aboutir à l'obtention de métal utilisable, elle a montré qu'il faut repenser le mode de conduite généralement admis pour ces fourneaux. Les mesures de température interne du four (pyromètre optique et thermocouple) indiquent que pour un remplissage complet de la cheminée en charbon, on n'arrive pas à dépasser 800 °C au cœur du four, alors que la couronne de ventilation atteint les 1200 °C requis. Le profil très oblique a généré une vitrification verdâtre très prononcée dans cette dernière zone, phénomène observé sur certains appareils du second Age du Fer. L'allure des températures sous creuset, en cours d'étude, s'est avérée différente de celle de l'an passé, avec notamment une forte influence de la sécheresse. Concernant l'identification chimique des résidus scoriacés, très utile à la compréhension des installations antiques, une série d'analyses a été lancée. Les expérimentations de 2002 et 2003 feront l'objet d'une publication dès que les études

minéralogiques et chimiques seront achevées.

V. Perspectives et projets

A/ Réalisation de nouvelles opérations de réduction en ventilation naturelle dans un four de grande dimensions.

Les expérimentations précédentes nous amènent à repenser la conduite des bas fourneaux) de grandes dimensions (diamètre interne de l'ordre du mètre) tels que ceux, de plus en plus nombreux, mis au jour en Bretagne et dans l'Ouest de la France, soit par la biais de fouilles archéologiques, soit par la découverte de grandes scories de fond de four piégées. Des critères permettant de discriminer et donc prouver l'utilisation des modes de fonctionnement en ventilation forcée ou naturelle demandent toujours à être établis formellement.

Ces considérations conduisent à envisager une poursuite d'expérimentations permettant de tester des paramètres tels que le taux de remplissage en charge (minerai et charbon de bois) de la cheminée, l'utilisation de bouchons d'argile coniques identiques à ceux mis au jour en Haute-Bretagne pour la période de La Tène moyenne.

B/ Etude du comportement d'une minerai différent en réduction et post-réduction

Les opérations réalisées sur le minerai de la mine de La Galivelais montrent que les substances minérales de sa gangue sont difficilement fusibles et nécessitent de hautes températures. Ces conditions ne permettent pas d'obtenir aisément et de façon reproductible un métal très pur et bien aggloméré. Corrélativement la consommation de charbon de bois est très importante. Comme on l'a vu précédemment, le premier test de réduction sur ce minerai a nécessité un rapport masse de charbon / masse fer métal de 11,4 , ce qui est considérable, en particulier dans un bas fourneau dont la conception a été prévue par les forgerons actuels pour travailler avec une bonne efficacité. Un travail de post réduction a été effectué sur la loupe obtenue. Le fer obtenu s'est révélé difficile

à travailler et par suite les opérations évoquées sont longues et fastidieuses. Cette perte de temps induit parallèlement, pour le métallurgiste antique (ou moderne), une perte en matière (fer métal) et en charbon de bois importante.

D'où l'idée que d'autres minerais ont pu paraître plus convenables à une telle tâche. La question qui est posée est celle des critères de choix qui ont pu guider le métallurgiste aux époques antiques ou moins anciennes, dans la sélection des gîtes miniers, pour la bonne réussite de son travail. On peut envisager aussi qu'il ait associé plusieurs roches entre elles pour améliorer la qualité du métal.

Il serait donc en ce sens intéressant de tester au moins un autre gîte ferrifère facilement accessible ou l'association de plusieurs minerais et observer son comportement à la réduction et en post réduction.

Bibliographie

ANDRIEUX Jean-Yves, GARÇON Anne-Françoise, LARCHER Guy, COIGNARD Joël, FONTUGNE Michel, HERBAUT Claudie, LOYER Stéphane, MOINERAI Marc, PLAINE Jean, 1993, Fouilles 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, 10, 1993, p. 101-114.

ANDRIEUX P., 1990, Prolégomènes à une étude tracéologique sur les structures d'élaboration thermique et les parois argilo-sableuses. Application à la métallurgie du fer. Thèse de III^e cycle, Dir. Mangin, Université de Franche-Comté, Institut d'archéologie, Besançon, 3 vol. multigraphiés.

ANDRIEUX Philippe, 1991, - Les problèmes et la problématique dans l'expérimentation et l'étude du comportement des bas fourneaux métallurgiques : l'exemple du fer, Actes du colloque international « Expérimentation en archéologie: bilan et perspectives », tenu à l'archéodrome de Beaune (avril 1988), tome 1 - Le feu : métal et céramique, Ed. Errances, p. 118-121.

BARDEL J.-P., 1980, Fouille d'un bas fourneau sur le site de la Fossardais à la Dominelais (35). Rapport de fouille, Direction des Antiquités préhistoriques et historiques de Bretagne, Rennes.

CHAUVEL J.-J., VIVET J.-B. et BONNIOL-JARRIER C., 1999, Etude minéralogique préliminaire du mobilier paléosidéurgique dans le Nord de la Haute-Bretagne, Les dossiers du Ce.R.A.A., **27**, p. 87-100.

CHAUVEL J.-J. et VIVET J.-B., 2001, - Le bassin paléosidéurgique de l'est de la Rance – Caractérisation et étude comparative des ressources minières et des minerais de fer grillés à l'Age du Fer et à l'époque gallo-romaine, *Les Dossiers du Ce.R.A.A.*, **29**, p. 59-72.

DIEUDONNE-GLAD N., 1994, - Minerai de fer disponible et minerai de fer exploité. Exemple de choix à l'époque romaine chez les Bituriges Cubi, Colloque de Besançon, 10-13 nov. 1993, La Sidéurgie ancienne de l'Est de la France dans son contexte

Européen, sous la direction de Michel Mangin, Annales littéraires de l'Université de Besançon, 536 Série Archéologie, 40, p. 323-329.

DUNIKOWKI Christophe, CABBOÏ Sarah et LANGLOIS J.Y. et alii, 1997-1998, rapport de fouilles sur l'A28, section Alençon-Le Mans-Tours, Série fouilles 1 à 14, Service Régional d'Archéologie de Loire-Atlantique, Nantes. Session de 3 jours d'expérimentations à l'issue des fouilles (non publié).

FLUZIN Philippe, 2000, Arts du feu et productions artisanales, Actes des Rencontres 21-23 octobre 1999, sous la direction de Pierre Pétrequin, Philippe Fluzin, Jacques Thiriot et Paul Benoit, Ed. APDCA, Centre de recherches archéologiques du CNRS, Villes d'Antibes, Ministère de la culture et de la communication, 628 p.

GUERISSE Pauline, 1994, Sites sidérurgiques anciens du Massif de Paimpont, Mémoire de Maîtrise. Dir. Andrieux J.-Y., Rennes II, 229 p.

GUYODO, J.-N., CHAUVEL, J.-J., CAVAILLES, M., SELLAMI, F. VEQUAUD, B., et VIVET, J.-B. – 2002 – La Peyratte (Deux-Sèvres). Habitat rural et sidérurgique au XIème-XIIème s. à La Petite Foye. *Dfs de diagnostic*. Institut national de recherches archéologiques préventives. Poitiers. 34 p. 17 fig.

LARCHER Guy, 1990, Sites métallurgiques de la région de Paimpont, rapport (collectif) de prospection inventaire, S.R.A. Bretagne.

LARCHER Guy, 1991, Sites métallurgiques de la région de Paimpont, rapport (collectif) de prospection et fouille du site de Couédan, S.R.A. Bretagne.

LARCHER Guy, 1992, Sites métallurgiques de la région de Paimpont ; Couesdan en Plélan-le-Grand, rapport de fouille programmée, S.R.A. Bretagne.

LARCHER Guy, 1993, Fer en Brocéliande: recherche, expérimentation (juillet 1993).

LARCHER Guy, 1994, La zone sidérurgique de la forêt de Paimpont (Ille-et-Vilaine)- bilan diachronique. Colloque de Besançon, 10-13 nov. 1993, La Sidérurgie ancienne de l'Est de la France dans son contexte Européen, sous la direction de Michel Mangin,

Annales littéraires de l'Université de Besançon, 536 Série Archéologie, 40, p. 113-120.

LE BIHAN J.-P. et GALLIOU P., 1974, Un groupe de bas fourneaux antiques découverts près de Quimper, BSAF, 52, p. 17-30.

VIVET J.-B., 1996, - Application des méthodes spectrométriques I.C.P - A.E.S et Arc à l'analyse des bronzes et alliages cuivreux archéologiques. Etude analytique, statistique, et tracéologique des haches du dépôt de Tréboul (29), mémoire de D.S.E. de Sciences physiques, Université de Rennes I, 77 p.

VIVET J.-B., 1997 - Paléoméallurgie du fer à l'est de la Rance et dans le Combournais - bilan interprétatif des données de prospection, *Les Dossiers du Ce.R.A.A.*, **25**, p.57-90.

VIVET J.-B., 1999, - Le Rocher Abraham en St Pierre de Plesguen (35), rapport n°1 de prospection thématique 1999, paléoméallurgie du fer en Bassin de Rance, Service Régional de l'Archéologie de Bretagne, Rennes.

VIVET J.-B., 1999, - Pilleverte II en Plesder (35), rapport n°2 de prospection thématique 1999, paléoméallurgie du fer en Bassin de Rance, Service Régional de l'Archéologie de Bretagne, Rennes.

VIVET J.-B., 1999, - Caractérisation des gisements métallurgiques, rapport n°3 de prospection thématique 1999, paléoméallurgie du fer en Bassin de Rance, Service Régional de l'Archéologie de Bretagne, Rennes.

VIVET J.-B., 2000, - La Ville Pierre II en Quévert, rapport de prospection thématique 2000, paléoméallurgie du fer en Bassin de Rance, Service Régional de l'Archéologie de Bretagne, Rennes.

VIVET J.-B. et CHAUVEL J.-J., 2000, Paléoméallurgie du fer dans le bassin de la Rance (35 et 22) - l'apport de la prospection, des sondages, et des analyses : premiers bilans, Journée préhistorique et protohistorique de Bretagne, 18 nov. 2000, U.M.R. 6566, Rennes.

VIVET J.-B., Le Rocher Abraham en St Pierre de Plesguen et Pilleverte II en Plesder, Bilan Scientifique 1999, D.R.A.C, Service Régional de l'Archéologie, en cours de publication.

CHAUVEL J.-J., VIVET J.-B. et BONNIOL-JARRIER C., 1999, Etude minéralogique préliminaire du mobilier paléosidérurgique dans le Nord de la Haute-Bretagne, Les dossiers du Ce.R.A.A., 27, p. 87-100.

VIVET J.-B., BOURHIS J.-R., et ONNEE Y., 2001, - Paléoméallurgie des bronzes d'Armorique, de la façade Atlantique et de la Manche – Evolution des teneurs en arsenic, étain et plomb à partir des corpus d'analyses, R.A.O., supplément n°9, p. 93-109.

VIVET J.-B., 2001, - Le Rocher Abraham, St Pierre de Plesguen (35): un témoin essentiel de l'activité sidérurgique gauloise du Nord de la Haute-Bretagne, *Les Dossiers du Ce.R.A.A.*, 29, p. 79-94.

VIVET J.-B. et alii, 2001, - Paléosidérurgie dans l'inter bassin de la Rance ; du Combournais à la forêt de Paimpont, rapport de prospection thématique (35), Service Régional de l'Archéologie de Bretagne, Rennes.

VIVET J.-B., 2002, - Trécélien en Paimpont (35) : métallurgie de réduction directe du minerai de fer en forêt de Brécélien, au XIV-XVI^e siècle, rapport n°1 de prospection thématique 2002, Service Régional de l'Archéologie de Bretagne, Rennes.

VIVET J.-B., CHAUVEL J.-J., NICOLLIN F., 2003, - Productions de fer à La Tène ancienne en vallée de Rance : La Ville Pierre II en Quévert (22), *Les Dossiers du Ce.R.A.A.*, 31, p. 77-99.

VIVET J.-B., 2003 - Trécélien en Paimpont (35) : métallurgie de réduction directe du minerai de fer en forêt de Brécélien, au XIV-XVI^e siècle, rapport de prospection thématique 2003, Service Régional de l'Archéologie de Bretagne, Rennes.

Annexes :



Figure 1



Figure 2

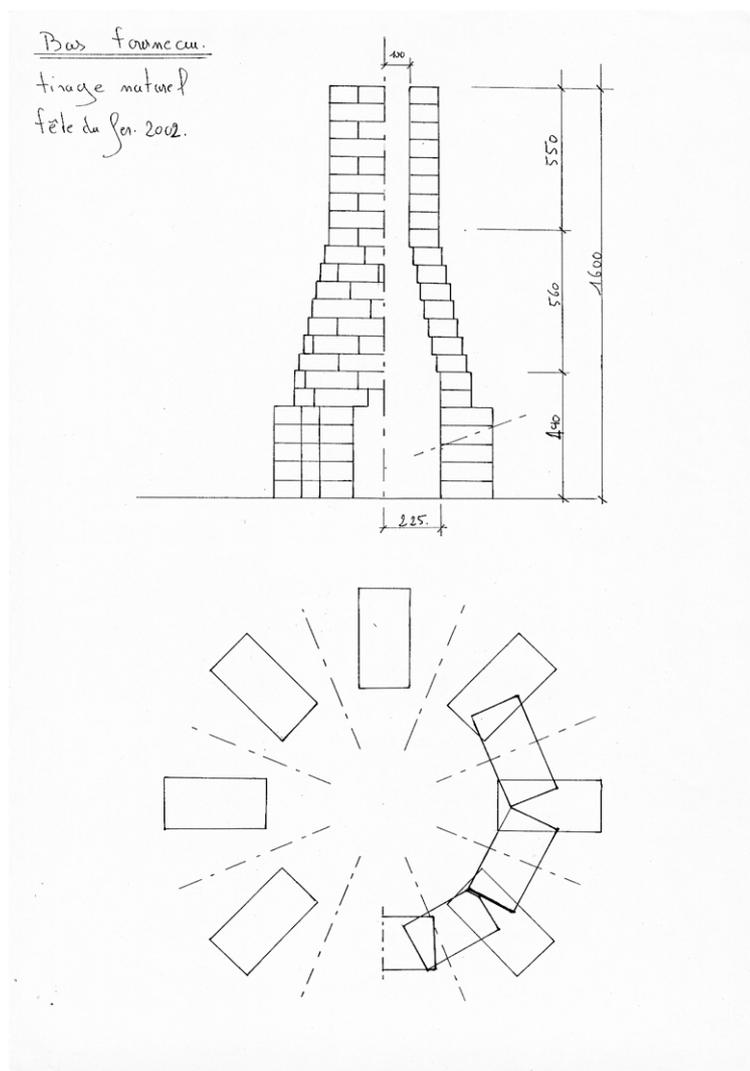


Figure 3



Figure 4



Figure 5

FETE DU FER 2002 (PAIMPONT) : TEMPERATURES MESUREES CORRELATIVEMENT A L'INTERIEUR DU FOURNEAU N°1, FONCTIONNANT EN VENTILATION NATURELLE, ET SOUS L'APPAREIL, A DES PROFONDEURS CROISSANTES (4 à 13 cm), EN FONCTION DU TEMPS.

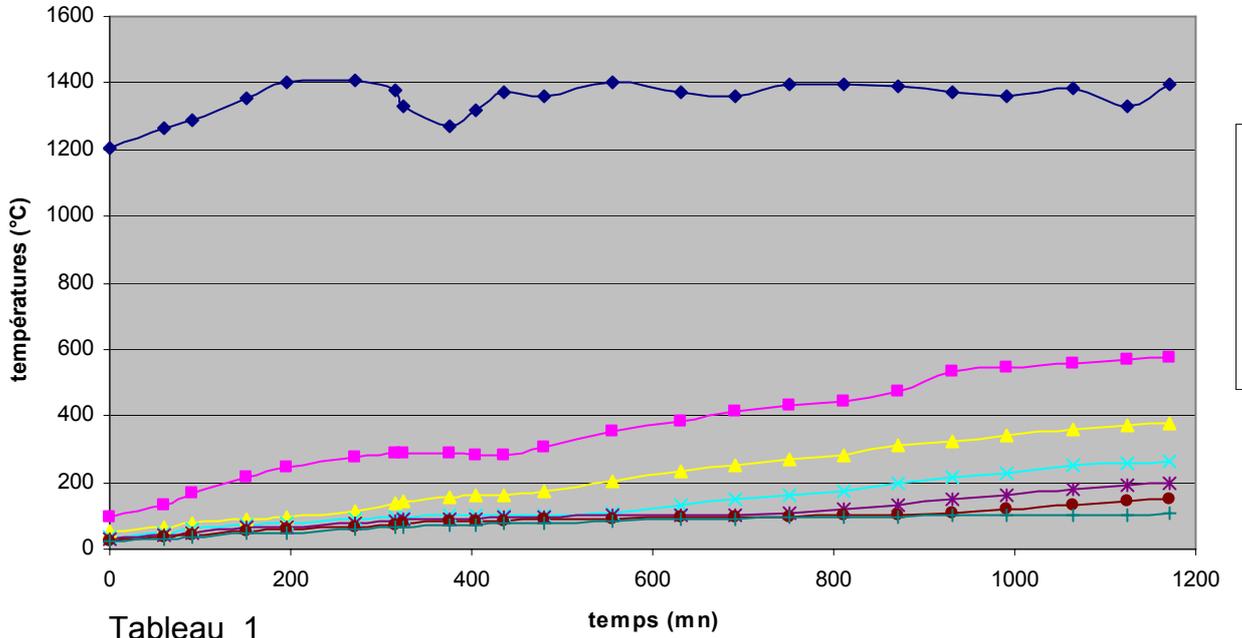


Figure 6



Fourneau 2003 - Section

J.B. Vivet
J.J. Chauvel

Figure 7

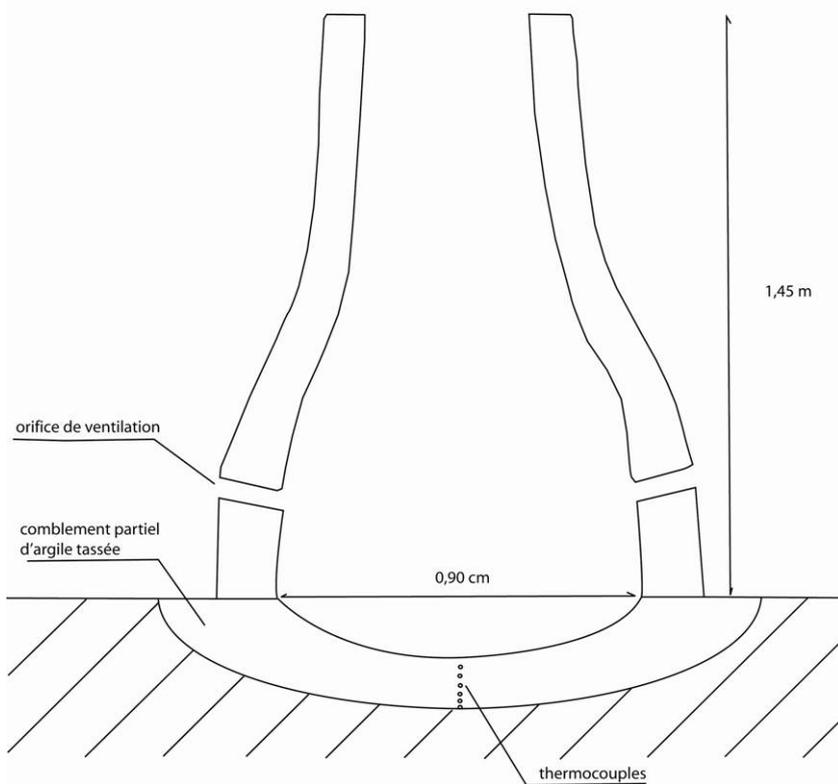


Figure 8

troisième partie

Questions liées à l'épuration

(P. Dillmann, R. Aranda)

I. Introduction

Dans un cadre géographique, historique et technologique donné, la chaîne opératoire révèle la manière dont la réduction du minerai est maîtrisée. Pour la filière directe, dans cette chaîne opératoire, l'étape de réduction est suivie d'un certain nombre d'autres opérations qui pourraient avoir une influence tout aussi importante sur la capacité d'un lieu de production à fournir du métal. Parmi celles-ci, l'épuration, qui permet de passer d'une loupe non compactée, sortant du bas-fourneau à un lopin de métal forgeable est un passage crucial. En effet, la capacité à compacter le métal, aux cours d'opérations qui restent encore à définir précisément tant archéologiquement que techniquement, peut être un goulot d'étranglement de la chaîne opératoire. La loupe de métal sortant du fourneau n'est pas forgeable et ce sont les opérations d'épurations qui, de manière importante (avec éventuellement la composition initiale du minerai), vont conditionner la qualité finale du matériau. Ainsi, même si des loupes de tailles importantes peuvent être produites, la quantité de métal sortant du lieu de production sera directement liée à la capacité des forgeron-métallurgistes à traiter ce métal pour en faire des produits forgeables.

Malheureusement, l'étude de cette opération est rendue difficile par plusieurs facteurs. En premier lieu, les traces archéologiques de l'opération peuvent être ténues, voire inexistantes. En effet, l'opération débute par un martelage peu violent, ne nécessitant probablement pas d'enclume élaborée. D'autre part, en fonction du contexte cette opération peut varier grandement. Elle peut par exemple avoir lieu immédiatement après la sortie de la loupe du foyer et se poursuivre sur un même lieu jusqu'à l'obtention d'un métal forgeable. Elle peut au contraire être interrompue pour fournir un produit intermédiaire qui sera commercialisé en l'état. Ainsi, en fonction des pratiques locales la frontière entre la réduction, l'épuration et le forgeage ne sera pas forcément très marquée. Plus exactement les phases de réduction, épuration, forgeage sont susceptibles de correspondre à des moments différents au sein d'un même atelier, ou à des ateliers différents y compris géographiquement.

Il est donc impératif, à qui veut comprendre le passage du minerai au produit semi-fini,

puis à la loupe, de saisir cette étape de l'épuration, tout autant que celle de la réduction. Précisons que la littérature donne très peu d'exemples de ce genre d'études, comparé au nombre pléthorique de réductions expérimentales qui ont été réalisées, dans des buts divers, aux cours des dix dernières années. Pour répondre à ces questions et au vu du peu de données proposées par l'approche archéologique, les expérimentations s'avèrent être un point crucial. En partant des loupes données par les reconstitutions expérimentales de réduction, basées sur des données archéologiques et vue la difficulté d'appréhender les indices de terrain à supposer qu'ils existent il importe à ce jour d'explorer l'éventail des possibilités offertes pour la transformation de la loupe en métal forgeable. Ceci permettra d'une part de mieux saisir les possibilités techniques de cette étape (en y incluant le «grappage»⁸⁹) et d'autre part de fournir des données extrêmement importantes sur les quantités pouvant être fournies dans un temps donné. Enfin, l'analyse des produits et déchets mais également des structures laissées par l'opération pourra permettre d'interpréter certains vestiges archéologiques, difficilement lisibles⁹⁰.

Les résultats de cette approche dépassent largement le cadre chronologique et géographique de ce PCR. En effet, tout au long de l'histoire de la métallurgie du fer, un certain nombre de demi-produits ont pu être identifiés archéologiquement (on citera par exemple les travaux de Sylvain Bauvais sur les demi produits proto-historiques en Picardie, et dans le nord du bassin Parisien, les barres des épaves de Sainte Marie de la Mer et les *merlaria* identifiées dans les sources historiques du XIVe siècle par Catherine Verna). Dans certains cas, les tailles de ces demi produits, bien avant l'apparition du marteau hydraulique posent la question de leur mise en forme.

Ne disposant quasiment d'aucun indice archéologique, un protocole spécifique a été suivi. Une réduction expérimentale de minerai a été réalisée à partir d'un système (minerai, paroi, bas-fourneau) bien maîtrisé. A partir de cette loupe obtenue, toute latitude a été laissée au forgeron-métallurgiste pour la compacter et arriver jusqu'à un lopin de métal forgeable, voire un objet. En cas d'échec (problèmes de fissuration du métal), le forgeron-métallurgiste recommençait l'opération en changeant son mode

⁸⁹ Cette opération consiste à chauffer dans un petit foyer un certain nombre de fragments de loupe et à laisser de souder par elle-même une masse de métal. Elle permet de traiter des loupes trop impures (contenant un trop grand nombre de scories) impossible à épurer autrement.

⁹⁰ On pense par exemple à cette pierre plate interprétée comme une enclume trouvée par Jean-Bernard Vivet et ne présentant que des traces de coups très légers. S'agit-il d'une enclume uniquement utilisée en début

opérateur. L'utilisation d'outils autres que le marteau à main, la masse (avec deux ou trois aides) et l'enclume était proscrite⁹¹. Les ajouts, sous forme de sable de Fontainebleau, n'ont été employés qu'en cas d'extrême nécessité. L'ensemble des opérations a été chronométré, les produits étaient dans la mesure du possible pesés au cours des opérations. Aucune intervention du chercheur sur le déroulement des opérations n'est permise sauf pour faire respecter les règles préalablement exposées.

Cette approche présente un certain nombre de limites, ne dépendant d'aucune hypothèse archéologique liée à un site, elle est obligé d'explorer un grand nombre d'hypothèses de déroulement de la chaîne opératoire sans être certains de la valeur archéologique des choix faits lors de l'expérimentation, savoirs faire différents, Elle est cependant la seule possible à ce jour vu le nombre restreint d'indices archéologiques. De plus, l'identification des produits est déchets liées aux différentes options techniques de l'épuration pourra permettre à l'avenir de reconnaître, sur les sites archéologiques des indices d'opération spécifiques (foyers, enclumes plus ou moins martelés, chutes de métal de forme spécifiques, culots de fond de foyer, etc...). Pour ces raisons, elle donc tout a fait justifiée ici.

La réalisation de telles opérations, dans un cadre scientifique rigoureux est un travail important, tant du point de vue de la mise en place de vocabulaires spécifiques entre forgeron-métallurgiste et chercheur (voir la première partie du rapport « Du minerai à l'objet : approche méthodologique ») que de celui de la compréhension fine des gestes techniques du forgeron-métallurgiste par l'archéomètre et l'historien des techniques. L'ensemble de ces va-et-vient, dialogues et confrontations, dans le vif de l'action autour d'un métal dont il faut contrôler la température tout au long de l'épuration est un des gros apports de ce PCR. A ce jour, une équipe « fiable » et véritablement pluridisciplinaire est constituée et permettra de réaliser efficacement et dans un cadre scientifique ce type d'expérimentation. Ceci est loin d'être le cas pour l'ensemble des opérations d'archéologie expérimentales menées à ce jour sur les territoires Français et Européens.

Deux opérations ont été menées cette année dans cet esprit sur le site de Paimpont

d'opération où il est nécessaire de compacter la loupe très délicatement ? C'est un point que les expérimentations d'épuration pourront contribuer à éclaircir.

(Ille-et-Vilaine) : l'épuration d'une loupe de fer obtenue par réduction directe y a été réalisée. Cette expérimentation a permis de rendre compte du temps de travail nécessaire en post-réduction pour obtenir un morceau de fer forgeable ainsi que de la masse de fer récupérée par rapport à celle de la loupe sortant du fourneau.

II. Résultats

A/ Expérimentation I : épuration de type « martelage »

Lors de cette expérimentation, la loupe obtenue en sortie de fourneau⁹² était suffisamment compacte pour procéder à une épuration de type « martelage⁹³ ».

Comme nous l'avons évoqué dans la précédemment, le choix méthodologique a été de diviser l'opération d'épuration en phases distinctes du fait que celles-ci, en fonction du contexte peuvent être très variables. Pour des raisons de clarté, nous avons cependant décidé de scinder les opérations effectuées par le forgeron-métallurgiste en deux phases, liées grossièrement au taux de compactage du matériau et à la nature des outils utilisés.

- La première phase (épuration phase I) voit le compactage de la loupe, essentiellement réalisée au maillet, afin d'en supprimer les porosités.

- La seconde phase (épuration phase II) voit le cinglage du produit obtenu en fin de phase I et son compactage par des replis successifs, afin d'en expurger une grande partie des inclusions et de le transformer en un lingot forgeable. Cette seconde phase est réalisée au marteau et à la masse avec un ou deux aides maniant cet instrument sous les ordres du forgeron-métallurgiste.

La transition entre ces deux phases peut être marquée à un ou deux cycles chaude/martelage près par le changement d'outil du forgeron-métallurgiste.

Pour effectuer ces opérations, le forgeron-métallurgiste a simplement détruit la partie supérieure de son bas fourneau afin de n'en conserver que la base et de le transformer

⁹¹ Nous verrons cependant dans la suite qu'il a été impossible de compacter une certaine quantité de métal sans faire intervenir un marteau mécanique. Ceci alimentera notre réflexion sur les quantités pouvant être traitées à la main.

⁹² Nous ne donnerons pas ici de détails à propos du bas fourneau et du type de minerai utilisé. Notons simplement que pour la première opération les dimensions du bas-fourneau ont été fixées par le forgeron et sont détachées de tout contexte archéologique. Pour les deux autres, les bas fourneau utilisés sont de type Mérovingien. Dans les deux cas une soufflerie mécanique a été utilisée.

⁹³ Par opposition à une épuration de type « grappage »

en foyer de forge. La place de la tuyère a été modifiée : de l'arrière elle est passée sur le côté. Cette façon de procéder, de par le fait qu'elle ne permet plus *in fine* de distinguer le foyer de réduction de celui d'épuration peut être une des raisons du peu d'occurrence de foyers d'épuration trouvés en contexte archéologique.



Figure 1 : Four de réduction et foyer d'épuration provenant de la destruction de ce four.

Le temps total de cette opération d'épuration pour obtenir, à partir d'une loupe de 14 kg sortie du bas fourneau, un lingot de fer forgeable d'une masse de l'ordre du kilogramme a été de 4h20, avec une succession d'une quarantaine de cycles chaude/martelage (voir Tableau 1 et 2). Chaque chaude et chaque martelage a duré entre 2 et 5 mn en moyenne. La phase II représente à elle seule près de 30 cycles et plus de 3h de travail pour le forgeron-métallurgiste⁹⁴.

Temps	Opération	Masse de la loupe (kg)	Remarques
0:00	Chaude	14	Ajout de charbon de bois.
0:03	Martelage		Maillet.
0:05	Chaude		Ajout de charbon de bois.
0:08			Ajout de charbon de bois.
0:11			Ajout de charbon de bois.
0:14	Martelage	13	Maillet.
0:16	Chaude		
0:18			Ajout de charbon de bois.
0:21	Martelage	11	Maillet. Perte d'un fragment important. Echantillonnage.
0:23	Chaude		
0:26			Déplacement de la loupe dans le foyer. Ajout de charbon de bois.
0:29	Martelage		Maillet.
0:30	Chaude		
0:32			Déplacement de la loupe dans le foyer. Ajout de charbon de bois.
0:35			Déplacement de la loupe dans le foyer. Ajout de charbon de bois.
0:37			Déplacement de la loupe dans le foyer. Ajout de charbon de bois.
0:40	Martelage	7	Maillet. Quantité importante de scorie dans le foyer.
0:42	Chaude		
0:46	Martelage	7	Maillet.
0:48	Chaude		
0:50	Martelage		Maillet.
0:52	Chaude		
0:54	Martelage		Maillet.
0:56	Chaude		
0:59	Martelage		Le métal est plus compact et peut être martelé avec un marteau en acier.
1:00	Chaude		
1:03	Martelage	5	
1:04	Chaude		
1:09	Martelage	4	Fissures importantes. Nécessité de forger avec ajouts.

Tableau 1 : Épuration phase I : temps de travail par opération et perte de masse de la loupe.

⁹⁴ Pour la réalisation d'un objet, à ce temps il faudra encore ajouter celui de la mise en forme, qui peut notamment comprendre des opérations de soudure de différents lingots dans le cas du forgeage d'objets de

Nombre de cycles	Opération	Opération	Temps moyen par opération (mn)
9	Martelage. Perte d'un gros bloc en fin d'opération.	Chaude	5
		Martelage	2
8	Martelage.	Chaude	2
		Martelage	2
4	Premier repli.	Chaude	4
		Martelage	4
1	Second repli.	Chaude	3
		Martelage	13
6	Troisième repli. Produit : lingot forgeable	Chaude	3
		Martelage	2
Durée totale : 3h13			

Tableau 2 : Travail réalisé lors de l'épuration phase II avec le temps moyen par opération.

B/ Expérimentation 2 : de type « grappage »⁹⁵

Lors d'une deuxième opération, la loupe obtenue en sortie de bas fourneau possédait une consistance insuffisante pour être épurée par martelage : dès le début de cette opération, la loupe s'est fragmentée en plusieurs morceaux sous les coups de marteau (la description du début de cette opération est donnée dans le Tableau). Ceci est dû au fait que les parties scoritiques de la loupe sont encore présentes en proportion trop importantes pour permettre la soudure des parties métalliques.

Une solution consiste alors à « grapper » les différents fragments de loupe dans un petit foyer, relativement profond (45 – 50 cm) et peu large (30 cm) et à la tuyère très inclinée. L'apport d'air a été effectué pour cette opération par une ventilation électrique. Le but est de faire refondre les parties scoritiques dont la température de fusion est inférieure à celle du métal. Ceci permet au métal, à l'état pâteux de se souder en une masse sous l'effet de son propre poids.

L'ensemble des fragments issus du martelage infructueux a été ramassé afin d'être

plusieurs dizaines de kg, comme des grosses barres ou des tirants mis en œuvre dans la construction monumentale.

« grappé ». Le poids total de l'ensemble de ces fragments est de 7,2 Kg. L'opération consiste à introduire dans le foyer très fortement alimenté en air des charges de fragments à intervalles réguliers (voir Tableau 4). Il est important de noter ici que, vu la force de ventilation nécessaire, celle-ci ne peut en aucun cas être effectuée par ventilation naturelle. De plus, l'effort à fournir pour le maniement de soufflet à mains est assez important et porte sur une durée relativement longue (plus d'une heure). Il est ininterrompu Cela le distingue du soufflage nécessaire pour la forge et martelage où les moments de soufflerie sont intenses mais de courte durée – de l'ordre de quelques minutes).

Temp s	Opération	Poids loupe	Remarque
	Sortie du four de réduction	11 Kg	
0:00	Début chaude avec soufflerie		loupe recouverte de charbon
0:05	Sortie loupe, martelage au marteau	8 Kg après martelage	
0:07	Chaude		
0:12	Sortie et martelage au marteau	6 Kg après martelage :	Perte de petits fragments
0:13	Chaude		
0:21	Sortie et martelage au marteau	5 Kg après martelage	Perte de petits fragments
0:24	Chaude		
0:32	Sortie et martelage Loupe sectionnée en deux morceaux	Loupe 1 : 2 Kg Loupe 2 : 1 Kg après martelage	Perte de fragments
0:34	Chaude		
0:44	Sortie et martelage loupe 1	1 Kg après martelage	Perte de petits fragments
0:47	Chaude		
0:57	Sortie et martelage loupe 1 Se casse en deux morceaux	1 Kg après martelage	Compactage impossible Fragments récupérés pour le «grappage»

Tableau3 : début de l'opération de martelage et fragmentation de la loupe

⁹⁵ Cette opération a été réalisée par les membres du PCR sur le site de la plateforme d'expérimentation métallurgique du site de Melle, dirigée par Florian Tereygeol (CNRS).

Heure	Charge (g)	Remarque
00:00	400	Entre les charges pelletées de charbon
00:04	400	
00:08	450	
00:11	800	
00:14	550	Refroidissement des pourtours du foyer avec de l'eau, entre deux charges au début puis toutes les charges quand le foyer est chaud
00:18	650	
00:22	750	
00:27	400	
00:31	550	
00:41	700	
00:51	600	
00:59	650	
01:07	300	Sortie de la loupe collée au fond du foyer début du martelage de compactage
01:13		

Tableau 4

A la fin de cette opération, une masse de métal a pu être extraite du foyer. Le forgeron-métallurgiste nomme cette masse « étoffe ». Le poids de la masse en sortie est d'environ 3Kg. Immédiatement après la sortie du foyer de « grappage », le compactage de cette masse a commencé. Pour la réchauffe de celle-ci entre les opérations de forge, un foyer de forge (voir figure 2) a été utilisé. Ses dimensions étaient de 30 x 30 cm pour une profondeur d'environ 30 cm. La tuyère y est bien moins inclinée que dans le foyer d'épuration. On notera la perte de masse durant le « grappage » par rapport au poids total des fragments introduits. La durée totale de l'opération de compactage est d'environ 40 mn. (Tableau 5) Lors de cette dernière, la perte de masse est minime. Ceci peut s'expliquer par le fait que la masse initiale contient très peu de scories piégées à l'intérieur.



Figure 2 : foyer de forge utilisé pour le réchauffage de la loupe

Heur e	Opération	Poids (kg)	Remarque
		3 Kg	
00:00	Début chaude avec soufflerie		loupe recouverte de charbon
00:12	Sortie loupe, martelage	1 Kg*	
00:14	Chaude		
00:22	Sortie et martelage	2 Kg	
00:23	Chaude		
00:28	Sortie et martelage		sensation des marteleurs : cassant
00:29	Chaude		
00:34	Sortie et martelage	2 Kg (après martelag)	
00:37	Chaude		
00:41	Sortie et martelage		Loupe plus petite, brûlée selon le forgeron-métallurgiste
00:43	Fin compactage	< 2 Kg (limite de la précision de la balance)	Un lingot est obtenu

* Probablement erreur de mesure durant l'opération.

Tableau 5 : compactage de la masse issue de l'opération de «grappage». Durée totale de l'opération : 40 mn.

C/ Expérimentation 3 : de type « grappage ».

Ici encore, la loupe sortie du bas-fourneau, n'a pas permis une opération de compactage direct satisfaisante. Les tentatives de compactages sont décrites dans le Tableau 6.

Heure	Opération	Poids
	Poids initial de la loupe	5 Kg
00:00	Chauffe foyer de forge au charbon	
00:37	Chaude	
00:38	Charbon pour recouvrir la loupe Refroidissement du pourtour du foyer avec de l'eau pour concentrer la chaleur vers le centre du foyer Opérations renouvelées 3-4 fois	
01:15	Sortie de la loupe	4,5 Kg
	Martelage 2 – 3 coups, loupe pas assez chaude	
01:16	Chaude	
	Ajout de charbon + refroidissement des pourtours à l'eau	
01:22	Modulation de la ventilation à la main : permet de faire remonter les flammes et d'homogénéiser la chaleur entre le fond et le dessus du foyer	
01:24	Sortie de la loupe du foyer	4,5 Kg
	Martelage à la masse Loupe cassée en deux perte d'un fragment important Martelage petit au marteau (métal ?), remis dans les cendres pour le maintenir au chaud	Poids du fragment 1,5Kg
01:28	Chaude	
	Plusieurs ajouts de charbon Refroidissement à l'eau Modulation de ventilation	
01:37	Charbon sur la loupe après l'avoir retournée Crépitements en fin de chaude	
01:44	Sortie de loupe	
	Martelage La loupe se fragmente en plusieurs morceaux	
01:48	Chaude Loupe 2 – Ajout de sable de Fontainebleau	
	Plusieurs ajouts de charbon Refroidissement à l'eau Modulation de ventilation	
01:59	Ajout de sable de Fontainebleau sur la loupe	
	Plusieurs : ajouts de charbon Refroidissement à l'eau Modulation de ventilation	
02:11	Retournement loupe et ajout de sable	
02:12	La loupe se fragmente au martelage	
02:15	Fin de manip, loupes et déchets de réduction récupérés pour le «grappage»	

Tableau 6 : expérimentation 3 : tentatives de compactage

L'ensemble des fragments issus de la réduction et des opérations de martelages et susceptibles de contenir du métal est collecté. Le choix de ces fragments se fait par sensation sous le marteau. Si le fragment se déforme et ne se casse pas sous l'effet de petits coups de marteaux au coin de l'enclume, alors il est susceptible de contenir une quantité conséquente de métal. Par opposition, un fragment de scorie se brise sous le marteau. Le poids total de fragments collecté pour l'opération de «grappage» est de 18Kg. L'opération a été réalisée non pas dans un foyer spécifique mais dans un foyer de forge en inclinant la tuyère.

Heure	Charge (g)	Remarque
00:00	500	Entre les charges pelletées de charbon Refroidissement des pourtours du foyer avec de l'eau, entre deux charges au début puis toutes les charges quand le foyer est chaud
00:04	500	
00:06	800	
00:08	500	
00:10	500	
00:12	1000	
00:14	500	
00:17	2800	
00:19	500	
00:21	500	
00:23	1600	
00:25	500	
00:27	500	
00:29	600	
00:32	500	
00:35	1600	
00:37	500	
00:40	600	
00:43	1000	
00:46	500	
00:48	500	
00:53	500	
00:55	500	
01:03		Sortie de la loupe collée au fond du foyer début du martelage de compactage

Tableau 7

Le poids total de la loupe obtenue en fin d'opération est de 12 Kg. L'opération de « grappage » (Tableau 7) a été suivie par un compactage de cette loupe. Les opérations sont décrites dans le Tableau 8 Au cours de cette opération, des mesures de températures ont été effectuées en posant un thermocouple au contact de la masse de métal. Ce type de mesures est à prendre avec la plus grande prudence du fait de la

difficulté de l'opération pendant le forgeage. De manière parallèle ont été noté les températures estimées à l'œil par le forgeron-métallurgiste. Le compactage a été effectuée par 3 personnes : un forgeron-métallurgiste dirigeant l'opération et tenant la masse de métal et deux marteleur compactant le métal à l'aide de masse.



Figure 3: compactage final

Heure	Opération	Poids (kg)	Remarque
00:00	Début chaude avec soufflerie		
00:09	Sortie loupe, martelage	12	Forgeron-métallurgiste : 800-900°C après martelage : 800°C
00:18	Chaude		
00:25	Sortie et martelage	10	Perte de fragments Le forgeron-métallurgiste a la sensation que le fer est « dur ». Sonde : 760°C
00:31	Chaude		
00:37	Sortie du métal pour mesure de température		Sonde :> 1215 °C
00:38	Chaude		
00:41	Sortie et martelage	9 après martelage	
00:43			Sonde : 960°C
00:45	Chaude		
00:53	Sortie et martelage		
01:05		8	T = 734°C
01 :07	Chaude		
01:17	Retournement loupe dans le foyer		
01:20	Sortie et martelage	7	
01:28	Chaude		
01:32	Arrêt de l'opération	7	

Tableau 8 : Expérimentation 3 : opérations de compactage après grappage.

La masse obtenue est un cube compact de 10 cm de côté environ. Un point important à noter est que la quantité forgée ici semble être la masse maximale manipulable et forgeable dans marteau hydraulique. C'est à cause de difficulté de compactage que l'opération a été interrompue. L'opération de compactage est reprise malgré ces difficultés (Tableau 9).

Heure	Opération	Poids (kg)	Remarque
00:00	Début chaude sans soufflerie		loupe recouverte de charbon
00:02	Un petit coup de soufflerie pour enflammer le charbon		Charbon
00:23	Chaude avec soufflerie		
00:28	Sortie loupe, martelage à 3 masses		Différence de couleurs dans les zones apparaissant sur l'étoffe au cours du refroidissement
00:31	Chaude	6 Kg	
00:38	Sortie et martelage à 3 masses		
00:39	Début de fissuration		<i>prélèvement</i> d'un morceau détaché
00:45			Observation de lignes de fractures découpant des zones de couleurs différentes au cours du refroidissement
00:49	Fin d'opération		

Tableau 9 : expérimentation 3. suite du compactage

III. Discussion des résultats ; apports et limites de l'expérimentation

Ces trois expérimentations, ont mis en œuvre deux pratiques différentes de l'épuration. La première est basée sur le compactage direct de la loupe sortant du bas fourneau, la seconde passe avant cela par une étape de « grappage » qui consiste à souder ensemble dans un foyer, un grand nombre de fragments de loupes impossibles à compacter directement du fait qu'ils contiennent encore une part trop importante de scories.

En fait, pour les deux pratiques, il est possible de diviser la phase d'épuration en deux étapes :

- Phase I : à partir d'une loupe sortant de bas fourneau ou de fragments hétérogènes ; compactage ou « grappage » afin d'obtenir une masse intermédiaire de métal suffisamment compact pour être forgée violemment et en utilisant une masse.
- Phase II : forgeage de métal de cette masse jusqu'à obtenir le lingot ou l'ébauche désirée. Cette phase consiste à effectuer un grand nombre de replis sur le métal ; c'est l'opération de corroyage proprement dite.

En plus de données quantitatives sur les pertes de masses liées à l'opération, les expérimentations ont permis de préciser les modes opératoires possibles pour transformer une loupe en une masse de métal forgeable. Deux étapes ont pu être mises en évidence. La première consiste en une agglomération de la loupe hétérogène. Cette phase, en fonction de la richesse de la loupe en métal peut être plus ou moins délicate. Dans tous les cas elle débutera par un martelage léger. A ce stade peuvent se produire des pertes importantes de métal. On pourra alors choisir de remplacer l'opération de martelage par un « grappage » de ce métal. Les opérations de grappage n'ont jamais été validées archéologiquement. Il est vrai qu'elles ne sont susceptibles de ne laisser que peu d'indices archéologiques. Un point important est que ce type d'opération nécessite une inclinaison forte de la tuyère et une ventilation importante sur des durées prolongées. Les opérations classiques de forges, elles, nécessitent également une soufflerie violente mais sur des temps très courts. Ceci est réalisable avec un soufflet classique. On devra se poser la question de savoir s'il en est de même pour une soufflerie violente et prolongée du type de celles que nécessitent les opérations de grappage.

Ces résultats montrent l'importance du temps et de l'énergie consacrés à l'étape d'épuration. En exceptant le rendement assez faible de l'opération avec une loupe de départ de relativement petite dimension, il semble capital d'insister sur le temps de travail et le nombre de personnes que nécessite l'opération, car il peut s'agir là d'une véritable étape limitante dans la chaîne opératoire de la production du fer. Dans son article consacré à l'emploi du fer dans les cathédrales gothiques (BENOIT 2002), P. Benoit estime que la capacité maximale de production d'un bas fourneau non activé à l'énergie hydraulique est de 20 kg de fer en barres, ce qui correspond déjà à une loupe de plusieurs centaines de kg. C. Verna mentionne comme capacité de production pour des moulins utilisant l'énergie hydraulique une masse d'environ une tonne par

semaine (VERNA 2001). Ces chiffres qui semblent insister sur la capacité de réduction des bas fourneaux ne doivent cependant pas être interprétés ainsi ; c'est pourtant le travers qu'il est aisé de réaliser en faisant uniquement des estimations sur le nombre de réductions nécessaires à la production d'une certaine quantité de métal. Il est vrai que les bas fourneaux médiévaux avaient dans la plupart des cas une capacité de production limitée, mais en réalité quelle que soit la masse de la loupe au sortir du bas fourneau, le temps nécessaire à son l'épuration y sera certainement à peu près proportionnel. En effet, le forgeron-métallurgiste ne pourra certainement pas manier seul une loupe d'une cinquantaine de kg ou plus. Il lui sera plus pratique de briser cette loupe de grandes dimensions pour la compacter en plusieurs fois, ce qui allonge le temps de la première phase de l'épuration ou nécessite un nombre plus important de personnes qui travailleraient simultanément. Pour la seconde phase, même en admettant que l'on décide de souder différents lopins de fer en cours d'épuration issus de la phase I pour réduire le nombre d'opérations, il est évident que plus la masse de fer à compacter est grande, plus il faudra faire de replis et plus le temps et l'énergie consacrés seront importants. De plus, le temps de réduction n'est pas non plus directement proportionnel à la charge de minerai réduit, notamment à cause des phases de montée en température et de chauffage de la colonne.

Glossaire

Affinage. – Historiquement, terme associé à la métallurgie des métaux non-ferreux (affinage de l'argent) utilisé par analogie, entre XIIe et XVIIe siècles dans les ateliers de production de fer (filère loupe/fer-acier). A partir du XVIIIe siècle, le terme sert exclusivement à désigner la décarburation de la fonte de même que le terme « affinerie » qui lui est lié (procédé indirect d'obtention du fer).

Battitures. – Micro-déchets, particules corrodées qui se détachent de la masse de fer lors de son martelage.

Bocard. – Engin mu par l'hydraulique, destiné au pilage des matières : minerai, charbon de bois, scories. Les matières étaient jetées dans une auge et pilées à sec ou à l'eau.

Chaîne opératoire. - Ensemble ordonné des gestes individuels et/ou collectifs mis en œuvre pour obtenir un objet. La chaîne opératoire est une décomposition gestuelle du processus d'obtention du résultat, mis en œuvre à l'échelle d'un ou de plusieurs ateliers. Le concept de chaîne opératoire permet de faire émerger les linéaments des procédés techniques.

Cinglage. - Evacuation des scories par martelage à très haute température avec enclume en pierre et maillet en bois. L'action est délicate car si elle n'est pas bien menée on peut détruire la loupe.

Combustion lente. - Procédé métallurgique de réduction des minerais en phase solide sans usage de la ventilation manuelle ou mécanique.

Compactage. - Martelage de la loupe exécuté avec un marteau en fer avec enclume en pierre ou en fer. Cette opération a pour but de faire un bloc (forme géométrique permettant la préhension et les repères de mise en section. Dans le procédé direct, cinglage, compactage, corroyage sont des phases dont les frontières ne sont pas nettes.

Complexe technique. - Ensemble des moyens matériels, intellectuels, financiers, culturels, économiques, juridiques, politiques nécessaires pour la mise en place d'un atelier de production, le rendre viable et productif, quel qu'en soit la taille. Ensemble des moyens nécessaires au développement d'une filière de production.

Corroyage. – Replis successif et soudage au feu, d'obtenir un lopin de fer forgeable. De 4 à 6 replis, soudés suffisent à rendre le lopin ouvrable. On obtient alors un lopin de fer marchand. Il existe une autre forme de corroyage qui est la mise en section fine,

associé à un empilage avec resoudage de plusieurs morceaux d'acier de bas fourneau, répétée plusieurs fois. Ce corroyage d'élaboration permet une bonne répartition des inclusions non métalliques dans la matrice du fer. Il a pour but d'augmenter la dureté en limitant les risques de fissuration dus aux inclusions non métalliques.

Espace technique. Région géographique et/ou historique présentant une homogénéité, un style individualisé dans les procédés, les lignées utilisées, les grammaires techniques en vigueur, par opposition à d'autres régions géographiques et/ou historiques déclinant les mêmes filières, lignées, procédés, dans des styles (formes et modalités de détail) différents.

Faciès techniques. - Variantes morphologiques et/ou fonctionnelles propres à des espaces ou à des cultures techniques données.

Filière de production (ou filière technique). – Suite de procédés, de lignée techniques et de chaînes opératoires mis en œuvre pour l'obtention d'un type de produit semi-fini ou fini.

Filière loupe/fer-acier. – Suite de procédés, de lignée techniques et de chaînes opératoires, mis en œuvre pour l'obtention de fer ou d'acier après une réduction du minerai en phase solide et obtention d'une loupe. Le « procédé direct » (minerai => loupe => fer) appartient à cette filière.

Filière fonte/fer-acier. – Mise en œuvre de suite de procédés, de lignée techniques et de chaînes opératoires, pour l'obtention d'un type de produit semi-fini ou fini. Le « procédé indirect » (minerai => fonte => fer) appartient à cette filière.

Forgeage. - Action de mise en forme d'objet en fer ou en acier par déformation plastique du matériau à chaud.

Four à scories coulées. – Dans le cadre du procédé direct, bas-fourneau dans lequel l'opérateur fait s'écouler la scorie en dehors du four durant la réduction.

Four à scories piégées. – Dans le cadre du procédé direct, bas-fourneau dans lequel l'opérateur laisse la scorie qui s'écoule lors de la réduction, s'accumuler dans une fosse située à l'intérieur du four, en dessous de la zone de la loupe en formation..

Grappage. – Terme de création récente, le grappage désigne l'agglomération de fragments ferreux par soudage et/ou martelage à chaud dans un foyer fermé (atmosphère réductrice). Il est pratiqué aujourd'hui par les forgerons comme forme de recyclage. La présence de cette opération dans la filière loupe/fer-acier est attestée historiquement et ethnologiquement dans les espaces techniques européens, africains et asiatiques.

Habitus technique. – Ensemble des comportements, des pratiques et des symboliques

commun à un groupe professionnel, et explicitement ou implicitement mis en œuvre.

Lignée technique. - Déclinaison d'une machine, d'un outil, d'un procédé à partir d'une souche originelle au travers du temps, des espaces, voire des systèmes techniques.

Minéralurgie. – Terme créé à la fin du XVIIIe siècle par Hassenfratz, sur le modèle des termes : « sidérurgie » et « métallurgie », apparus quant à eux un siècle auparavant, pour désigner la préparation mécanique des minerais avant leur réduction.

Nœud technique. - Au sens figuré, le terme « nœud » exprime « point de rencontre, de jonction d'éléments dans une affaire délicate et complexe » et au sens littéraire, une « péripétie ou suite de péripéties qui, dans une œuvre littéraire, notamment une pièce de théâtre, mène l'action à son point culminant. » L'expression « nœud technique » emprunte à ces deux dernières définitions, le sens de point de rencontre, de jonction à un moment délicat et complexe, où la technique en question culmine. Mais l'expression emprunte aussi au « nœud de commutation » informatique, ce « dispositif de ramification et de concentration de lignes de transmission, assurant une fonction d'aiguillage des données » (*TLF*) sans en garder toutefois le sens de construction consciente qu'implique le terme « dispositif ». Un nœud technique est donc un point de rencontre, de jonctions de savoir-faire et de compétences, déterminé par un moment délicat et complexe de la technique, les ramifications et concentrations de compétences qu'il induit autorisant les échanges et les transferts de ces compétences.

Patouillet. – Terme historique désignant les structure de lavage des minerais de fer.

Procédé technique. - Mise en œuvre de processus physico-chimiques dans le cadre d'un atelier pour l'obtention d'un produit semi-fini ou fini.

Procédé direct. Terme apparu en Europe dans la seconde moitié du XIXe siècle pour désigner la production du fer dans le cadre de la filière loupe/fer-acier.

Procédé indirect. Terme apparu en Europe dans la seconde moitié du XIXe siècle pour désigner la production du fer dans le cadre de la filière fonte/fer-acier.

Rable. Râteau plein en bois, utilisé pour tirer les matières des fosses de lavage.

Sentiers de dépendance. – Concept servant à évaluer les marges d'évolution des procédés, filières et entreprises de production, en fonction des contraintes internes et externes qui le constituent et l'environnent.

Stuckhofen. Fourneaux en usage dans l'espace technique allemand jusque dans le courant du XIXe siècle. John Percy dans son *Traité de métallurgie* le qualifie de « *high-bloomery furnace* », littéralement : haut-fourneau produisant une loupe » et le présente comme un « fourneau catalan, allongé vers le haut, dans la forme d'une cheminée rectangulaire ou circulaire... Les Allemands l'appelle *Stück-* ou *Wolfosen*, parce que la

grande masse métallique qui est extraite par le bas est appelé *Stück* (morceau) ou *Wolf* (Loup). » Le *Stuckhofen* qui produisait secondairement de la fonte liquide, pourrait bien constituer un jalon dans la filière loupe-fonte/fer-acier, filière de transition entre le « procédé direct » et le « procédé indirect ».

Système technique. – Concept servant à désigner des espaces techniques structurés, polarisés par des faisceaux techniques qui modèlent les grammaires techniques, architecturent les modes de pensée, déterminent les sentiers de dépendance. On distingue traditionnellement en Europe occidentale le système technique eau/bois/vent (XIIe – XVIIIe siècle), le système fer/charbon/vapeur (XVIIIe – XIXe siècle), le système pétrole/électricité/alliage (XIXe-XXe siècles).

Ventilation forcée. – procédé technique utilisant l'injection d'un courant d'air