REVUE ARCHÉOLOGIQUE DE PICARDIE

Trimestriel - N° 1-2 - 2009

L'actualité de l'archéologie du haut Moyen Âge en Picardie

Les apports de l'expérimentation à l'archéologie mérovingienne

Actes des XXIXe Journées internationales d'archéologie mérovingienne
Musée des Temps Barbares, Marle (Aisne)
26-28 septembre 2008

RÉDUCTION EXPÉRIMENTALE DE MINERAI DE FER FRANCILIEN

Benjamin JAGOU

INTRODUCTION

La recherche sur la métallurgie du fer au haut Moyen Âge a évolué ces dernières années dans la région francilienne. Un décompte récent effectué à l'occasion d'un mémoire universitaire (Jagou 2008) a mis en évidence la présence de 65 sites ayant livré des traces archéologiques de cet artisanat (fig.1) principalement dans la partie sud de la région avec la découverte du site de Saint-Maurice-Montcouronne dans l'Essonne (Goustard 1989) ou de Vert-Saint-Denis en Seine et Marne (Daveau 1995). Ces travaux ont également permis de mettre en évidence l'utilisation du minerai du type goethite, plus communément appelé « limonite » pour la période du haut Moyen Âge dans la région.

À l'occasion du diagnostic archéologique d'un site métallurgique effectué dans la parcelle des "Terres Salées" sur la commune de Saint-Martin-de-Bréthencourt dans les Yvelines (1), 17,167 kg de minerai ont été ramassés dans les tranchées stériles en structure archéologique. Le minerai ramassé sur le limon de plateau du site qui semble être de la goethite (FeOOH) a été identifié par Vincent Goustard (INRAP). La découverte de ce minerai nous a permis de mettre en place une expérimentation de réduction par le procédé direct. Ce type de réduction avec un minerai issu du sous-sol francilien n'avait jamais encore été effectué et avait donc pour objectif de tester sa faisabilité tout en fournissant des données quantitatives et qualitatives sur la production de fer obtenu.

1 - Diagnostic effectué par Fabrice Brutus (INRAP).

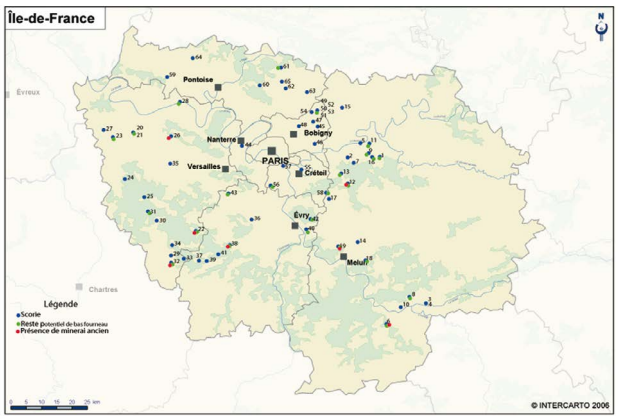

Fig. 1 - Carte de repartition des sites francilien ayant livre des traces metallurgiques.
Seine et Marne (77) - 1. Bailly-Romainvilliers "Le Bassin" - 2. Bussy-Saint-Martin "Rentilly" - 3. Châtenay-sur-Seine "Le Merdat" - 4. Chatenay-sur-Seine "La Rigoulotte" - 5. Chessy "Les Cornilles" - 6. Ecuelles "Ravanne" - 7. Ferrières-en-Brie "Z.A.C des hauts ferrières" - 8. Forges "Mauperthuis" - 9. Jossigny "Le Pré Chêne" - 10. La Grande Paroisse "Les Rimelles" - 11. Montévrain "Le Clos Rose" - 12. Ozoir-la-Ferrière "Avenue de la Doutre" - 13. Roissy-en-Brie "Ru du Moulin de la Forge" - 14. Saint-Germain-Laxis "Climat des terres noires" - 15. Saint-Pathus "Les petits ormes" - 6. Serris "Les ruelles" - 17. Servon "L'arpent Ferret" - 8. Sivry-Courty "Les Bretinaux" - 19. Vert-Saint-Denis "Les Fourneaux".
Yvelines (78) - 20. Arnouville-lès-Mantes "Chemin de l'Epine Basseline" - 21. Arnouville-lès-Mantes "Les 50 Arpents" - 22. Bullion "Rue de Noncienne" - 23. Dammartin-en-Seve "Ferme de Garel" - 24. Gambais "Château-trompette" - 25. Gambaiseuil "Bois des longues Mares" - 26. Herbeville "Le clos Imbert" - 27. Longnes "Le Moulin d'en Haut" - 28. Meulan-les-Mureaux "Les Mureaux" - 29. Purnay-en-Yvelines "Les Fourneaux" - 30. Rambouillet "Le parc de Châtillon" - 31. Saint-Lèger-en-Yvelines "Rue Octave Allaire" - 32. Saint-Martin-de-Bréthencourt "Les Terres Salées" - 33. Saint-Mesne "La Fosse d'Ormilard" - 34. Sonchamp - 35. Villiers-Saint-Frédéric "Les rues Gramet". ***Essonne*** (91) - 36. Marcoussis "Le château Bellejane" - 37. Roinville-sous-Dourdan "La Bruyère" - 38. Saint-Maurice-Montcouronne "Les Marais" - 39. Saint-Cyr-sous-Dourdan "Bistel" - 40. Saint-Germain-lès-Corbeil "La Butte à Gravais" - 41. Sermaise "Bellanger" - 42. Tigery "Z.A.C les Fossés neufs" - 43. Villiers-le-Bacle "Les Fonds d'Orsigny" - Hauts-de-Seine (92) - 44. Reuil-Malmaison "Noblet IV îlot 2". ***Seine-Saint-Denis*** (93) - 45. Drancy "Rue Louis-Delplacé" - 46. Gagny "1 place Foch" ; Montreuil "17-23, Enest Savart" - 48. Sevran "Église Saint-Martin" - 49. Tremblay-en-France "R.D. 40" - 50. Tremblay-en-France "Rue Cruppet" - 51. Tremblay-en-France "Château Bleu" - 52. Tremblay-en-France "Allée des Tilleuls" - 53. Tremblay-en-France "Chemin de la Pissotte" - 54. Villepinte "Maréchal de Latre-de-Tassiny". **Val de Marne** 55. Créteil "Saint-Christophe" - 56. Fresnes "Z.A.C Saint Eloi" - 57. Ivry-sur-Seine "Place Parmentier ilôt 2" - 58. Santeny "Le Purgatoire".**Val d'Oise -** 59. Avernes "Fontainne-Villiers" - 60. Baillet-en-France "La vielle Église" - 61. Belloy-en-France "Saint-Martin-du-Tertre" - 62. Le Mesnil-Aubry "La Croix Verte" - 63. Louvres "Le Bois d'Orville" - 64. Marines "Les Carreaux" - 65. Villiers-le-Sec "La Place de la Ville".

Pour réaliser cette expérimentation nous avons pris conseil auprès de Danielle Arribet-Deroin (2), et Paul Benoit (3), afin de définir les techniques et les structures qui nous permettraient d'obtenir une éventuelle loupe de fer. Nous avons décidé d'utiliser les structures et le protocole utilisés par Paul Benoit pour son expérimentation, mise en place à l'abbaye de Fontenay (Côte d'Or). Nous nous sommes installés sur la plate-forme d'archéologie expérimentale établie par François Gentili sur le site du château d'Orville à Louvres dans le Val d'Oise, et ceci dans la continuité des essais de réductions effectués sur ce site depuis 2007.

LES ÉTAPES DU TRAVAIL

Dans un premier temps, il nous a fallu préparer le minerai prospecté afin de le calibrer pour la réduction.

LA PRÉPARATION DU MINERAI

Notre expérimentation a débuté par la réalisation des différentes étapes de préparation du minerai de fer. Les minerais ont été lavés afin d'ôter la gangue de limon qui les entourait. Il en est résulté 17, 1 kg de minerai propre (fig. 2). Dans un second temps, il nous a fallu concasser le minerai afin d'obtenir de petits nodules de la taille d'un petit haricot. Après cette opération, il nous restait 16, 5 kg de minerai. Cette calibration est importante pour permettre une meilleure introduction du minerai dans la structure et en faciliter la réduction. Après discussions avec Paul Benoit nous avons décidé de ne pas griller le minerai. Ce procédé ne nous permettrait pas d'augmenter la teneur en fer du minerai.

Fig. 2 - Le minerai utilisé.

Une fois le minerai traité nous nous sommes intéressés à la construction de la structure de réduction.

2 - Maître de conférences spécialiste d'histoire et archéologie des techniques médiévales et modernes à l'Université Paris 1.

3 - Professeur émérite d'histoire des techniques à l'Université Paris 1.

Fig. 3 - La structure de réduction.

LA STRUCTURE DE RÉDUCTION

Pour réaliser cette expérimentation nous avons été conduit à construire un bas fourneau. Sa morphologie s'inspire des découvertes réalisées en Île-de-France (Vert-Saint-Denis, Bullion, …) mais aussi des publications la production de fer brut en Île-de-France dans la période médiévale (Cabboï 2006). Nous avons donc construit une structure en forme de cheminée à scorie écoulée, excavée, sur 38 cm de diamètre pour une hauteur de 73 cm (fig. 3). Le fourneau est constitué de pierres calcaires et de limon argilo-sableux prélevés sur le site d'Orville. Une porte de 26 cm de large et de 52 cm de haut est située sur le devant de la structure et le « gueulard » a un diamètre de 19 cm. Nous avons opté pour une ventilation forcée afin d'optimiser nos chances d'obtenir du fer. Cette dernière est située à l'arrière de la structure et constituée d'une tuyère en terre cuite.

Une fois la structure achevée et séchée pendant une semaine à l'air libre, nous avons pu procéder à notre réduction du minerai de fer.

LA RÉDUCTION DU MINERAI

La réduction du minerai a eu lieu le 2 décembre 2008. À 9h 45 nous avons fait un feu de bois au sein de la structure afin de l'amener progressivement à bonne température (fig. 4). À 11 h, nous avons fermé la porte de notre fourneau à l'aide de plusieurs blocs de calcaire liés avec du limon. Nous avons laissé une ouverture de 4 cm sur le devant afin d'avoir un canal d'évacuation pour une possible coulée de scorie lors de la réduction. Le feu a été alimenté en bois jusqu'à 13h 15. A partir de cet instant la température dans le fourneau était suffisante pour initier le processus de réduction, et la structure n'a ensuite plus été alimentée que par du charbon de bois. Un premier seau de charbon a d'abord été versé afin tapisser le fond de la structure. Une fois le charbon bien

Fig. 4 - Préchauffage de la structure.

consumé, un remplissage total de la structure a été réalisé à 13h 25. À 13h 55, l'ensemble du charbon présent dans la structure était en combustion, nous avons effectué une mise à niveau du combustible et démarré la soufflerie à 14h (4).

À 14h 10 nous avons procédé à la première charge dans le bas fourneau. Cette dernière était constituée de 800 g de minerai concassé (fig. 5) et de 1kg de charbon de bois constitué de petits nodules (entre 2 et 5 cm). De 14h 10 à 15h 15, nous avons mis neuf charges similaires à celle précédemment décrite (*cf.* tableau de synthèse). À 15h 21, une obstruction de la tuyère par de la scorie a été observée. Cette dernière a été dégagée à l'aide d'une longue tige de fer. De 15h 24 à 15h 45, trois nouvelles charges ont été réalisées. La treizième charge (15h 55) était uniquement composée de 800 g de minerai. Nous avons pris la décision de réaliser cette charge de minerai uniquement en constatant que nous avions un surplus de charbon de bois au sein de la structure, car ce dernier ne descendait pas dans le fourneau. Ce surplus peut s'expliquer par le fait que la loupe de fer en formation dans la structure a pris de plus en plus de place et la descente de charbon s'en est donc trouvé ralentie. À 16h 03, nous avons repris le cours des charges normales (charbon +

4 - Nous avons opté pour une ventilation forcée électrique équivalent en débit à une ventilation manuelle mais facilitant sa réalisation technique par une conduite régulière.

Fig. 5 - Première charge de minerai et de charbon dans la structure.

Fig. 6 - Ouverture de la porte de fourneau et coulure de scorie.

minerai), mais la quantité de minerai introduit dans la structure a été portée à 1 kg de minerai. Ainsi de 16h 03 à 16h 39 cinq charges de 1 kg de charbon et de 1 kg de minerai ont été réalisées. La dernière charge a été effectuée à 16h 47 avec les 600 derniers grammes de minerai encore à notre disposition. Une fois cette dernière charge réalisée, la ventilation a fonctionnée pendant encore environ 30 minutes afin de permettre aux dernières charges de descendre au cœur de la structure et d'être réduites. La soufflerie a été totalement arrêtée à 17h 14 et la porte du fourneau a été ouverte à 17h 16. Une coulée de scorie a été remarquée lors de l'ouverture de la porte et une loupe de fer a pu être extraite de la structure de réduction (fig. 6).

RÉSULTATS DE CETTE EXPÉRIMENTATION

Tout d'abord, concernant la consommation de notre structure pour cette expérimentation, nous avons observé une consommation de 150 litres de charbon de bois (soit 30 kg) sur l'ensemble de la durée de l'opération. De surcroît, 16 kg de minerai ont été introduits dans le fourneau (5). Concernant la

5 - La perte du demi kilo manquant par rapport au moment où le minerai avait été pesé lors de la fin du concassage peut s'expliquer par une perte lors du transport ou lors des pesages des charges

structure de réduction, cette dernière a bien supporté le processus même si nous avons pu observer une scorification des parois à l'emplacement de la tuyère. Cette structure pourrait donc très bien supporter une nouvelle réduction.

Enfin pour finir, lors de cette expérimentation, nous avons obtenu environ 5 kg de métal. Ce dernier est matérialisé par une loupe de fer extraite du fourneau lors de l'ouverture de la porte de la structure et par des fragments de métal ramassés

Heures	Évènements	Minerai (g)	Charbon (kg)	Charbon (l)
9h 45	Mise en route d'un feu de bois dans la structure			
11h 00	Fermeture de la porte			
13h 15	Premier seau de charbon		1	5
13h 25	Remplissage de charbon de tout le fourneau		10	50
13h 55	Mise à niveau du charbon		1	5
14h 00	Démarrage de la soufflerie			
14h 10	1ère charge	800	1	5
14h 16	2e charge	800	1	5
14h 23	3e charge	800	1	5
14h 34	4e charge	800	1	5
14h 43	5e charge	800	1	5
14h 51	6e charge	800	1	5
14h 59	7e charge	800	1	5
15h 07	8e charge	800	1	5
15h 15	9e charge	800	1	5
15h 21	obstruction tuyère par scorie			
15h 24	10e charge	800	1	5
15h 37	11e charge	800	1	5
15h 45	12e charge	800	1	5
15h 55	13e charge	800		
16h 03	14e charge	1 000	1	5
16h 11	15e charge	1 000	1	5
16h 19	16e charge	1 000	1	5
16h 29	17e charge	1 000	1	5
16h 39	18e charge	1 000	1	5
16h 47	Dernière charge	600	1	5
17h 14	Arrêt soufflerie			
17h 16	Ouverture de la porte			
	Total des matières premières utilisées	16 000	30	150

Durée totale du protocole	7h 31
Durée totale de la réduction	3h 14

Métal produit	Poids (g)
1er fragment de loupe	600
2e fragment de loupe	1 050
3e fragment de loupe	2 050
Petits éléments ramassés dans les cendres	1 100
Total de métal produit en grammes	4 800

Tab. I - Tableaux de synthese de l'expérimentation.

Fig. 7 - Premier fragment de la loupe extraite du fourneau.

Fig. 8 - Second fragment de la loupe.

Fig. 9 - Troisième fragment de la loupe.

dans les cendres le lendemain de la réduction. En ce qui concerne la loupe, celle-ci s'est divisée en trois morceaux distincts. Le premier fragment (fig. 7) pèse 600 g, le second (fig. 8) 1 050 g et enfin le dernier (fig. 9) 2 050 g. Enfin 1,1 kg de morceaux de fer ont été ramassés dans les cendres.

CONCLUSION

Comme nous venons de le voir cette expérimentation a répondu aux objectifs que nous nous étions fixés. Nous avons réussi à obtenir environ 5 kilogrammes de fer pour 16 kg de minerai, ce qui indique que le minerai a une teneur minimale de 32 % de fer. Celle-ci est même probablement plus importante car des morceaux de minerai non réduit ont été découverts au sein des cendres issues de la réduction. La présence de ces éléments non réduits peut s'expliquer par le fait qu'ils doivent provenir des dernières charges effectuées et n'ont pas atteint le point le plus chaud de la structure avant l'ouverture de la porte. On observe également au sein de ces dernières des particules de fer microscopiques qui viennent se coller sur l'aimant et qui ne se sont donc pas agglomérées aux restes de la loupe.

Dans la continuité de cette opération, nous souhaiterions soumettre les différents fragments de loupe obtenus aux opérations de post-réduction (épuration et forge). Pour cela, nous envisageons de prendre contact avec un artisan forgeron possédant les compétences requises pour réaliser ces opérations dans un cadre expérimental. Ces phases de post-réduction nous permettront de mieux comprendre les caractéristiques intrinsèques de ce fer pour la réalisation d'objets, et d'éclairer ainsi un peu mieux les conditions d'utilisation de ce type de minerai au haut Moyen Âge.

BIBLIOGRAPHIE

CABBOÏ S. & DUNIKOWSKI C. (1995) - *La sidérurgie chez les Sénons : Les ateliers celtiques et gallo-romains des Clérimois (Yonne)*, D.A.F. n° 51, Maisons des sciences de l'Homme, Paris, 183p.

DAVEAU I. (1995) - *Un complexe métallurgique et minier du haut Moyen Âge : Habitats Gaulois, Gallo-romain et du haut Moyen Âge : Vert-Saint Denis, Les Fourneaux* (77234495-2AH) : DFS de sauvetage urgent 01/04/94 au 31/08/94, Paris, AFAN centre-nord, Saint Denis, SRA.

JAGOU B. (2008) - *La production de fer en Île-de-France à la période médiévale*, mémoire de Master 1, Université Paris 1, 100p.

LEROY M., FORRIERES C. & PLOQUIN A. (1990) - « Un site de production sidérurgique du haut Moyen Âge en Lorraine (Ludres, Meurthe-et-Moselle). Étude des conditions de réduction du minerai lorrain », *Archéologie Médiévale*, Tome XX, p.141-179.

LEROY M. (1998) - «Les ateliers sidérurgiques médiévaux de Saint-Dizier », *Bulletin de la société archéologique Champenoise*, n° 91, Société archéologique champenoise, Reims, p 4-167.

LEROY M. & CABBOÏ L. (2006) - *Les formes d'organisation de la production de fer en métallurgie ancienne, systèmes de production et chaîne opératoire dans les ateliers de l'Est du Bassin Parisien, de l'âge du Fer au haut Moyen Âge*, Programme Collectif de Recherche Paléométallurgie du fer, INRAP, Laboratoire des métaux.
MANGIN P., dir., (2004) -, *Le fer*, collection archéologie, Errance, Paris, 239p.

SERNEELS V. (1993)- *Archéométrie des scories de fer. Recherches sur la sidérurgie ancienne en Suisse occidentale*, Cahiers d'archéologie Romande, n° 61, Lausanne, 240p.

L'auteur

Benjamin JAGOU

Résumé

Les recherches métallurgiques du premier Moyen Âge pour la région Île-de-France et la découverte de minerai francilien nous ont poussé à réaliser une expérimentation de production de fer brut par le procédé direct. Cette expérimentation a eu lieu en décembre 2008 sur le site du château d'Orville à Louvres (Val-d'Oise).

Mots-clés : production de fer brut, haut Moyen Âge, bas fourneau, minerai.

Abstract

Research into early mediaeval metallurgy in the Ile de France region, together with the discovery of iron ore in the same area prompted us to experiment with the production of as-cast iron by the direct technique. This project was carried out in December 2008 on the site of the "château d'Orville" at Louvres (Val d'Oise).

Key words : raw iron production, early Middle Ages, furnace, ore.

Traduction : Margaret & Jean-Louis CADOUX.

Zusammenfassung

Die Forschungen zur frühmittelalterlichen Metallurgie in der Region Île-de-France und die Entdeckung von Eisenerz in dieser Region haben uns bewogen, zu versuchen experimentell Roheisen mit der direkten Methode zu produzieren. Dieses Experiment fand im Dezember 2008 auf der Ausgrabungsstätte des Château d'Orville in Louvres (Departement Val-d'Oise) statt.

Schlüsselwörter : Produktion von Roheisen, Frühmittelalter, Rennofen, Eisenerz.

Traduction : Isa ODENHARDT-DONVEZ (donvezservit@wanadoo.fr).