Zeitschrift: Cahiers d'archéologie romande

Herausgeber: Bibliothèque Historique Vaudoise

Band: 57 (1992)

Artikel: L'emploi des fourneaux à fer asymétriques du pied du Jura vaudois : deux hypothèses à vérifier

Autor: Pelet, Paul-Louis

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-836181

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 11.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

L'emploi des fourneaux à fer asymétriques du pied du Jura vaudois: deux hypothèses à vérifier

Paul-Louis PELET

LES réflexions que j'aimerais présenter aujourd'hui se fondent sur des fouilles déjà anciennes – «Fer charbon acier» a été publié en 1973[1] – et sur des découvertes plus récentes, encore inédites, à Montcherand (canton de Vaud) en 1983 et à Boécourt (canton du Jura) en 1989.

Ces réflexions s'appuient d'autre part:

– sur les expérimentations de fourneaux à fer auxquelles j'ai participé à Vordernberg (1978-79) et à Beaune (1983-84)[2],

– sur les recherches d'archéométrie sidérurgique de Vincent Serneels en Suisse romande[3],

– sur les fouilles dirigées par Ludwig Eschenlohr à Boécourt[4].

Il est possible maintenant de développer des hypothèses, que Radomir Pleiner pressentait déjà aux Bellaires en 1965, mais que trop d'incertitudes interdisaient de formuler.

Les fourneaux cobayes

Les fourneaux pris en considération, datent des VIe et VIIe siècles ap. J.-C. Ils se situent au niveau stratigraphique supérieur des fouilles des Bellaires et de Montcherand, à moins qu'ils ne forment des unités d'exploitation isolées, comme à Bossena I, Prins-Bois II (VD) ou Boécourt (JU).

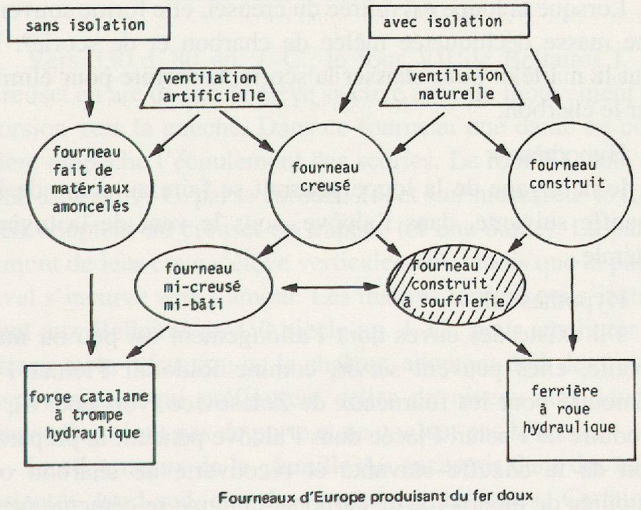

Fig. 1. Fourneaux d'Europe produisant du fer doux.

Fourneaux «construits dotés d'une soufflerie» (fig. 1); ils se distinguent des modèles asymétriques antérieurs, relevés dans le site de Bellaires I, par leurs portes solidement construites et par l'aménagement d'un creux de coulée pour les scories. Ils utilisent une tuyère frontale, posée sur le seuil de la porte et (excepté Prins-Bois II qui adopte un abat-vent) une ou deux tuyères latérales, insérées de 25 à 45 cm en dessus du fond du creuset. Ils sont fréquemment jumelés. Les expérimentations de Philippe Andrieux à Beaune, en 1983 dans un fourneau de ce type ont révélé que deux tuyères disposées perpendiculairement, mais à deux niveaux différents accroissent de 100° la température de la cuve.

Grâce à une bonne réfraction de la chaleur et surtout grâce à ce double appel d'air, les fourneaux asymétriques révolutionnent dans le Jura suisse la technique de réduction directe du fer: ils parviennent à faire couler la scorie en cours de chauffe, ce qui accroît considérablement leur capacité de

Tableau I
Les fourneaux asymétriques

Nom	N°	Datation (ap. J.-C.)	(larg. long.) du creuset	
Montcherand	Vb	av. 610 (dendro.)	60/60	(1/1)
Boécourt	I	550-650	70/70	(1/1)
Boécourt	IIb	550-650	60/60	(1/l
Boécourt	IIa	550-650	60/70	(1/1,16)
Bellaires III	XX	VIe-VIIe siècle	50/70	(1/1,4)
Montcherand	III	av. 610	60/90	(1/1,5)
Montcherand	Vc	av. 610	50/80	(1/1,6)
Bossena I	XXII	610 (dendro.)	40/68	(1/1,7)
Bellaires III	XIX	VIe-VIIe siècle	50/86	(1/l,7)
Bellaires I	VI	env. 510 ± 100	50/95	(1/1,9)
Bellaires I	IV	env. 510 ± 100	55/105	(1/1,9)
Prins-Bois II	XXIII		50/105	(1/2,1
Bellaires I	III	env. 510 ± 100	50/110	(l/2,2)
Montcherand	Va	610	55/130	(1/2,4)
Montcherand	I	610	50/140	(1/2,8)
Bellaires I	I	env. 510 ± 100	45/126	(1/2,8)
Bellaires I	II	env. 510 ± 100	45/140	(1/3,1)
Total 17				

L'âge du Fer dans le Jura. Cahiers d'archéologie romande 57, 1992, pp. 341-349

production. A premièrre vue, cette innovation technique n'est pas d'origine burgonde[5], ni franque. Adaptée dans le monde méditerranéen à des fourneaux très différents, elle est connue en Grande-Bretagne au IIe siècle ap. J.-C. (Ashwicken)[6].

Aux 9 fourneaux asymétriques du niveau stratigraphique supérieur publiés dans «Fer charbon acier», s'ajoutent des trouvailles plus récentes: les fours de Montcherand (VD), uniques ou jumelés, I, III, Va, Vb et Vc dont les fondations ont été mises au jour en 1983[7], et les deux fourneaux dégagés par Ludwig Eschenlohr à Boécourt en 1989 (JU).

Dimensions et forme du creuset.– Ce premier inventaire montre que les fourneaux asymétriques forment un ensemble peu homogène. Ni les dimensions des fourneaux, ni leurs proportions ne sont les mêmes, non seulement d'un site à l'autre, mais d'un four jumelé à son jumeau.

La colonne de droite du tableau I relève leur différence la plus frappante: la grande variabilité de la forme de la cuve, parfois quasi circulaire (Boécourt) ou à base trapézoïdale (Bossena I), le plus souvent allongée, ellipsoïde. Ces variations ne correspondent ni à une évolution chronologique ni à des sites particuliers. Observées dans le secteur des Bellaires, elles se retrouvent à Montcherand.

Elles ne soulignent ni une maladresse, ni un laisser-aller que les maîtres ferriers ne sauraient se permettre: une chauffe manquée réduit à néant une semaine de travaux préparatoires. Ces variations suggèrent le choix de processus techniques différenciés.

Le passage des cuves cylindriques à celles en forme de demi-poire:

1° améliore la réfraction,

2° favorise la ventilation; versés dans le gueulard, le charbon et le minerai forment normalement un cône avec une pente de 45°. Comme le montrent les figures 2 et 3, la tuyère latérale reste dégagée. Mais le volume à chauffer augmente, la consommation de charbon aussi.

La construction de fours allongés n'est rentable que si on les utilise pour produire plus, ou mieux.

Les expérimentations comparatives de Philippe Andrieux de fourneaux cylindriques (Scharmbeck) et d'un fourneau asymétrique trapu, du type des Bellaires III (fours XIX-XX) aboutissent aux résultats suivants:

Tableau II
Consommation des fourneaux expérimentaux de Philippe Andrieux, à Beaune

Fourneaux, type	Scharmbeck	(ind.)	Bellaires	(ind.)
Vol. de la cuve	125-150 dm3	100	225-250 dm^3	173
durée de la chauffe	12-15 h		12-15 h	
consom. moyenne de charbon	75 kg	100	140 kg	187
consom. moyenne de minerai	30 kg	100	60 kg	200
proportion charbon/ minerai	250%	100	233%	93

Dans la mesure où les deux modèles réduisent en fer la même proportion du minerai versé dans la cuve, le fourneau des Bellaires économise 7% du charbon, sans que Philippe Andrieux ait coulé la scorie en cours de chauffe pour accroître la production.

On peut évaluer la capacité des fourneaux les plus allongés comme Bellaires I, I-II ou Montcherand I à 255-290 dm^3. Ils consomment apparemment 15% de plus de charbon, n'offrent plus l'avantage de l'économie de combustible. Il faut trouver une autre raison à leur allongement.

Dès 1965, Radomir Pleiner, à Bellaires I, suggérait qu'il avait pu servir à aciérer la loupe qui se formait sous le gueulard. Poussée dans le renfoncement de la cuve le moins ventilé, elle y aurait subi une cémentation. Des fourneaux médiévaux tchèques d'une architecture certes très différente utilisaient ce procédé pour obtenir de l'acier[8]. L'hypothèse de Radomir Pleiner était tentante; mais est-il possible de déplacer une loupe dans le fourneau pendant la chauffe? La loupe en formation ne se distingue ni par sa forme ni par sa couleur dans la masse des scories en fusion. De plus cette masse reste extrêmement compacte – et difficile à manipuler. Arrêter la chauffe, dégager et déplacer la loupe, puis l'aciérer au cours d'une seconde chauffe en rechargeant un trop vaste fourneau, gaspillerait le charbon. Il reviendrait moins cher de le faire dans un plus petit foyer, (comme il en existait à Bellaires I: fourneau XI et foyer XV, fourneau XII et foyer XVI).

Une autre objection pouvait être faite, en un sens plus grave: il n'était pas certain que le prolongement de la cuve ait été moins ventilé que le creuset proprement dit. Aux fourneaux I, II, III, IV et VI de Bellaires I, les parois latérales étaient systématiquement détruites. On en avait très probablement récupéré les tuyères!

De toute évidence, les allongements des fours I à IV augmentent la consommation de charbon. Mais ils ne le font pas sans raison. S'il n'était pas rationnel d'utiliser «l'alcôve» après la réduction, il eût été au contraire judicieux de le faire pendant la réduction, en profitant de sa chaleur, mais pour quelle opération?

Lorsque la loupe est retirée du creuset, elle forme souvent une masse déchiquetée mêlée de charbon et de scorie[9]. Il faut la marteler pour chasser la scorie, la recuire pour éliminer le charbon.

Hypothèse I:

le nettoyage de la loupe pourrait se faire au cours de la chauffe suivante, dans l'alcôve, sous le vent de la tuyère latérale.

Hypothèse II:

s'il existe des cuves dont l'allongement est peu ou mal ventilé, elles peuvent servir, comme Radomir Pleiner l'a démontré pour les fourneaux de Zelesovice (voir note 8), à produire de l'acier. Placée dans l'alcôve pendant la préparation de la chauffe suivante et recouverte de charbon ou entourée de monoxyde de carbone, la loupe se cémente pendant que la nouvelle chauffe atteint la température de réduction du minerai.

Les fourneaux très allongés

Commencer par les fourneaux les plus allongés, facilitera nos déductions. Ce groupe comprend:

– les 5 fourneaux du niveau stratigraphique supérieur de Bellaires I, qui formaient avec Prins-Bois II, la «famille A» des fourneaux du pied du Jura vaudois[10],

– les deux fourneaux du niveau supérieur de Montcherand.

Tableau III

Les fours les plus allongés

Fourneau	N°	larg./long.	
Bellaires I	I	1/ 2,8	(jumelé à II)
Bellaires I	II	1/ 3,1	(jumelé à I)
Bellaires I	III	1/ 2,2	(jumelé à IV)
Bellaires I	IV	1/ 1,9	(jumelé à III)
Bellaires I	VI	1/ 1,9	(unique)
Prins-Bois II	XXIII	1/ 2,1	(unique)
Montcherand	I	1/ 2,8 (séparé, mais contemporain de Va)	
Montcherand	Va	1/ 2,3 (séparé, mais contemporain de I)	

Dans les 8 fourneaux, la paroi arrière est deux à trois fois plus allongée que les parois latérales.

Les fours jumelés n'ont pas les mêmes dimensions, leur volume n'est pas identique. Les fours I et II, ne sont pas symétriquement opposés: ils évacuent tous les deux leurs scories près du côté droit de leur porte.

Comme les 5 fourneaux de Bellaires I ont travaillé en batterie ou se sont succédé à très bref intervalle, les plus allongés ont vraisemblablement une autre fonction, une autre vocation que leur voisin. Il vaut la peine de scruter en détail leur architecture et les traces de leur activité.

L'asymétrie des cuves

Vers 330 ± 80 ap. J.-C., le four VII de Bellaires I, au creuset en arc de cercle élève sa cuve avec un mouvement de torsion vers la gauche. Dans ce fourneau une dame ou costière empêche l'écoulement des scories. Le four XI, daté de 380 ± 50 ap. J.-C. par le carbone 14, et son successeur le four XII adoptent un creuset en trapèze (et une dame). La paroi amont de leur cuve s'élève verticalement, tandis que la paroi aval s'incurve vers l'amont. Les maîtres ferriers qui s'installent aux Bellaires au IVe siècle ap. J.-C., pour améliorer le tirage ou la réfraction de la chaleur, adoptent déjà des cuves asymétriques qui préfigurent celles du niveau supérieur – mais elles n'ont pas de porte et ne coulent pas la scorie.

Les fourneaux de la «famille A» encastrés dans des talus orientés nord-sud ont des cuves asymétriques. Certaines parois restent rectilignes, (verticales ou obliques), les autres sont incurvées (planes ou concaves).

Tableau IV

Les cuves des fourneaux très allongés

Four	paroi amont (nord)	aval (sud)	gauche (ouest)	droite (est)
I	concave	porte, tuy.	enlevée (t)	concave
II	concave	porte, tuy.	concave	incurv.(t)
III	vertic.	porte, tuy.	enlevée (t)	concave
IV	vertic.	porte, tuy.	concave	enlevée (t)
VI	vertic.	porte, tuy?	enlevée (t)	détruite
XXIII	oblique	porte, tuy.	concave	concave
Mont.I	rectil.	porte	?	incurvée
Mont.Va	incurvée	?	?	?

Les dimensions du fond de la cuve ou creuset, sont données dans le Tableau I. Le creuset varie d'un four très allongé à l'autre. Un seul est pratiquement plat (I).

Les autres s'inclinent:
d'amont en aval (II, Montcherand I[11]),
vers l'ouest (à gauche) (IV),
vers l'ouest et l'aval (VI),
vers l'est et l'aval (III).

La position des tuyères frontales

Aucune tuyère frontale n'a été retrouvée en place dans une porte. (Elles ont été déblayées en même temps que les scories). Mais les creux de coulée et la répartition des scories sur les parois de la cuve suggèrent leur position. En principe, la scorie ne s'agglutine ni dans le gueulard (cheminée), ni au niveau du creuset. Elle forme un large bandeau dans la partie centrale de la cuve. Ce bandeau s'épaissit dans les zones les moins ventilées, où la température n'atteint pas le point de liquéfaction. (Il convient de rappeler que les soufflets envoient un vent frais dans la cuve. Une scorie visqueuse enrobe l'embouchure de la tuyère, et pend comme une barbe par-dessous).

Tableau V

Fourneau	Position des tuyères dans la porte
I	à gauche, oblique, 115° vers la droite
II	à gauche, oblique, 125° vers la droite
III	à gauche, angle incertain: 90°?
IV	à droite, 110° vers la gauche
VI	à droite, 110° vers la gauche
XXIII	à gauche oblique, 115° vers la droite
Montch. I	à gauche?
Montch. Va	indéterminable

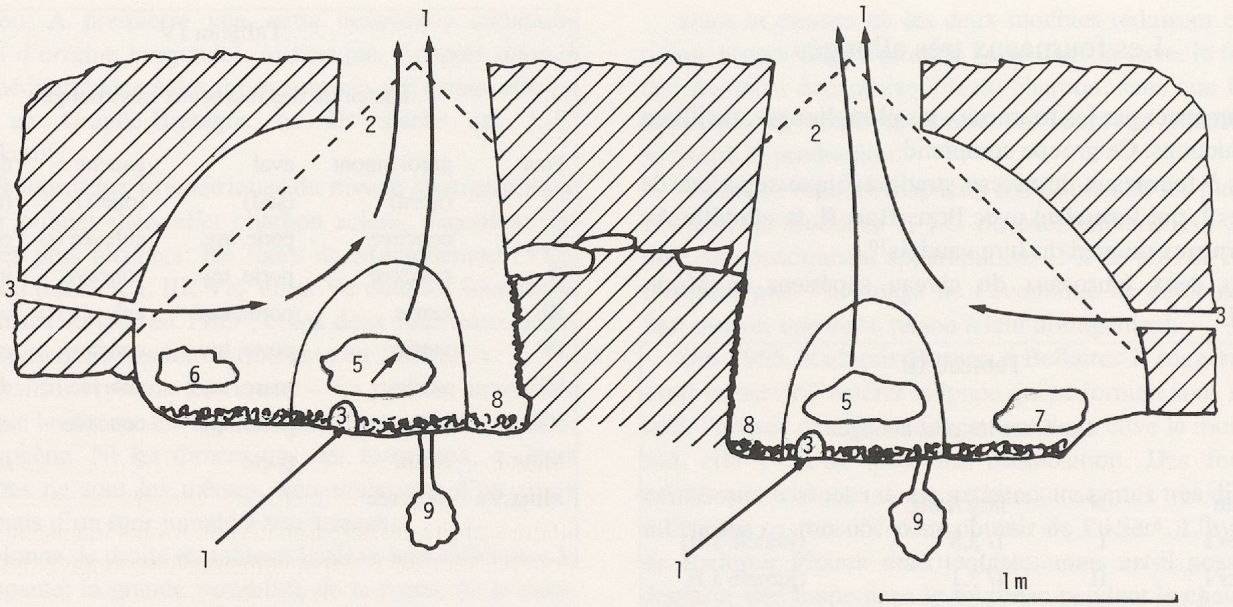

Fig. 2. Bellaires I, fourneaux I et II.
1: Ventilation. 2: Cône charbon-minerai. 3: Tuyère. 3: Buse sans tuyère. (fig. 6). 4: Scorification. 5: Eponge de fer. 6: Loupe à recuire. 7: Loupe à cémenter. 8: Résidus charbon-cendre. 9: Coulée de scorie. 10: Creuset trapézoïdal de Bossena I.

Fonctionnement des fourneaux très allongés

Les fourneaux accolés I et II (fig. 2). Les fours accolés I et II, les plus allongés de Bellaires I, (126 X 45cm et 140 X 45 cm) ont été conçus séparément. Ils peuvent se passer l'un de l'autre. Bien que leur élévation atteigne encore 90 cm, les deux fourneaux ont perdu leur paroi latérale extérieure (ouest et est) qui devait supporter une tuyère. C'étaient pourtant les parois les moins exposées à la chaleur. La paroi amont de la cuve est scoriée au four I sur 85 cm, au four II sur 95 cm, ce qui correspond dans les deux cas aux deux tiers (67%) de leur longueur. C'est dans cette zone seulement que se réduit le minerai. Les deux fourneaux évacuent leurs scories vers l'est. Si l'on essaie de simuler la double ventilation qui résulte de la tuyère frontale placée dans la porte et de la tuyère latérale, on arrive aux constatations suivantes:

Four I. Comme le creux de coulée est à droite, la tuyère frontale doit être placée dans la porte à gauche. Elle ventile la concavité droite du creuset. Le degré de démolition de la paroi latérale fait penser que sa tuyère, relativement basse, mais dégagée, ventilait le prolongement de la cuve et enflammait le monoxyde de carbone avant de s'engouffrer dans le gueulard et de provoquer un violent courant ascendant.

Four II. La tuyère frontale, à gauche dans la porte ventile vers la droite, en oblique, la paroi amont. Sur la gauche, où le vent est moins vif, la scorie s'accumule. La paroi latérale un peu moins démolie qu'au four I, peut suggérer une tuyère latérale un peu plus élevée.

L'allongement ellipsoïde du creuset s'explique difficilement s'il ne sert à une opération simultanée. Une tuyère placée 25 cm en dessus du fond du creuset pourrait réchauffer et

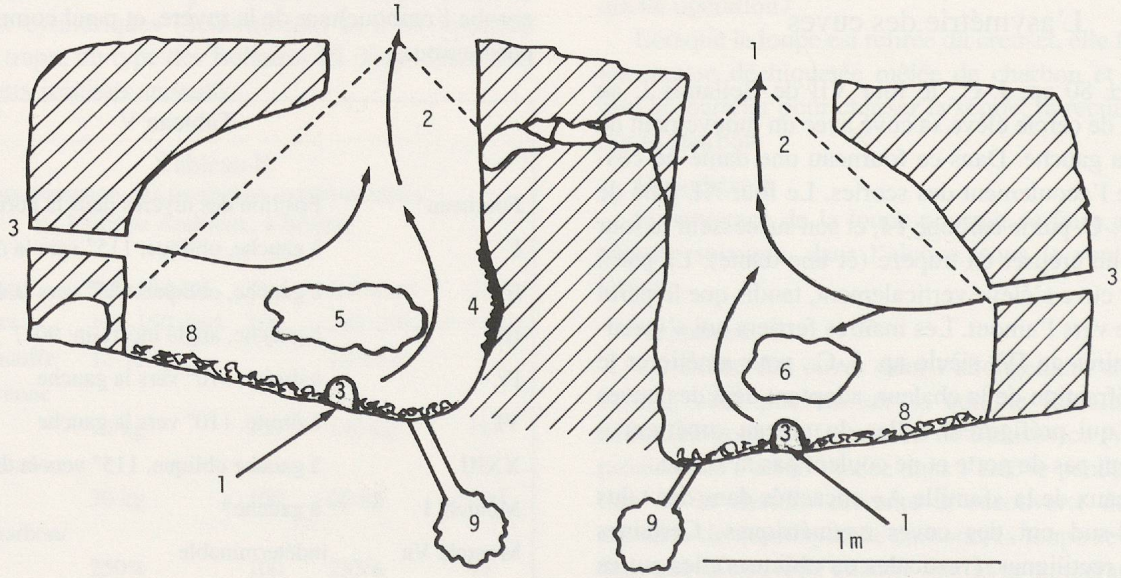

Fig. 3. Bellaires I, fourneaux III et IV. (Pour le détail de l'illustration se reporter à la légende de la fig. 2).

purifier une loupe au cours d'une opération de réduction du minerai. Placée à 35 ou 40 cm du fond, elle pourrait contribuer à cémenter, aciérer cette loupe. Faute de retrouver des tuyères en place, seule une expérimentation permettrait de valider ces hypothèses.

Le fourneau unique VI. Passablement détruit, ce four unique s'apparente par son allongement aux deux précédents. Sa paroi amont est scoriée sur 95 cm. Son fond, incliné vers l'aval est recouvert d'une couche de marne rougie par la chaleur, qui marque l'emplacement de la réduction et situe la coulée à l'ouest, comme au four IV. La tuyère frontale, placée dans la partie est (droite) de la porte, dirige le vent vers la gauche sous un angle d'environ 110°.

Les fourneaux jumeaux III et IV (fig. 3). Les fours III et IV construits d'un seul tenant inclinent leurs creusets très allongés (110 et 105 cm) en direction du pilier central. La hauteur conservée atteint 100-110 cm. Les deux cuves ne sont pas exactement symétriques: au four III, la paroi orientale est concave, tandis que son pendant, la paroi ouest du IV, est pratiquement verticale. Du fait de l'allongement des cuves, les deux tuyères latérales sont bien dégagées et deux opérations simultanées y seraient possibles comme dans le couple précédent. Mais une couche de scories très riche en fer, épaisse de 10 à 15 cm, recouvre la paroi amont du four III sur une longueur d'environ 100 cm. La ventilation semble avoir été également déficiente tout le long de cette paroi. Apparemment, ce fourneau a utilisé tout le volume de sa cuve à la réduction du minerai. Le four IV, qui prévoit lui aussi un écoulement de la scorie, place sa tuyère frontale à l'est (droite). Le vent pénètre vers l'ouest sous un angle de 110°. La cuve aux parois glaisées, orange clair ou roses à peine recouvertes de scories a bénéficié d'une ventilation parfaitement adaptée, autonettoyante; à moins qu'elle ait servi à une opération produisant moins de scories: par exemple recuire les loupes ou les cémenter. On serait tenté d'attribuer une double activité au couple et non à chaque fourneau.

Le fourneau de Prins-Bois II (XXIII) (fig. 4). Avec son creuset ellipsoïde deux fois plus long que large (105/50 cm), Prins-Bois II s'apparente aux fourneaux de Bellaires I. Mais il s'en différencie par l'absence de tuyères latérales et par la construction d'un abat-vent (plus exactement d'un abat-bise) qui vient renforcer la ventilation. La tuyère frontale, placée à gauche, ventile la paroi amont sous un angle de 115°, sans la réchauffer suffisamment. Elle est recouverte d'une épaisse couche de scories sur toute sa longueur. Mais la halde de Prins-Bois II a livré une coulure de fonte longue de 22 cm et pesant plus de 400 g. Le fourneau était donc capable de dépasser la température permettant de faire couler la scorie, puisqu'il parvenait à liquéfier le métal.

La porte en encorbellement s'ouvre sur la droite de l'ellipse. A gauche, une concavité profonde de quelque 40 cm s'abrite derrière l'abat-vent. Moins intensément ventilée, elle pourrait servir à cémenter une loupe pendant qu'il s'en forme une nouvelle sous le gueulard.

Les sidérurgistes du pied du Jura n'ignoraient pas l'acier. Des plaquettes aciérées ont été recueillies dans les déchets du four XIV «burgonde» de Bellaires I immédiatement antérieur aux fours jumelés.

Montcherand I et Va. Malgré son très mauvais état de conservation, le fourneau I de Montcherand appartient typiquement au groupe des fourneaux asymétriques très allongés. Sa porte s'ouvre sur la gauche de l'ellipse. A droite, une cavité profonde de quelque 40 cm pourrait convenir à la cémentation d'une loupe. L'emploi partiel de minerai carbonaté à Montcherand pourrait faciliter cette opération.

Le four Va, trop détruit, ne fournit aucun indice.

Les fourneaux à tuyères en place

La découverte de tuyères latérales en place à Bellaires III, à La Bossena I, puis en 1989 à Boécourt, mais dans des fourneaux moins allongés, confirme les déductions antérieures, apporte quelques réponses, oblige à affiner nos hypothèses.

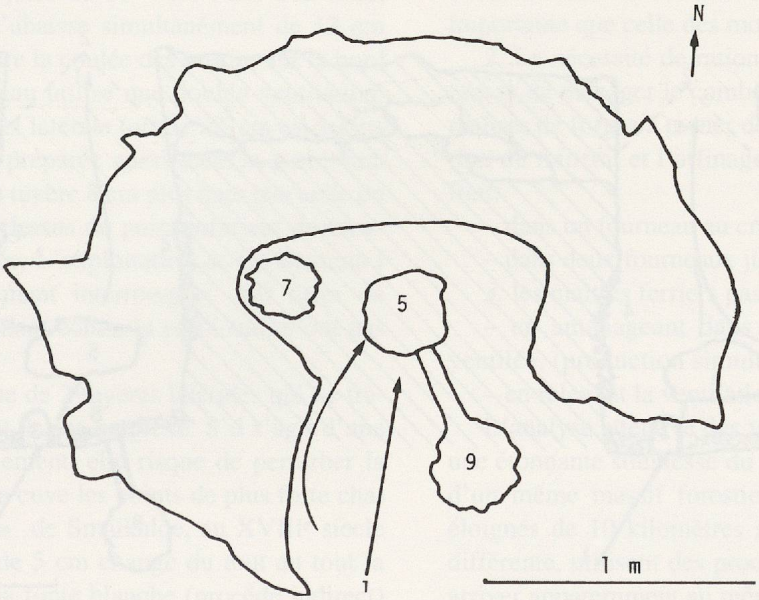

Fig. 4. Prins-Bois II, Fourneau 23. (Pour le détail de l'illustration se reporter à la légende de la fig. 2).

Tableau VI
Les fourneaux à tuyères en place
(Famille B du pied du Jura, et Boécourt)

Fourneau	N°	larg./long.
Boécourt	I - IIa	1/1–1/1,16
Bellaires III	XIX - XX	1/1,7 –1/1,4
Bossena I	XXII	1/1,7
Total 5		

Les cinq fourneaux de ce groupe sont beaucoup plus trapus que les précédents.

Tableau VII
Architecture des fours trapus

Fourneau	paroi amont (nord)	aval (sud)	gauche (ouest)	droite (est)
Bell. III, XIX	concave	porte t.	vertic.(t)	concave
Bell. III, XX	concave	porte t.	vertic.	concave(t.)
Boss. I, XXIIa	concave[a]	porte t.	incurv.(t)	incurv.(t.)
Boécourt I	incurv.	porte	incurv.(t)	?
Boécourt II	incurv.	porte[b]	rectil.	rectil.

Inclinaison des creusets:

Bell. III, XIX	amont-aval[c] (horizontal d'est en ouest)
Bell. III, XX	amont-aval et à droite (est)
Bossena I, XXII	amont-aval et à gauche (sud) Boécourt I
Boécourt I	amont-aval
Boécourt II	amont-aval

(a) La paroi amont de la Bossena est orientée à l'ouest, la paroi gauche, au sud, etc . – (b) Plusieurs fragments de tuyères de porte montrent nettement une implantation oblique et non perpendiculaire à la paroi amont. – (c) horizontal sur 30 cm, puis en pente: cela suffit pour entraîner la masse visqueuse des scorie. – t. = tuyère.

L'angle de ventilation: 4 fourneaux ont conservé leurs tuyères latérales; elles se font exactement face dans les fours jumelés XIX et XX, et sur les deux côtés du four XXII (mais à un niveau différent). La tuyère latérale gauche retrouvée en place à Boécourt, légèrement inclinée vers le bas, n'atteint pas de plein fouet la paroi de droite; elle dévie le vent d'environ 10° vers la paroi amont.

Tableau VIII
Tuyères latérales et frontales

Tuyères latérales:	hauteur en dessus du fond	inclinaison vers le creuset
four XIX	35 cm	5°
four XX	38 cm(a)	horizontale
four XXII, droite	25 cm	4°
four XXII, gauche	45 cm	buse horizontale fermée
Boécourt I gauche	?	

Tuyères frontales, dans la porte:

XIX	à gauche 105° vers la droite
XX	à gauche 115° vers la droite
XXII	à droite 90°
Boécourt	non perpendiculaires à la paroi amont

(a) entièrement recouverte par la scorie au moment de l'abandon du four.

Fourneaux jumelés XIX et XX (fig. 5). A Bellaires III, le creuset du four XIX, ellipsoïde, atteint 86/50 cm; celui du four XX, 70/50 cm. Les deux parois ouest des fourneaux sont verticales, les deux parois est, concaves. Le parallélisme de cette construction entraîne une dissymétrie de la ventilation. Au four XIX, la tuyère latérale, inclinée de 5° traverse la paroi verticale 35 cm en dessus du fond. Au XX, elle tra-

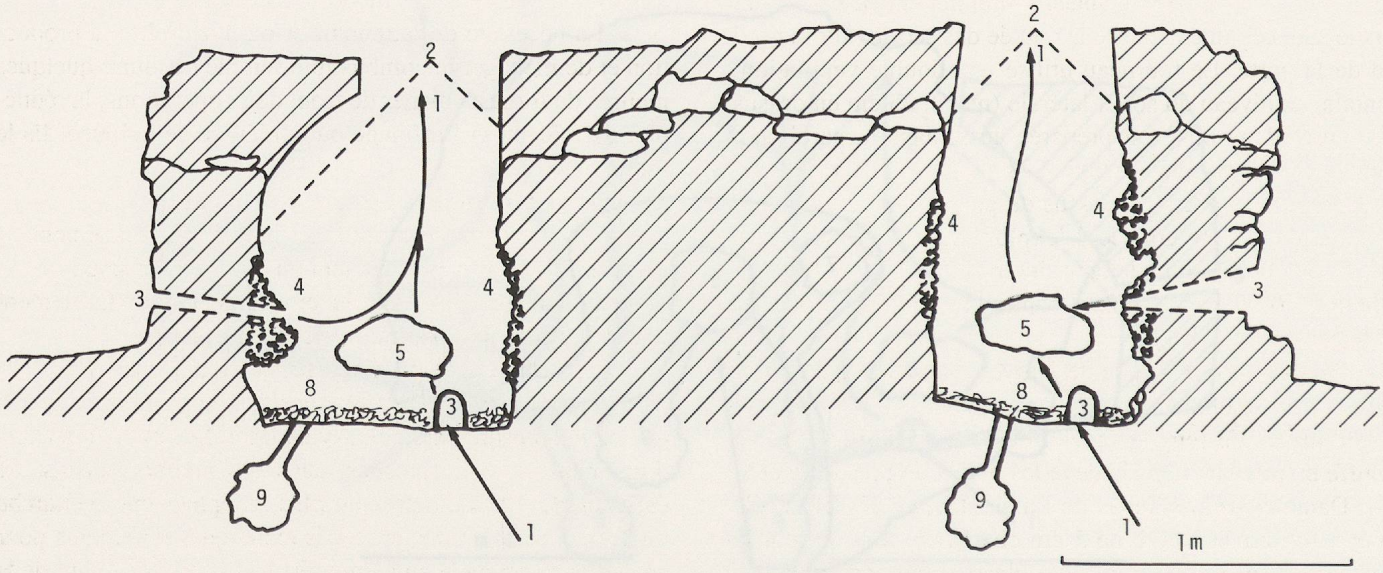

Fig. 5. Bellaires III, fourneaux XIX et XX. (Pour le détail de l'illustration se reporter à la légende de la fig. 2).

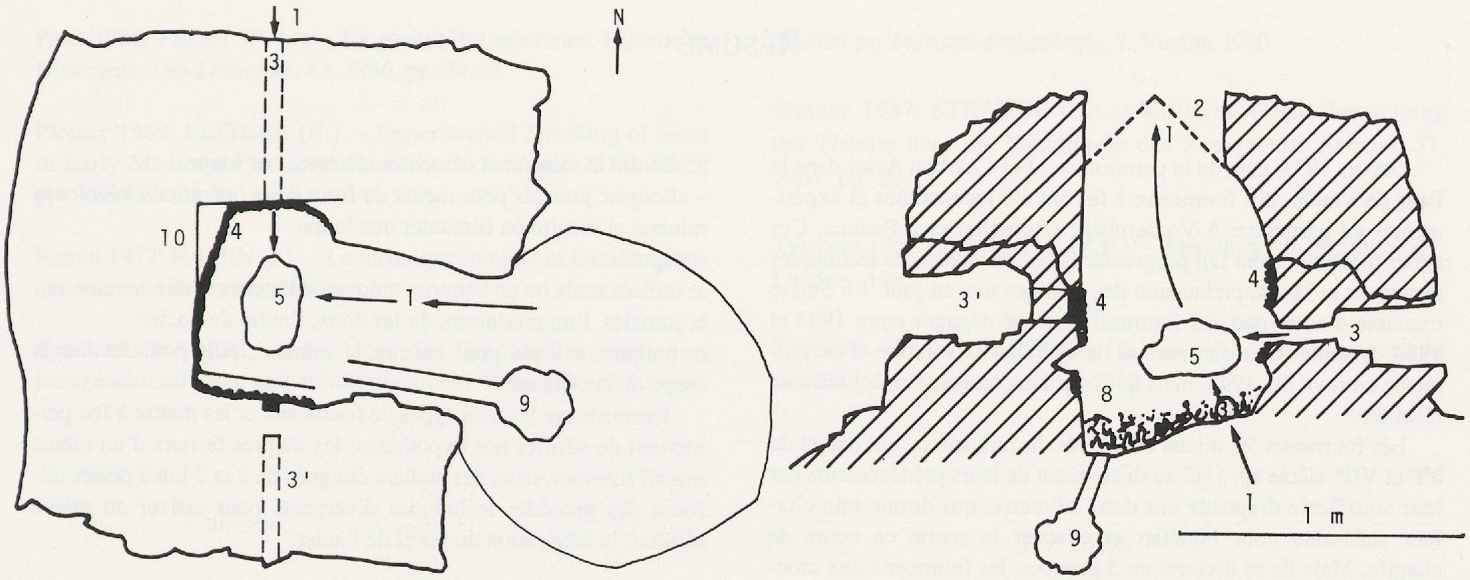

Fig. 6a et b. Bossena I, coupe du fourneau XXII. (Pour le détail de l'illustration se reporter à la légende de la fig. 2).

verse horizontalement la cuve dans sa partie la plus concave à 38 cm. du fond. Dans les deux fourneaux, les tuyères frontales prennent place dans la partie gauche de la porte. Elles atteignent le fond des deux cuves obliquement (angles de 105 à 115 °), mais en sens inverse. La direction du vent inférieur, le niveau du vent supérieur divergent d'une cuve à l'autre. L'effet doit être différent: mais seule une expérimentaion permettrait de dire si cette légère modification de la soufflerie suffit à faire du four XX un producteur d'acier.

Comme dans tous les fourneaux à cuve étroite, les tuyères latérales sont menacées par le cône de charbon et de minerai. Celle du four XX était entièrement recouverte par une coulée de scorie au moment de l'abandon de l'exploitation.

Fourneau de La Bossena I (XXII, fig. 6a et 6b): Le creuset de ce fourneau unique, en forme de trapèze irrégulier, de 58cm/40 cm rappelle par ses proportions les deux fourneaux précédents. La paroi amont de la cuve, (approximativement sud-nord) concave, est déjetée de 10° vers l'est. Son fond, incliné vers l'aval (est) s'abaisse simultanément de 13 cm vers le sud, ce qui concentre la coulée des scories sur le bord sud de la porte. Le fourneau utilise une double ventilation: frontale, au niveau du sol et latérale (nord), 25 cm en dessus du creuset. Une buse est préparée aussi dans la paroi sud. Cette buse, qui placerait la tuyère 8 cm plus haut que celle du nord, se trouve 45 cm en dessus du point inférieur du creuset. Elle n'a pas été utilisée. L'exploitation de La Bossena I semble avoir été brutalement interrompue: 150 litres de minerai grillé, déversé brûlant contre la paroi sud, n'ont pas été jetés dans la cuve.

La position asymétrique de 2 tuyères latérales qui ne travaillent pas simultanément, laisse perplexe. S'il s'agit d'une simple tuyère de remplacement, elle risque de perturber la chauffe en relevant dans la cuve les points de plus forte chaleur. Dans les «Flossöfen» de Smalkalde, au XVIIIe siècle encore, relever la tuyère de 5 cm change du tout au tout la production, qui passe de la fonte blanche (procédé indirect) au fer doux (procédé direct)...

Dans un bas fourneau, ce déplacement de la ventilation préluderait à un changement de fabrication. Diminuer l'apport d'oxygène dans le creuset et brûler plus haut dans la cuve le monoxyde de carbone favorise une cémentation de la loupe, c'est-à-dire une production d'acier.

L'exploitant d'une petite ferrière peut diversifier son travail sans construire une batterie de fourneaux.

Une surprenante diversité

L'examen attentif des fourneaux à fer du niveau supérieur, nous amène aux conclusions suivantes:

1. L'amélioralion de la réfraction de la chaleur dans les cuves, le perfectionnement de la ventilation, poursuivis de génération en génération, aboutissent au pied du Jura, vers le VIe siècle, à des modèles susceptibles de liquéfier la scorie. Chaque chauffe livre une plus lourde masse de métal; la production totale de ces fourneaux est deux ou trois fois plus importante que celle des modèles antérieurs[12].

2. La nécessité de rationnaliser ou d'accroître la production et de ménager le combustible semble conduire quelques maîtres de forges à mener de front deux opérations, la réduction du minerai et l'affinage ou l'aciérage de la loupe. Ils le font:

– dans un fourneau au creuset très allongé,

– dans deux fourneaux jumelés utilisés simultanément.

3. les maîtres ferriers passent du fer doux à l'acier:

– en aménageant dans la cuve une cavité faiblement ventilée, (production simultanée)

– en relevant la ventilation, (production alternée).

L'analyse attentive des vestiges mis au jour fait entrevoir une étonnante souplesse du savoir-faire. Les maîtres ferriers d'un même massif forestier, dans des ateliers voisins, ou éloignés de 10 kilomètres au plus, adoptent une démarche différente, utilisent des procédés techniques divergents pour arriver apparemment au même résultat: produire au gré de la demande du fer forgeable ou de l'acier.

Résumé

Depuis 1973, date de la parution de «Fer Charbon Acier dans le Pays de Vaud», des fourneaux à fer ont été reconstitués et expérimentés en particulier à Vordernberg (Autriche) et à Beaune. Ces expérimentations ont fait progresser la connaissance des techniques anciennes et la compréhension des vestiges mis au jour. En Suisse romande d'autre part, 11 fourneaux ont été dégagés entre 1983 et 1989. L'apport nouveau permet de chercher la solution d'un problème entrevu dès 1965, mais que trop d'inconnues empêchaient de résoudre.

Les fourneaux les mieux conservés du Jura suisse, qui datent du VIe et VIIe siècle ap. J.-C. se distinguent de leurs prédécesseurs par leur soufflerie disposée sur deux niveaux, qui donne une chaleur suffisante pour liquéfier et évacuer la scorie en cours de chauffe. Mais ils se divisent en 3 groupes, les fourneaux aux creusets:

– très allongés: qui en une seule chauffe peuvent:
a: réduire le minerai et recuire une loupe
b: réduire le minerai et cémenter (aciérer) une loupe
– allongés: jumelés pour mener de front deux opérations: réduire le minerai et recuire ou cémenter une loupe
– trapus:
a: utilisés seuls ou en batterie, uniquement pour réduire le minerai
b: jumelés, l'un produisant du fer doux, l'autre de l'acier
c: uniques, utilisés pour réduire le minerai, puis pour recuire la loupe ou la cémenter.

Reconstituer les trois types de fourneaux et les mettre à feu permettrait de vérifier nos hypothèses: les maîtres ferriers d'un même massif forestier, dans des ateliers éloignés de 2 et 3 km à peine, utilisent des procédés techniques divergents pour arriver au même résultat: la fabrication du fer et de l'acier.

Paul-Louis Pelet
8, Ch. du Réservoir
CH-1012 LAUSANNE

Notes

1. Pelet 1973; voir aussi Pelet 1977; Pelet 1985.
2. Sur ces expérimentations, voir Sperl 1980; Andrieux 1990.
3. Thèse en préparation, Lausanne.
4. Voir Eschenlohr et Serneels 1991.
5. Le fourneau XIV de Bellaires I, totalement différent de tous les modèles gallo-romains antérieurs, vraisemblablement d'origine burgonde, n'a pas de trou de coulée pour la scorie. Unique en son genre, il ne fait pas école. Les modèles postérieurs innovent à partir des fourneaux gallo-romains.
6. Tylecote 1962, 220.
7. Abetel 1992.
8. Pleiner 1969, 458-487.
9. Dans ses expérimentations de Beaune, Philippe Andrieux a remarqué que les loupes obtenues dans les fourneaux du type Bellaires étaient plus compactes que celles provenant de modèles plus réduits. Elles ne pouvaient cependant se passer d'un corroyage et/ou d'une nouvelle chauffe.
10. Pelet 1973, 132.
11. La pente de Montcherand Va est mal définie.
12. Pelet 1973, 163.

Bibliographie

Abetel 1992: ABETEL (E.). – L'établissement sidérurgique de Montcherand. *CAR*, 55. Lausanne, 1992.

Andrieux 1990: ANDRIEUX (Ph.). – Prolégomènes à une étude tracéologique sur les structures d'élaboration thermique et les parois argilo-sableuses. Thèse de 3e cycle, Université de Franche-Comté. Besançon, 1990.

Cleere 1976: CLEERE (H.). – «Iron Making», Roman Crafts. Londres, 1976.

Eschenlor et al. 1992: ESCHENLOR (L.) et SERNEELS (V.). – Les bas fourneaux mérovingiens de Boécourt. *Cahier d'archéologie jurassienne* 3. Porrentruy, 1991.

Moesta 1986: MOESTA (H.). – Erze und Metalle – Ihre Kulturgeschichte im Experiment. Berlin/Heidelberg, 1986. (2e éd.).

Pelet 1973: PELET (P.-L.), avec la collaboration de Barbara de Carvalho et de Pierre Decollogny. – Fer charbon acier dans le Pays de Vaud, vol. I, Les sources archéologiques. *Bibliothèque historique vaudoise*, 49. Lausanne, 1973.

Pelet 1977: PELET (P.-L.). – L'architecture des fourneaux à fer primitifs, évolutions autonomes et tendances générales. *In:* Archäologische Eisenforschung in Europa. *Wissenschaftliche Arbeiten Burgenlands*, 59. Eisenstadt, 1977, pp. 173-180.

Pelet 1978: PELET (P.-L.). – Fer, charbon acier dans le Pays de Vaud, vol.II, La lente victoire du haut fourneau. *Bibliothèque historique vaudoise*, 59. Lausanne, 1978.

Pelet 1981: PELET (P.-L.). – L'Archéologie industrielle, science ou fiction? une question de définition. *Revue suisse d'histoire*, 1981, pp. 32-42.

Pelet 1982a: PELET (P.-L.). – Recherches sur la métallurgie du fer dans le Jura vaudois. *In:* Mines et fonderies antiques de la Gaule. Paris, 1982, pp. 205-214.

Pelet 1982b: PELET (P.-L.). – L'histoire des techniques avant la Révolution industrielle. *Revue suisse d'histoire*, 1982, pp. 324-337.

Pelet 1983: PELET (P.-L.). – Fer, charbon acier dans le Pays de Vaud, vol. III, Du mineur à l'horloger. *Bibliothèque historique vaudoise*, 74. Lausanne, 1983.

Pelet 1986: PELET (P.-L.). – La genèse des machines, Histoire et Historiens. *Uni-Lausanne,* 42, 1986, pp. 24-27.

Pleiner 1969: PLEINER (R.). – Experimental Smelting of Steel in Early Medieval Furnaces. *Pamàtky archeologické,* 60, 1969, pp. 458-487.

Ramin 1977: RAMIN (J.). – La technique minière et métallurgique des Anciens. Bruxelles, 1977.

Sperl 1980: SPERL (G.).– Über die Typologie urzeitlicher, frühgeschichtlicher und mittelalterlicher Eisenhüttenschlaken. *Studien zur Industriearchäologie*, 7. Vienne, 1980.

Straube 1987: STRAUBE (H.). – Kritische Gegenüberstellung der Theorie über die Metallurgie des Rennfeuers. *Ferrum*, 57, 1987, pp. 20-28.

Tylecote 1962: TYLECOTE (R.F.). – Metallurgy in Archaeology. Londres, 1962.

Tylecote 1987: TYLECOTE (R.F.). – The early history of metallurgy in Europe. Londres, 1987.