

| | |
|---------------------|---|
| Zeitschrift: | Cahiers d'archéologie romande |
| Herausgeber: | Bibliothèque Historique Vaudoise |
| Band: | 60 (1993) |
| Artikel: | Une industrie reconnue : fer, charbon, acier dans le Pays de Vaud |
| Autor: | Pelet, Paul-Louis / Carvalho-Zwahlen, Barbara de / Decollogny, Pierre |
| Kapitel: | 8: L'exploitation |
| DOI: | https://doi.org/10.5169/seals-835406 |

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: 21.02.2026

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

8

L'EXPLOITATION

La découverte, entre 1963 et 1972, de plus de 40 sites inconnus et la fouille de six d'entre eux rendaient indispensables des analyses nouvelles: spectrographiques, pour contrôler l'authenticité et éventuellement les parentés des scories et des minerais; quantitatives, pour compléter les données fournies par les fouilles de Prins-Bois I entre 1958 et 1960.

Les analyses spectrographiques ont été effectuées, au gré des possibilités, par l'Institut de chimie minérale de l'Université de Lausanne (professeur G. Brunisholz) en 1963, par la maison Jarrell-Ash au Locle en 1965, puis par l'Institut de minéralogie (professeur R. Woodtli) en 1971-72. De plus, grâce à la complaisance des usines Sulzer Frères à Winterthour, les analyses quantitatives de 6 minerais, de 15 scories, de 5 déchets de métal et d'un tranchant de pioche ont été effectuées dans leurs laboratoires par M. Henri Gut. Tandis que les analyses quantitatives gardent toute leur valeur, mais forment à elles seules un échantillon trop restreint, les analyses spectrographiques qualitatives ont perdu une grande partie de leur intérêt. Entre 1983 et 1993, au Laboratoire de minéralogie de l'Université de Lausanne-Dorigny Vincent Serneels a multiplié pour sa thèse d'archéométrie sidérurgique les analyses de scories et de minerais. Des appareils plus perfectionnés et un échantillonnage statistiquement plus satisfaisant répondent aux questions que nous nous posions en 1973, complètent, nuancent et parfois rectifient nos premières déductions.

1. Les minerais

Les analyses quantitatives

Les analyses faites lors des fouilles de Prins-Bois I en 1959-60 (Pelet, 1960a, 88) ont révélé l'utilisation du sidérolithique local par les forgerons antiques, alors que les géologues du début du siècle l'avaient considéré, en particulier à Goumoens, comme inutilisable (Schardt, 1923).

Les échantillons retenus aux Bellaires parmi beaucoup d'autres se distinguaient par leur aspect ou par leur consistance; b131 avait une couleur brun rouge, b50 brune, c20 bleu acier, cd78/94 de Bellaires II brun grenat violacé, b1581 enfin, violacé avait été broyé et probablement grillé; o3 était un fragment de galet glaciaire magnétique (Bellaires I). Les résultats de ces analyses sont reportés dans la figure 145.

Fer et manganèse

L'analyse faite en 1959 pour Prins-Bois I découvrait 34% de fer et de manganèse; 40% pour Ferreyres/Haut-des-Champs. Les analyses postérieures oscillent entre 36 et 46% de Fe+Mn. Pratiquement, les forgerons pouvaient escompter une teneur de l'ordre de 40%, satisfaisante. Le minerai n'avait pas la pauvreté qu'on lui attribue fréquemment à la suite des travaux de Schardt (1923). En effet, les analyses sur lesquelles le géologue s'est fondé, en fonction des conditions modernes d'exploitation reposaient non sur les pisolithes lavés, comme on le faisait autrefois, mais sur l'ensemble du bolus sidérolithique, très pauvre à Goumoens (teneur moyenne Fe+Mn: 12,8%) et trop siliceux pour les hauts fourneaux.

La proportion du manganèse est en général faible dans le sidérolithique: environ 0,4%. Mais certains rognons peuvent en contenir une forte proportion; deux d'entre eux, d'une couleur bleu acier (échantillon c20) ont été retrouvés au haut du site de Bellaires I, dans la couche de la dernière exploitation. Aisément repérables dans les scories du fait de leur couleur voyante et exceptionnelle, ils contiennent 20% de Mn contre 16% de Fe. Les analyses faites avant 1973 n'ont relevé aucun résultat correspondant dans les scories. Celles de Vincent Serneels, plus nombreuses, constatent de temps à autre une teneur en Mn qui dépasse de beaucoup celle du sidérolithique normal. Il relève à Prins-Bois II, 4,5%, 4,9%, à Voualève 5,5%. A Montcherand où la teneur générale en Mn est un peu plus forte qu'aux Bellaires, elle peut atteindre

| N° col. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 1-7 | 8 |
|-----------------|---------|----------------------------------|---|----------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------------------------------------|---------|-------------------------|
| | Pr.-B.I | Ferreyres Haut-des- Champs | | | Bell.I. | | Bell.II | Moyenne | Bell.I |
| <i>Minerais</i> | | | <i>b 131</i> <i>brun</i> <i>rouge</i> | <i>b 50</i> <i>brun</i> | <i>c 20</i> <i>bleuâtre</i> | <i>b 1581</i> <i>grillé</i> | <i>CD 78/94</i> <i>rougeâtre</i> | | <i>galet magnétique</i> |
| | % | % | % | % | % | % | % | % | % |
| Fe tot. | 33,65 | 40,6 | 46,30 | 38,30 | 16,30 | 39,30 | 45,30 | 37,11 | 10,10 |
| Mn tot. | 0,42 | 0,60 | 0,24 | 0,55 | 20,30 | 0,37 | 0,22 | 3,24 | 0,23 |
| Fe+Mn | 34,02 | 41,20 | 46,54 | 38,85 | 36,60 | 39,67 | 45,50 | 40,34 | 10,33 |
| FeO | 2,16 | 11,49 | 0,26 | 0,26 | 0,26 | 4,92 | 0,22 | 2,79 | |
| Fe2O3 | 45,09 | 44,31 | 66,28 | 54,78 | 23,20 | 50,83 | 64,88 | 49,90 | 13,10 |
| MnO | 0,54 | 0,78 | 0,32 | 0,71 | 19,30 | 0,49 | 0,28 | 5,11 | 0,31 |
| MnO2 | | | | | 13,04 | | | | |
| Ni | | | 0,04 | 0,04 | <0,01 | 0,02 | 0,03 | | |
| SiO2 | 25,60 | 23,85 | 15,28 | 20,58 | 11,53 | 28,42 | 15,17 | 20,06 | 38,15 |
| Al2O3 | 11,50 | 6,25 | 8,72 | 11,79 | 5,72 | 9,78 | 8,38 | 8,87 | 1,80 |
| TiO2 | 0,55 | 0,28 | 0,27 | 0,28 | 0,26 | 0,62 | 0,26 | 0,36 | 0,03 |
| Cr2O3 | | | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,02 | 0,03 | | |
| CaO | 0,80 | 4,10 | 3,51 | 2,70 | 5,36 | 3,10 | 3,20 | 3,25 | 0,84 |
| MgO | 0,06 | 0,20 | | | 7,20 | | | | 37,20 |
| H2O | | | | | 8,40 | | | | |
| CO2 | | | | | | | | | |
| S | <0,01 | <0,01 | | 0,22 | 0,22 | 0,22 | | | |
| P | 0,25 | 0,38 | | | | | | | |

dans certaines scories jusqu'à 8%. Une pièce exceptionnelle en contient quelque 22%! Les forgerons n'ont pas rejeté systématiquement les rognons manganifères. Ils les ont réduits avec le minéral normal, mais sans réussir à en capturer le manganèse qui aurait amélioré la qualité du fer.

Nickel

Aux Bellaires, la plus forte teneur en Ni ne dépasse pas 0,04%. Les analyses spectrographiques semi-quantitatives qui ont précédé les qualitatives en 1959, proposaient 0,01% à Ferreyres/Haut-des-Champs, 0,02 à Prins-Bois I. La présence de Ni est dix fois plus forte (0,2%) dans certains déchets de fonte ou dans le tranchant de pioche analysé (voir p. 104). Ce métal ne passe pas aisément dans les scories et reste mêlé au fer. L'accroissement de la teneur est trop faible malgré tout pour que l'on puisse supposer l'adjonction de fer météorique.

Composants acides et basiques

Les composants acides du minéral: SiO₂, Al₂O₃, TiO₂ ou basiques: FeO, MnO, CaO, MgO sont très importants pour déterminer les conditions de réduction et de fusibilité.

Du tableau précédent, nous tirons les proportions suivantes:

| Site | Composants acides | Composants basiques | Prépondérance acide | Prépondérance basique |
|-----------------------------|----------------------|------------------------|------------------------|--------------------------|
| Pr.-B.I | 37,65 | 3,56 | 34,09 | |
| Ferreyres, Ht-des-Champs | 30,38 | 16,57 | 13,81 | |
| Bell.I, 3 éch. | 31,91 | 5,42 | 26,49 | |
| Bell.I, c20 | 17,51 | 24,92 | | 7,41 |
| Bell.II | 23,81 | 3,70 | 20,11 | |
| moyenne | 28,25 | 10,83 | 23,62 | |

Fig. 145. Minéraux de fer: analyses quantitatives.

Comme dans les analyses antérieures, la silice abonde: 20% en moyenne (entre 11,5% et 28,4% SiO₂). L'alumine oscille entre 5,7 et 11,8% (Al₂O₃ moyenne: 8,38%). L'oxyde de titane est toujours présent, mais en faible dose: 0,36% en moyenne. L'acidité moyenne des scories est inférieure à 30%.

Les éléments basiques, au contraire, sont plus faiblement représentés: ils forment en moyenne 10,83% du minéral, – 7,31% sans l'échantillon c20. Le CaO oscille entre 0,8 et 5,36% (en moyenne 3,25%). Seul c20, exceptionnellement manganifère a une prépondérance basique.

Autre caractéristique frappante, le magnésium est absent de 5 analyses; dans les autres, sa teneur ne représente au maximum que 0,2%. Il entre au contraire pour un tiers dans le galet glaciaire magnétique (MgO:37%).

L'analyse de ce galet, est, elle aussi, instructive: elle enregistre environ 10% de Fe. La très faible teneur en magnésium des scories dont nous possédons des analyses quantitatives (voir fig. 145) montre que de tels minéraux n'ont pas retenu l'attention des métallurgistes. Sans parler de la faible fusibilité de la magnétite, ils étaient trop siliceux pour servir de fondants à des minéraux à prépondérance acide.

Comme précédemment, les minéraux paraissent pauvres en impuretés fâcheuses: le soufre (0,22%), l'arsenic (<0,1%), le phosphore ne semblent pas avoir été réellement gênants.

Les analyses qualitatives

Alors que les analyses de Prins-Bois marquaient une différence sensible entre les minéraux du groupe Prins-Bois -

Fig. 146. Composants acides et basiques.

| Bellaires I | | | | | | | | | | | | |
|-------------|----------------------|-------|-------------------------|-------|-------|------------------------|-------------------------|-------|----------------------|-----------------------|----------------------|---------------|
| Four | IX paroi amont | V | IV ou V tuyère a6 | VII | XV | XIIa paroi ouest | XIIb fond du four | XIV | II paroi amont | III paroi amont | VI paroi amont | Moy. |
| Niveau | 2 | 3 | 9 ou 3 | 5 | 6 | 7 | 7 | 8 | 9 | 9 | 9 | % |
| Fe | 17,32 | 19,35 | 44,43 | 30,17 | 37,28 | 18,13 | 31,30 | 50,60 | 7,26 | 26,27 | 28,59 | 28,25 |
| Mn | 0,09 | 0,04 | 0,30 | 0,25 | 0,25 | 0,08 | 0,09 | 0,14 | 0,09 | 0,30 | 0,07 | 0,15 |
| Fe+Mn | 17,41 | 19,39 | 44,73 | 30,42 | 37,53 | 18,21 | 31,39 | 50,74 | 7,35 | 26,57 | 28,66 | 28,40 |
| FeO | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 31,93 | 39,10 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 6,45 |
| Fe2O3 | 24,75 | 27,65 | 63,48 | 7,63 | 9,82 | 25,90 | 44,72 | 72,76 | 10,38 | 37,53 | 40,85 | 33,18 |
| MnO | 0,12 | 0,05 | 0,39 | 0,32 | 0,32 | 0,11 | 0,12 | 0,19 | 0,12 | 0,39 | 0,09 | 0,20 |
| Ni | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| SiO2 | 58,30 | 51,20 | 18,07 | 41,00 | 31,16 | 53,28 | 27,09 | 13,48 | 55,05 | 38,05 | 40,85 | 38,86 |
| Al2O3 | 11,28 | 11,20 | 0,00 | 16,69 | 13,02 | 11,92 | 10,12 | 9,12 | 9,35 | 11,69 | 11,48 | 11,08 |
| TiO2 | 0,00 | 0,62 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,58 | 0,49 | 0,00 | 0,39 | 0,00 | 0,44 | 0,23 |
| CaO | 0,28 | 0,70 | 2,66 | 2,24 | 3,93 | 2,94 | 2,80 | 0,56 | 5,89 | 5,05 | 1,54 | 2,60 |
| MgO | 0,20 | 0,66 | 0,00 | 0,20 | 1,21 | 1,31 | 2,62 | 0,60 | 0,71 | 1,21 | 0,40 | 0,83 |
| CO2 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,16 | |
| SO4 | | | | | | | | | | | | 0,78 (S=0,26) |

| Bellaires II | | | Prins - Bois I | Bossena I | Rosset I | Moiry | | Châtel | Moy. | |
|--------------|--------|---------|----------------|----------------|----------|---------------|---------------|--------|-------|--------|
| Four | XVIIa | XVIIb | | XIX de fond | XXII | 1 compacte | 2 soufflée | | | |
| Niv.strat. | unique | unique | | | unique | | | | | |
| | % | % | % | % | % | % | % | % | % | |
| Fe | 30,33 | 44,69 | 26,07 | 22,23 | 23,73 | 29,31 | 22,93 | 16,79 | 45,11 | 27,48 |
| Mn | 0,30 | 0,27 | 0,38 | 0,60 | 0,35 | 0,35 | 0,58 | 0,78 | 0,17 | 0,27 |
| Fe+Mn | 30,63 | 44,96 | 26,35 | 22,83 | 24,08 | 29,65 | 23,51 | 17,57 | 45,28 | 28,87a |
| FeO | 35,35 | 47,28 | 9,77 | 6,18 | 22,56 | 30,32 | 13,79 | 5,03 | 0,00 | 16,06 |
| Fe2O3 | 4,06 | 11,32 | 26,35 | 24,86 | 8,86 | 8,14 | 17,40 | 18,36 | 64,45 | 27,40 |
| MnO | 0,39 | 0,36 | 0,49 | 0,78 | 0,45 | 0,44 | 0,75 | 1,01 | 0,22 | 0,35 |
| Ni | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| SiO2 | 42,44 | 25,66 | 29,06 | 41,24 | 43,37 | 38,44 | 42,06 | 48,48 | 19,90 | 38,24b |
| Al2O3 | 13,88 | 11,51 | 20,10 | 5,30 | 17,30 | 14,40 | 17,75 | 20,95 | 4,90 | 12,40 |
| TiO2 | 0,00 | 0,00 | 0,42 | 0,55 | 0,67 | 1,00 | 0,54 | 1,00 | 0,25 | 0,35 |
| CaO | 3,65 | 3,08 | 1,50 | 0,70 | 3,15 | 4,30 | 5,00 | 3,95 | 7,84 | 3,08c |
| MgO | 0,40 | 0,40 | 0,13 | 0,19 | 0,70 | 0,35 | 0,24 | 0,05 | 0,86 | 0,62 |
| CO2 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | |
| S | | (<0,01) | (<0,01) | (<0,01) | <0,01 | <0,01 | 0,01 | 0,02 | | |
| P | | 0,19 | 0,23 | 0,16 | 0,21 | 0,17 | 0,09 | | | |

| | | | |
|---|-----------------------|------------------------|-----------------------|
| N.B. | a: (sans Châtel 28,6) | b: (sans Châtel 37,89) | c: (sans Châtel 2,69) |
| Bellaires II et Châtel: analyses faites en 1967; Prins-Bois I, Bossena I, Rosset et Moiry: Pelet, 1960a | | | |

Fig. 147. Analyses quantitatives des scories, en %.

Ferreyres et ceux du Mormont et de Goumoens (Pelet, 1960a, 88), 26 analyses spectrographiques des maisons Jarrell-Ash et Sulzer Frères et des instituts de chimie minérale et de minéralogie de l'Université de Lausanne ne marquent que la grande similitude des minéraux recueillis dans un rayon de 3 kilomètres, entre La Sarraz et Moiry.

Les seuls échantillons qui s'en différencient par la présence de plomb, d'argent, de zinc ou par une teneur plus forte en arsenic viennent du haut Jura: Châtel sur Montricher, mines du Risoux et des Grangettes près du lac Saint-Point.

2. Les scories

Les analyses des scories complètent ces premières constatations en montrant ce que les sidérurgistes d'autrefois ont su tirer des minéraux à disposition. Elles donnent d'autre

part une série d'indications sur la qualité ou la quantité du métal extrait.

Les analyses quantitatives

Onze échantillons de Bellaires I, deux de Bellaires II, un de Châtel sur Montricher, soit quatorze en tout ont été analysés en 1967 dans les laboratoires de Sulzer Frères à Winterthour. Les résultats en sont reportés dans la figure 147, en même temps que les analyses faites antérieurement pour Prins-Bois I, Bossena I, Rosset I et Moiry / Fontaine-des-Forges (Pelet, 1960a, 82-83). Ces vingt séries de chiffres confirment et nuancent les constatations antérieures.

Les scories de Bellaires I analysées se rattachent en définitive à sept exploitations sans roue à eau, à ventilation artificielle cependant. Issues du même site, du même minéral,

elles sont formées des mêmes éléments. Mais la proportion de ces éléments varie considérablement selon le moment de la formation de la scorie: au début de la fonte, la silice domine; en fin de fusion, le fer est plus abondant. Mais les fluctuations de la température au cours de la chauffe provoquent de nombreuses entorses à cette règle très générale.

Cinq des scories des Bellaires ont été détachées de la paroi d'un four. Soit parce qu'elles se sont formées au début de l'opération de fonte, soit par affinité avec le revêtement glaiseux du foyer, elles contiennent une plus forte proportion de silice (près de 50%) et une teneur assez faible en fer et en manganèse (environ 20% en moyenne). De l'une à l'autre d'ailleurs, la variabilité reste extrême: ainsi, les scories des parois amont des fourneaux II, III et VI, du même type et pratiquement contemporains ont une teneur en Fe+Mn qui va de 7,35 à 28%, une teneur en SiO_2 qui va de 38 à 55%.

Les scories prises dans les tranchées ou au fond des fourneaux ont entre 20 et 50% de Fe+Mn (en moyenne 35,7%), et entre 13,5 et 51% de SiO_2 (en moyenne 28,6%). Ce ne sont pas celles des fourneaux les plus anciens qui sont les plus riches en fer. Pour arriver à déceler une amélioration éventuelle de la réduction – difficilement perceptible et souvent peu probable de fourneau en fourneau – il aurait été nécessaire de décupler les analyses quantitatives. Notre échantillonnage restreint donne l'essentiel: un ordre de grandeur.

Les fouilles de Prins-Bois I relevaient dans les scories moins de 28% de Fe + Mn. Cette proportion se retrouve dans les analyses de Bellaires I (28,4%) aussi bien que pour l'ensemble du tableau XV (28,87%). En gros, on peut admettre qu'au pied du Jura les scories du sidérolithique fondu sans soufflerie hydraulique contiennent environ 30% de fer et de manganèse. Ce chiffre paraît faible lorsqu'on le compare aux analyses nombreuses exécutées en Europe (voir fig. 148).

D'une manière générale, dans les fourneaux sans souffleries hydrauliques, la teneur en fer des scories, très variable certes, atteint plus de 40% en moyenne. Mais les données de la fig. 147 sont trop incomplètes, trop disparates aussi pour qu'on puisse même esquisser l'évolution de la capacité de réduction des fourneaux. Tant qu'elle n'est pas simultanément comparée aux minerais fondus, la teneur en Fe des scories n'est pas aussi significative qu'on l'a dit parfois. La présence de 28% de Fe seulement dans nos scories ne provient pas d'une mise à feu exceptionnellement habile. La teneur en fer du minerai lui-même atteint à peine 40%. Si les scories en contenaient autant, quel fer aurait-on produit?

Comme le montrent les recherches de Vincent Serneels, une gangue riche en silice et en alumine abaisse le point de fusion du minerai.

Si l'on admet que la scorie est composée à 95% par les résidus du minerai et à 5% par ceux du charbon et des parois non réfractaires des fourneaux (les analyses ne décèlent pas l'emploi de fondants aux Bellaires), on peut estimer que les métallurgistes ont retiré du sidérolithique environ 10% de fer, ce qui veut dire qu'un quart seulement du métal contenu dans le minerai a été utilisé. A Tannerre en Puisaye un minerai avec 56% de Fe donne apparemment des scories contenant 38,5 et 40% de Fe. Les forgerons ont extrait quelque

15% du minerai, soit 26% du métal existant (Monot, 1964; Goudard, 1936). Dans les exploitations hydrauliques du Parc national suisse, des scories ont une teneur en Fe de 28% environ, pour des minerais de 50% (Schläpfer, 1960).

Les forgerons seraient parvenus à tirer 20% de fer, soit 40% du métal contenu dans le minerai. Multiplier de telles comparaisons serait du plus haut intérêt. Elles sont cependant souvent tendancieuses: il faut être sûr du minerai réellement fondu, et tenir compte des différentes conditions de fusion.

Les scories révèlent un autre aspect, intéressant, de la technique antique, que les travaux de M. Bartuska et Radomir Pleiner (1965) ont mis en évidence. Une chaleur légèrement insuffisante aboutit à la combinaison de FeO avec la silice (SiO_2). Les silicates qui en résultent (la fayalite en particulier) sont ensuite très difficilement réductibles.

Lorsque le FeO abonde dans les scories, la fusion s'est opérée médiocrement. Sur les 20 échantillons analysés, un quart (5 échantillons) est dans ce cas, avec une teneur totale en Fe+Mn de 35%, nettement supérieure à la moyenne. Deux d'entre eux appartiennent au four XVII de Bellaires II dont les scories, par leur aspect même suggéraient une ventilation peu efficace (voir page 17). Les autres proviennent l'un du site non fouillé de Rosset, l'autre de la scorie agglutinée à la tuyère a6 du four VII, le troisième enfin des scories recueillies sur le fond du four à recuire XV (où de plus faibles températures s'expliqueraient très aisément).

La réduction en général satisfaisante du minerai diminue la proportion de FeO tandis que l'abondance du SiO_2 accentue l'acidité des scories. Cette acidité apparaît dans la somme de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2$, dont on soustrait les monoxydes FeO, MnO, CaO et MgO.

Dans les scories comme dans le minerai (voir fig. 150), les bases sont beaucoup moins importantes. Seule la présence de FeO peut abaisser la prépondérance acide. Aucune des scories analysées n'est cependant basique.

Malgré la formation d'une forte quantité de Wustite (FeO) dans quelques scories, la prépondérance acide est encore plus marquée dans la fig. 150 (28, 45) que pour les minerais (23,62). Ce qui s'explique par le fait que pratiquement tous les composants acides ont passé dans la scorie alors qu'une partie du fer en est extraite.

Si, comme les forgerons, on ne tient pas compte de l'échantillon de minerai c20 fortement manganifère, la teneur en Mn des scories, en moyenne 0,27% s'apparente à celle des échantillons de minerai (0,40%).

Les analyses des déchets métalliques (voir fig. 154) montrent qu'il en est resté moins de 0,01% dans le métal. Nos échantillons ne comprennent pas de scories riches en manganèse. Elles n'apparaîtront qu'au cours des travaux de Vincent Serneels.

D'après les scories analysées, les artisans du pied du Jura n'ont pas introduit de fondant calcaire: la proportion de CaO est de 3% dans les scories comme dans le minerai.

La scorie de Châtel sur Montricher suggère un minerai plus riche en calcaire (CaO: 7,84%) que celui du pied du Jura – mais autre que la limonite valanginienne – et plus pauvre en alumine: 4,9%.

| Lieu | Epoque incertaine | La Tène | Rome | Haut Moyen Age | XI-XIIe siècle | XIV-XVe siècle | Réf. |
|---|-------------------|------------------|------|---|----------------|----------------|------|
| Allemagne | | | | | | | |
| Siegerland | | 47-55 | | | 38-56 | | 1 |
| Angleterre | | | | | | | 2 |
| Ariconium/Hereford. | | 50 | | | | | |
| Achwicken/Norfolk. | | 53 | | | | | |
| Bagendon/Glos. | | 18-58 | | | | | |
| Boho/Ferm. | | 50 | | | | | |
| Camerton/Somer. | | 26 (15), 44-57,6 | | | | | 3 |
| Chelm's Combe/Somer. | 44-52 | | | | | | |
| Corbridge/N'land | | 60 | | | | | |
| Dinas Powy/Glam. | | | | 54 | | | |
| Great Casterton/Rut. | | 51,5 | | | 38,05 | | |
| Harthope Mill/c. Durham | | | | | | 33,8 | |
| Heronbridge/Chesh. | | 49,9 | | | | | |
| High Bishopley/c. Durham | | | | | 29-42,5 | | |
| Kentor/Devon. | 49,5 | | | | | | |
| Maiden Castle/Dorset | | 57 | | | | | |
| Wilderspool/Lanc. | | 14-55 | | | | | |
| York | | | | 53 | | | |
| France | | | | | | | |
| Berry | | 26-36 | | | | | 4 |
| Bretagne | | 34-50 | | 39-52 | 47-52 | | 5 |
| Haute-Savoie (Salève) | | 44,6 | | | | | 6 |
| Morvan (Thoste) | | 36 | | | | | 7 |
| Morvan (Lécussy) | | | | | 25,4 | | 7 |
| Moselle (Bliesbruck) | | 47-57,9 | | | | | 8 |
| Ouest | | 39-50 | | 49-52 | 47-52 | | 4 |
| Yonne | | 38,5-48 | | | | | 9 |
| Pologne | | | | | | | |
| Cracovie | | | | 34-55 | | | 10 |
| Rép. Tchèque | | | | | | | |
| Bohème et Moravie | 31,49 | 15,4-59,8 | | 49 | 38,47 | | 11 |
| Moyennes | 46,50 | 43,80 | | 48,6 | 42,30 | 33,8 | |
| 1 Gilles, 1957, p.179; 1936, p.252; 1956, p.57 | | | | 7 Mangin, 1992 | | | |
| 2 Tylecote, 1962, p.: 188, 246-7, 262, 286 | | | | 8 Forrières, 1987 | | | |
| 3 Wedlake, 1958 | | | | 9. Monot, 1964 | | | |
| 4 Davy, cité: Rev.Hist.Sidér. II/1, 1961, 64; Kerleroux, 1965, 68 | | | | 10 Nosek, 1969, pp. 183-193 | | | |
| 5 Puzenat, 1939 | | | | 11 Bartuska & Pleiner, 1965; Pleiner, 1958, p.283 | | | |
| 6 Maréchal, 1982 | | | | | | | |

Fig. 148. Teneur en fer (Fe) des scories en Europe, en %.

| Lieu | Epoque incert. | Rome | Haut Moyen Age | XIV-XVe siècles | Réf. |
|--------------------------|----------------|-------|-------------------------------|-----------------|------|
| Bargen | | | | 10-44 | 3 |
| Laufon | | 43 | | | 1 |
| Merishausen | | | 53 | | 2 |
| Parc national | | | | 6,4-49 | 4 |
| Schaffhouse ct. | 52 | | | | 2 |
| Boécourt (11 éch.) | | | 31-49,7 | | 5 |
| VD Montcherand (45 éch.) | | | 30,8 | | 6 |
| VD Région Ferreyres | | 7-50 | | | |
| | | m. 28 | | | |
| 1 Epprecht, 1980, p.79 | | | 4 Schläpfer, 1960 | | |
| 2 Guyan, 1946, p.72-73 | | | 5 Eschenlohr & Serneels, 1992 | | |
| 3 Guyan, 1957, p.159-174 | | | 6 Serneels, 1993 | | |

Fig. 149. Teneur en fer (Fe) des scories en Suisse, en %.

Les analyses qualitatives

Tous les sites n'ont pas livré, dès les sondages, du minerai. Analyser les scories apporte un complément d'information utile. Cinquante-quatre échantillons ont été

spectrographiés à l'Institut de minéralogie; six autres à l'Institut de chimie minérale.

Six d'entre eux provenaient de l'étranger: des ferrières de la Burbanche, près du Bourg de Rossillon (Ain), du Creux-de-Mâchefer dans le bois du Charlet, commune de

| Site Nb anal. | Bell.I 11 % | Bell.II 2 % | Pr.-B.I 2 % | Boss.I 1 % | Rosset I 1 % | Moiry 2 % | Châtel I 1 % |
|--------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------------------|--------------------|-----------------|--------------------|
| Acides: | | | | | | | |
| SiO ₂ | 38,86 | 34,05 | 35,15 | 43,37 | 38,24 | 45,27 | 19,90 |
| Al ₂ O ₃ | 6,45 | 12,70 | 12,70 | 17,30 | 14,40 | 19,35 | 4,90 |
| TiO ₂ | 0,23 | 0,00 | 0,48 | 0,67 | 1,00 | 0,77 | 0,25 |
| Total | 50,17 | 46,75 | 48,33 | 61,34 | 53,64 | 65,39 | 25,05 |
| Bases: | | | | | | | |
| FeO | 6,45 | 41,31 | 7,97 | 22,56 | 30,32 | 9,41 | 0,00 |
| MnO | 0,20 | 0,37 | 0,63 | 0,45 | 0,44 | 0,88 | 0,22 |
| CaO | 2,60 | 3,37 | 1,10 | 3,15 | 4,30 | 4,47 | 7,84 |
| MgO | 0,83 | 0,40 | 0,16 | 0,70 | 0,35 | 0,14 | 0,86 |
| Total | 10,08 | 45,45 | 9,86 | 26,86 | 35,41 | 14,90 | 8,92 |
| Prépondérance acide | 40,09 | 1,30 | 38,47 | 34,48 | 18,23 | 50,48 | 16,13 |

Fig. 150. Acides et bases dans les scories, en %.

Cheigneu-La Balme (Ain, transmis par M. Jean-Paul Maret, La Bertrandièvre, 42 L'Etrat), de Courcelles-Trémoy dans l'Yonne, (transmis par M. Arthur Brocard, Le Larderet près Champagnole) et d'anciennes exploitations de chalcopyrites de la vallée d'Aoste: Tour-d'Héréraz (val d'Aya) et Extrapierraz (val Gressonney recueillies grâce à l'obligeance de M^{me} Rosanna Mollo, superintendante de la circonscription archéologique de la vallée d'Aoste).

La composition moyenne des scories, même broyées et mélangées est plus variable encore que celle des échantillons de minerai. Il faut éviter d'en inférer plus qu'elles ne peuvent apporter.

Les analyses spectrographiques confirment cependant l'absence, la présence ou l'abondance du fer. Elles signalent aussi quelques éléments secondaires significatifs.

Toutes les scorifications présentent de grandes similitudes. Cependant, 4 des 5 échantillons étrangers se distinguent par une particularité frappante:

– présence de cuivre (Extrapierraz, Tour d'Héréraz, vallée d'Aoste),

– de plomb (Creux de Mâchefer, Cheigneu-la-Balme, Ain),

– de baryum (Courcelles-Trémoy).

Seules les scories de la Burbanche (Ain), ne se distinguent pas de celle pied du Jura vaudois. Des analyses quantitatives décèleraient probablement de minimes différences.

Pour des raisons diverses, 6 échantillons ne contiennent presque pas de fer:

– 2 fragments de laitier du haut fourneau du Brassus, (vallée de Joux); le fer a passé presque entièrement dans la fonte,

– les scories de la charbonnière brûlée de Châtel II, (haut Jura); il ne s'agit pas d'industrie du fer,

– les scories ramassées aux Trois-Noyers (Eclépens), site suspect, hors de la zone sidérurgique,

– les scories de Saint-Prex, (artisanat du bronze)

– les scories de Vidy b, (artisanat du bronze?).

Quatre échantillons contiennent nettement du cuivre: Orny/Sur-le-Mont,

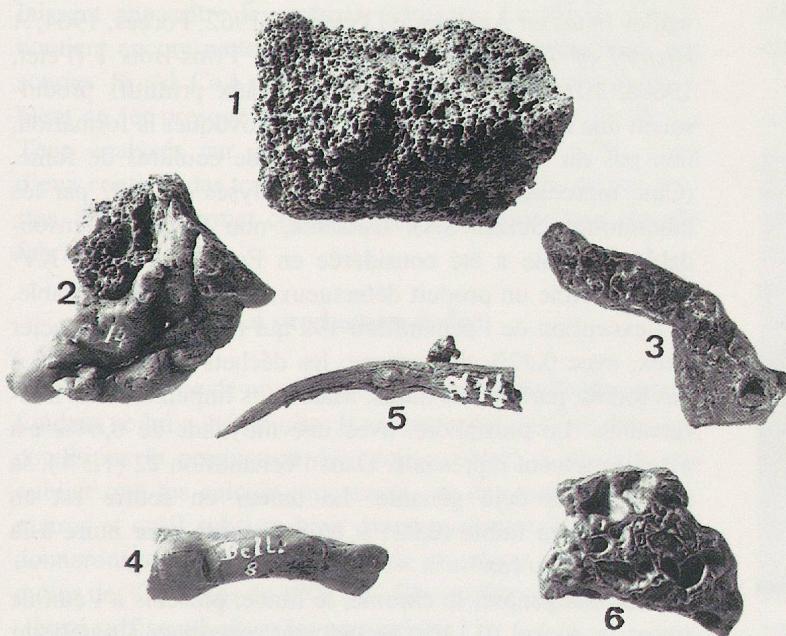


Fig. 151. Bellaires I. Petites scories: 1, spongieuse; 2, en grappe; 3, 4, en gouttes; 5, en épine; 6, soufflée.

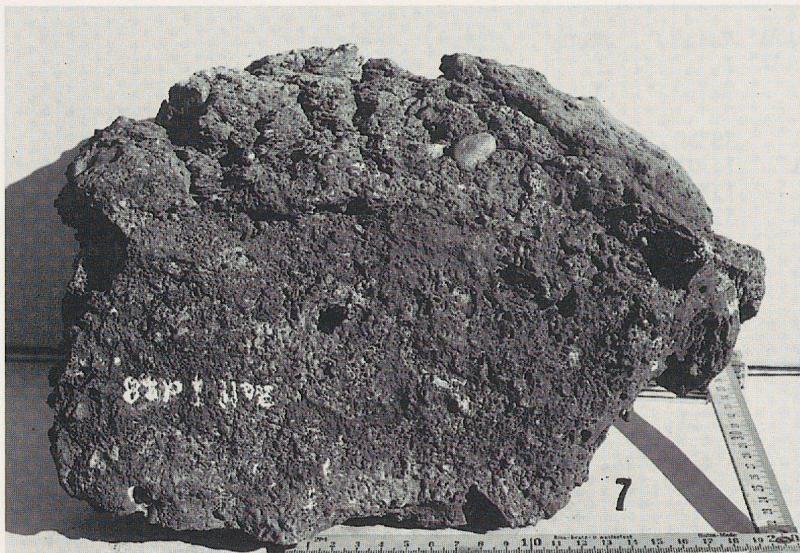


Fig. 152. Bellaires I. Scories massives: 7, fond du four V; 8, paroi du four XI.

Saint-Prex,
Extrapierre, val Gressoney
Hérerez, val d'Ayaz.

Les deux premiers, prélevés hors du bassin sidérurgique proviennent d'un artisanat du bronze, les deux autres, pris dans la vallée d'Aoste correspondent à une industrie du cuivre.

Cinq échantillons relèvent une teneur importante en calcium:

Châtel B.
Orny ch.
Vidy
Cuarnens/Pré-Penard,
Buron.

Châtel B, dérive d'un minerai plus riche en calcium que le sidérolithique du pied du Jura. Les quatre autres, ont été prélevés en dehors de la zone sidérurgique (ateliers de forge).

L'absence totale des raies du manganèse paraît elle aussi significative. L'échantillon N° 43, Châtel I, semble provenir d'un atelier de verrier (fer très secondaire). Dans le N° 45, laitier du haut fourneau du Brassus, le manganèse a entièrement

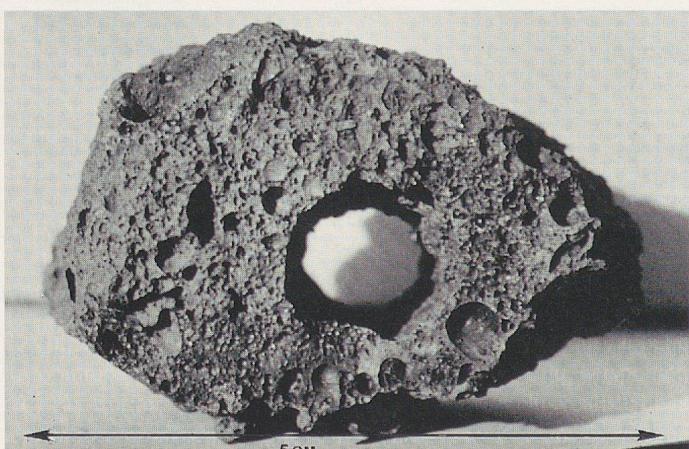
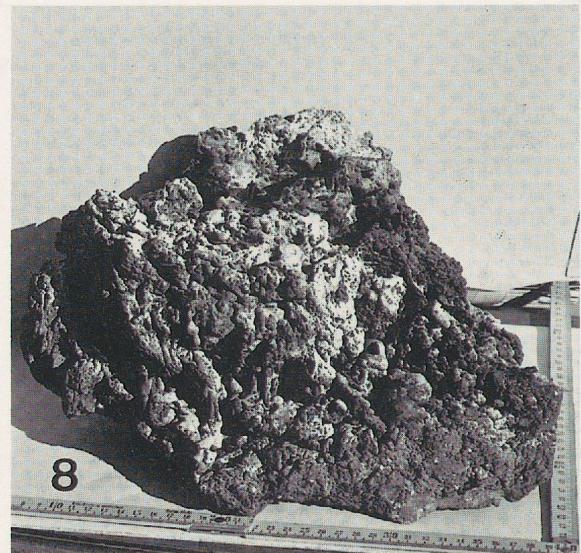


Fig. 153. Scorie percée d'un coup de ringard.



passé dans la fonte. Le N°49 (Châtel II) est tiré d'une meule de charbonnier incendiée.

Ainsi, les analyses qualitatives des scories :

- éliminent quelques sites suspects,
- reconnaissent les scories qui proviennent du sidérolithique, mais elles ne permettent pas de différencier d'une manière significative le minerai de chaque ferrière.

3. Fonte et fer

En l'absence de saumons trouvés sur leur lieu de fabrication, seule l'analyse de déchets métalliques abandonnés parmi les scories peut nous apporter quelques indices sur la réduction du métal et sur ses qualités éventuelles.

A part quelques éclats de fer perdus par inadvertance, rares, les morceaux négligés n'ont pas les qualités que recherchaient les sidérurgistes.

En effet, comme les travaux de Joseph-Wilhelm Gilles en Allemagne, de K. Bielenin en Pologne, comme les trouvailles faites en Angleterre (Tylecote, 1962; Forbes, 1964; *A History of Technology*, I, 1954) et à Prins-Bois I (Pelet, 1960a, 103) l'ont prouvé, les fourneaux primitifs produisaient une chaleur assez élevée pour provoquer la formation, non pas du fer doux souhaité, mais de coulures de fonte. (Cinq morceaux de fonte ont été analysés en 1967 par les laboratoires Sulzer SA). Cassante, non forgeable, insoudable, la fonte a été considérée en Europe jusqu'au XV^e siècle comme un produit défectueux, un déchet inutilisable. A l'exception de l'échantillon 19a qui ressemble à un acier doux, avec 0,42% de carbone, les déchets correspondent à des fontes, parfois très dures. Mais leurs impuretés sont intéressantes. Le phosphore, avec une moyenne de 0,64% est assez fortement représenté. Dans l'échantillon 22 (1,3%), sa présence est déjà gênante. La teneur en soufre est au contraire trop faible (0,031% en moyenne) pour nuire à la forgeabilité du fer.

Le manganèse, le chrome, le titane, présents à l'état de traces, le nickel (0,14%) ne peuvent contribuer à améliorer

| Métal | <i>Bellaires I</i> acier doux | <i>coulure</i> | <i>fente très dure</i> | <i>fragments métalliques</i> | <i>Bellaires II</i> fragments métalliques | <i>Moyenne</i> |
|---------------------|----------------------------------|----------------|------------------------|------------------------------|--|----------------|
| N° déchets éléments | 19a % | 19b % | 20 % | 21a % | 22 % | % |
| P | 0,290 | 0,470 | 0,610 | 0,520 | 1,300 | 0,640 |
| C | 0,420 | 2,260 | 2,980 | 1,710 | 3,420 | 2,160 |
| S | 0,012 | 0,008 | 0,048 | 0,056 | 0,032 | 0,031 |
| Si | 0,150 | 0,110 | 0,460 | 0,160 | 0,150 | 0,200 |
| Mn | 0,010 | 0,010 | 0,010 | 0,010 | 0,010 | 0,010 |
| Cr | 0,010 | 0,010 | 0,010 | 0,010 | 0,010 | 0,010 |
| Ni | 0,140 | 0,110 | 0,110 | 0,200 | 0,140 | 0,140 |
| Ti | 0,010 | 0,010 | 0,010 | 0,010 | 0,010 | 0,010 |
| Total | 1,040 | 2,980 | 4,240 | 2,670 | 5,080 | 3,200 |

Fig. 154. Analyses des déchets métalliques

les qualités du métal. La teneur en carbone trop élevée est la cause du rejet de ces déchets.

Autant qu'on en puisse juger, le fer des Bellaires ne contenait guère d'impuretés nuisibles; il profitait peu des éléments susceptibles de le durcir.

Les rognons du sidérolithique riches en manganèse n'influencent pas la teneur en Mn des scories que nous avons analysées. Leur réduction n'apparaît que si l'on multiplie les analyses, comme le fait Vincent Serneels dans ses Recherches archéométriques sur la sidérurgie ancienne en Suisse romande. Apparemment, les saumons n'étaient que rarement acierés.

L'examen métallographique des deux échantillons 19b et 19a (fig. 155-156) fait ressortir dans le premier cas le rôle eutectique des phosphite second échantillon chauffé à haute température jusqu'au point de liquéfaction s'est ensuite refroidi rapidement en ne formant que des aiguilles de ferrite.

Les analyses spectrographiques d'un déchet de loupe provenant de Croset sur Ferreyres et des quatre saumons que possède le Musée cantonal d'archéologie à Lausanne, saumons recueillis à Chabrey et à Niédens sur Yvonand (Vaud), laissent apparaître les mêmes éléments. Le fer de Croset contient encore nettement les éléments caractéristiques des scories: Si, Al, Ca à côté du Mn et du Ni. Les saumons semblent en fer presque pur, comme les saumons de fer de La Tène analysés par A. France-Lanord, (1963, 175). L'un d'eux contient des traces d'As, comme certaines de nos scories. Rien ne permet cependant de déterminer leur lieu de fabrication.

La production de fer

Un seul type de minéral a été fondu aux Bellaires; aucun fondant ne lui a été adjoint. Il est tentant d'évaluer dans ces conditions la production des ateliers. Mais il ne faut pas oublier que les calculs reposent sur des moyennes sommaires et qu'il subsiste bien des incertitudes. Les résultats donneront tout au plus un ordre de grandeur: moins de 10t, moins de 30t, moins de 100t, etc. Ces chiffres dans leur grossièreté suffisent à situer les entreprises.

Nous l'avons constaté plus haut, les forgerons du pied du Jura sont parvenus à extraire entre un quart et un tiers du métal contenu dans le minéral (soit entre 10 et 13,3% du poids du minéral). En cubant le volume des terrasses de déchets et en déterminant la proportion des scories qui entrent dans leur composition, on peut établir combien de fer est resté dans chaque halde. Le calcul est évidemment très approximatif.

D'après les relevés faits à Bellaires III, la couche supérieure «humus et scories» des figures, comprend dans son volume environ 52% de scories; la «terre de forge», 54%; les couches de «glaise cuite» qui s'accumulent devant les portes des fours, 24%. Beaucoup moins abondantes, les poches de «glaise cuite» ne forment pas 5% des haldes. Dans l'ensemble, les scories font au minimum 50% du volume des déchets. Ainsi, les 600 m³ de Bellaires I feraient 300 m³ de scories pures, proprement dites, les 500 de Bellaires III, 250 m³.

Quelle que soit la densité réelle des matériaux fondus, les scories, lorsqu'elles sont simplement triées et lavées, pèsent du fait de leur forme déchiquetée et des bulles qu'elles contiennent, environ 980 kg au mètre cube. Avec en moyenne 28% de Fe, chaque mètre cube a retenu 274 kg de fer, soit moins de 300 kg.

Dans les 300 m³ de scories pures de Bellaires I, on peut admettre qu'il est resté près de 90t de fer inutilisé, inutilisable. Comme les trois quarts du métal passent dans les scories, à chacun de leurs mètres cubes correspond une production de fer inférieure à 100 kg (91,3 kg).

L'extraction de minéral a donc été d'environ 1t (913 kg) pour 1 m³ de scories, soit 0,25 m³ de minéral réductible (densité du sidérolithique: 4).

Les fourneaux de Bellaires I auraient produit un peu moins de 30 t de fer et exigé 300 t de minéral, soit environ 75 m³. La figure 157 estime la production des haldes fouillées. Dans la mesure où nous pouvons nous fonder sur un site non entièrement dégagé, les 24 fourneaux de Prins-Bois I, d'une construction beaucoup plus fragile ont eu une production moyenne nettement inférieure pour l'ensemble de leur chauffe. Les valeurs minimales que nous retenons pour nos calculs, aboutissent à une évaluation de la production



I. Fer

← lamelles de graphite

← texture intermédiaire

← aiguilles de nitrides

← eutectique des phosphides

grossi 50 fois.
Photo Laboratoires Sulzer SA
22104/6

II Fonte

← texture de Wittmanstätt
consistant en:
aiguilles de ferrite

← texture intermédiaire.
Cet échantillon, qui avait atteint
de hautes températures, a été refroidi rapidement.

grossi 50 fois.
Photo Laboratoires Sulzer SA
22103/6



Fig. 155-156. Bellaires I. L'examen métallographique de déchets métalliques non travaillés.

| Site | | Scories pures m ³ | Fer perdu t | Fer produit t | Minerai utilisé t | m ³ |
|------------------------------|----------------|---------------------------------|----------------|------------------|----------------------|----------------|
| Bellaires I | | 300 | 90 | 30 | 300 | 75 |
| Bellaires I | four I-IV, VI | 150 | 45 | 15 | 150 | 37,5 |
| Bellaires II | | 20 | 6 | 2 | 20 | 5 |
| Bellaires III | four XVIII/XXI | 50 | 15 | 5 | 50 | 12,5 |
| Bellaires III | four XIX/XX | 200 | 60 | 20 | 200 | 50 |
| Bossena I | | 20 | 6 | 2 | 20 | 5 |
| Prin-Bois II | | 25 | 7,5 | 2,5 | 25 | 6,25 |
| Production moyenne d'un four | | 26,7 | 8 | 2,7 | 26,7 | 6,7 |
| Prins-Bois I | | 125 | 37,5 | 12,5 | 125 | 31,25 |
| Production moyenne d'un four | | 5,2 | 1,6 | 0,5 | 5 | 1,25 |

Fig.157. Production des haldes fouillées.

environ 6 fois plus faible que celle que proposait Auguste Quiquerez (1866b, 60 et suiv.), dont nous nous étions inspiré en 1960 pour estimer la production de Prins-Bois I. Nous n'avions pas déduit non plus la part des déchets terreux, glaïeux et pierreux mêlés aux scories.

Grosso modo, on peut évaluer la production des fourneaux. Les chiffres que nous proposons restent approximatifs, pour ne pas dire incertains. Les variations de la production d'un atelier à l'autre ne sont qu'exceptionnellement repérables; elles se superposent incomplètement sur les observations faites à propos des progrès techniques et sur les données chronologiques. Malgré ces handicaps, l'esquisse grossière que nous proposons met en évidence une transformation de la production très nette à l'aube des temps barbares: les deux dernières entreprises ont une allure déjà «industrielle». Les fourneaux plus résistants des niveaux supérieurs de Bellaires I et surtout de Bellaires III produisent davantage de fer, sans que l'puisse relever toutefois une réduction nettement plus efficace du minerai. Malgré l'essor de leur production – peut-être de guerre – les fours XIX-XX n'ont consommé que 50 m³ de minerai.

Les 13 ou 14 ateliers de Bellaires I, II et III pris ensemble ont extrait moins de 150 m³ (600 t) de sidérolithique utilisable. Il est aisément de comprendre dans ces conditions, que les besoins d'un atelier soient loin d'épuiser les ressources même modestes d'un gisement; leur exploitation reprend quand la forêt a repoussé.

| Site | Four | Fer produit par fourneau t | Minerai utilisé par fourneau t | m ³ |
|----------|-------------------------------------|----------------------------------|--------------------------------------|----------------|
| Pr.-B.I | | 0,5 | 5 | 1,25 |
| Bell.I | des niv. infér. & intermédiaires | 1,5 | 15 | 3,75 |
| Bell.II | XVII | 2 | 20 | 5 |
| *Boss.I | XXII | 2 | 20 | 5 |
| Bell.III | XVIII/XXI | 2,5 | 25 | 6,25 |
| Pr.-B.II | XXIII | 2,5 | 25 | 6,25 |
| Bell.I | I-IV, VI | 3 | 30 | 7,25 |
| Bell.III | XIX/XX | 10 | 100 | 25 |

N.B. *Bossena I= production interrompue

Fig. 158. Fer produit par fourneau.

Il n'est pas impossible que certains filons aient été exploités sans interruption pour des entreprises forcées de se placer dans un secteur forestier plus éloigné.

4. Le charbon et la forêt

Si limitée soit-elle, la production de fer a exigé la fabrication d'un volume considérable de charbon de bois. Des estimations prudentes (Pelet, 1960a, 93, n.2 et 3), inclinent à admettre qu'un fourneau à soufflerie manuelle brûlait **en poids** quatre fois plus de charbon que de minerai.

Les fourneaux les plus anciens en auraient consommé chacun de 20 à 100 t, ceux des entreprises «industrielles» du niveau supérieur, de 120 à 400 t par fourneau. Les cinq de Bellaires I auraient brûlé 600 t, ceux de Bellaires III 800 t. Quelle surface de forêt était-il nécessaire d'abattre pour fournir le combustible? La densité de peuplement des forêts subjurassiennes au sol pauvre ne peut être que supputée; elle rendait vraisemblablement quelque 150 stères à l'ha, soit environ 30 t de charbon de bois dur.

Chaque atelier aurait exigé le déboisement suivant:

| | |
|---|------------|
| Bellaires I, niv. infér. et intermédiaires | 1,5 - 2 ha |
| Bellaires II, Bossena I | 2 - 3 ha |
| Prins-Bois II | 3 - 4 ha |
| Bellaires III, niv. infér. 1 ou 2 atel. | 3 - 8 ha |
| Bellaires I, fours I-IV, VI | 15 - 20 ha |
| Bellaires III, niv. sup. fours XIX-XX | 25 - 30 ha |

Les plus anciens ateliers créaient donc une clairière de 140 à 200 m de côté, les plus récents ont défriché des surfaces douze à vingt fois plus importantes.

Les charbonniers qui, dès le XV^e siècle exploitent les forêts du haut Jura creusent dans les talus des terrasses circulaires de 6 à 10 m de diamètre avant d'y dresser leurs meules (Pelet, 1983, 257-278). Ces places se repèrent aisément au mouvement du terrain et à l'épaisse couche de poussier noir qui les recouvre. Tandis que les recherches entreprises sous la direction de Claude Domergue dans les Pyrénées constatent la présence de terrasses de charbonnage liées à des sites

métallurgiques antiques ou antérieurs à l'an mil (Cl. Dubois, 1990, à paraître), aucune de ces terrasses n'a été relevée dans les forêts qui entourent les sites fouillés au pied du Jura. Les forgerons antiques et médiévaux ont pratiqué une carbonisation en fosses. Vite comblées, ces fosses disparaissent avec la repousse de la forêt. Seul le sondage effectué en novembre 1978 par Roland Jeanneret (1979) sur le tracé de la future autoroute N° 9 a dégagé sur le flanc du site sidérurgique de Montcherand une fosse de ce type. Creusée dans le sable, cette fosse, profonde d'environ 120 cm, large d'autant, n'avait pas été utilisée. Elle était remplie de déchets typiques d'une industrie sidérurgique: fragments de glaisages, scories, pierres rubéfiées, cendres. Mais les sidérurgistes ne creusent pas des dépotoirs: les scories dévalent le talus en aval des fourneaux. Restée apparemment inutilisée, la fosse ne pouvait servir qu'à la carbonisation. – Le processus est encore décrit par Biringuccio en 1540 (éd. 1678, 232).

Les essences charbonnées

C'est par centaines que des morceaux de charbon ont été perdus autour des fourneaux, ou ont été rejetés non consumés avec les scories. 1207 échantillons provenant de 344 prélèvements distincts ont été déterminés par le Dr Fritz Schweingruber de l'Institut fédéral de recherche forestière à Birmensdorf (Zurich). Sa collaboration amicale et efficace a permis de tirer un parti exceptionnel d'un tel matériau archéologique. Pour l'apport de ces analyses à l'histoire de la forêt, voir Fritz Schweingruber (1976); (1978); P. Schläpfer et R. Brown, (1948).

Dans nos fouilles, les prélèvements ne se répartissent pas uniformément. A Bellaires I, ceux qui s'inscrivent dans un niveau stratigraphique indiscutable se distribuent de la façon suivante:

| | |
|-----------------------------|----|
| Niveau 9 | |
| (supérieur) fours I-IV, VI: | 64 |
| Niveau 8 | |
| (intermédiaire) four XIV: | 22 |
| Niveau 7 | |
| (intermédiaire) four XII: | 50 |
| Niveau 6 | |
| (intermédiaire) four XI: | 16 |
| Niveau 5 | |
| (intermédiaire) four VII: | 29 |
| Niveau 3 | |

| Essences | Morceaux | | Plantes | |
|--------------------|----------|-------|---------|-------|
| | N | % | N | % |
| Hêtre/fagus | 529 | 44 | 135 | 39,25 |
| Chêne/quercus | 407 | 34 | 111 | 32,25 |
| Erable/acer | 128 | 10,5 | 46 | 13,5 |
| Frêne/fraxinus | 94 | 8 | 36 | 10,5 |
| Peuplier/populus | 39 | 3 | 8 | 2,25 |
| Orme/ulmus | 8 | 0,5 | 6 | 1,75 |
| Pommier ou poirier | 2 | (0,1) | 2 | 0,5 |
| Total | 1207 | 100 | 344 | 100 |

Fig. 159. Les essences charbonnées. Nombre et %.

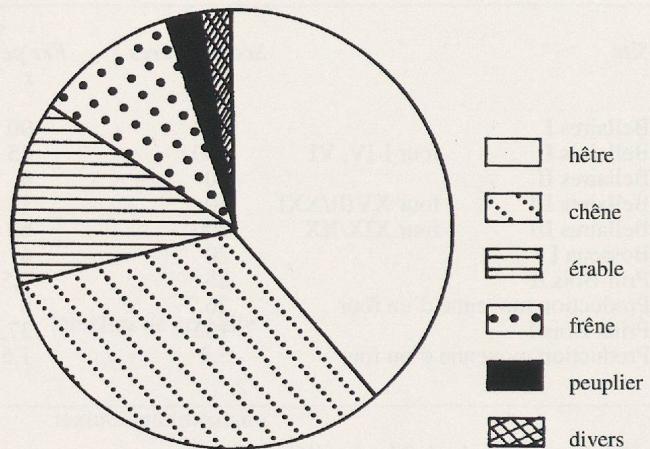


Fig. 160. Les essences charbonnées.

| | |
|--------------------------|------------|
| (intermédiaire) four V: | 14 |
| Niveau 2 | |
| (intermédiaire) four IX: | 1 |
| Niveau 1 | |
| (inférieur) four X: | 1 |
| Total | 197 |

Du fait de la pauvreté des couches inférieures, l'échantillonnage ne peut renseigner que sur l'exploitation forestière de l'Empire romain finissant.

Certains morceaux sont parfaitement conservés, d'autres – provenant des mêmes essences – ont été brisés ou réduits en poussière par les travaux sidérurgiques successifs, par les labours ou les déboisements et par deux mille ans d'intempéries. De plus, le nombre des fragments peut dépendre d'accidents: le charbon humide est souvent fragile: il s'effrite. Quelle foi accorder alors à des comptages? Nous avons comparé le nombre des morceaux recueillis et la fréquence des espèces, pondérée par le nombre de fragments clairement différenciés par leur âge, à l'intérieur de chaque prélèvement («Plantes / N») de la figure 159).

La hiérarchie est la même. Notre échantillonnage n'est sans doute pas très éloigné de la réalité.

Les forgerons de tous les ateliers ont préféré le hêtre et le chêne (plus de 70%), au meilleur pouvoir calorifique¹. Ils ont utilisé fréquemment l'érable et le frêne (15-25%) et occasionnellement d'autres bois de valeur approchante, l'orme, le pommier ou le poirier.

Un décapage du terrain tout entier aurait probablement mis au jour quelques autres cas exceptionnels, mais sans changer les prépondérances caractéristiques de cette sélection. Une analyse du charbon de bois recueilli sur le site de la maison Favre (Affolter) à Ferreyres (voir p. 117) en 1989 relève la même prédominance du hêtre et du chêne accompagnés du noisetier, du saule, de l'orme et du buis (Weidmann, 1990, 113).

1. L'analyse d'un lot de charbon «de charme» pour les feux de pique-niques, en provenance de l'Allemagne de l'Est a révélé qu'il comprenait 43% de hêtre, 30% de chêne, 26% de charme et 1% d'autres essences. Pour les deux dominantes, ce sont les proportions que nous trouvons aux Bellaires!

| Site | Bellaires I | | Bellaires II | | Bellaires III | | Bossena I | | Totaux | |
|---------------|-------------|------------|--------------|------------|---------------|------------|-----------|------------|------------|-----|
| Ø en cm | N | % | N | % | N | % | N | % | N | % |
| <= 1,9 | 5 | 2,5 | 2 | 5,5 | 4 | 10 | | | 11 | 4 |
| 2 - 3,9 | 84 | 39 | 9 | 25 | 9 | 22,5 | | | 102 | 34 |
| 4 - 5,9 | 59 | 27,5 | 11 | 30,5 | 10 | 25 | | | 80 | 27 |
| 6 - 7,9 | 29 | 13,5 | 9 | 25 | 9 | 22,5 | 2 | 49 | 16,5 | |
| 8 - 9,9 | 21 | 10 | 2 | 5,5 | 4 | 10 | 2 | 29 | 9,5 | |
| 10 - 11,9 | 11 | 5 | | | 2 | 5 | 3 | 16 | 5,5 | |
| => 12 | 5 | 2,5 | 3 | 8,5 | 2 | 5 | | | 10 | 3,5 |
| Totaux | 214 | 100 | 36 | 100 | 40 | 100 | 7 | 297 | 100 | |

Fig. 161. Diamètre des bûches.

Le seul combustible de qualité inférieure, le peuplier ne représente que 2 à 3% de l'ensemble; il peut avoir servi de complément, si ce n'est de menu bois d'allumage. Aucun conifère n'est utilisé, soit parce que le charbon de sapin qui donne une flamme pure, recherchée pour les foyers de forge, n'est pas assez riche en calories pour la réduction du minerai, soit parce que les résineux, rares dans la forêt actuelle sont absents de la sylve antique. Le buis qui, avec le chêne pubescent, fait aujourd'hui l'originalité du peuplement forestier n'apparaît qu'une fois, à Ferreyres. Pline (LXVI, ch. 71) estime inutilisable ce bois très dur et difficilement inflammable. Au XVI^e siècle, Nicolas Bourbon le rejette expressément². Le charme enfin, accompagnant classique du chêne, présent sur les champs de fouilles et qui donne un excellent charbon fait aussi défaut. E. Straker (1969, 110), ne le relève dans la forêt de Weald en Angleterre qu'à partir des Tudor et non à l'époque romaine. Les forgerons le réservent-ils à d'autres usages: coins de bois, maillets, manches d'outils, pièces de chars, etc., ou le charme ne peuple-t-il pas la forêt romaine? Au Bois-de-Forel sur Romainmôtier, de type analogue, la population des arbres d'un diamètre de 16 cm au maximum est la suivante:

| <i>Feuillus</i> | |
|------------------|-------|
| Hêtre | 30,2% |
| Chêne | 19,2% |
| Erable et frêne | 9,6% |
| Autres feuillus | 8,7% |
| Total | 67,7% |
| <i>Conifères</i> | |
| Sapin | 26,7% |
| Mélèze | 2,9% |
| Epicéa | 1,7% |
| Autres résineux | 0,9% |
| Total | 32,2% |

Si l'on exclut les résineux, qu'ils aient été absents autrefois ou simplement méprisés par les charbonniers, on constate que de nos jours encore la hiérarchie des feuillus est la même:

| | |
|-----------------|-------|
| Hêtre | 44,5% |
| Chêne | 28,3% |
| Erable et frêne | 14,2% |
| Divers | 13,0% |

Les quatre essences dominantes représentent au Bois-de-Forel 87% des arbres à feuilles caduques.

L'orme, le pommier, le poirier, le cerisier, le prunier sauvages, le peuplier, le noisetier, l'aubépine, l'alisier, etc., – et le charme ne font ensemble que 13%.

Aux Bellaires et à la Bossena, 84% des échantillons proviennent de troncs; 300 morceaux permettent la reconstitution de leurs diamètres. L'épaisseur moyenne des bûches carbonisées est de 5,5 cm, l'épaisseur moyenne présumée des troncs à leur base, 11 cm (voir fig. 161).

Pour Henri Duhamel du Monceau (1761, 9), la carbonisation entraîne une réduction du diamètre de l'ordre du tiers. Les forestiers actuels l'estiment d'un cinquième seulement, tandis que le volume diminue de 40%. Même si l'on admet la plus forte réduction, le diamètre moyen des bois choisis atteint 6 à 8 cm, celui d'aucune bûche ne dépasse 25 cm. En fait, plus de 80% d'entre elles restent en dessous de 6-8 cm lors de la coupe. La prépondérance des fragments de troncs et leur étroitesse prouvent que les maîtres de forges ne charbonnaient pas les arbres de haute futaie. Les cernes annuels de 270 échantillons confirment-ils cette déduction?

Ce qui frappe dans la figure 162, c'est l'écrasante proportion des bois apparemment jeunes ou très jeunes (75%) opposée au large éventail des âges (4 à 150 ans). Mais les prélèvements ne donnent pas l'âge des arbres eux-mêmes, soit parce qu'ils sont pris à une certaine hauteur du tronc, soit parce qu'ils sont brisés. Trente-quatre échantillons seulement sont conservés de la moelle à l'écorce; ils ont en moyenne 54 ans, et non 32.

Si l'on imagine un tronc modèle de 150 ans, de croissance régulière et divisé en tranches égales conservées intégralement, l'âge moyen des tranches serait de 75 ans. Si on admet au contraire une division en morceaux de volume égal mais s'étirant toujours de la moelle à l'aubier, la proportion du bois le plus ancien augmente énormément et l'âge moyen obtenu approche de 120 ans. Ces deux modèles théoriques ne sont pas sans intérêt. Ils montrent que, malgré la présence d'un chêne de 150 ans au moins, les 34 troncs d'âge connu (nous n'avons pas retenu les branches) ne suggèrent pas une forêt aussi vieille, exploitée en coupe rase (la moyenne des échantillons serait à coup sûr beaucoup plus élevée). Il s'agit,

2. Nicolai Borbonii Vandoperani Ferraria, (1533). Dans la région de Bar-sur-Aube, les charbonniers choisissent le chêne, le frêne, le hêtre, le pin et l'yeuse. Ils rejettent le houx, le mélèze et le buis.

| Site | Bellaires I | | Bellaires II | | Bellaires III | | Bossena I | | Totaux | |
|-----------------|-------------|------------|--------------|------------|---------------|------------|-----------|----|------------|------------|
| Age (ans) | N | % | N | % | N | % | N | % | N | % |
| 2 - 20 | 79 | 41 | 19 | 56 | 14 | 37 | 1 | | 113 | 42 |
| 21 - 40 | 64 | 34 | 11 | 32 | 15 | 39,5 | | | 90 | 33 |
| 41 - 60 | 29 | 15 | 3 | 9 | 7 | 18,5 | 3 | | 42 | 16 |
| 61 - 80 | 13 | 7 | 1 | 3 | 2 | 5 | 3 | | 19 | 7 |
| 81 - 100 | 4 | 2 | | | | | | | 4 | 1,5 |
| > 100 | 2 | 1 | | | | | | | 2 | 0,5 |
| Totaux | 191 | 100 | 34 | 100 | 38 | 100 | 7 | | 270 | 100 |
| Age moyen (ans) | | 33 | | 22 | | 32 | | 56 | | 32 |

Fig. 162. Age des échantillons.

plutôt de l'abattage de plantes d'âges divers: taillis «furetés» ou taillis sous futaie (Badoux, 1906; Hess, 1927, 158-164; Cointat, 1956, 658-675). Parallèlement, les troncs les plus vieux (60 ans et plus) ne se distinguent guère par leurs dimensions. Le diamètre de 25 d'entre eux n'atteint pas 7 cm de moyenne (9-10 cm pour le bois frais). Le vétérant, avec ses 150 ans (niveau supérieur de Bellaires I) avait lors de la coupe un diamètre de 20 à 24 cm. Ces vieux arbres sont malingres. De plus, à Bellaires I, les chênes carbonisés (âge moyen des échantillons 43 ans) ont un diamètre de 45 mm, les bûches de hêtre (âge moyen 28 ans), 48 mm. La similitude des diamètres l'emporte sur la différence des croissances. Ces constatations font penser que les bûcherons ont sélectionné les plantes en fonction de leurs faibles dimensions, qui conviennent au charbonnage, et non en raison de leur plus grande maturité.

La répartition des échantillons selon leur âge et leur niveau est anormale. Du fait de la subdivision des morceaux

de charbon et du volume des troncs, ce sont les morceaux les plus âgés qui devraient dominer et non les plus jeunes. Cette anomalie prouve l'intervention d'autres facteurs: bois découpés et déliés à l'excès par les hommes ou par le temps. Mais ce phénomène se reproduit à tous les niveaux. Les séries restent parallèles.

En l'absence de coupes rases, ni l'âge moyen de troncs intégralement conservés ni les morceaux les plus âgés ne révèlent l'intervalle entre les coupes. En cas d'abattages sélectifs, un âge moyen moins élevé indiquerait tout au plus une accélération de l'exploitation. Du fait des interventions humaines ou climatiques, il n'est pas certain que la multiplication des morceaux jeunes dans les niveaux supérieurs de Bellaires I et la diminution relative des morceaux âgés (malgré le chêne de 150 ans) indiquent un moindre intervalle entre les ateliers à la fin de l'Empire romain.

Même relevée d'un cinquième pour compenser la contraction due à la carbonisation, la croissance annuelle de

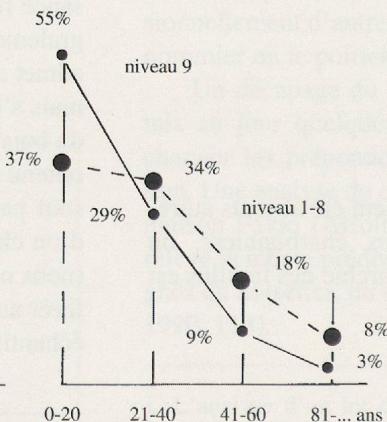
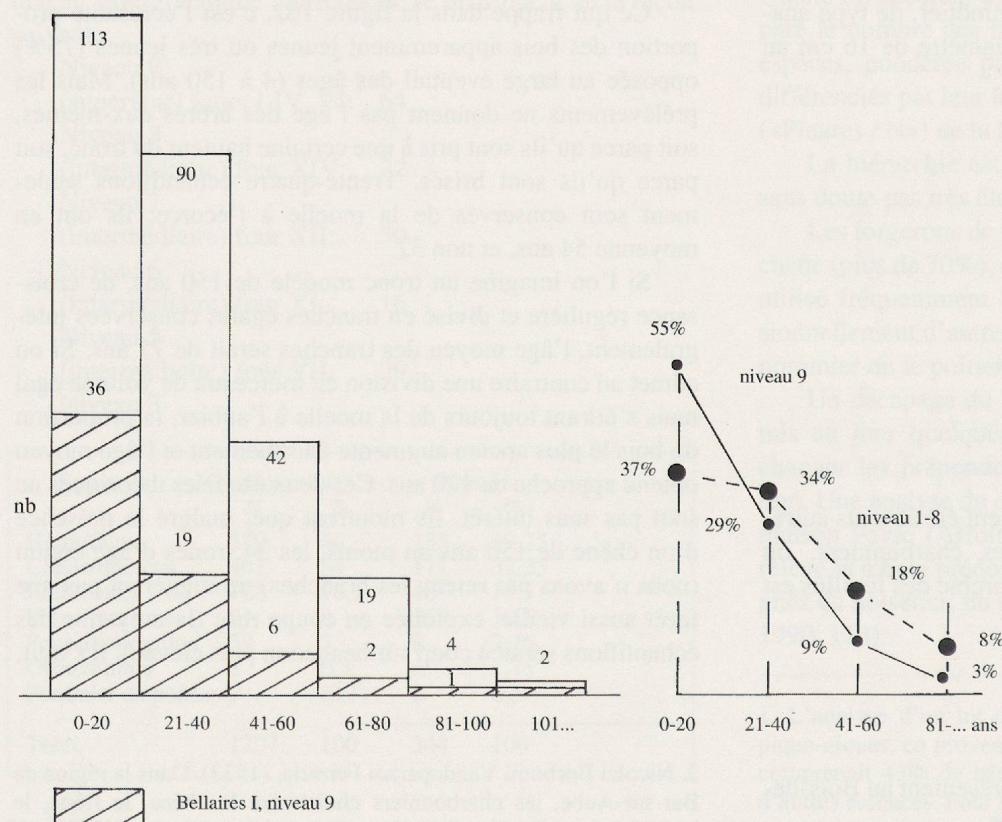


Fig. 163. Age des charbons. Bellaires I, II, III, Bossena: âge des échantillons de charbon.

la forêt est très inférieure à la moyenne. De nos jours, les arbres poussent mieux dans les combes relativement riches en humus des Bellaires. Le charbon provient probablement de zones où le rocher affleure (Gannevat, 1950, 223-226). Forêt pauvre, mais saine malgré tout: le charbon ne porte aucune trace de mycélium. Les forgerons n'y ont pas récolté du bois mort. Quelque 25 échantillons portent encore la trace de leurs outils. Six morceaux ont conservé leur écorce,

ce qui permet de déterminer la période de la coupe: cinq ont été abattus en hiver, un au début de la période de végétation. Les fentes repérables dans les tissus ligneux suggèrent un séchage à l'air libre. Les feuillus à la croissance trop lente, aux tissus trop légers sont sans valeur en menuiserie; ils semblent convenir particulièrement à une carbonisation régulière. Sur 1207 morceaux, deux seulement sont mal cuits.