



HAL
open science

Structuration et contexte des échanges en métallurgie du fer durant la Protohistoire : une approche interdisciplinaire à partir des matières premières métalliques

Marion Berranger, Philippe Fluzin

► To cite this version:

Marion Berranger, Philippe Fluzin. Structuration et contexte des échanges en métallurgie du fer durant la Protohistoire : une approche interdisciplinaire à partir des matières premières métalliques. Anne Colin; Florence Verdin. L'âge du Fer en Aquitaine et sur ses marges. Mobilité des personnes, migrations des idées, circulations des biens dans l'espace européen à l'âge du Fer. Actes du 35e colloque international de l'Association française pour l'étude de l'âge du Fer (Bordeaux, 2-5 juin 2011), Supplément Aquitania (30), Fédération Aquitania, pp.609-629, 2013, 978-2-910763-34-3. <hal-03972575>

HAL Id: hal-03972575

<https://hal.science/hal-03972575v1>

Submitted on 9 Feb 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire HAL, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons CC BY-NC-ND 4.0 - Attribution - Non-commercial use - No Derivative Works - International License

Structuration et contexte des échanges en métallurgie du fer durant la Protohistoire. Une approche interdisciplinaire à partir des matières premières métalliques

Marion Berranger, Philippe Fluxin

La caractérisation morphologique des produits manufacturés a longtemps été privilégiée afin d'appréhender la circulation des biens. Pour les objets métalliques, une approche interdisciplinaire a été précocement envisagée, dès les années 1950, notamment à travers l'analyse élémentaire des alliages base cuivre. Néanmoins, ces travaux ont montré la grande complexité d'une démarche visant à relier directement la composition chimique d'un métal à un minerai, encore plus particulièrement lorsque les matériaux sont alliés et ont pu être recyclés. Les travaux actuels ne s'orientent donc plus tant vers la définition de l'origine des bronzes, que vers l'étude de la circulation du métal en fonction de régions et de périodes définies¹.

En ce qui concerne les ferreux, l'application de méthodes interdisciplinaires a été plus récente et le domaine de la traçabilité des matériaux connaît actuellement les développements les plus novateurs. Des études de provenance examinent ainsi les rapports isotopiques² ou reposent sur l'identification d'éléments traces dans des régions présentant des traceurs particuliers (phosphore³ ; manganèse⁴). Le recours aux analyses élémentaires, méthode relativement accessible, peut également permettre de tracer la signature chimique d'un atelier et ses pratiques⁵. Certains corpus d'objets protohistoriques ont bénéficié de ces caractérisations nouvelles mais leur application est encore trop limitée régionalement pour proposer une synthèse globale⁶.

Une autre approche interdisciplinaire et complémentaire à la précédente, reposant sur la caractérisation des propriétés du métal à l'échelle macroscopique et microscopique, vise à restituer les mécanismes des échanges, en traçant notamment les qualités des matériaux et les savoir-faire. C'est une partie des résultats de cette dernière démarche, que nous proposons de présenter ici (fig. 1).

-
- 1- Rychner & Kläntschi 1995 ; Véber *et al.* 2003.
 - 2- Schwab *et al.* 2006.
 - 3- Desaulty 2008.
 - 4- Leroy 2010.
 - 5- Dillmann & L'heritier 2007.
 - 6- Berranger 2009 ; Bauvais 2007 ; Berranger *et al.* 2007.

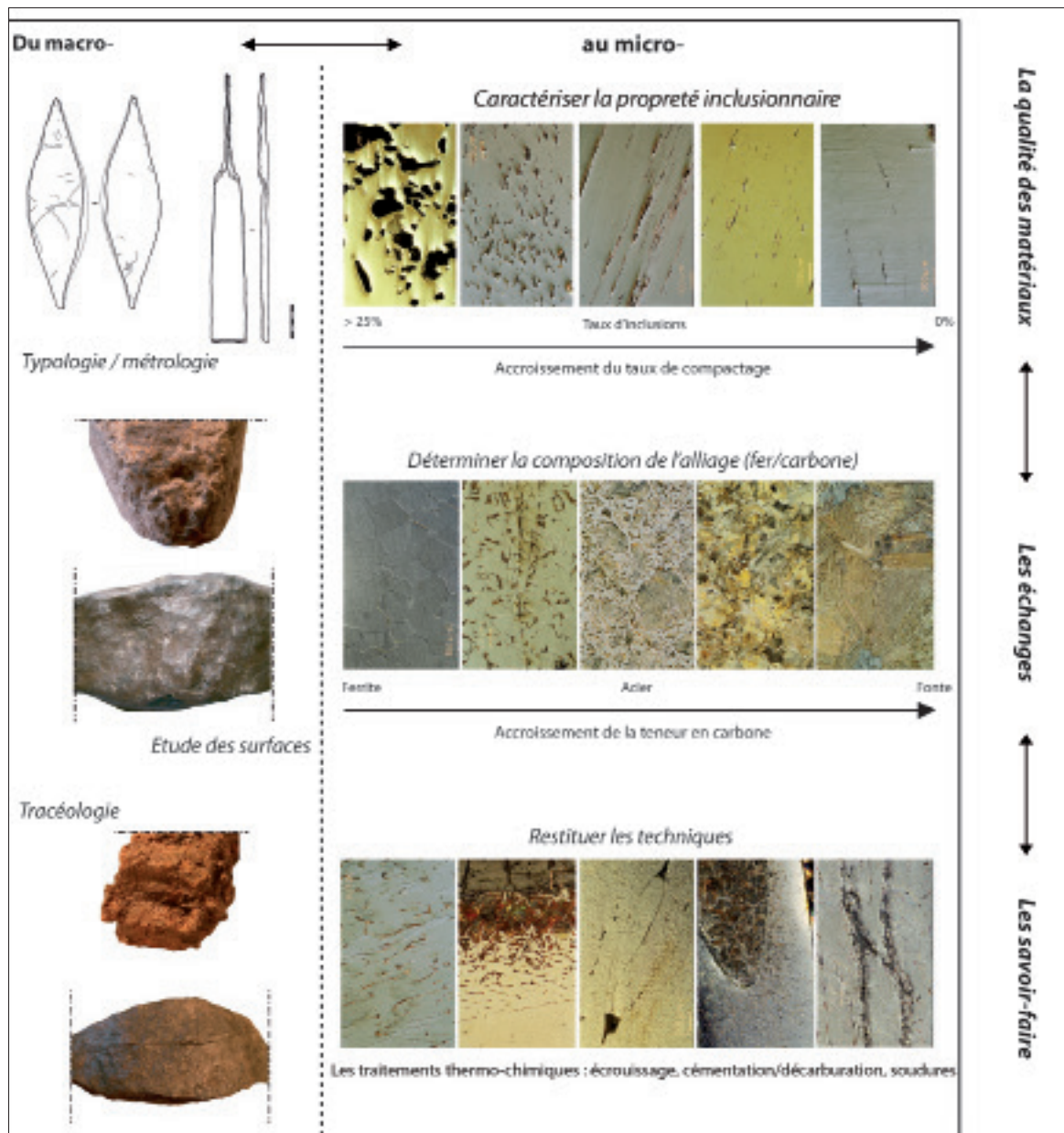


Fig. 1. Une approche interdisciplinaire reposant sur une caractérisation de la matière à l'échelle macroscopique et microscopique.

DONNÉES INTRODUCTIVES

Spécificités des échanges en métallurgie du fer protohistorique

Les produits ferreux présentent certaines spécificités qui ont pu influencer sur leurs conditions de circulation durant la protohistoire. Certains avantages du matériau doivent être soulignés. Le minerai de fer est l'un des éléments les plus abondants au sein de la croûte terrestre (5 %) et s'avère, pour certains minerais, enfoui à faible profondeur, et donc relativement facile à extraire. Contrairement à la production du bronze, les contraintes d'accessibilité à la matière première s'avèrent donc relativement modérées. Du moment que les étapes techniques de sa production sont maîtrisées, le fer métal aurait pu être potentiellement produit sur de vastes zones géographiques, notamment pour de faibles volumes.

Malgré la disponibilité de la matière première, ce matériau est jusqu'à une période assez tardive dans le Second âge du Fer, relativement peu diffusé dans la société. Clairement réservé à une sphère réduite de la population durant le Premier âge du Fer, son usage reste, jusque dans le courant des III^e-II^e s. a.C., principalement destiné à la fabrication de pièces d'importance stratégique, telles que l'armement ou l'outillage. Des contraintes particulières ont donc dû très probablement peser sur les conditions de production et de circulation des matières premières métalliques aussi bien que des produits manufacturés.

Corpus et méthodologies

Rappelons que, pour les périodes anciennes, la chaîne opératoire de production du fer se subdivise schématiquement en deux grandes étapes⁷. Celle de réduction, aboutissant à l'obtention de fer métallique, par réaction chimique entre du minerai de fer, du charbon et un agent réducteur, le gaz carbonique, au sein d'un foyer semi-ouvert appelé bas-fourneau. L'opération s'effectue à une température inférieure à la fusion du fer (1536°C) ce qui aboutit à l'obtention d'une masse de métal qui peut être plus ou moins hétérogène et contenir une proportion variable d'inclusions non métalliques : charbon, porosités et scorie. L'étape suivante, dite de post-réduction, a un double objectif : modifier la texture et la structure du métal (notamment par l'élimination des stériles en inclusions), et le déformer à chaud jusqu'à l'obtention de la forme voulue.

Parmi les produits résultant de ces différentes phases de production, les matières premières métalliques (masses brutes de réduction et demi-produits) s'avèrent des documents privilégiés pour étudier la circulation des biens et des savoir-faire. En effet, il s'agit de produits intermédiaires destinés à circuler entre l'atelier de réduction/épuration et de forgeage, qui peuvent ainsi renseigner sur les réseaux de circulation du métal.

La présente étude porte sur 1042 matières premières métalliques, provenant de 128 sites répartis sur le territoire français actuel (fig. 2). Plus de la moitié des pièces du corpus a subi une étude macroscopique et tracéologique (564). Les données archéométriques sont issues, quant à elles, de dépouillements bibliographiques et de l'étude inédite de 66 objets. Les analyses ont consisté, après description des surfaces et enregistrement métrologique, en l'observation au microscope métallographique d'une section complète de chaque échantillon, préparée par polissage, et observée avant et après attaque chimique (nital 3 %).

La seule caractérisation macroscopique fournit de premières informations sur les traitements appliqués (avancée des étapes de compactage par exemple) ou sur d'éventuelles spécificités techniques (traces d'outils), mais elle n'est pas suffisante pour déterminer la qualité des produits. En effet, les matériaux obtenus dans le cadre du procédé direct peuvent présenter une très grande hétérogénéité, inhérente aux conditions de réduction. Les observations effectuées à l'échelle microscopique permettent ainsi de caractériser la texture et la

7- Fluzin 2002 et Mangin 2004.

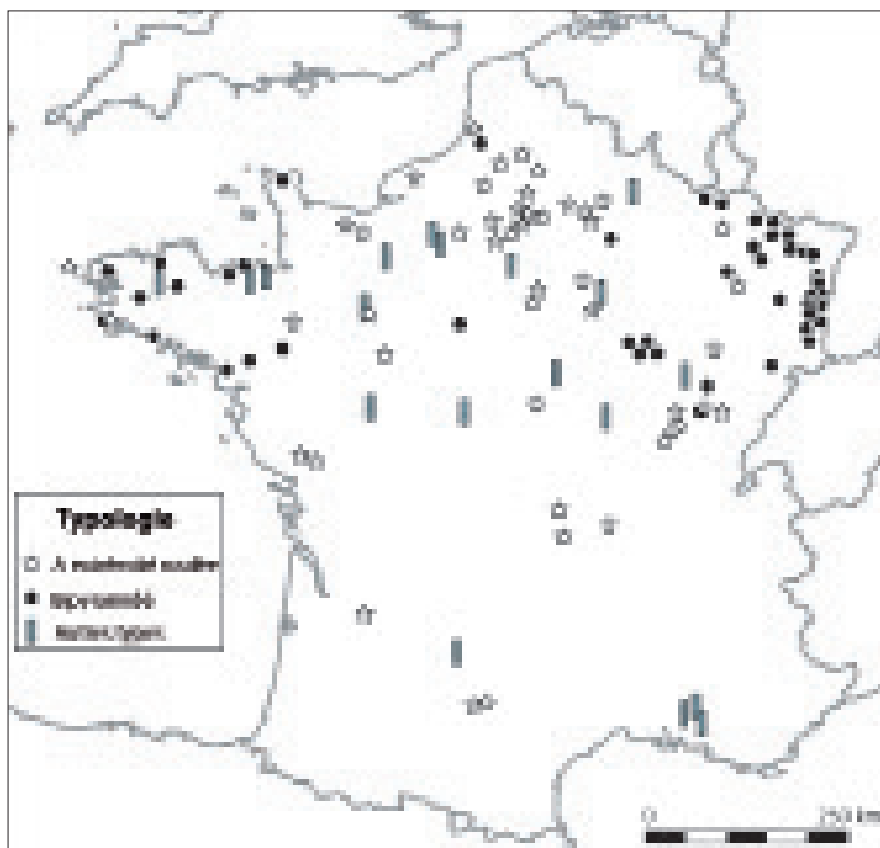


Fig. 2. Carte de répartition des sites étudiés, par type de matière première métallique.

structure internes. Trois critères principaux d'évaluation ont été ici privilégiés : la qualité inclusionnaire, la composition du métal et la nature des traitements appliqués (fig. 1).

La qualité inclusionnaire est déterminée par la quantité et l'aspect des hétérogénéités présentes dans la matrice métallique, qu'il s'agisse de porosités ou d'inclusions vitreuses (silice/scorie). Leur proportion, leur taille et leur aspect (degré d'écrasement) fournissent des informations sur le degré d'épuration et de compactage. Cinq groupes ont été différenciés : très médiocre, quand la proportion d'inclusions et de porosités est supérieure à 25 % de la section étudiée ; mauvaise : de 25 à 15 % ; moyenne : de 15 à 10 % ; bonne : de 10 à 5 % ; excellente : de 5 à 0 %. Ce taux permet ensuite de caractériser l'état d'avancement du processus d'épuration - compactage : plus celui-ci est élevé moins cette étape est aboutie. La qualité globale d'un objet ne dépend néanmoins pas uniquement de ce taux.

Le métal peut également présenter des propriétés très variables en fonction de ses caractéristiques physico-chimiques, telles que les teneurs en carbone, phosphore, manganèse etc. La teneur en carbone est l'un des principaux facteurs à prendre en compte, l'accroissement de ce dernier composé rendant l'objet plus dur mais plus cassant. Les classifications actuelles reconnaissent trois grands domaines de composition :

- le fer pur ou ferrite ($> 0,02 \text{ \%}_{\text{masse}} \text{C}$) ;
- l'acier : hypoeutectoïde (de $0,02$ à $0,8 \text{ \%}_{\text{masse}} \text{C}$), eutectoïde ($0,8 \text{ \%}_{\text{masse}} \text{C}$) et hypereutectoïde ($0,8$ à $2,1 \text{ \%}_{\text{masse}} \text{C}$).
- les fontes ($2,1$ à $6,7 \text{ \%}_{\text{masse}} \text{C}$).

Des différences de ductilité sont perceptibles entre un acier pauvre et un acier riche en carbone. Ainsi, ont été distingués les aciers “doux”, contenant entre $0,1$ et $0,4 \text{ \%C}$ et les aciers “durs”, comprenant de $0,5$ à $0,8 \text{ \%C}$. Signalons que, dans le cadre du procédé direct, la production de fonte est généralement accidentelle.

Le dernier domaine de caractérisation concerne les techniques de fabrication. L'application de traitements mécaniques ou thermo-chimiques conduit en effet à la modification du réseau cristallin et de la structure du métal. Certains de ces traitements sont surtout appliqués en forge d'élaboration. Les observations ont porté sur les trois types de traitements les plus fréquents :

- les traitements mécaniques effectués à froid ou à basse température tels que le martelage, la tranche, le perçage, qui, lorsqu'ils sont effectués à une température inférieure à 650°C , sans réchauffement ultérieur, entraînent une faible déformation ou un fort écrouissage des grains du métal, de façon proportionnelle à l'intensité des chocs mécaniques.

- Les traitements thermiques, tels que les refroidissements plus ou moins brutaux qui permettent de renforcer la dureté d'objets déjà aciérés mais accentuent leur fragilité (un réchauffage ultérieur appelé revenu, peut en partie pallier à ce défaut) et qui génèrent des structures dites “hors d'équilibre” particulières (martensite, troostite ou bainite nodulaire).

- Les traitements thermo-chimiques. Tels que la cémentation, qui se traduit par la diffusion de carbone de l'extérieur vers l'intérieur de la masse ferreuse, ou le processus contraire de décarburation (par oxydation), qui permet la migration superficielle du carbone. Les soudures qui appartiennent également à cette catégorie de traitements ont été particulièrement étudiées, afin de déterminer les techniques d'épuration/mise en forme. Ont ainsi été distingués les produits formés par la déformation d'une seule masse métallique, l'assemblage de feuilles différentes ou le corroyage par replis successifs.

Ces informations vont permettre de caractériser, à partir de l'échantillon archéologique disponible, certains aspects de l'organisation des échanges. L'objectif est dans un premier temps de définir la nature de l'offre et de la demande dans le domaine plus spécifique des matières premières métalliques. En effet, ces deux variables, conceptualisées récemment pour une économie de marché, peuvent être retenues comme structurant les échanges. D'autres critères influent sur les modalités de circulation des biens : les possibilités d'accès aux réseaux de communication, les compétences, les moyens économiques des artisans. Ils n'ont néanmoins pas été analysés en détail ici, car il s'agit de paramètres connaissant une trop grande variabilité à notre échelle d'observation. Les logiques sous-jacentes aux échanges ne sont néanmoins pas uniquement économiques, surtout dans les sociétés anciennes. Le poids de la tradition, l'influence des élites ont pu jouer un rôle important, voire dans certains cas primordial. Il est donc nécessaire de tenter d'approcher ces aspects, même s'ils sont bien plus complexes à caractériser en se basant sur la seule documentation archéologique.

CARACTÉRISER LE MARCHÉ DES MATIÈRES PREMIÈRES MÉTALLIQUES : L'OFFRE ET LA DEMANDE

L'offre

Durant la protohistoire, le fer est diffusé en masses brutes, directement issues du bas-fourneau, ou sous une forme semi-préparée, on parle alors de demi-produits (fig. 3). La forme et la qualité de ces objets dépendent de la nature du produit obtenu à l'issue de la réduction et des traitements appliqués en forge d'épuration. L'interruption plus ou moins précoce de l'étape d'épuration conditionne ainsi les caractéristiques des demi-produits, dont l'aspect et la qualité peuvent ainsi être très variables.

À l'échelle de la France, cinq catégories sont actuellement distinguées en fonction de la morphologie : les demi-produits bipyramidés, les "Hooked Billet", les demi-produits quadrangulaires, à soie et à extrémité roulée. 99 % des exemplaires connus sont bipyramidés ou à extrémité roulée. Pour ces types, plusieurs variantes morphologiques ont été reconnues (fig. 4). L'analyse interne d'un échantillonnage représentatif met en évidence le partage de caractéristiques communes aux objets d'une même variante, voire d'une même catégorie.

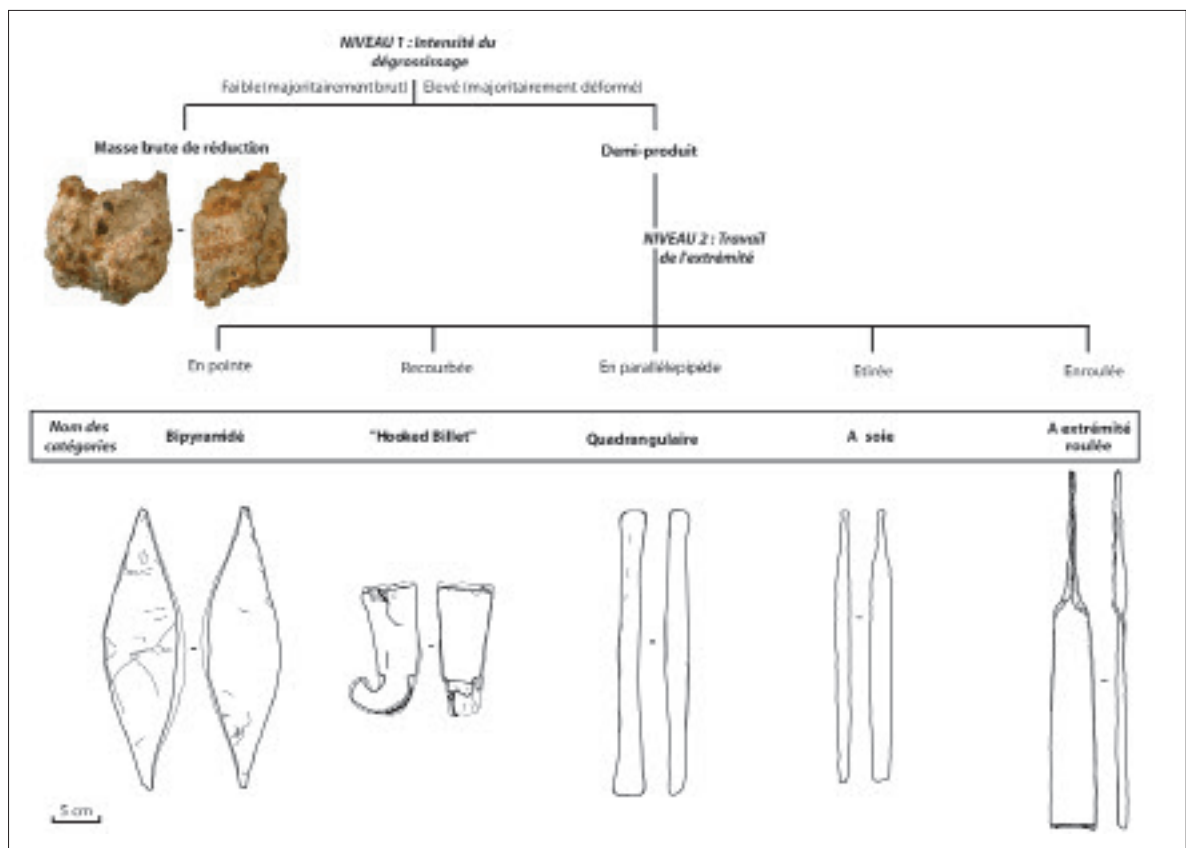


Fig. 3. Typologie des matières premières métalliques.

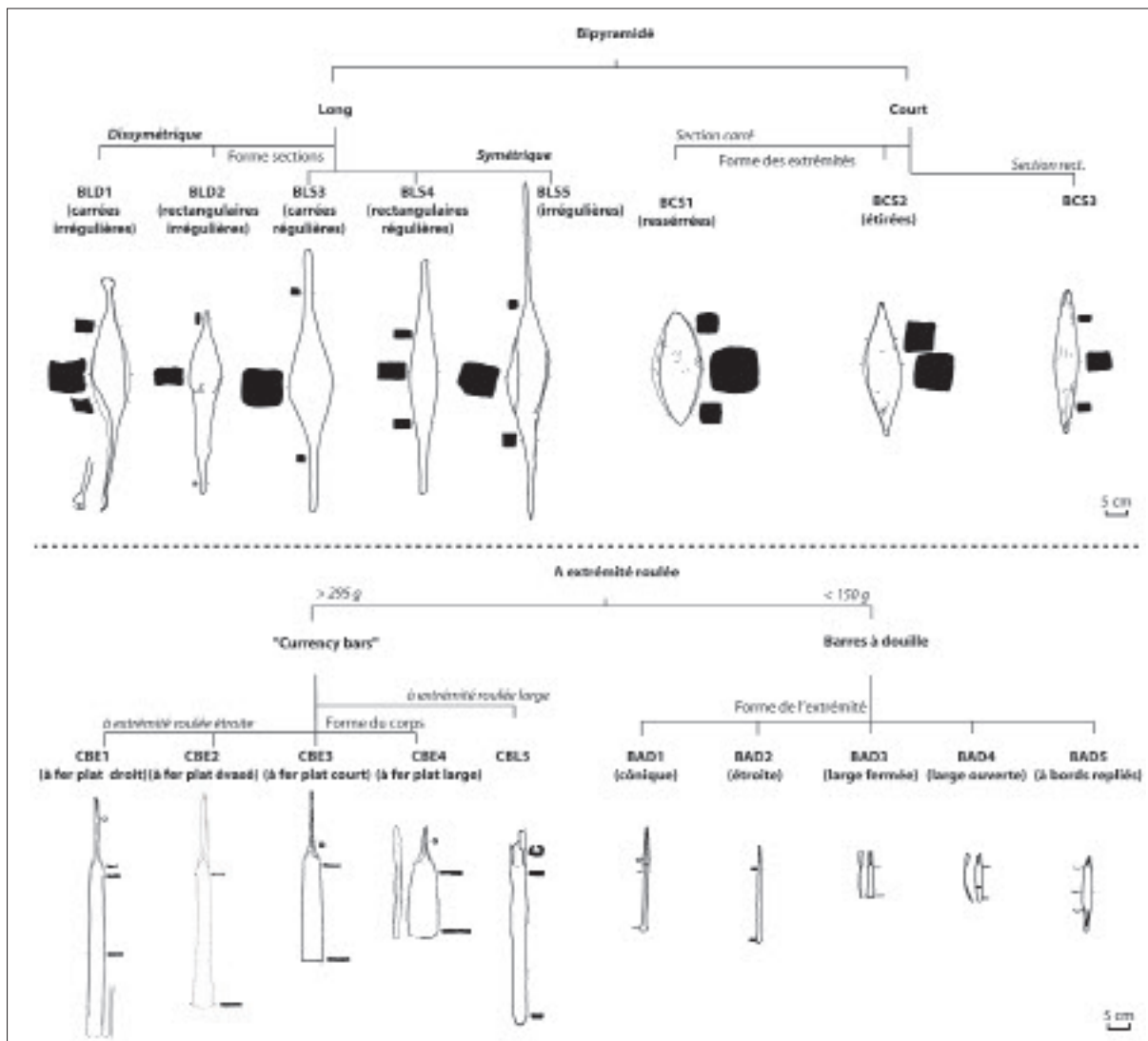


Fig. 4. Les variantes des demi-produits bipyramidés et à extrémité roulée (reconnus à partir du corpus français).

- Des volumes de métal distincts

L'étude des caractéristiques métrologiques des demi-produits complets, en prenant en compte la longueur et la masse, ou la taille des sections (une comparaison à partir du volume est trop aléatoire en raison de la morphologie complexe de certains objets), révèle l'existence de groupes métrologiques (fig. 5 – tabl. 1).

Les mêmes quatre grands groupes s'individualisent dans chacun des cas. Les deux premiers rassemblent des objets lourds pesant de 1,5 kg à 14 kg. Ils correspondent aux masses brutes de réduction, aux bipyramidés, quadrangulaires et aux "Hooked Billet". La distinction entre ces deux groupes repose essentiellement sur la taille : le groupe 1 rassemble des objets courts, tandis que le groupe 2 comprend des objets plus longs.

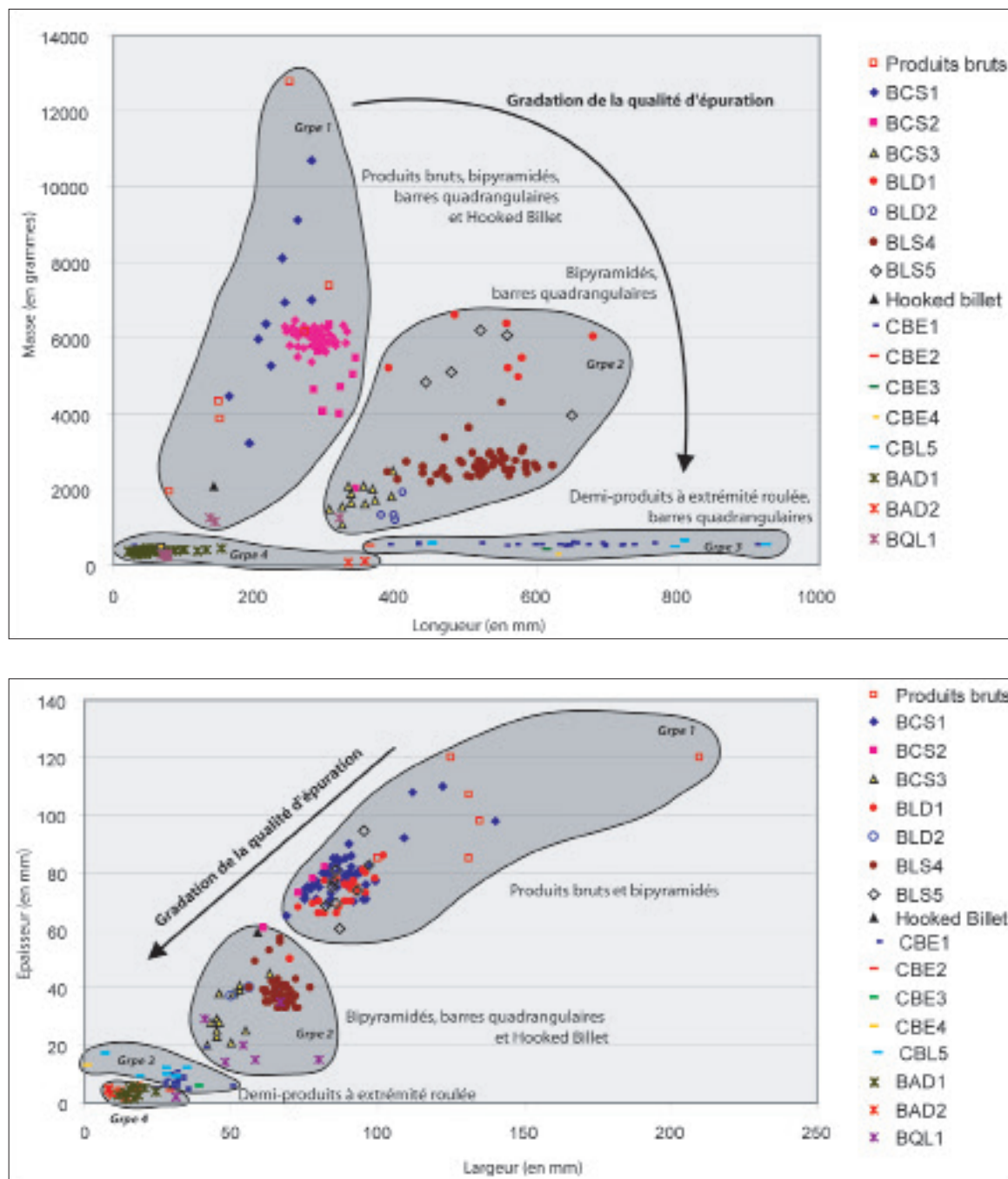


Fig. 5. Comparaison, par variantes, des caractéristiques métrologiques des produits complets : masse / longueur et épaisseur / largeur.

masses brutes de réduction, des bipyramidés et des “*Hooked Billet*”. Un groupe intermédiaire rassemble des objets plus propres, davantage travaillés, bien que restant majoritairement incomplètement épurés. Il inclut les barres quadrangulaires et certains produits bipyramidés. Le dernier groupe correspond aux produits les plus manufacturés (longs et plats), dont le processus d'épuration a été poussé jusqu'à un stade quasiment terminal. Il rassemble les barres à soie et à extrémité roulée.

- Les techniques de fabrication

Le croisement des données macroscopiques et microscopiques permet également de restituer les conditions d'obtention des différentes catégories de demi-produits (tabl. 1). Certains produits tels les bipyramidés, les “*Hooked Billet*” et les demi-produits quadrangulaires résultent de techniques de mises en forme simples, par déformation de la masse métallique sur elle-même. Les demi-produits à extrémité roulée sont issus de techniques d'une certaine complexité, et sont souvent mis en forme par replis successifs, ce qui leur confère une homogénéité et une qualité d'épuration nettement supérieure.

- La composition chimique de l'alliage

La teneur en carbone ou en phosphore conditionne également directement les propriétés mécaniques d'un métal. Si la présence de phosphore est attestée au sein de certains demi-produits, tel à Marsal (Lorraine)⁸, le faible nombre d'analyses ne permet pas de certifier l'hypothèse de leur circulation sous une forme spécifique, d'autant que cette composition peut être le reflet de la signature chimique de certains minerais.

En ce qui concerne les alliages fer/carbone, la composition des demi-produits étudiés est relativement homogène (tabl. 1) : ils sont presque tous majoritairement ferritiques et leur teneur en carbone ne dépasse que très rarement 0,5 %_{mass}. Du fer plus carburé (jusqu'à 0,9 %C) peut être présent, mais localement et de façon très minoritaire. Une variante fait exception : les barres à douilles BAD1 pour lesquelles l'acier semble avoir été un critère recherché (avec cémentation systématique).

Au sein des matières premières métalliques, seuls les fragments de produits bruts comportent toujours un acier à fort taux de carbone à 0,7/1 %C, quelques-uns dépassant localement les 2,1 %C (fonte). Si l'hypothèse de rebuts ne peut être exclue, il pourrait également s'agir de produits en attente de décarburation, ou bien, mis de côté pour des productions spécifiques (lames, outils). Le compactage parfois poussé de certains d'entre eux permet en effet de supposer qu'ils n'ont pas été abandonnés du fait de leur trop fort taux de carbone : leur rejet se serait effectué plus en amont et non après un travail déjà avancé de régularisation des surfaces et de densification partielle.

Il serait donc possible d'envisager une circulation distincte entre les fers doux ou peu aciérés (inférieur à 0,5/0,6 %C), qui auraient été principalement diffusés en demi-produits, et l'acier dur (à 0,7/1 %C) qui aurait été échangé principalement sous une forme plus ou moins brute.

Caractéristiques de l'offre

Les matières premières métalliques se subdivisent donc en un nombre de types et variantes limité, ce qui témoigne d'une production en fonction de morphologies récurrentes. La confrontation des caractéristiques métrologiques, de la qualité d'épuration, des techniques de fabrication et de la composition chimique des matières premières métalliques permet de noter une certaine corrélation entre typologie, métrologie et qualités internes. Il est ainsi possible de supposer une production de demi-produits en fonction de certains standards, ce qui témoigne d'une rationalisation particulière au moment de leur fabrication et de leur diffusion. Elle

8- Vega et al. 2002.

implique la transmission d'une information entre le producteur de demi-produit et l'acquéreur, dans le cadre d'une "codification" acceptée par l'ensemble des intervenants : artisans et éventuels intermédiaires.

On note également des particularités morphologiques, qui ne peuvent être interprétées en fonction d'une seule logique pratique, et qui expriment probablement une volonté de démontrer la qualité du métal à partir de l'aspect extérieur. Il s'agit des extrémités roulées sur elles-mêmes⁹ ou bien fortement allongées ou écrasées en spatules. Pour les demi-produits à extrémité roulée, bien épurés, l'objectif aurait été de démontrer la bonne qualité d'épuration du métal, afin de s'assurer d'un amincissement sans déchirure (pour la fabrication de tôles par exemple). Pour les bipyramidés aux extrémités fortement travaillées (BL), qui correspondent principalement à des produits encore particulièrement bruts, l'intérêt aurait été de démontrer la ductilité du métal, afin de s'assurer qu'il se déformait facilement et que le compactage serait donc aisé.

Ces données sont synthétisées dans le tableau 1, et permettent d'envisager la circulation d'au moins quatre grands groupes de produits. On note que les caractéristiques les plus discriminantes sont la métrologie et la qualité d'épuration, cette dernière étant également étroitement liée aux techniques de fabrication. La composition chimique de l'alliage (inhérente en grande partie aux minerais employés et aux conditions de réduction) ne semble avoir joué qu'un rôle secondaire d'après nos observations.

La documentation archéologique permet d'appréhender la possibilité pour un forgeron d'acquérir quatre grandes gammes de matières premières métalliques :

- des produits lourds et courts, relativement mal épurés et peu travaillés ;
- des produits lourds et longs, de qualité d'épuration intermédiaire, ayant fait l'objet de traitement plus poussés ;
- des produits légers, fins et longs, bien épurés, éventuellement mis en forme par replis ;
- des produits très légers, fins et courts, de qualité d'épuration excellente, mis en forme par replis et éventuellement cémentés.

Il est évident que ces caractéristiques distinctes devaient conférer des valeurs différentes aux demi-produits. Un forgeron aurait donc eu la possibilité d'acquérir une matière première en fonction de l'investissement qu'il était prêt à consentir, mais également adaptée à ses besoins, à la nature de sa production et à son savoir-faire. L'introduction de données chronologiques permet d'appréhender certains aspects de l'évolution de l'offre et de la demande au cours des deux âges du Fer.

Évolution de l'offre et de la demande au cours du temps

Soulignons en préambule la complexité d'une étude chronologique reposant sur les matières premières métalliques. En effet, ces objets sont souvent trouvés hors de tout contexte daté, ou sont issus de découvertes anciennes mal documentées. C'est particulièrement le cas pour les bipyramidés qui proviennent généralement de dépôts isolés. La datation de séries de bipyramidés par radiocarbone fait l'objet d'un programme de recherche en cours, ce qui permet d'envisager un renouvellement prochain de la documentation.

Les résultats de l'étude chronologique proposée ici reposent sur la prise en compte de sites uniquement bien datés, issus de l'intégralité de l'aire de répartition des demi-produits, de la Grande-Bretagne à la Pologne. La synthèse de l'analyse¹⁰ est présentée sous la forme d'un histogramme (fig. 6) décomptant le nombre d'objets datés par siècle et par catégorie de demi-produit. Il n'inclut que les contextes bien avérés, et les objets datés à cheval sur deux périodes ont été comptés une fois pour chacune.

9- Crew 1994.

10- Berranger 2009.

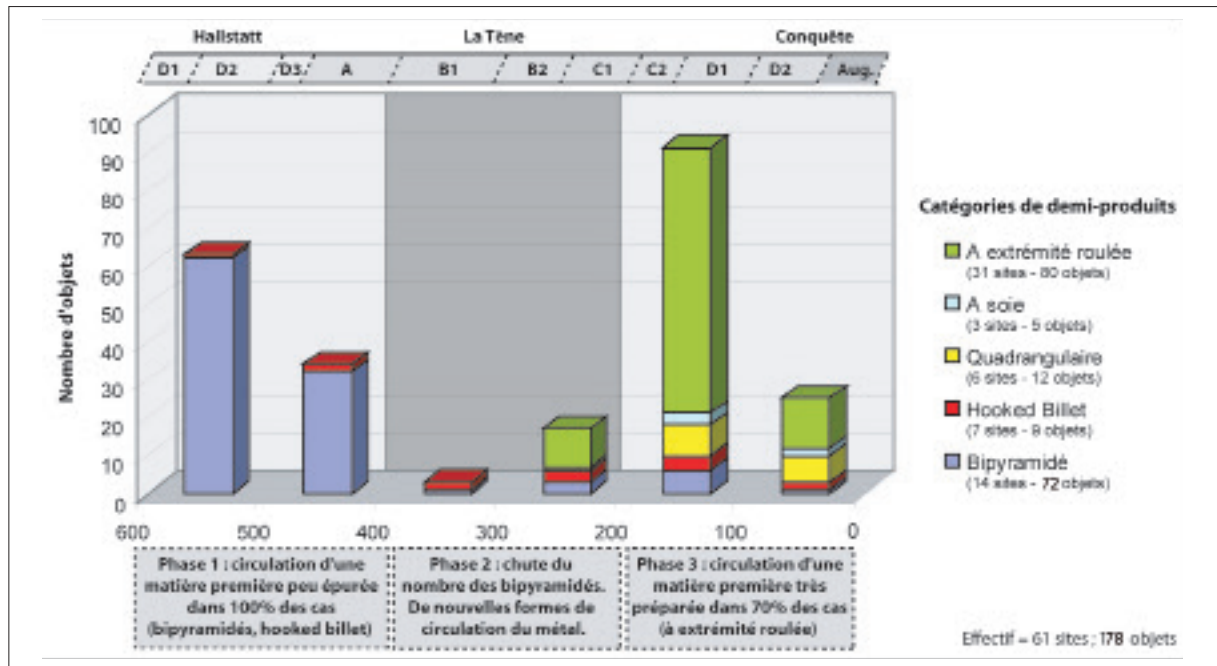


Fig. 6. Synthèse des datations des demi-produits. N'ont été pris en compte que les contextes bien avérés. Les objets datés à cheval sur deux périodes ont été comptés une fois pour chacune.

Le Premier âge du Fer est caractérisé par la circulation d'une matière première, ayant la forme de bipyramidés et de "Hooked Billet", de qualités relativement similaires : ces produits sont volumineux et lourds, et constituent un matériau peu ou sommairement épuré, résultant de techniques de mises en forme simples. Cela implique, au niveau du "forgeron-producteur", un faible investissement dans l'étape de préparation de la matière. Le "forgeron-acquéreur" devait quant à lui disposer d'une maîtrise technique étendue, afin de transformer une pièce métallique totalement ou en grande partie brute jusqu'à un objet fini de qualité adaptée à sa fonction. Le faible niveau de transformation des matières premières métalliques en amont de l'étape de forgeage, renvoie à des utilisations très diversifiées. La matière première semble ainsi produite afin de répondre à une demande probablement relativement généraliste, et la documentation actuelle ne permet pas d'appréhender une forte spécialisation entre artisans.

À partir de La Tène B2 apparaissent de nouvelles catégories de demi-produits : à extrémité roulée, quadrangulaires et, à partir du II^e s. a.C., des barres à soie, tandis que la circulation des catégories connues antérieurement (bipyramidés et "Hooked Billet") perdure. Comme nous l'avons vu, ces produits correspondent à des qualités et des volumes de métal distincts, ce qui traduit un élargissement de la gamme des qualités de métaux en circulation. Ce phénomène est très probablement à corrélérer avec une différenciation croissante dans les pratiques sidérurgiques en forge et avec une plus grande spécialisation.

On note ainsi un renforcement de l'adéquation entre le type de matière première disponible et le type d'objet à produire. Cela se traduit par l'apparition de barres (telles que les barres à douille) dont le volume particulièrement réduit est clairement adapté à la fabrication d'un unique objet.

Il est possible d'évoquer pour certains demi-produits, comme ceux à extrémité roulée, la notion d'ébauche. Ces derniers reflètent, en effet, une préparation d'un niveau très avancé, se traduisant par une épuration menée

jusqu'à un stade quasiment terminal. Leur mise en forme peut résulter de techniques complexes (par replis successifs), qui permet l'orientation de la matière et son homogénéisation, et implique donc de très bonnes caractéristiques mécaniques. L'utilisation de ces barres a pu être de nature variée, mais aurait été surtout destinée à la production d'objets de qualité. L'étude des ateliers délivrant ces demi-produits en cours de transformation révèle effectivement la transformation d'objets de qualité : lames et/ou outils, voire fabrication de tôles, éventuellement de fourreaux¹¹.

L'apparition de "demi-produit/ébauches" traduit l'émergence de "marchés" spécifiques, se développant dans le cadre d'une chaîne de production spécialisée, depuis la préparation du produit brut, jusqu'à la finition de l'objet. Il est possible de supposer une organisation des réseaux d'acquisition, et donc de transformation, du métal à plusieurs niveaux. Ces caractéristiques témoignent d'un degré de spécialisation important entre artisans forgerons, s'approvisionnant, selon leurs besoins, leurs moyens et leur savoir-faire, en demi-produits plus ou moins adaptés à leur production. Se dessine ainsi un "marché" du fer en forte structuration et diversification. Ces "standards" ne traduisent pas seulement des traditions techniques d'ateliers plus ou moins autonomes, mais résultent d'une normalisation fonctionnelle qui témoigne d'une interdépendance entre les acteurs de la chaîne de production : réduction – épuración – forgeage d'objets.

LE CONTEXTE DES ÉCHANGES

Définir l'offre et la demande dans le domaine des matières premières métalliques a fourni des données relatives à l'organisation économique des échanges. Il s'agit à présent, à partir de ces mêmes produits, de tenter d'appréhender certains aspects du contexte des échanges et notamment le rôle joué par les élites.

Données théoriques sur l'artisanat dépendant/indépendant

La question qui nous intéresse ici est de savoir si la production et la circulation des matières premières métalliques s'effectuait dans le contexte d'un artisanat "attaché/affilé" aux élites pour reprendre un terme anglo-saxon (*attached*), ou dans le cadre d'un artisanat indépendant. Costin a récemment synthétisé ces notions longuement discutées, en soulignant qu'au centre de la distinction entre artisan indépendant ou dépendant se situent les problématiques du contrôle des systèmes de production et de la nature des objets produits¹². Il s'agit finalement de déterminer qui maîtrise les moyens de production (depuis l'accès au matériel brut jusqu'au type d'objets produits), l'organisation du travail et la distribution des objets. Un certain degré de dépendance est reconnu lorsque l'un de ces paramètres n'est pas contrôlé par l'artisan. Brumfield et Earle ont ainsi défini l'artisanat dépendant comme dédié à la production de biens, le plus souvent qualifiés de prestige, à destination des élites, ces derniers contrôlant la distribution des produits¹³. Le contrôle des systèmes de production par les élites leur permet également d'en retirer pouvoir et statut. Le développement d'un artisanat indépendant serait au contraire à mettre en rapport avec des mécanismes purement économiques et passerait par la production de biens de subsistances, ou utilitaires, pour des consommateurs diversifiés¹⁴. Il s'agit d'une vision très schématique, ces deux types de cas de figure correspondant à deux extrêmes, qui peuvent par ailleurs cohabiter. Ainsi, dans le cadre d'un artisanat attaché aux élites, la totalité du système de production n'a pas besoin d'être directement asservi et les contrôles peuvent s'effectuer à différents niveaux de la hiérarchie et sous différentes formes¹⁵. La notion d'artisanat dépendant peut donc s'avérer très fluctuante, en fonction des critères examinés.

11- Berranger 2009.

12- Costin 2001, 298.

13- Brumfield & Earle 1987.

14- *Ibid.*

15- Costin 2001.

La proposition d'Arnold et Munns, reconnaissant comme spécialistes dépendants ceux qui produisent des objets dont la distribution finale est contrôlée par les élites et comme artisans indépendants ceux qui en contrôlent la distribution et n'entretiennent que peu ou pas de dépendance économique vis à vis des élites¹⁶, nous semble à ce titre particulièrement pertinente. Elle permet, en se centrant sur le critère du contrôle des débouchés, d'appréhender, par extension, les contraintes exercées sur la nature des objets produits et sur les moyens de production. Il est souvent difficile à partir des données archéologiques de savoir si les élites pouvaient contrôler la nature des objets produits. Il peut par contre être possible d'aborder la question des contrôles exercés sur les moyens de production et notamment sur l'accès aux matières premières, en tentant d'appréhender les modalités de distribution de ces dernières.

L'analyse des cartes de répartition

La carte de répartition est l'un des outils permettant une première approche de la distribution des produits. Pour les matières premières métalliques, seuls les bipyramidés et les demi-produits à extrémité roulée sont en nombre suffisamment important pour se prêter à ce type de travail.

La carte de répartition des produits bipyramidés, attribués principalement au Premier âge du Fer à partir de la documentation actuelle, met en évidence leur regroupement en une zone principale, au centre de l'Europe continentale (fig. 7). La plupart des variantes semble ainsi connaître une même aire de diffusion, à l'exception de la variante BLS5. Cette dernière se retrouve uniquement en Bretagne (et dans le sud de la Grande-Bretagne) et constitue la forme quasi-unique de bipyramidé attestée dans cette zone. Même si la qualité de la documentation ne permet pas d'envisager une étude typo-chronologique fine de ces produits, la contemporanéité de plusieurs variantes est reconnue (BLD1, BCS1, BCS2, BCS3¹⁷). Il est possible que les différences de morphologie caractérisant ces produits de qualité identique, traduisent des traditions d'ateliers distincts. La distribution des demi-produits sur une même zone géographique de plusieurs centaines de kilomètres carrés, témoignerait alors de leur circulation concurrente dans l'intégralité de la zone hallstattienne.

Précisons que cette carte de répartition matérialise, pour l'essentiel, l'aire où ont été déposées des séries de bipyramidés, en milieux terrestres isolés de toute occupation humaine¹⁸. En effet, un grand nombre de bipyramidés ont été conservés car ils n'ont pas été intégrés aux réseaux d'échanges économiques habituels, et n'ont donc pas été transformés en forge. On remarque que l'abandon de ces masses considérables de fer s'est principalement effectué dans la zone où s'expriment de la manière la plus fastueuse les manifestations de pouvoir au Hallstatt D2/D3-La Tène A (zone de répartition des résidences et *tumuli* dits "princiers" – fig. 8). Durant cette période, où les objets ferreux ne constituent qu'une faible proportion du mobilier funéraire et non funéraire, l'abandon du fer en quantités considérables se serait alors effectué principalement sous forme de stocks de matières premières, avant qu'ils ne soient transformés en forge. Développées dans des sociétés de type chefferie complexe¹⁹, les manipulations touchant ces réserves de valeur ont alors pu être effectuées dans le cadre de cérémonies particulières, destinées à réaffirmer le pouvoir des élites par le sacrifice de richesses. Malgré l'absence de données relatives aux lieux de transformation des produits bipyramidés, les pratiques développées autour de ces objets traduisent un phénomène de concentration de richesses aux mains des élites, ce qui révèle très probablement l'existence de contraintes exercées lors de la diffusion des bipyramidés hors des ateliers d'épuration. Pour cette période le contrôle des élites a ainsi pu s'exercer aussi bien en amont qu'en aval de la production d'objets finis.

16- Arnold & Munns 1994.

17- Berranger 2009.

18- Pour la France c'est le cas, sur les 51 contextes cartographiés, de 27 sites auxquels il faut ajouter 18 contextes incluant la découverte d'un bipyramidé isolé.

19- Récemment : Brun & Ruby 2008.

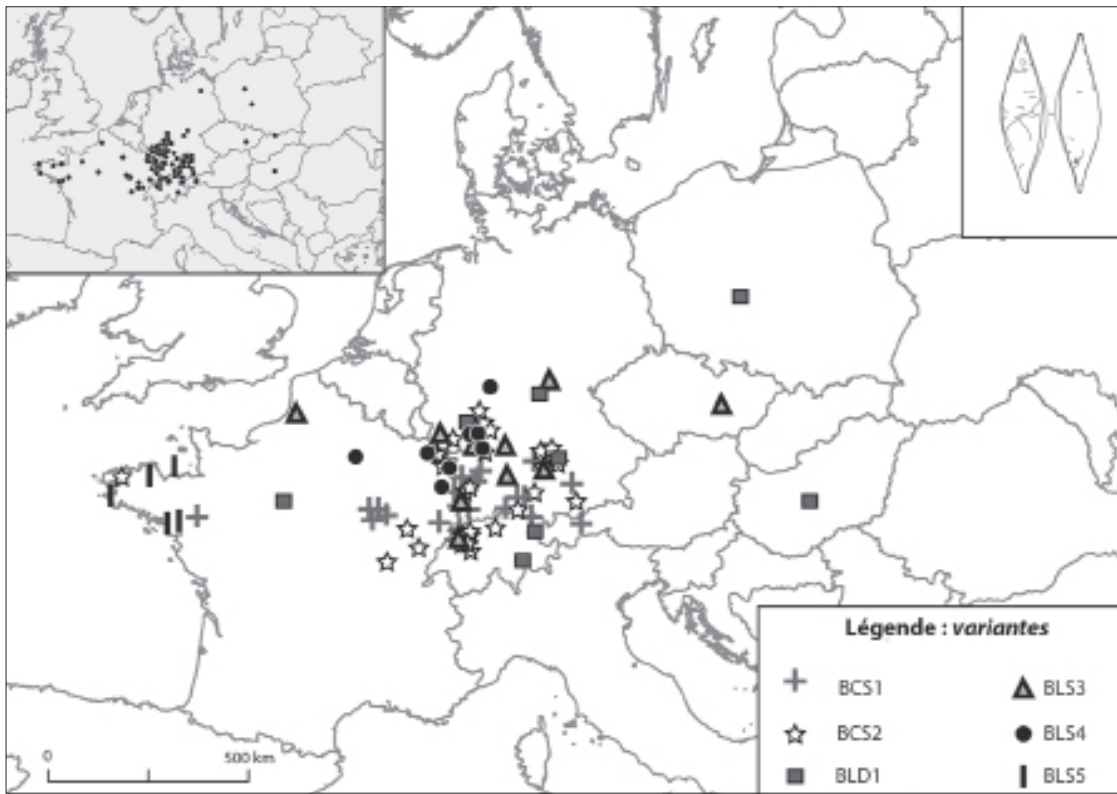


Fig. 7. Répartition des principales variantes des bipyramidés reconnues à partir du corpus français (en fenêtre grisée, distribution de la totalité des bipyramidés, à l'échelle européenne).

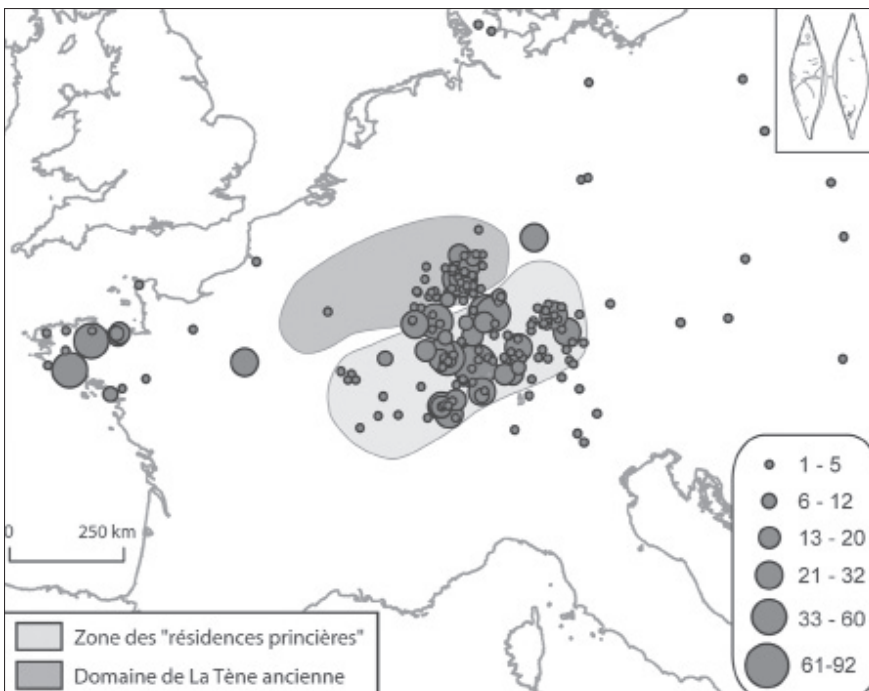


Fig. 8. Superposition de la distribution des bipyramidés sur les zones culturelles reconnues pour le Premier âge du Fer (fond de carte d'après Fichtl 2005).

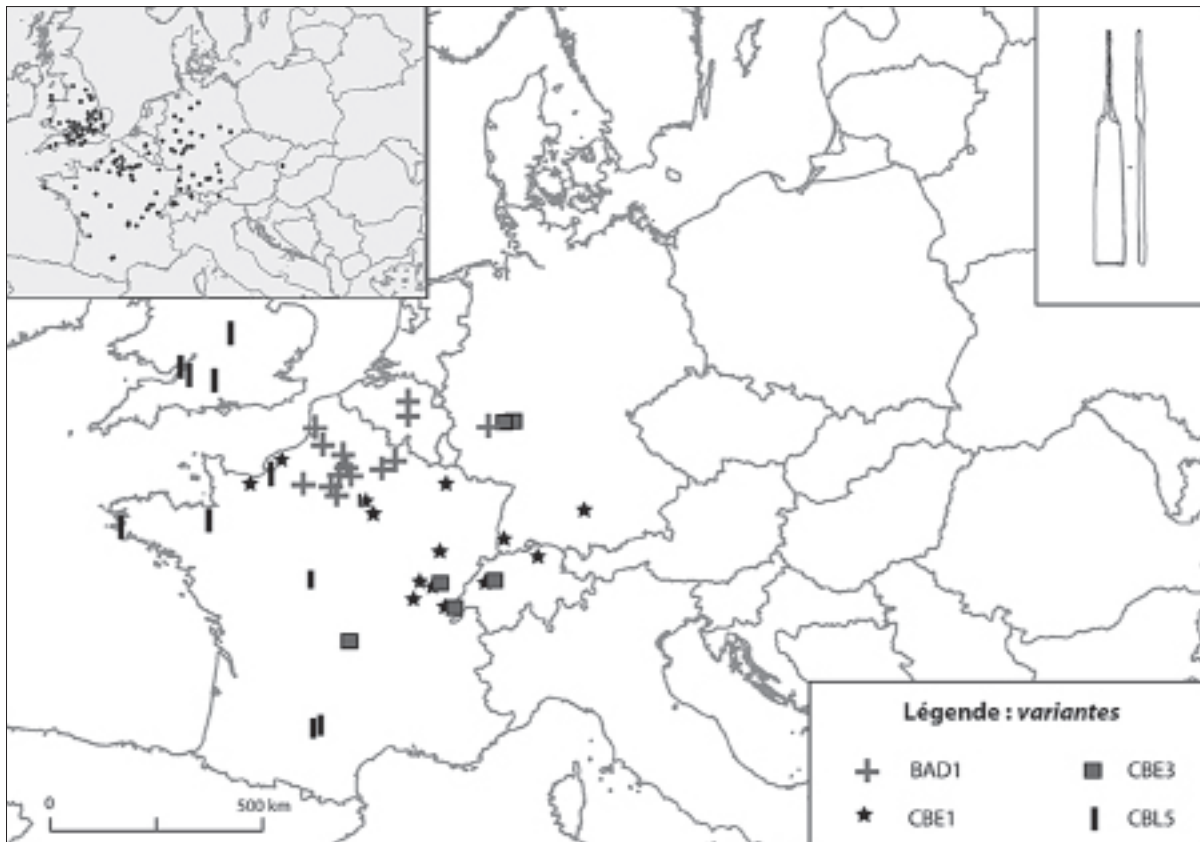


Fig. 9. Répartition des principales variantes des demi-produits à extrémité roulée reconnues à partir du corpus français (en fenêtre grisée, distribution de la totalité des demi-produits à extrémité roulée, à l'échelle européenne).

La carte de répartition des demi-produits à extrémité roulée met en évidence, pour une période couvrant La Tène B2-D2, des concentrations par variantes (fig. 9). Sur le territoire français, les variantes connaissent une répartition relativement groupée et exclusive (CBE1 : nord-est de la France, suisse et ouest de l'Allemagne, CBL5 : ouest de la France, CBE2 et BAD1 : nord de la France, Belgique).

Il est délicat de tenter de restituer des zones de production, à partir de la répartition géographique d'un produit, celle-ci correspondant plutôt à son aire de diffusion. Néanmoins, la distribution restreinte des variantes reflète vraisemblablement une production à une échelle régionale. Leur aire de répartition permet, de plus, d'exclure dans la très grande majorité des cas, une circulation sur de très longues distances. Comme pour les bipyramidés, les variantes individualisées pourraient résulter d'une production en fonction de traditions distinctes d'ateliers. Leur circulation ne semble par contre plus s'effectuer, comme avant, en fonction d'échanges concurrents au sein d'une même zone, mais au contraire s'organiser à l'intérieur d'espaces plus cloisonnés de macro-régions incluant plusieurs *civitates*. C'est du moins ce que suggère la superposition des variantes des demi-produits à extrémité roulée sur la carte des peuples gaulois, d'après les limites de diocèses médiévaux (fig. 10). Il pourrait s'agir d'indices témoignant d'un contrôle particulier des conditions de production et de circulation de ces matières premières intermédiaires, comme par exemple des accords spécifiques entre *civitates*, dont les mécanismes restent encore à caractériser.

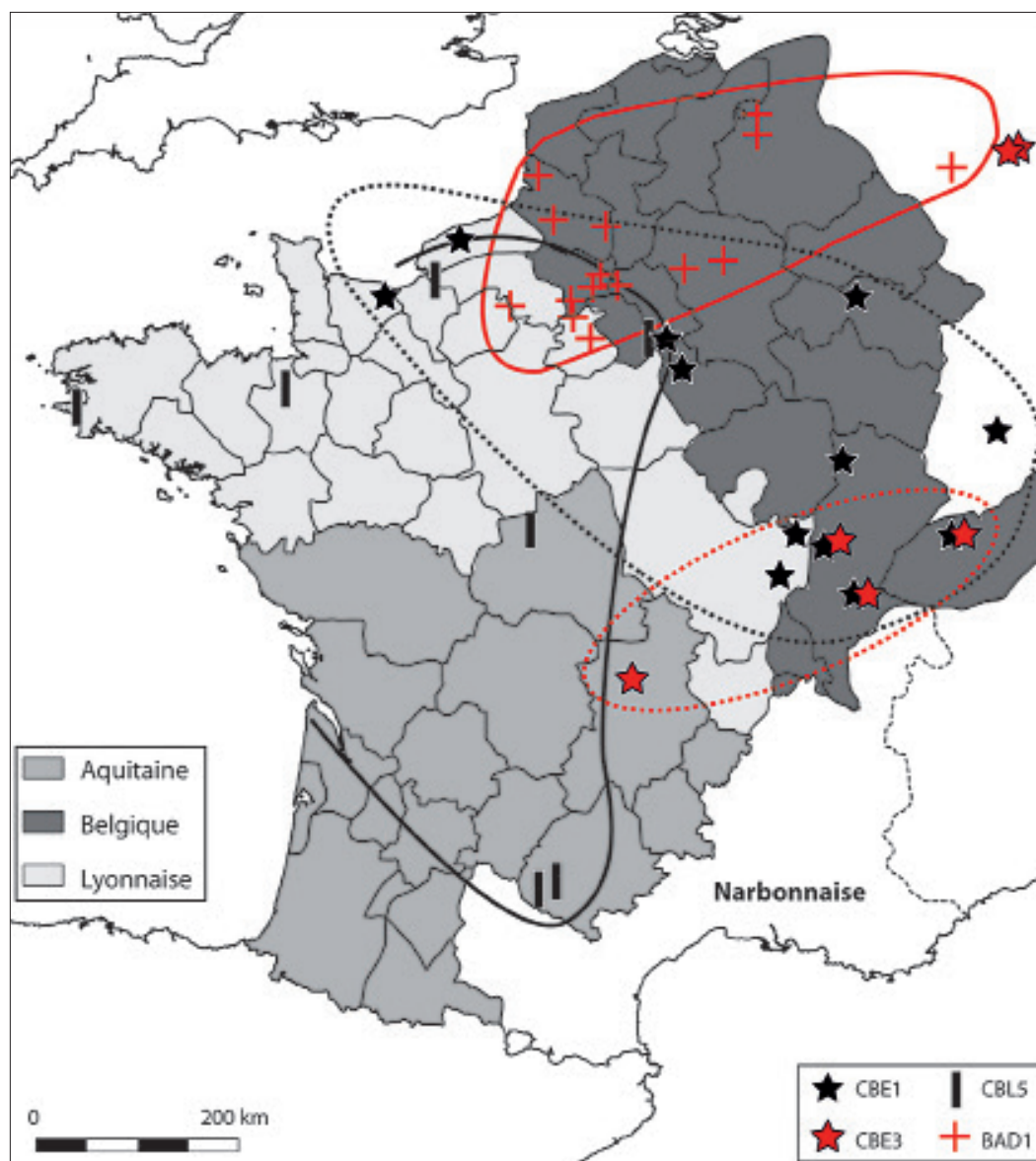


Fig. 10. Superposition de la distribution des principales variantes de demi-produits à extrémité roulée sur la carte des peuples gaulois du début du 1^{er} s. p.C. reconnus à partir des diocèses médiévaux (d'après Longnon repris dans Fichtl 2004).

L'analyse des lieux de fabrication de demi-produits

L'évolution constatée, au cours des deux âges du Fer, dans les lieux d'implantation des ateliers d'épuration peut également fournir des informations complémentaires concernant les conditions de circulation des biens (fig. 11).

Bien qu'il faille garder une certaine prudence quant à ces conclusions, en raison du faible nombre de sites documentés, l'étude des ateliers de traitement des masses brutes de réduction permet d'observer le développement d'une activité d'épuration, pour les IV^e-V^e s. a.C. et au moins jusque dans le courant du II^e s. a.C., sur le lieu même de la réduction. La nature des sites pratiquant l'activité d'épuration apparaît très variable : atelier isolé/associé à une activité domestique, production unique/volumes importants. Cette variabilité pourrait résulter de la vocation généraliste de ces ateliers durant cette période. Ils auraient été destinés à répondre à des motivations très diverses : afin d'alimenter un marché extérieur aussi bien que pour répondre aux besoins limités d'une communauté²⁰.

Le courant du II^e s. a.C. semble être une phase de réorganisation et de diversification des productions. On assiste à un déplacement de l'activité d'épuration vers des sites pratiquant également l'élaboration d'objets finis. On note que l'épuration n'est majoritairement plus présente sur les lieux dédiés à la réduction du métal. Contrairement à la période précédente, ces sites partagent un certain nombre de constantes. Il s'agit de façon récurrente d'agglomérations, qu'il est possible d'identifier comme des centres économiques et politiques d'importance régionale. En l'état actuel des connaissances, les forges présentes dans ces agglomérations semblent se démarquer de celles des autres habitats, par les liens privilégiés qu'ils entretiennent avec les ateliers de réduction. En effet, l'étude des établissements ruraux contemporains révèle que ces derniers sont exclusivement approvisionnés en un métal plus ou moins bien épuré²¹. Les agglomérations étudiées semblent ainsi jouer un rôle d'intermédiaires obligés entre les ateliers de réduction et de forgeage, ce qui pourrait témoigner d'un contrôle dans l'acquisition des matières premières métalliques.

Le rôle centralisateur des agglomérations et plus particulièrement des *oppida*, dans l'exploitation des ressources en fer, est envisagé depuis les années 1980²². Le postulat reposait néanmoins jusqu'à présent sur l'existence d'un contrôle en amont de la chaîne opératoire, lors de l'exploitation et de la transformation du minerai. Il faut reconnaître que ces hypothèses ne s'appuyaient sur aucun véritable indice archéologique. J. Collis propose ainsi une centralisation de la production sidérurgique par la pratique de la réduction au sein des *oppida*²³, ce que l'étude des déchets permet de réfuter, étant donné que ces derniers sont uniquement rattachés à la post-réduction.

Les résultats des travaux développés ici indiquent un contrôle qui s'exercerait plus vers l'aval de la chaîne de production, par le rassemblement du métal brut avant sa transformation en un produit destiné à être diffusé. Ce rôle centralisateur doit-il être interprété comme résultant de la domination naturelle des agglomérations qui concentrent les activités économiques majeures²⁴ ? Ou est-ce le reflet d'une emprise directe exercée par les élites, l'aristocratie équestre abondamment documentée par les sources littéraires²⁵, sur la production et les échanges de matière première, en tant que source d'enrichissement et de pouvoir ? Cette caractéristique désignerait alors un artisanat de la réduction qui n'est pas maître de la distribution de ses productions, ce qui définit une pratique dépendante²⁶. Pour cette période, l'organisation des modes de productions sidérurgiques et la

20- Cas documentés par l'ethnographie en Afrique notamment, Fluzin *et al.* 1996.

21- Bauvais 2007 ; Bauvais & Fluzin 2007 ; Orenco 2003 ; Zaour & Lepaumier à paraître.

22- Alexander 1981 ; Collis 1984 ; Metzler *et al.* 1991.

23- Collis 1984.

24- "Ville-marché" : Braudel 1986 ; en sidérurgie pour l'époque gallo-romaine voir aussi Mangin *et al.* 2000, 345-358.

25- Guichard & Perrin 2002.

26- Arnold & Munns 1994.

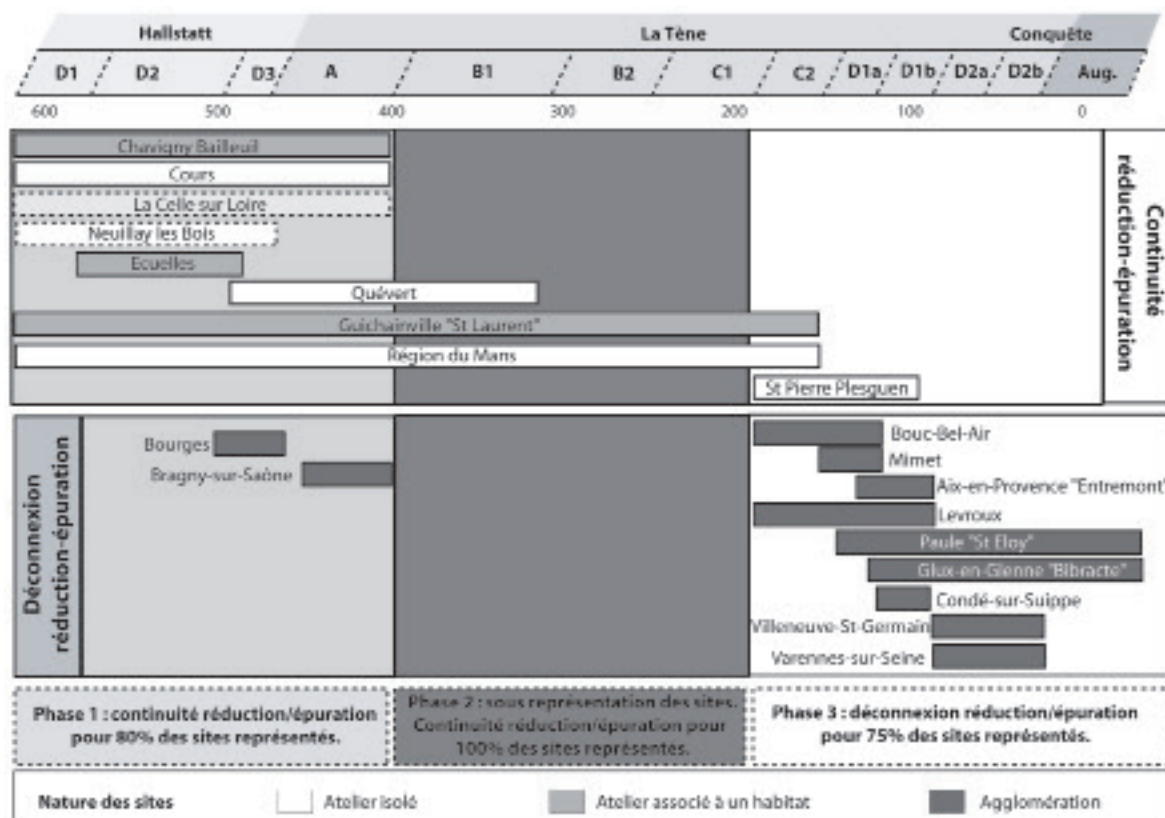


Fig. 11. Chronologie et nature des ateliers d'épuration.

circulation du métal témoignent d'une économie envisagée, à l'échelle restreinte de macro-régions. Cette configuration aurait pu rendre possible l'exercice de pressions fortes de la part des élites aristocratiques, notamment par le contrôle des moyens de production, et des modes de distribution/acquisition des matières premières.

CONCLUSION

L'approche interdisciplinaire que nous développons, basée sur l'analyse macroscopique et structurale de la matière, démontre la précision des réponses qui peuvent être apportées dans la caractérisation de la qualité des matériaux et la restitution des chaînes opératoires. Elle permet d'analyser de façon fine l'organisation des productions, la circulation et la consommation du métal. Pour la période des âges du Fer, il est ainsi possible de reconnaître la diffusion de fers de qualités différentes, dont la production semble se conformer à des standards. La circulation des matières premières semble ainsi connaître une organisation précise, indiquant une concertation entre artisans producteurs et consommateurs, et désignant parfois des marchés spécialisés. Ces résultats révèlent l'existence d'un système d'échange sophistiqué, dont l'évolution au cours des deux âges du Fer accompagne une spécialisation et une diversification croissante de l'artisanat de la forge.

Les résultats novateurs fournis par les études structurales permettent à présent d'envisager l'application d'autres investigations archéométriques, basées sur la caractérisation microanalytique des inclusions, afin de cerner les lieux de provenance du métal. Pour les âges du Fer, les barres à douilles BAD 1 ont été les premiers demi-produits à bénéficier de cette méthode, à travers l'étude de la composition chimique des éléments majeurs. Ces analyses ont révélé une origine diversifiée du métal²⁷ et la mise en forme de certaines de ces barres à partir de plusieurs masses métalliques. Cette dernière caractéristique indiquerait leur fabrication au sein d'ateliers d'épuration rassemblant la production de plusieurs ateliers de réduction, et traduit donc une forte segmentation de la chaîne opératoire²⁸.

Un des prochains enjeux vise à systématiser cette approche à d'autres catégories de matières premières métalliques. Les travaux actuels s'orientent ainsi vers l'étude des produits bipyramidés, en complément à leur datation par radiocarbone, dans le cadre d'un programme franco-allemand CIPIA²⁹ débuté en 2011, portant sur la circulation des produits ferreux dans l'est de la France et le sud de l'Allemagne, durant le Premier âge du Fer / La Tène A. Le dynamisme des travaux interdisciplinaires engagés actuellement permet ainsi d'envisager un profond renouvellement de la documentation pour la période protohistorique dans les années à venir.

Bibliographie

-
- Alexander, J. A. (1981) : "The coming of iron-using in Britain", in : Haefner, dir. 1981, 57-67.
- Arnold, J. E. et A. Munns (1994) : "Independent or attached specialization: the organization of Shell Bead Production in California", *Journal of Field Archaeology*, 21, 4, 473-489.
- Bauvais, S. (2007) : *Évolution de l'organisation des activités de post-réduction dans le nord du bassin-parisien au Second âge du Fer : études multidisciplinaires de la chaîne opératoire en métallurgie du fer*, Thèse de doctorat, Université de technologie de Belfort-Montbéliard.
- Bauvais, S. et P. Fluzin (2007) : "Premières réflexions sur l'organisation des activités de forge en contexte rural à La Tène finale en Picardie", in : Milcent, dir. 2007, 239-261.
- Berranger, M. et P. Fluzin (2011) : "Du métal brut au demi-produit : propriétés et modes de circulation des matières premières ferreuses", in : Reddé *et al.*, dir. 2011, 877-886.
- (2012) : "From iron to semi-product: quality and circulation of materials during the Iron Age in France", *Archaeometry* 54, 4, 664-684.
- Berranger, M. (2009) : *Le fer, entre matière première et moyen d'échange, en France du VIII^e au I^{er} s. av. J.-C. Approches interdisciplinaires*. Thèse de doctorat, Université Panthéon-Sorbone Paris 1.
- Berranger, M., S. Bauvais et P. Fluzin (2007) : "'Socket bars' : multi-disciplinary results (archaeology and archaeometry) on a specific iron semi-product in the northern Parisian basin (France)", in : *Archaeometallurgy in Europe 2007, international conference in Grado-Aquilea (Italy)*, 2007, publication sur CD.
- Braudel, F. (1986) : *L'identité de la France, espace et histoire*, Arthaud, Paris.
- Brumfield, E. M. et T. K. Earle (1987) : "Specialization, exchange and complex societies : an introduction", in : Brumfield & Earle, dir. 1987, 1-9.
- Brumfield, E. M. et T. K. Earle, dir. (1987) : *Specialization, exchange and complex societies*, Cambridge.
- Brun, P. et P. Ruby (2008) : *L'âge du Fer en France, premières villes, premiers états celtiques*, Inrap, Archéologies de la France, Paris.

27- Bauvais 2007 ; Berranger *et al.* 2007.

28- Berranger 2009G

29- Projet "Circulation of iron products in the Iron Age of eastern France and southern Germany : multidisciplinary and methodological approaches towards the provenance of ancient iron", (CIPIA) financé par l'Agence National de la Recherche et la Deutsche Forschungsgemeinschaft. Coordonné par P. Dillmann (LMC-IRAMAT-CNRS-UMR5060/SIS2M-LAPA-CEA-CNRS- UMR3299) et R. Schwab (Curt-Engelhorn Zentrum Archäometrie).

- Bocoum, H., dir. (2002) : *Aux origines de la métallurgie du fer en Afrique. Une ancienneté méconnue. Afrique de l'Ouest et Afrique centrale*, UNESCO.
- Collis, J. (1984) : *Oppida. Earliest towns north of the Alps*, Sheffield.
- Costin, C. L. (2001) : "Craft production systems (chap. 8)", in : Feinman & Price, dir. 2001, 273-314.
- Crew, P. (1994) : "Currency Bars in Great Britain, typology and function", in : Mangin, dir. 1994, 175-176.
- Dessaulty, A.-M. (2008) : *Apport des analyses chimiques multitechnique à la compréhension du comportement des éléments traces dans les filières sidérurgiques anciennes. Application aux études de provenance et à la distinction des procédés. Le cas du Pays de Bray normand*, Thèse de doctorat de physiques pour l'ingénieur, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard.
- Diesser, A. (en cours) : *Espaces de production du fer en Lorraine et diffusion des produits sidérurgiques lorrains : apports des analyses par dosage d'éléments traces et statistiques*, Thèse de doctorat, Université de technologie de Belfort-Montbéliard.
- Dillmann, P. et M. L'Héritier (2007) : "Slag inclusion analyses for studying ferrous alloys employed in French medieval buildings: supply of materials and diffusion of smelting processes", *Journal of archaeological Science*, 1810-1823.
- Feinman, G. M. et T. D. Price, dir. (2001) : *Archaeology at the millenium : a sourcebook*, New York.
- Fichtl, S. (2004) : *Les peuples gaulois. III^e-I^{er} av. J.-C.*, Paris.
- (2005) : *La ville celtique (les oppida de 150 av. J.-C. à 15 ap. J.-C.)*, Paris.
- Fluzin, P. (2002) : "La chaîne opératoire en sidérurgie : matériaux archéologiques et procédés. Apports des études métallographiques", in : Bocoum, dir. 2002, 59-91.
- Fluzin, P., P. Benoit, H.-T. Kienon, J.-B. Kiethega et O. El Kedim (1996) : "Apports de l'archéométrie à la restitution de la chaîne opératoire des procédés sidérurgiques directs à partir des vestiges sidérurgiques, intérêts des comparaisons ethnoarchéologiques", in : Magnusson, dir. 1996, 56-64.
- Giumlia-Mair, A.-L. et F. Schiavo, dir. (2003) : *Le problème de l'étain à l'origine de la métallurgie, Actes du XIV^e congrès UISPP, Liège 2001*, BAR Int. Series, Oxford.
- Guichard, V. et F. Perrin (2002) : "L'aristocratie celte à la fin de l'âge du Fer (II^e s. av. J.-C., I^{er} s. ap. J.-C.)", in : *Actes de la table ronde des 10 et 11 juin 1999, Glux-en-Glenne*, Bibracte, 5, 29-66.
- Haefner, H., dir. (1981) : *Frühes Eisen in Europa*, Schaffhausen.
- Leroy, S. (2010) : *Circulation au Moyen âge des matériaux ferreux issus des Pyrénées ariégeoises et de la Lombardie. Apport du couplage des analyses en éléments traces et multivariées*, Thèse de doctorat, Université de technologie de Belfort-Montbéliard.
- Magnusson, G., dir. (1996) : *The importance of ironmaking. Technical innovation and Social Change, Norberg conference May 8-13 1995*, jernkontorets Bergshistoriska Utskott.
- Mangin, M., dir. (1994) : *La sidérurgie ancienne de l'Est de la France dans son contexte européen, Archéologie et archéométrie, Actes du colloque de Besançon, 10-13 novembre 1993*, Annales littéraires de l'Université de Besançon, Paris.
- (2004) : *Le fer*, Collection Archéologique, Paris.
- Mangin, M., P. Fluzin, J.-L. Courtadon et M.-J. Fontaine (2000) : *Forgerons et paysans des campagnes d'Alésia (Haut Auxois, Côte d'Or) I^{er} siècle av.-VIII^e siècle ap. J.-C.*, CRA 22, Paris.
- Metzler, J., R. Waringo, R. Bis et N. Metzler-Zens (1991) : *Clemency et les tombes aristocratiques en Gaule Belgique*, ministère des affaires culturelles, Dossiers d'archéologie du musée national d'histoire et d'art I.
- Milcent, P.-Y., dir. (2007) : *L'économie du fer protohistorique : de la production à la consommation du métal, Actes du XXVIII^e colloque de l'AFAEF, Toulouse 20-23 mai 2004*, Aquitania Suppl. 14, 2, Bordeaux.
- Oréngo, L. (2003) : *Forges et forgerons dans les habitats laténiens de la Grande Limagne d'Auvergne, fabrication et consommation de produits manufacturés en fer en Gaule à l'Âge du fer*, Monographies instrumentum 26, Montagnac.
- Pagès, G., L. Long, P. Fluzin et P. Dillmann (2008) : "Réseaux de production et standards de commercialisation du fer antique en Méditerranée : les demi-produits des épaves romaines des Saintes-Maries-de-la-Mer (Bouches-du-Rhône)", *RAN*, 41, 261-283.
- Pagès, G. (2010) : *Artisanat et économie du fer en France méditerranéenne de l'Antiquité au début du Moyen Âge : une approche interdisciplinaire*, Monographies Instrumentum 37, Montagnac.
- Reddé, M., P. Barral, F. Favory, J.-P. Guillaumet, M. Joly, J.-Y. Marc, P. Nouvel, L. Nuninger et C. Petit, dir. (2011) : *Aspects de la Romanisation dans l'Est de la Gaule*, 2, Bibracte.
- Rychner, V. et N. Kläntschi (1995) : *Arsenic, Nickel et Antimoine : une approche de la métallurgie du Bronze Moyen et Final en Suisse par l'analyse spectrométrique*, Cahiers d'archéologie Romande, 2 tomes.
- Schwab, R., D. Heger, B. Höppner et E. Pernicka (2006) : "The provenance of iron artifacts from Manching : a multi-technique approach", *Archaeometry*, 48, 3, 433-452.
- Véber, C., B. Mille et D. Bourgarit (2003) : "Analyse élémentaire des dépôts lorrains : essai de caractérisation d'une production métallique de la fin de l'Âge du Bronze", in : Giumlia-Mair & Schiavo, dir. 2003, 67-76.
- Vega E., P. Dillmann et P. Fluzin (2002) : "Contribution à l'étude de fers phosphoreux en sidérurgie ancienne", *Revue d'Archéométrie*, 26, 197-208.
- Zaour, N. et H. Lepaumier (à paraître) : *Les activités métallurgiques dans les habitats enclos du Second âge du fer en Basse-Normandie, Actes du 4^e symposium européen de métallurgie, 4-8 juillet 2007*, Paimpont.