



**HAL**  
open science

## Espaces de production et circuits d'échanges en métallurgie du fer dans l'espace nord-alpin durant le Premier âge du Fer

Marion Berranger, Sylvain Bauvais, Alexandre Dissier, Enrique Vega, Philippe  
Dillmann

### ► To cite this version:

Marion Berranger, Sylvain Bauvais, Alexandre Dissier, Enrique Vega, Philippe Dillmann. Espaces de production et circuits d'échanges en métallurgie du fer dans l'espace nord-alpin durant le Premier âge du Fer. Luis Valdès; Veronica Cicolani; Eneko Hiriart. L'Europe des matières premières au Ier millénaire av. n.è. Exploitation, transformation, diffusion., 5, AFEAF, pp.135-154, 2023, Collection AFEAF, 9782956740742. hal-04385203

**HAL Id: hal-04385203**

**<https://hal.science/hal-04385203v1>**

Submitted on 13 Jan 2025

**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.

Copyright

# Espaces de production et circuits d'échanges en métallurgie du fer dans l'espace nord-alpin durant le Premier âge du Fer

Marion Berranger, Sylvain Bauvais, Alexandre Disser, Enrique Vega, Philippe Dillmann

D'abord centrées sur la restitution des chaînes opératoires, les études archéométriques connaissent de nouveaux développements méthodologiques et thématiques à partir de la fin des années 2000 avec le développement croissant de méthodes d'analyses visant à étudier la provenance des objets en fer (Coustures *et al.* 2006 ; Leroy *et al.* 2014 ; Dillmann *et al.* 2015). Rapidement, ces nouvelles méthodologies ont été appliquées en Europe occidentale à des corpus d'objets datés des premiers temps de la sidérurgie, afin de restituer les réseaux d'échanges.

Les demi-produits de fer, forme sous laquelle le métal est échangé après une étape d'épuration plus ou moins poussée, sont au cœur de ces questionnements. En effet, le métal qui les constitue circule depuis les ateliers de réduction du minerai de fer vers les ateliers de forgeage où ils sont transformés en objets. Leur parcours entre ces différents ateliers peut être marqué par différentes étapes de transformation de la matière ferreuse, et donc de leurs propriétés et de leur morphologie. En raison de leur potentiel informatif, ces artefacts sont étudiés depuis de longues années, afin d'identifier les formes du métal en circulation, tout comme leurs aires de répartition. Ils sont également analysés à l'échelle de la matière afin de préciser les techniques de leur fabrication, ce qui renseigne indirectement sur l'organisation des chaînes opératoires.

L'étude des filiations chimiques à partir des demi-produits de fer est au centre des thématiques de recherches développées au sein de l'IRAMAT (LMC et LAPA)<sup>1</sup>. Elles se basent sur l'analyse chimique des inclusions de scories présentes dans la matrice métallique. Les résultats de ces approches ont fait l'objet de plusieurs publications récentes, allant du site à l'échelle régionale, et concernant différents types de demi-produits datés des âges

du Fer (Dillmann *et al.* 2017 ; Berranger *et al.* 2017a ; Bauvais *et al.* 2018 ; Berranger *et al.* 2021 ; Bauvais *et al.* 2021).

L'objet du présent article est de synthétiser l'ensemble des données chimiques acquises sur ces objets, en centrant nos questionnements à l'échelle de l'espace nord-alpin ou aire du Hallstatt occidental, qui constitue le cœur d'une concentration des deux types de demi-produits en circulation durant les âges du Fer. Seuls des produits ferreux datés sur une période couvrant le Hallstatt D3 - La Tène A ont été retenus.

Il s'agit, par la prise en compte d'un large corpus d'artefacts, d'apporter des éléments de réflexions à plusieurs questions centrales lorsque l'on considère les échanges de produits ferreux durant le Premier âge du Fer : à quelle distance circulent les matières premières métalliques ? La production de fer brute est-elle concentrée ou dispersée ? Qui contrôle les productions et les échanges ?

Afin d'aborder ces questions, des études de filiation chimiques ont été engagées sur un corpus d'une soixantaine de demi-produits de fer (bipyramidés et fers plats à extrémité roulés également appelés *currency-bars*), ainsi que sur des fragments de métal brut et chutes de métal provenant d'ateliers datés du Ha D3-LTA. Leur composition chimique a été comparée avec celles d'espaces de réduction dont les productions sont attestées durant les âges du Fer, et situés dans l'aire du Hallstatt nord-occidental.

**Les apports récents des caractérisations multi-méthodes sur les demi-produits de fer et les espaces de production : la possibilité de nouveaux questionnements.**

## Répartition et typologie des demi-produits

L'identification de deux grandes catégories de demi-produits de fer (fig. 1) attribuées aux âges du Fer intervient dès le début du XX<sup>e</sup> siècle et conduit à différentes propositions de classements

<sup>1</sup> Travaux principalement conduits le cadre d'un projet ANR/DFG portant sur la circulation du métal dans l'aire nord-alpine CIPIA (Dillmann *et al.* 2017, Bauvais *et al.* 2021), ainsi que dans le cadre d'un Programme Collectif de Recherche portant sur la sidérurgie ancienne dans le centre-est de la France (Berranger *et al.* 2021).

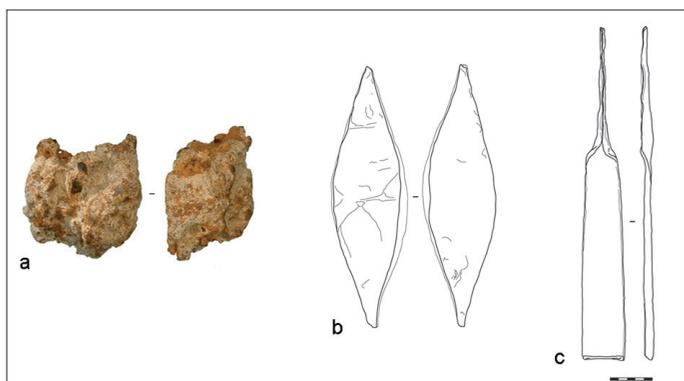


Fig. 1. Exemples de matières premières métalliques circulant durant les âges du Fer. a. Masse brute de réduction ; b. Demi-produit bipyramidé ; c. Fer plat à extrémité roulée / *currency-bar* (M. Berranger/CNRS).

typologiques. Ces travaux soulignent alors l'existence d'une certaine normalisation des formes sous lesquelles le métal circule durant les âges du Fer, en fonction de deux grands types inégalement répartis dans l'ouest de l'Europe. En Grande-Bretagne et sur la façade atlantique les fers plats à extrémité roulée, dits *currency-bars* prédominent (Crew 1994). En Europe centrale, ce sont les bipyramidés qui sont connus en plus grand nombre (Kurz 1995). Une zone tampon, correspondant à l'espace nord-alpin, livre les deux types.

La compilation des inventaires disponibles et la prise en compte de nombreuses découvertes récentes ont permis de proposer une typologie basée tant sur leurs caractéristiques morphologiques que structurales. Ces travaux ont également permis de présenter un bilan actualisé de la répartition de ces produits par types, et d'individualiser des variantes régionales (Berranger 2014, 88-93).

## Contextes de découvertes et chronologie

La plupart de ces demi-produits, qu'ils soient bipyramidés ou *currency-bars*, proviennent de dépôts isolés. Dans ce cas, ils nous sont parvenus le plus souvent complets, sans traces de transformations en forge, mais après avoir été soustraits aux cycles économiques ordinaires. Ils sont retrouvés alors dans des failles rocheuses, dans des dépôts en rivière, ou en milieu terrestre, sans occupations humaines contemporaines avérées (Berranger 2014). De plus, ces dépôts sont généralement constitués uniquement des mêmes types de demi-produits, sans autres objets associés.

L'isolement de ces artefacts a longtemps complexifié leur étude chronologique. Rares sont les bipyramidés retrouvés en contextes datés, ce qui a conduit à des attributions aux âges du Fer ou à l'époque romaine, basées sur des critères typomorphologiques discutables ou issues de rapprochements non avérés avec des sites romains proches (Kleeman 1981). À l'échelle de l'Europe un plus grand nombre de bipyramidés est retrouvé dans des contextes datés du Hallstatt D - La Tène A,

néanmoins certains exemplaires seraient présents également dans des contextes plus tardifs Laténiens (Kurz 1995). Pour encore complexifier ce panorama, certains bipyramidés sont également attestés en contextes antiques mais il s'agit d'objets plus petits et légers que les précédents, ou simplement de moitiés de bipyramidés (Berranger 2014, 117).

Les fers plats à extrémité roulée sont plus fréquemment associés à des mobiliers datés, notamment dans des dépôts en habitat ou en sanctuaires intervenant entre La Tène C2 et D2 (Berranger 2014, fig. 41). En revanche, ces contextes ne livrent que quelques types spécifiques : des barres à douilles BAD1, caractérisées par une taille et une masse réduites, et *currency-bars* CBL5 se démarquant par une extrémité roulée large (Berranger 2014, 120-122).

Le recours à de nouvelles applications de la méthode radiocarbone permettant de dater les produits aciérés, par prélèvement du carbone (et non du charbon) directement dans le métal (Leroy *et al.* 2015a et 2015b) a apporté une contribution déterminante pour préciser la chronologie absolue de ces objets. Le protocole nécessite la réalisation de plusieurs dates pour un même objet, afin d'affiner statistiquement les mesures.

Quinze demi-produits bipyramidés ont ainsi été datés par méthode radiocarbone (datation de charbon - Berranger 2014 ; datation du carbone contenu dans l'acier : Berranger *et al.* 2017a ; 2017b ; 2019 ; Dillmann *et al.* 2017 ; Bauvais *et al.* 2021). L'ensemble des résultats les situent sur le plateau du Hallstatt compris entre le VIII<sup>e</sup> et le V<sup>e</sup> siècle av. n.è. Quelques dates couvrent le IX<sup>e</sup> siècle av. n.è., mais il s'agit à chaque fois d'une seule des deux dates obtenues pour un même objet. Ce résultat pourrait ainsi s'expliquer soit par un effet « vieux bois », soit par une date de production se situant de part et d'autre d'un plateau de calibration situé autour de 800 CalBC.

Dix *currency-bars* provenant du Jura et de la Saône, et appartenant au type CBE1 très peu représenté dans les contextes de la fin de l'âge du Fer, ont été datés en fonction du même protocole (Berranger *et al.* 2019). Ils semblent se rattacher à une période un peu plus large et légèrement plus tardive, entre le VII<sup>e</sup> et le V<sup>e</sup> siècle av. n.è., jusqu'au II<sup>e</sup> siècle av. n.è.

Deux exemples illustrent la réutilisation possible de métal ou d'objets anciens. Cela pourrait être le cas du bipyramidé de Farébersviller (Far.1), retrouvé dans un silo attribué par le mobilier céramique à La Tène B2-C2, alors que le métal dont est constitué le demi-produit est daté des VIII<sup>e</sup> et le VI<sup>e</sup> siècle av. n.è. De même, le dépôt de Valempoulières, associe une barre (VAL. 01) datée des environs du VIII<sup>e</sup> siècle av. n.è. et une autre de morphologie identique (VAL.04) datée quant à elle du III<sup>e</sup> siècle av. n.è.

La compilation de l'ensemble des résultats acquis ces dernières années, tant à partir de l'étude des contextes de découvertes que des dates radiocarbone, permet à présent de poser les premiers jalons d'une étude typo-chronologique plus fine de ces demi-produits. La **figure 2** en synthétise les résultats.

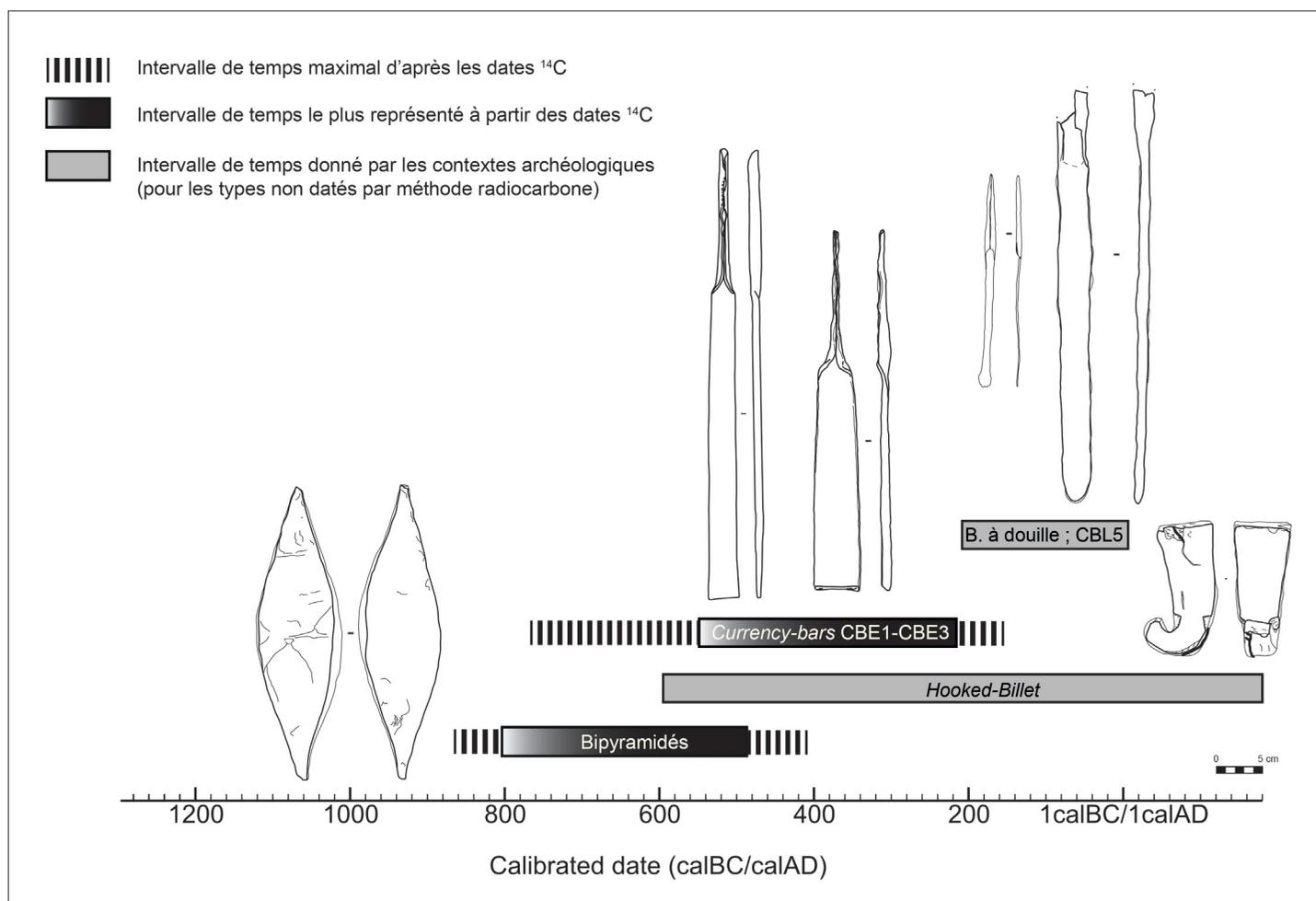


Fig. 2. Proposition de typo-chronologie des principaux demi-produits datés des âges du Fer (d'après Berranger *et al.* 2019).

### La circulation du métal à partir de l'étude des demi-produits

Les analyses métallographiques engagées sur des séries de ces objets ont également permis de préciser les techniques de fabrication dont ils résultent. Elles se basent sur des protocoles publiés à plusieurs reprises (Bauvais *et al.* 2018 ; Berranger 2014).

Que ce soit pour les bipyramidés, qui constituent des objets massifs, pesant plusieurs kilogrammes, ou les *currency-bars*, objets plus légers pesant moins de 1 kg, deux modes opératoires sont mis en évidence.

Certains objets sont constitués d'une seule masse de métal, déformée sur elle-même. Si cette technique peut s'avérer de mise en œuvre assez simple pour des fers plats dotés d'une extrémité roulée, elle devait être particulièrement complexe à réaliser dans le cas de bipyramidés massifs et épais. En effet, le chauffage à cœur de la masse de métal, indispensable pour rendre le métal malléable, devait être particulièrement complexe, tout comme le martelage à la main d'un tel volume de métal. Cette technique par déformation simple est documentée par exemple pour les bipyramidés de Aibre, Vaire-Arcier, Colmar ou encore pour les exemplaires Dur.3 et Dur.6 provenant du dépôt de Durrenentzen.

D'autres demi-produits présentent une soudure révélatrice de l'assemblage de masses de métal (fig. 3). Pour les bipyramidés, la soudure est généralement médiane, située entre deux masses de volume probablement proche. Pour les *currency-bars*, l'assemblage est parfois constaté au milieu du fer plat, comme pour les objets Arbois CB01 et SAL.24 provenant de la région de Salins-Les-Bains (Jura). D'autres *currency-bars* possèdent une soudure sur l'extrémité roulée, mais il pourrait également s'agir d'une portion d'une même feuille partiellement pliée sur elle-même.

Les analyses de provenance déjà réalisées ont démontré que dans certains cas les deux masses de métal constitutives d'un même objet, avaient des origines différentes. C'est le cas pour les bipyramidés Dur.48, Far.1, Marsal 3 (Dillmann *et al.* 2017 ; Bauvais *et al.* 2021) et pour le *currency-bar* Arbois CB01 (Berranger *et al.* 2021). Lorsque plusieurs objets issus d'un même dépôt ont été analysés, une multiplicité de provenances est également mise en évidence. C'est le cas du dépôt de Durrenentzen qui rassemble cinquante-et-un bipyramidés, dont quatre ont été analysés (les quatre bipyramidés sont constitués de six masses de métal, cf *supra*). L'analyse chimique des inclusions de scories piégées dans le métal a mis en évidence l'existence de cinq masses de métal aux provenances différenciées (Berranger *et al.* 2017a). Dans le

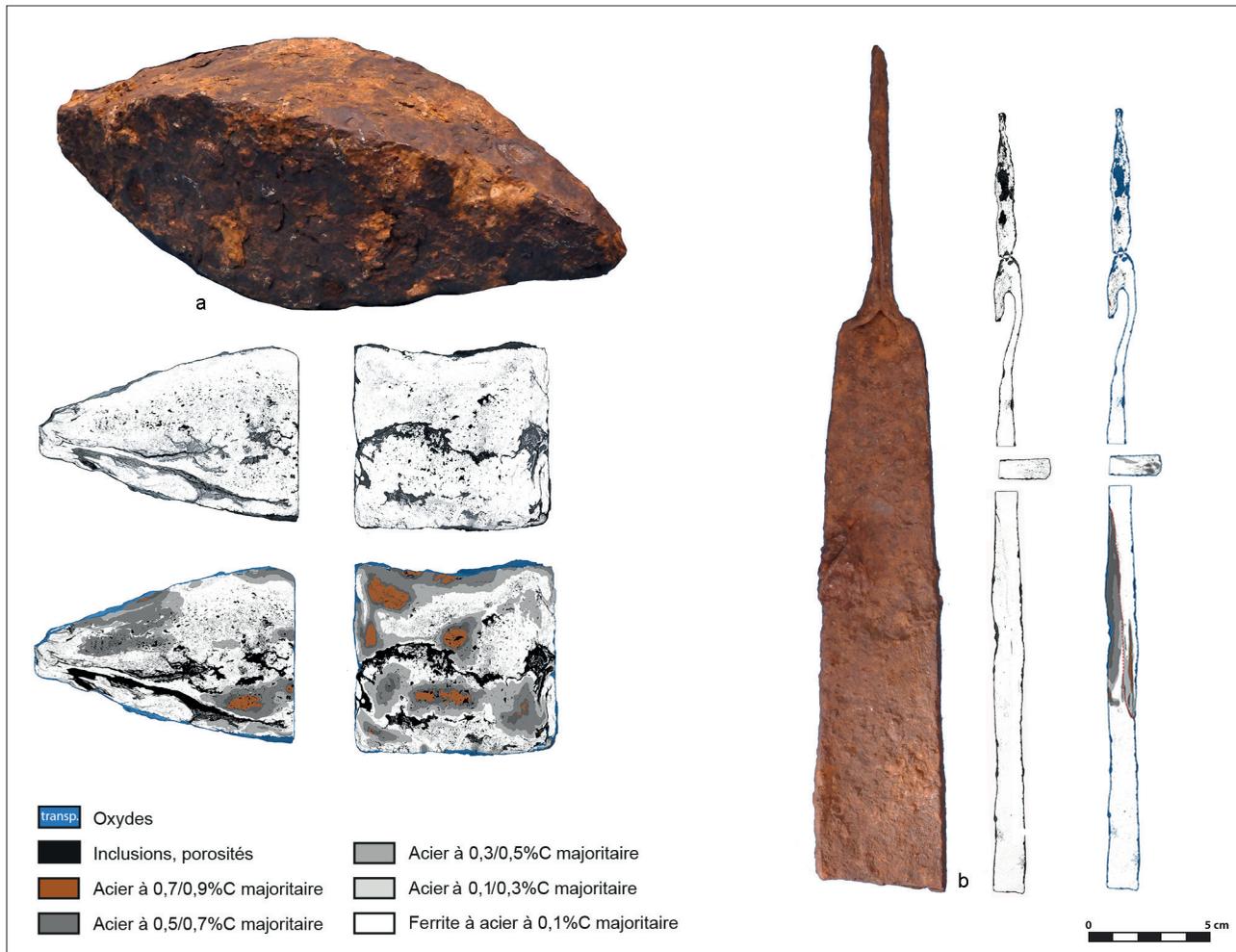


Fig. 3. Exemples de demi-produits obtenus par soudures de deux masses de métal. A. Chatillon-sur-Seine – Vix. Vix 2014 Bef.048 (Côte d’Or) ; b. Arbois CB01 (Jura) (M. Berranger/CNRS).

Jura, l’étude des dépôts de Saint Thiébaud et de Valempeulrières, qui livrent respectivement vingt-six et quatre *currency-bars*, a conduit aux mêmes observations (Berranger *et al.* 2021). À Saint-Thiébaud, huit objets rassemblant neuf masses de métal ont été étudiées, et permettent d’isoler au moins deux groupes de provenances distinctes. À Valempeulrières, les deux objets étudiés ont des provenances distinctes.

À ce stade, ces caractéristiques révèlent l’existence d’une fragmentation des chaînes opératoires sidérurgiques dans l’espace et le temps. En effet, l’homogénéité typologique des demi-produits d’un même dépôt permet de restituer leur mise en forme au sein d’un atelier ou d’un groupement d’ateliers se référant aux mêmes normes. La diversité d’approvisionnement en métal brut pour l’obtention des demi-produits permet quant à elle d’identifier des ateliers de forgeage situés à distance des ateliers de réduction (déconnexion géographique des activités). Ces ateliers sont de plus reliés à plusieurs sources d’approvisionnement comme en témoignent clairement les artefacts constitués de masses de métal d’origines différentes. Ces caractéristiques indiquent, d’une part, une spécialisation des artisans en fonction des différentes étapes de la chaîne opératoire (*a minima* entre artisans de la réduction et de la forge) et d’autre

part, un approvisionnement auprès de plusieurs sources de fer brut (ateliers de réduction). Cela indique l’existence de réseaux d’échanges complexes, impliquant probablement différents acteurs.

### La production de fer brut au Ha D-LTA.

La connaissance des lieux de production a également connu une accélération considérable ces dernières années, grâce aux nombreuses découvertes issues de l’archéologie préventive comme programmée. Cet enrichissement documentaire permet d’affiner les premières synthèses qui portaient principalement sur la restitution des techniques de production et leur organisation dans leur cadre chronologique (Cabboi *et al.* 2007), en permettant à présent d’intégrer la restitution des dynamiques à l’œuvre régionalement (Berranger *et al.* 2017b ; Berranger, Bauvais 2020 ; Bauvais *et al.* 2021).

Pour le Ha D-LTA plusieurs modes de production du fer brut semblent se superposer dans l’espace nord-alpin et sa périphérie. De petites productions ponctuelles sont ainsi connues de manière dispersée, par exemple dans l’Aisne à Tergnier ou Travecy (Bauvais 2007), dans la région de Nancy à Velaine et

Grondreville (Leroy, Cabboi 2019), à l'est du Rhin dans la région de Düsseldorf (Gassmann, Schäfer 2014), dans la vallée de la Lahn (Schäfer 2014) ou encore dans le Siegerland (Stöllner *et al.* 2020). Conjointement se développent de véritables centres productifs identifiés en fouilles par des concentrations de fours, ou en prospections-pédestres par des concentrations d'amas de déchets sidérurgiques situés à l'emplacement des ateliers. Ces ensembles productifs sont ainsi identifiés dans la région au nord du Mans (Zaour 2021), en Puisaye (inédit et Berranger, Bauvais 2020) ou dans l'Indre dans le secteur de Meunet-Planches (Dieudonnée-Glad 2017). Dans l'ouest de l'Allemagne, d'autres zones de production concentrées sont connues autour de Neuenbürg en Forêt Noire et dans le Jura Souabe (Gassmann, Schäfer 2014), ainsi qu'en Souabe Bavaroise, peut-être plus spécifiquement à partir de la période suivante du LTA-LTB (Gassmann, Schäfer 2014).

Certaines zones de production concentrées se situent parfois géographiquement dans l'aire d'influence de ces places centrales, comme pour les ateliers de Meunet-Planches situés non loin de l'habitat de Bourges, ou les secteurs de production de la Forêt noire et du Jura Souabe proches de l'habitat du Neuenbürg.

Aucune place centrale n'est clairement identifiée à proximité de la Puisaye et du Pays d'Othe mais des tombes à importations méditerranéennes connues dans leur environnement témoignent de la présence d'élites locales (Brun, Chaume 2013). Enfin, l'importante zone de production de la région Mancelle, est rattachée à une aire culturelle médio-atlantique moins bien documentée que celle du Hallstatt nord-occidental (Milcent 2006) et a pu être intégrée à des réseaux d'échanges distincts qu'il reste encore à définir pour les produits ferreux.

### L'émergence de nouvelles problématiques

Pour cette période des V<sup>e</sup>-IV<sup>e</sup> siècle av. n.è., la surimposition de plusieurs modes de production du fer brut : à la fois dispersée au sein d'ateliers ponctuels, et concentrée au sein de grands centres permet d'envisager l'existence d'un réseau dynamique d'échanges des produits ferreux à différentes échelles.

L'approche proposée ici, basée sur la restitution des réseaux d'échanges à partir d'analyses de filiations chimiques, a ainsi pour objectif de préciser la localisation des espaces de production dont proviennent certains demi-produits du Ha D-LTA. Il s'agit de tenter de déterminer s'il est possible de relier la signature chimique de certains objets avec des espaces de production connus, afin de mieux préciser l'importance de ces derniers et leur aire de diffusion. Est-il possible de mettre en évidence des circuits d'échanges spécifiques, ou bien les produits issus des petites productions dispersées suivent-elles les mêmes réseaux d'échanges que ceux des grands centres productifs ?

D'autre part, les caractéristiques propres aux demi-produits ouvrent d'autres questionnements touchant davantage aux liens entretenus entre économie et représentations symboliques. Ainsi, les contextes de découvertes des demi-produits ne sont pas sans rappeler les dépôts mono-spécifiques de haches à douille en bronze du Premier âge du Fer (Milcent 2017). Ces

artefacts semblent ainsi participer à un phénomène plus large d'enfouissement d'objets en métal, intervenant dans le courant du Hallstatt D. Ces produits standardisés, réserves de valeurs, semblent ainsi dotés d'un statut spécifique, éventuellement pré-monnaie (Berranger 2014 ; Berranger *et al.* 2019) durant cette période du Hallstatt D-LTA où la consommation du fer paraît limitée à une élite. On peut alors se demander si la production et la circulation de ce type de « bien de prestige » suit les mêmes circuits d'échanges en usage pour les produits ferreux ordinaires (Dillmann *et al.* 2017) ?

Pour tenter d'aborder ces questionnements, le corpus d'objets pris en compte intègre également quelques fragments de métal brut, chutes de forge et objets finis provenant d'habitats ou d'ateliers contemporains.

## Des études de filiations chimiques basées sur l'analyse des scories de réduction

### Méthodologie

Afin de restituer les réseaux de circulation du métal, l'approche retenue ici repose sur l'analyse chimique des scories résultants de la production du fer brut. Les travaux développés récemment ont permis de déterminer que durant la réduction, certains éléments chimiques présents dans le minerai se réduisent majoritairement et sont intégrés au métal (comme le cobalt ou le nickel), tandis que d'autres ne se réduisent pas et migrent intégralement dans la scorie (Schwab *et al.* 2006 ; Desaulty *et al.* 2009 ; Leroy *et al.* 2012), c'est notamment le cas des Terres Rares. La scorie de réduction est présente en quantité sur les ateliers où le minerai a été réduit pour être transformé en métal brut. Cette scorie reste également présente au sein de la matière métallique, piégée à l'échelle micrométrique durant la réduction. Les étapes ultérieures d'épuration et de forgeage à chaud ont pour objectif notamment d'évacuer la scorie de réduction présente en inclusion dans le métal, leur nombre diminue alors au fur et à mesure de l'avancement dans la chaîne de transformation du métal en objets. L'intérêt des demi-produits ferreux est de conserver encore un grand nombre de ces inclusions héritées de la réduction. D'autres inclusions, provenant d'ajouts notamment peuvent être introduits durant ces mêmes étapes d'épuration-forgeage (Disser *et al.* 2020).

Pour les scories provenant des ateliers de réduction, des prélèvements de quelques centimètres cubes sont broyés et les éléments majeurs et traces qui les constituent sont quantifiés par ICP-AES et ICP-MS (spectrométrie à Emission Atomique et spectrométrie de masse couplée à un plasma inductif) au CRPG<sup>2</sup> à Nancy. Cinquante-huit éléments sont ainsi dosés.

Pour les objets en métal, une analyse métallographique est réalisée dans un premier temps afin de déterminer les techniques de fabrication, et notamment s'ils résultent de l'assemblage de

2 SARM-CRPG, CNRS-Université de Lorraine.

plusieurs masses de métal ou de la mise en forme d'une seule. Dans un second temps les inclusions piégées au sein de la matrice métallique sont analysées. Les composés majeurs sont d'abord déterminés par spectrométrie en énergie dispersive (EDS) couplée à un microscope électronique à balayage (MEB). L'objectif est de distinguer parmi les quelques milliers d'inclusions détectées en cartographiant la surface du métal, celles qui sont issues de l'étape de réduction (et donc porteuses de l'information de provenance), de celles ajoutées durant les phases de post-réduction. L'ensemble des inclusions analysées est pris en compte et la cohérence de composition est vérifiée en combinant l'étude des rapports des composés non réduits (NRC) (Dillmann, L'Héritier 2007 ; Disser *et al.* 2020) à partir de représentations bivariées et de traitements statistiques multivariés de type Analyse en Composante Principale (ACP) (Charlton *et al.* 2012 ; Disser 2014). Les éléments retenus à ce stade sont  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$  et

$\text{K}_2\text{O}$ , dont les rapports restent constants pour les inclusions issues de la réduction. Les inclusions dont les ratios varient proviennent d'ajouts ou d'effets de concentration («effets pépites») et sont donc supprimées (Disser *et al.* 2020).

Dans un second temps l'analyse par LA-ICP-MS (Ablation Laser) porte uniquement sur les inclusions identifiées comme résultant de la réduction, et permet de mesurer les éléments chimiques présents à l'état de traces. Quatorze éléments traces ont été retenus pour cette étude : Ce, Eu, Gd, Hf, La, Nb, Nd, Pr, Sm, Tb, Th, U, Y, Yb. Afin de s'affranchir des effets d'enrichissement inhérents à l'étape de réduction (diminution de la part de fer dans la scorie par rapport à la proportion de fer dans le minerai), une normalisation des données est effectuée. La méthode de normalisation retenue est celle des *log-ratio* détaillée dans Leroy *et al.* 2012. Seuls les éléments toujours au-dessus de la

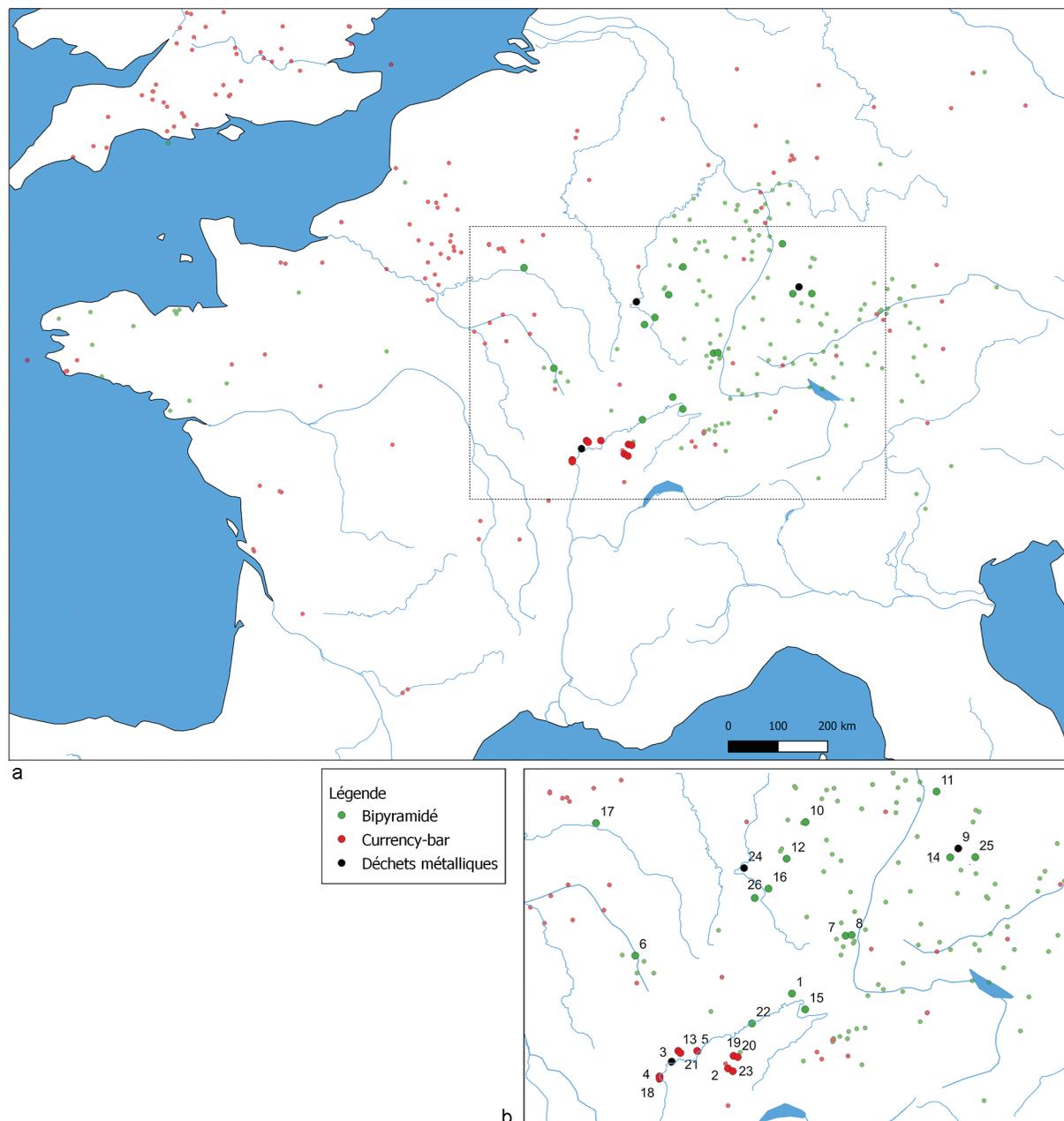


Fig. 4. a. Localisation des sites étudiés, sur la carte de répartition des demi-produits bipyramidés et des *currency-bars*. b. Localisation des noms des sites. Les numéros correspondent à l'inventaire dans la fig. 5 (M. Berranger/CNRS).

limite de détection ont été retenus au dénominateur pour cette normalisation, à savoir : Y, La Ce, Sm et Eu. À ce stade, entre trois et une quinzaine d'inclusions sont prises en compte par objet.

Le grand nombre d'observations et d'éléments dosés nécessite une approche statistique des données visant à comparer la composition chimique des objets entre eux (Charlton *et al.* 2012 ; Leroy *et al.* 2014 ; Disser *et al.* 2017 ; Dillmann *et al.* 2017). Une Analyse en Composante Principale (ACP) basée sur les coefficients de corrélation de Pearson a ainsi été appliquée et permet de proposer un premier traitement des données. Ensuite une Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) utilisant la méthode d'agglomération de Ward est appliquée sur les coordonnées de l'ensemble des observations de l'ACP. Le nombre de cluster individualisé par la CAH est déterminé en fonction du saut d'inertie observé sur le diagramme des niveaux.

## Le corpus d'étude

L'étude intègre soixante-et-onze masses de métal, constituant cinquante-six objets, répartis sur un large espace nord-alpin (fig 4). Une partie des analyses archéométriques menées sur certaines de ces masses de métal a déjà été publiée. C'est notamment le cas des bipyramidés et masses brutes, retrouvés en Alsace, en Lorraine et dans l'ouest de l'Allemagne (Dillmann *et al.* 2017 ; Bauvais *et al.* 2021), ainsi que de *currency-bars* provenant de dépôts terrestres dans la région de Salins-les-Bains (Jura) et retrouvés dans le cours de la Saône et dans un méandre du Doubs (Berranger *et al.* 2021). Vingt-et-un objets inédits, correspondant à des bipyramidés de la région du Doubs et de Champagne, ainsi que des chutes de travail issues des habitats contemporains de Vix et Bragny-sur-Saône ont été ici pris en compte. La figure 5 récapitule le corpus d'objets retenus.

n° sur fig. 4	Site	Référence objets analysés	Types	Commentaire	Chronologie	Contexte de découverte	Référence contexte découverte	Référence études archéométriques
1	Aibre "La Reveuge" (Doubs)	Aibre	Bipyramidé	Analyse de 1 objet		Découverte "fortuite"	Joan 2003	Inédit
2	Arbois "Pré des Noyers" (Jura)	Arbois CB01 (a) et Arbois CB01 (b)	Currency-bar	Objet analysé constitué de deux masses de métal	Ve-IVe av. n.é. (combine C14)	Dépôt isolé (2 objets)	Berranger <i>et al.</i> 2019, 2021	
3	Bagny-sur-Saône "Sous Moussières" (Saône-et-Loire)	Masse brute : BR-M1 ; chutes de forge : BR-M2, BR-M3, BR-M4, BR-M8	Masse brute et chutes de forge		Ve s. av. n.é.	Atelier de forge	Flouest 1993, Modarressi-Tehrani 2009	Inédit
4	Châlon-sur-Saône "Gué des Piles" (Saône-et-Loire)	SAO.82-07-06 A et SAO.82-07-06 B	Currency-bar	Dans le cours de la Saône	Ville-IVe av. n.é. (C14)	Dépôt en rivière (au moins 4 currency-bars)	Dumont 2002	Berranger 2014, Berranger <i>et al.</i> 2019, 2021
5	Champdivers "Les grand Glairon" (Doubs)	CHAMP 99-17-05	Currency-bar	Dans le cours de la Saône	Ville-Ve av. n.é. (C14)	Dépôt en dans un bras mort de rivière (9 currency-bars et bipyramidés)	Daubigny <i>et al.</i> 2007,	Berranger 2014, Berranger <i>et al.</i> 2019, 2021
6	Châtillon-sur-Seine / Vix "Mont Lassois" (Côte-d'Or)	Bipyramidés/demi-produits : Vix D59-16 (a) et (b), Vix 2014 Bef.048 (a) et (b), Vix 947-337-1, Vix 971-6-1, Vix 2010_8C, Vix 2010_8A, Vix 2010_21, Vix 2012_FK001 (a) et (b), Vix2012_FK021, objets : Vix 2012_FK002 (a) et (b), Vix 2010_8B (a) et (b) et (c)	Bipyramidés, chute d'élaboration et objets	9 Bipyramidés ou demi-produits et 2 objets, dont cinq constitués de deux à trois masses de métal	IXe-VIe av. n.é. (C14)	Habitat	Chaume 2001 et à paraître	Berranger 2014, M. Seen dans Chaume à paraître
7	Colmar "Gare de marchandise" (Haut-Rhin)	Colmar	Bipyramidé	Analyse de 1 objet	IXe-VIe av. n.é. (C14)	Découverte "fortuite"	Zehner 1998	France-Lanord 1963, Dillmann <i>et al.</i> 2017, Bauvais <i>et al.</i> 2021
8	Durrenentzen (Haut-Rhin)	Dur.3, Dur.6, Dur.48-1, Dur.48-2, Dur40-1	Bipyramidé	Analyse de 4 bipyramidés dont 2 (Dur.6 et Dur.48) constitués de deux masses de métal	IXe-Ve av. n.é. (C14)	Dépôt isolé (51 objets)	Bielman 1986	Berranger <i>et al.</i> 2017a
9	Eberdingen-Hochdorf "Reps" (Bade-Wurtemberg - All.)	METC118 (barre) et METC114 (masse brute)	Masse brute et barre		LTA-B1	Centre de production (forge)	Biel 2013	Dillmann <i>et al.</i> 2017, Bauvais <i>et al.</i> 2021
10	Seingbouse-Farebersviller "Gerspich" (Moselle)	Far1-1 et Far1-2	Bipyramidé	Bipyramidé constitué de deux masses de métal	Ville-VIe av. n.é. (C14)	Dépôt en silo dans un habitat Ille-Ile av. n.é.	Flotté, Fuchs 2004	Dillmann <i>et al.</i> 2017, Bauvais <i>et al.</i> 2021
11	Heiligenberg in Heideberg "Heideberg" (Bade-Wurtemberg-All.)	Heiligenberg 41/1 -41/2et 42	Bipyramidé	Un des bipyramidés, n°41, est constitué de deux masses de métal		Dépôt isolé (2 objets)	Ludwig, Marzoff 1999	Dillmann <i>et al.</i> 2017, Bauvais <i>et al.</i> 2021
12	Marsal (Moselle)	Marsal 1-1, 1-2, 3-1 et 3-2	Bipyramidé	Analyses de deux bipyramidés constitués chacun de deux masses de métal	Ville-Ve av. n.é. (C14)	Dépôt de 8 objets	Olivier 2000	Dillmann <i>et al.</i> 2017, Bauvais <i>et al.</i> 2021
13	Pouilly-sur-Saône (Saône-et-Loire)	SAO.81-03-01	Currency-bar	Dans le cours de la Saône		Dépôt en rivière	Dumont 2002	Berranger 2014, Berranger <i>et al.</i> 2019, 2021
14	Renningen (Bade-Wurtemberg - All.)	Renningen	Bipyramidé	Renningen (Bipyramidé)		Dépôt isolé (17 objets)	Kurz 1995	Dillmann <i>et al.</i> 2017, Bauvais <i>et al.</i> 2021
15	Roches-les-Blamont (Doubs)	Roches-les-Blamont	Bipyramidé	Analyse de 1 objet	Ville-Ve av. n.é. (C14)	Découverte "fortuite"		Inédit
16	Romain (Meurthe-et-Moselle)	Romain 1-1 et 1-2	Bipyramidé	Analyse d'une bipyramidé constitué de deux masses de métal	IXe-VIe av. n.é. (C14)	Découverte "fortuite"		Dillmann <i>et al.</i> 2017, Bauvais <i>et al.</i> 2021
17	Saint-Imoges (Marne)	Saint-Imoges	Bipyramidé	Analyse de 1 objet	Ville-Ve av. n.é. (C14)	Dépôt isolé (5 objets)	Chossenot 1997	Inédit
18	Saint Marcel "Port Guillot" (Saône-et-Loire)	SAO.85-01-01 B	Currency-bar	Dans le cours de la Saône	Ville-IVe av. n.é. (C14)	Dépôt en rivière (au moins 12 currency-bars)	Dumont 2002	Berranger 2014, Berranger <i>et al.</i> 2019, 2021
19	Saint Thiébaud "Mont Poupet" (Jura)	SAL.05, SAL.06, SAL.07, SAL.08, SAL.11, SAL.24 (a)/SAL.24(b), SAL.25, SAL.26	Currency-bar	Etude de 8 objets dont un SAL.24 est constitué de deux masses de métal	Ville-IVe av. n.é. (C14)	Dépôt isolés (26 objets)	Berranger <i>et al.</i> 2019, 2021	
20	Salins-les-Bains "Bois Bovard-est" (Jura)	WPT 154-1	Currency-bar		Ville-Ve av. n.é. (C14)	Dépôt isolé (2 objets)	Berranger <i>et al.</i> 2019, 2021	
21	Seurre "L'île au Bœuf" (Côte d'Or)	SAO.77-10-07	Currency-bar	Dans le cours de la Saône		Dépôt en rivière (au moins 14 currency-bars)	Dumont 2002	Berranger 2014, Berranger <i>et al.</i> 2019, 2021
22	Vaire-Arcier (Doubs)	Vaire-Arcier	Bipyramidé		Ville-Ve av. n.é. (C14)	Découverte "fortuite"		Inédit
23	Valempoulières "Bois de Rafour" (Jura)	VAL.01, VAL.04	Currency-bar	Etude de deux objets	IVe-IIIe av. n.é. (C14)	Dépôt isolé (4 objets)	Berranger <i>et al.</i> 2019, 2021	
24	Velaine-en-Haye (Meurthe-et-Moselle)	Velaine 002	Masse brute	Masse brute retrouvée sur un atelier de réduction	HaD3/LTA	Habitat	Defressigne <i>et al.</i> 2002	Dillmann <i>et al.</i> 2017, Bauvais <i>et al.</i> 2021
25	Waiblingen (Baden-Wurtemberg-All.)	Waiblingen	Bipyramidé	Waiblingen (Bipyramidé)		Dépôt isolé		Inédit
26	Xirocourt (Meurthe-et-Moselle)	Xir 1-1 et 1-2	Bipyramidé		Ville-Ve av. n.é. (C14)	Découverte "fortuite"		Dillmann <i>et al.</i> 2017, Bauvais <i>et al.</i> 2021

Fig. 5. Inventaire des sites et des objets analysés (M. Berranger-S. Bauvais /CNRS)

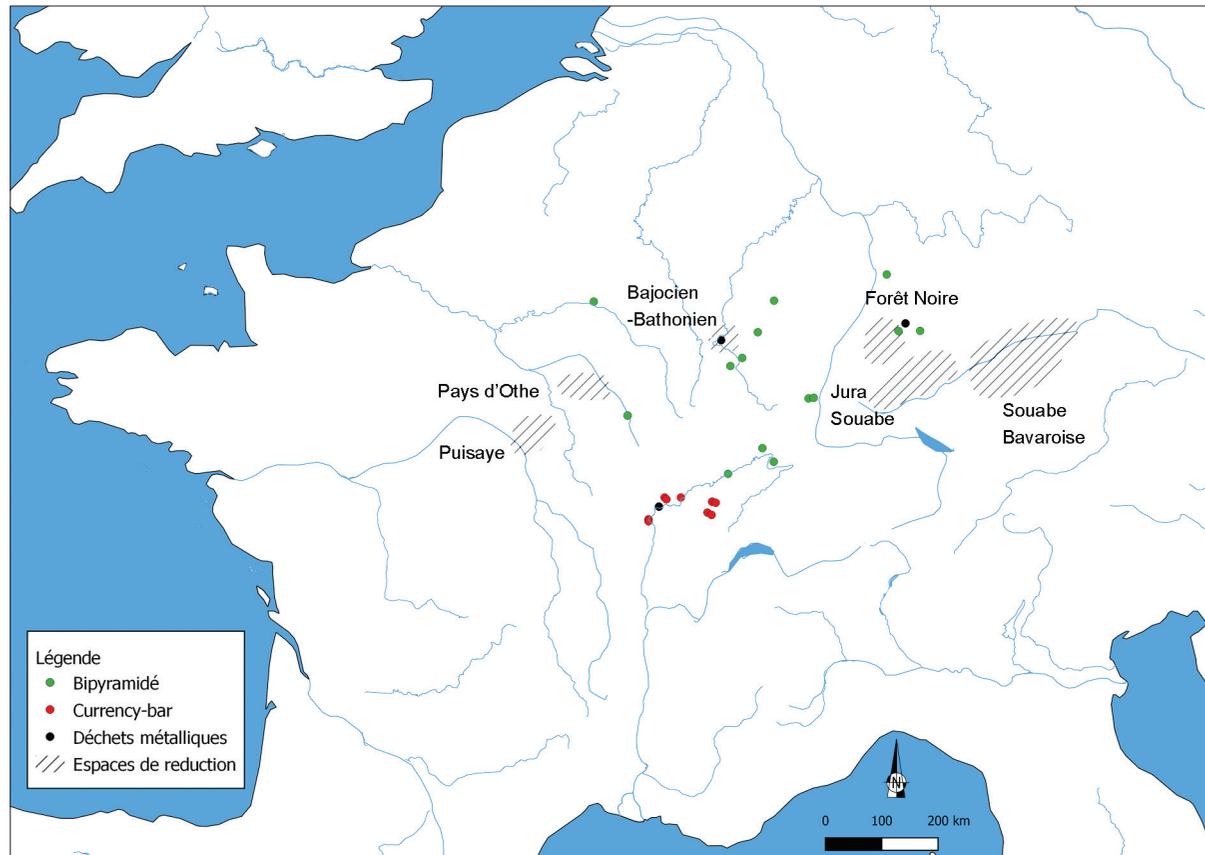


Fig. 6. Localisation des espaces de réduction pris en compte par rapport aux objets métalliques analysés (M. Berranger/CNRS).

Six espaces de production (fig. 6), ayant livré des ateliers datés des âges du Fer, et situés dans l'aire nord-alpine constituent les ensembles de référence auxquels ont été comparés les objets en métal. Il s'agit des ateliers de Forêt Noire (All.), de Souabe Bavaroise (All.), des Jura Souabe (All.), du Bajocien-Bathonien (Lorraine) dont les signatures chimiques ont été étudiées durant le programme ANR CIPIA (Dillmann *et al.* 2017, Bauvais *et al.* 2021). Ont également été prises en compte les données chimiques issues de Puisaye et du Pays d'Othe acquises dans le cadre du PCR « La sidérurgie en Bourgogne Franche-Comté avant le haut fourneau » (Berranger dir. inédit). La figure 7 récapitule le corpus de référence retenu.

## Résultats

### Les espaces de réduction de référence

Considérons dans un premier temps la variabilité chimique des espaces de production de référence. La figure 8 correspond aux projections des axes F1/F2 de l'ACP, qui cumulent le maximum de variance (77,19 %), ainsi qu'à la CAH conduite sur l'ensemble des axes de l'ACP afin de prendre en compte 100 % de la variance.

Les scories de Forêt Noire constituent un groupe à part et bien différencié des autres espaces de production. Les scories issues de Puisaye et Pays d'Othe ne peuvent être distinguées. Les

ateliers de réduction pris en compte pour ces espaces se situent sur les mêmes couches géologiques correspondant à des dépôts tertiaires éocènes, sous forme d'argile intégrant des dépôts riches en limonites. L'utilisation de ces mêmes types de minerais pourrait expliquer la forte proximité chimique de ces ateliers qui se répartissent sur plusieurs centaines de kilomètres carrés.

La signature chimique des scories provenant du Bajocien-Bathonien (Lorraine), de Souabe Bavaroise et du Jura Souabe est très proche. Le Bajocien-Bathonien peut être individualisé lorsque l'ensemble des axes de l'ACP est pris en compte. La Souabe Bavaroise et le Jura Souabe restent par contre indifférenciés même lorsqu'ils sont comparés deux à deux. Précisons cependant que ces espaces se distinguent notamment en prenant en compte leurs rapports isotopiques en osmium, tel que cela est présenté dans Dillmann *et al.* 2017.

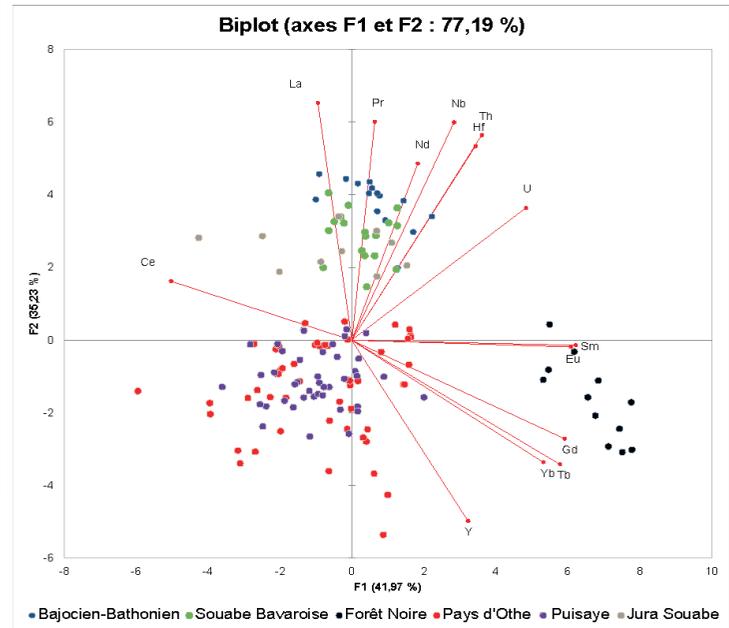
À ce premier stade de l'analyse nous retiendrons donc quatre grands espaces de référence : d'une part la Forêt Noire, d'autre part la Puisaye-Pays d'Othe qui est ici considérée comme un même ensemble, le Bajocien-Bathonien, et enfin la Souabe Bavaroise / Jura Souabe.

### Espaces de réduction *versus* objets en fer

La signature chimique des inclusions de scories piégées au sein des objets en métal a été comparée avec celle des espaces de réduction, en prenant en compte l'ensemble des données chimiques disponibles. La figure 9 correspond à la projection des

Espace de production	Site	Scorie et minerais analysés	Datation
Bajocien-Bathonien (Lorraine)	Gondreville "ZAC de la Roseraie"	12	Ha D-LT A
Forêt Noire	Neuenbürg Waldrennach "Grosseltal"	13	Ha D-LT A
Forêt Noire	Neuenbürg Waldrennach "Herlienbusch"	4	Ha D-LT A
Forêt Noire	Neuenbürg Engelsbrand "Kuhnbusch"	2	Ha D-LT A
Souabe Bavaroise	Emershofen	3	LT B-D
Souabe Bavaroise	Fristingen	2	LT B
Souabe Bavaroise	Fruchtheim	2	LT B
Souabe Bavaroise	Karlskron "Grillheim"	4	LT B-LT D
Souabe Bavaroise	Kicklingen	1	LT A-LT B
Souabe Bavaroise	Manching	2	LT B-LT D
Souabe Bavaroise	Osterberg	4	LT B-LT C
Souabe Bavaroise	Unterroth	7	LT B-LT C
Souabe Bavaroise	Weissenhorn	1	LT B
Jura Souabe	St Johann Würtingen	17	LT A-LT B
Pays-d'Othe	Bussy-en-Othe "Etang de Saint-Ange - Bois de Migenne 1"	7	LT B-LT D
Pays-d'Othe	Cuy "Noslon"	7	LT C2-LT D1
Pays-d'Othe	Les Clérimois "Les Fouetteries"	14	LT D
Pays-d'Othe	Villiers-Sur-Seine "Le Défendable"	11	LT D
Pays-d'Othe	Vinneuf "Le Chatelot"	6	LT B-LT C
Puisaye	Aillant-sur-Tholon "Bois des Fermiers 1"	10	LT D
Puisaye	Aillant-sur-Tholon "Les Boulassesaux"	4	LT A-LT C
Puisaye	Aillant-sur-Tholon "Les Reserves"	4	LT D
Puisaye	Dracy "La Grande Pature 10"	3	LT A-LT C
Puisaye	Saint Fargeau "Bois de Bailly 1"	5	LT A-LT D
Puisaye	Saint Fargeau "Bois de Bailly 26"	5	LT A-LT B
Puisaye	Saint Fargeau "Bois de Bailly 33"	5	LT B-LT C
Puisaye	Treigny "Bois des Chataigniers 2"	2	LT A-LT D
Puisaye	Treigny "Les Gâtines Beauchet 1"	2	Ha D-LT A
Puisaye	Treigny "Les Gâtines Beauchet 2"	2	Ha D-LT A

Fig. 7. Inventaire des espaces de réduction étudiés (M. Berranger-S. Bauvais /CNRS).



axes F1/F2 et F2/F3 qui cumulent 71,3% de la variance de l'ACP. La réalisation d'une CAH sur les coordonnées de l'ACP permet d'individualiser huit clusters (fig. 10).

Les inclusions de trente-deux masses de métal se répartissent au sein de clusters (n°7 ; 6 ; 8 ; 5) qui n'incluent pas de scories issues des espaces testés. Pour ces objets, aucune compatibilité chimique de provenance n'est mise en évidence avec les espaces retenus. Les inclusions de trente-neuf autres masses de métal se répartissent au sein des mêmes clusters que les scories issues d'espaces de réduction ce qui permet de considérer des hypothèses de provenance (quelques inclusions isolées n'ont pas été retenues). Ainsi, les objets des clusters n°3 et 2 pourraient être compatibles avec une provenance de Puisaye-Pays d'Othe. Le cluster n°1 comprend des objets qui pourraient provenir de Forêt Noire. Le cluster n°4 inclut huit objets qui pourraient être compatibles avec les espaces du Bajocien-Bathonien ainsi que de Souabe Bavaroise et du Jura Souabe.

Ces premières hypothèses de compatibilité chimique ont été chacune testées en comparant individuellement les inclusions des objets en métal avec un seul espace de provenance candidat. La démarche statistique combine de nouveau ACP, puis CAH sur les coordonnées de l'ACP. La figure 11 illustre le cas où les inclusions de l'objet métallique et les scories de l'espace de réduction candidat ne peuvent être séparées : l'hypothèse de compatibilité est alors confortée. La figure 12 illustre le cas contraire, avec une séparation nette entre les inclusions de l'objet métallique et les scories de l'espace de réduction : dans ce cas l'hypothèse de compatibilité est infirmée. Dans certains cas les inclusions et les scories sont séparées uniquement sur un des plans de l'ACP, tout en restant groupées sur la CAH en prenant en compte 100 % de la variance. Dans ces cas, la compatibilité n'est pas clairement confirmée (fig. 13). Elle est mentionnée mais devra faire l'objet d'autres analyses. La figure 14 résume les résultats par objet.

Le cluster n°1 de l'étude statistique menée à l'échelle de l'ensemble des objets et espaces (figure 10) contient des scories de la Forêt Noire et les inclusions de trois objets. De ces derniers,

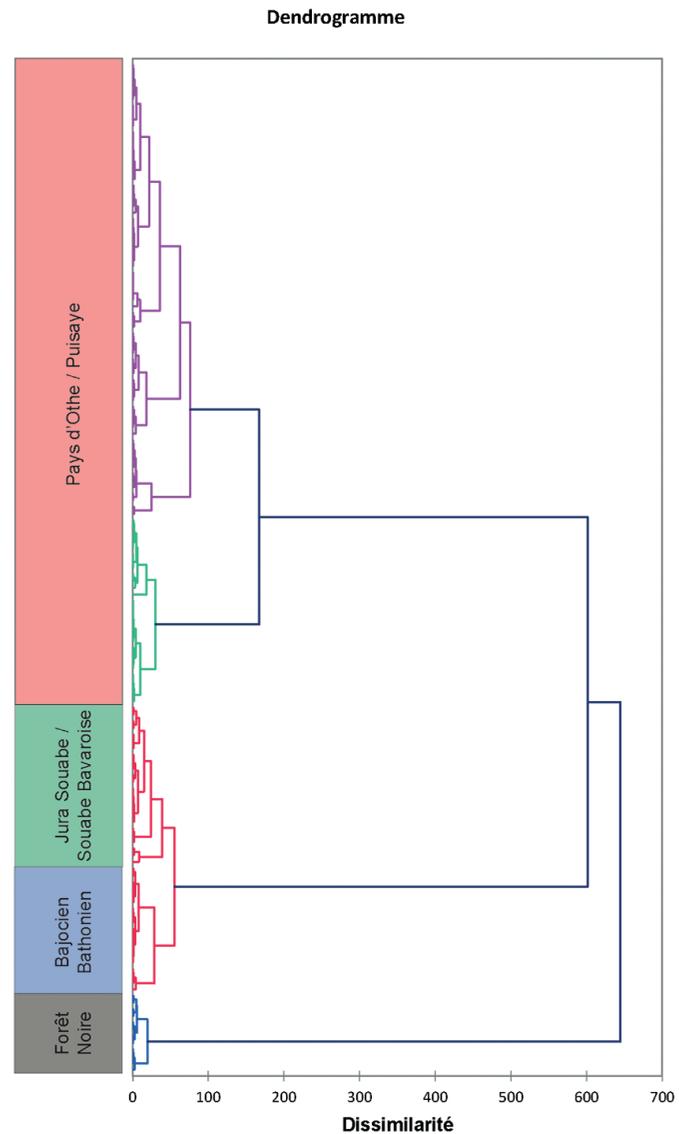


Fig. 8. Les espaces de réduction. Haut : Analyse en Composante Principale (ACP) sur les xij des scories. Bas : Classification Ascendante Hiérarchique sur les coordonnées de l'ACP (M. Berranger/CNRS).

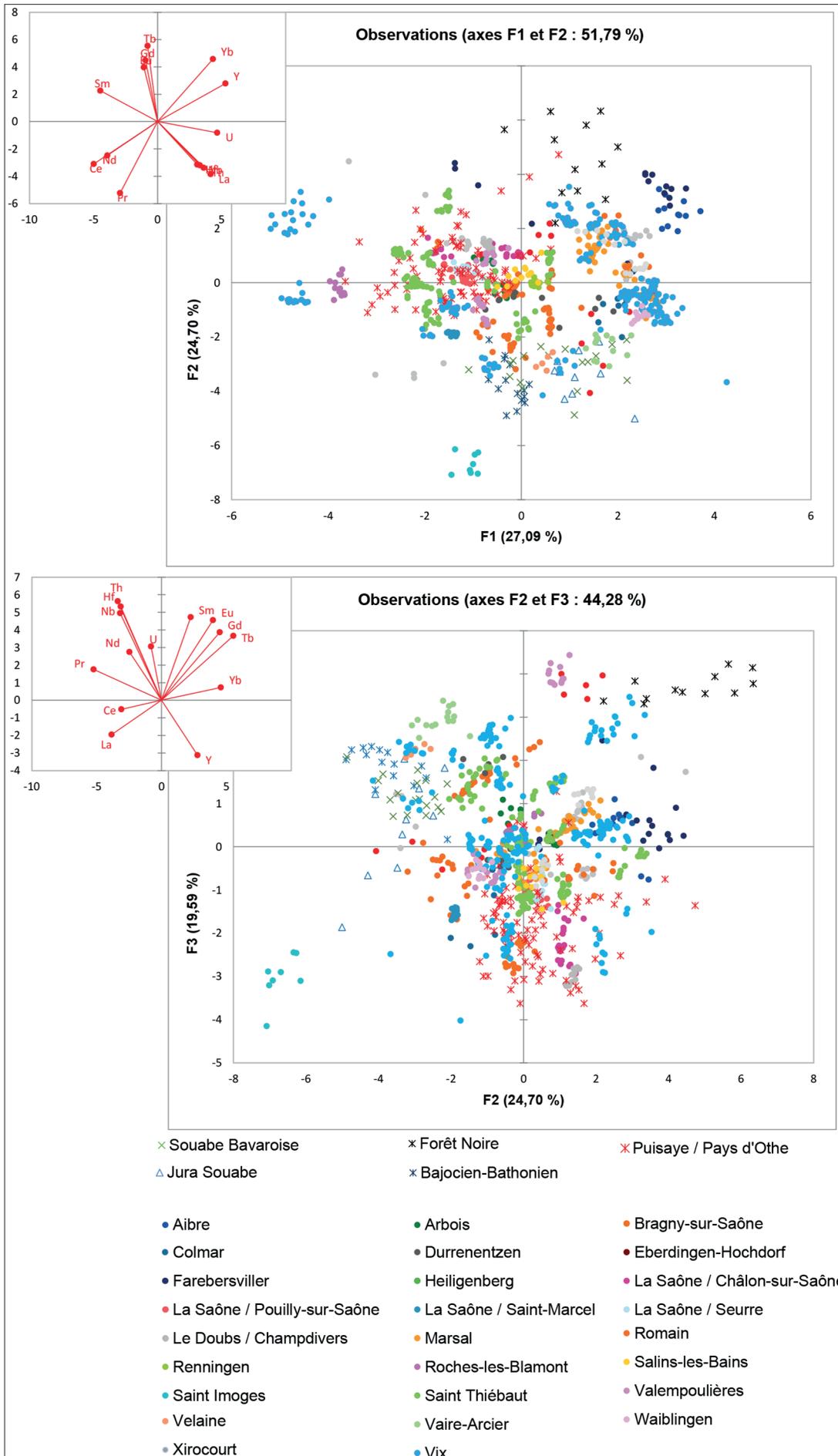


Fig. 9. Les espaces de réduction et les masses de métal par site. Analyse en Composante Principale (ACP) sur les xij des scories et des inclusions au sein des objets en métal (M. Berranger/ CNRS).

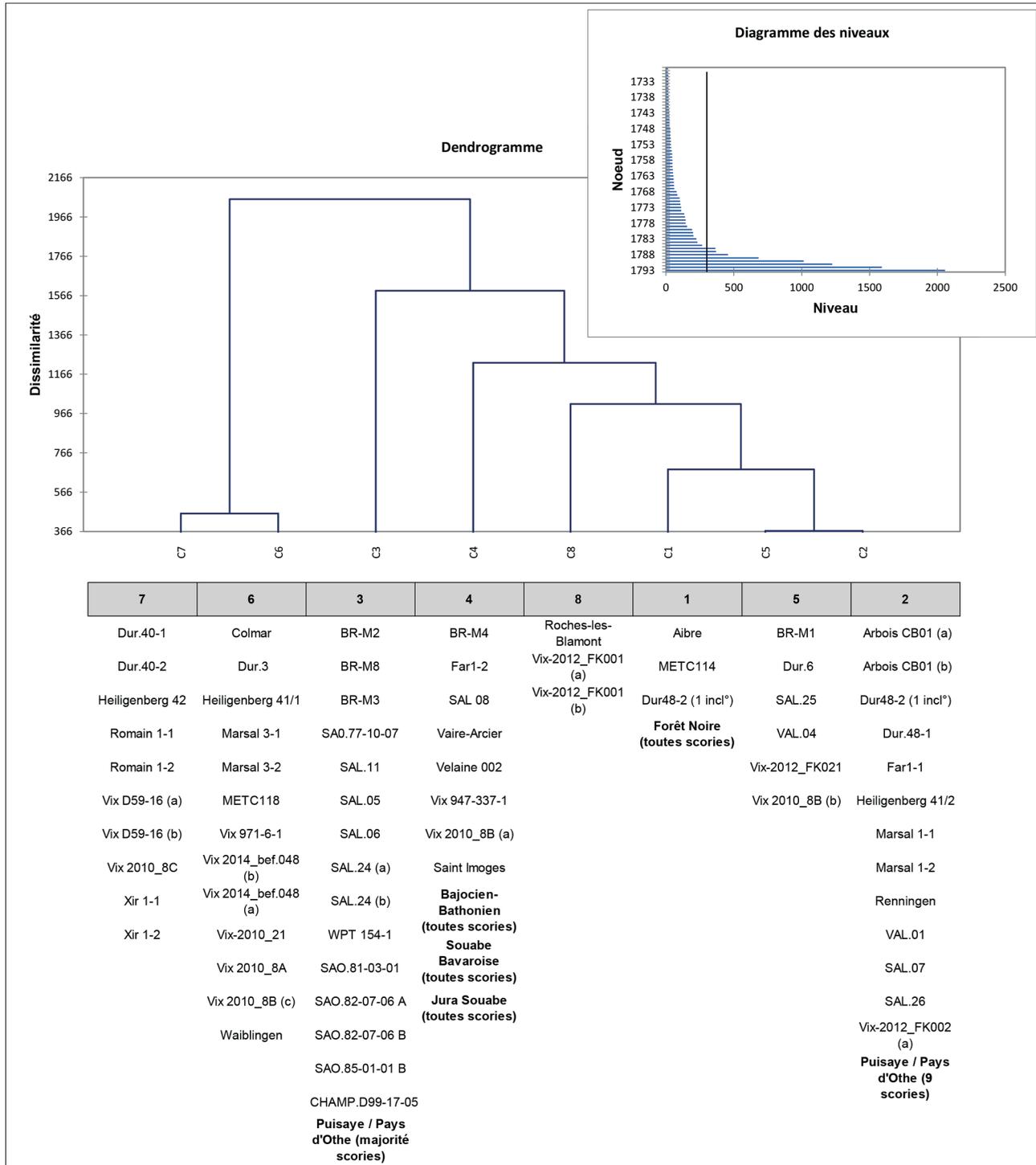


Fig. 10. Les espaces de réduction et les masses de métal. Classification Ascendante Hiérarchique sur les coordonnées de l'ACP de la figure 7. Détail de la répartition des objets et des espaces au sein des clusters individualisés (M. Berranger/CNRS).

seule la masse de métal brut d'Hochdorf METC114, possède des caractéristiques chimiques compatibles avec une provenance liée à l'ensemble Forêt Noire.

Au sein du cluster n°4, le bipyramidé Far1-2 provenant de Farébersviller présente une signature chimique compatible avec la Souabe Bavaoise. Cependant les analyses isotopiques réalisées préalablement sur cet objet sont incompatibles avec une provenance depuis cet espace (Dillmann *et al.* 2017, Bauvais *et al.* 2021). Pour le bipyramidé de Vix 947-337-1 présent dans le

même cluster n°4, sa signature chimique est compatible avec la Souabe Bavaoise ou le Jura Souabe, sans qu'il soit possible à ce stade de trancher. Les caractéristiques chimiques des inclusions de la masse brute de Velaine 002 sont compatibles avec une provenance locale du Bajocien-Bathonien. Pour Velaine 0002, cette hypothèse avait déjà été formulée à l'issue des analyses réalisées dans le cadre de l'ANR-DFG CIPIA (Dillmann *et al.* 2017, Bauvais *et al.* 2021). Les autres objets présents dans ce cluster

n°4 ont révélé une signature chimique incompatible avec une provenance de ces espaces lors des comparaisons deux à deux.

Dans l'analyse statistique prenant en compte l'ensemble des objets et des scories, les scories de Puisaye-Pays d'Othe se répartissent dans les clusters n°2 et 3 (fig. 10). Ces derniers intègrent les inclusions de scories de 28 masses de métal.

À l'issue des comparaisons deux à deux, douze masses de métal ont une signature chimique compatible avec une provenance de Puisaye-Pays d'Othe. Pour sept autres masses, les compatibilités avec cet espace sont moins certaines, étant donné la séparation entre inclusions et scories dans au moins un des plans

de l'ACP (fig. 13). Dans les deux cas, il s'agit majoritairement de *currency-bars* du Jura et de la Saône répartis, d'après des travaux antérieurs dans les mêmes clusters de provenance, sans que leur origine n'ait alors pu être déterminée (Berranger *et al.* 2021).

### Discussion

Le foisonnement des échanges au sein des activités en métallurgie du fer et la segmentation de la chaîne opératoire en étapes impliquant des acteurs spécialisés ont été mis en évidence

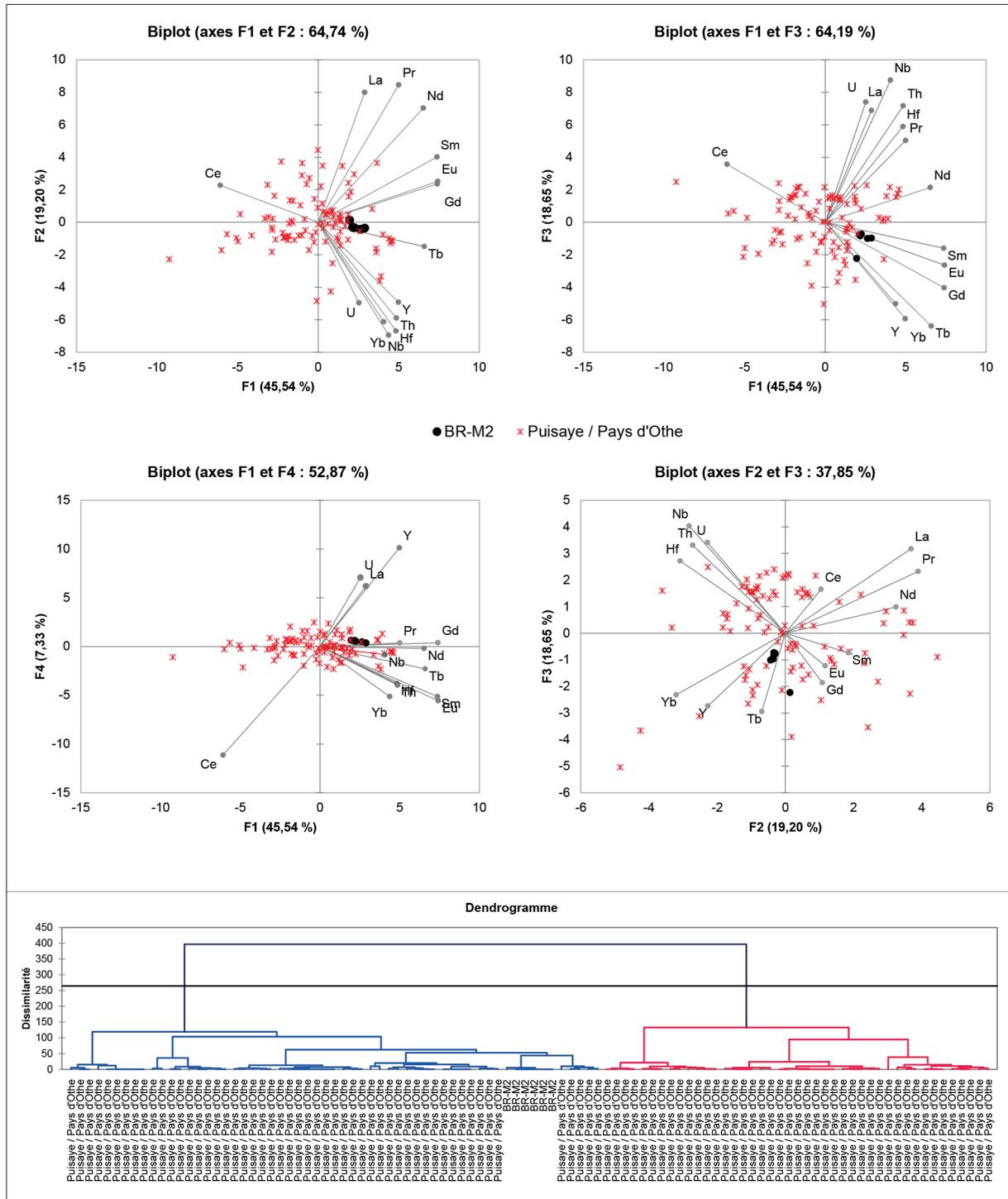


Fig. 11. ACP et CAH entre un objet en métal et un espace de réduction candidat. Exemple de compatibilité (M. Berranger/CNRS).

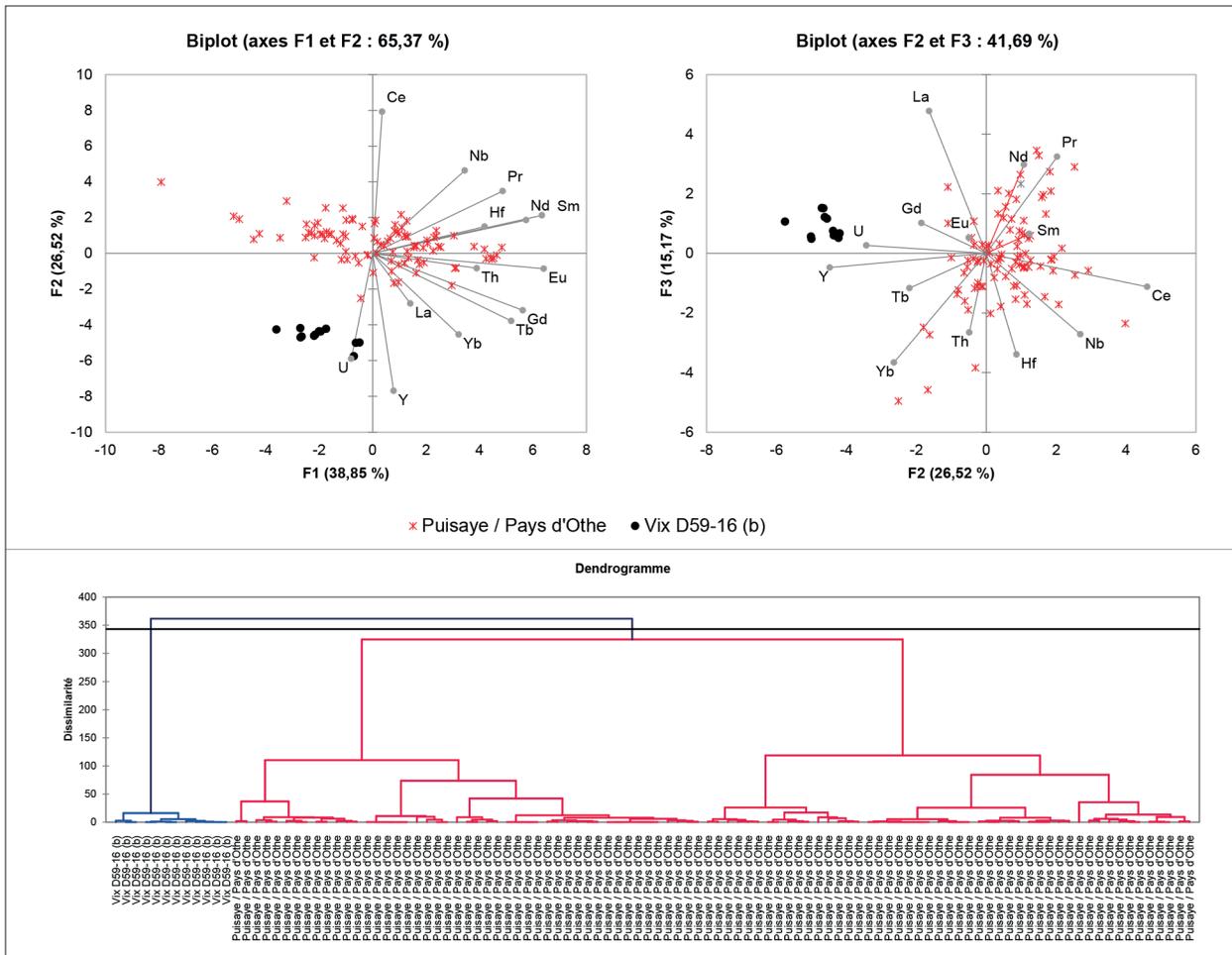


Fig. 12. ACP et CAH entre un objet en métal et un espace de réduction candidat. Exemple d'exclusion (M. Berranger/CNRS).

par de nombreuses études (voir *supra*). Il est à présent possible d'esquisser certaines caractéristiques de ces axes d'échanges. Les figures 14 et 15 synthétisent les résultats acquis dans le cadre de la présente étude.

### Une circulation locale de la matière première

Au sein du corpus pris en compte, des provenances locales peuvent être identifiées. C'est le cas de la masse brute de Velaine 002, retrouvée dans un habitat daté de la transition Ha D3 - LTA au sein duquel l'ensemble de la chaîne opératoire de traitement du fer semble avoir été réalisé. Pour ce fragment de métal brut, une compatibilité de provenance est constatée avec les scories de réduction locales et contemporaines du Bajocien-Bathonien (Lorraine). Ce cas de figure illustre le traitement d'un métal produit vraisemblablement au sein d'ateliers de réduction d'importance limitée et dont le traitement primaire était réalisé localement. La masse brute MetC114 retrouvée sur les ateliers de forgeage d'Eberdingen-Hochdorf datés du LTA-LTB1 témoigne également d'une circulation du métal à courte distance, mais cette fois-ci depuis l'importante zone de production de Forêt Noire dont l'activité est attestée durant le Ha D3 - LTA. Cette dernière se situe à moins d'une centaine de kilomètres à l'ouest

des ateliers où a été trouvée le fragment de métal. Dans les deux cas, il s'agit de fragments de masses de métal très partiellement épurées, situées à un stade de mise en forme pouvant précéder une éventuelle diffusion vers d'autres ateliers de mise en forme.

### Une circulation à longue distance de part et d'autre du Rhin

Différents flux impliquant des échanges à longue distance sont documentés grâce à la détermination de provenances possibles. Le demi-produit 947-337-1, retrouvés sur l'habitat princier de Vix a ainsi une signature chimique compatible avec le Jura Souabe ou la Souabe Bavaroise. Il documente la circulation d'un métal produit à l'est du Rhin et acheminé vers l'ouest, jusqu'en région Bourgogne. Le Jura Souabe et la Souabe Bavaroise se différencient mal par la seule analyse chimique élémentaire, mais ils sont bien distingués par les analyses isotopiques de l'osmium (Dillmann *et al.* 2017). Des analyses supplémentaires devront ainsi être réalisées sur cet objet pour mieux préciser son origine.

À l'inverse, le bipyramidé de Renningen, bien que localisé au cœur de la Forêt Noire, est constitué d'une masse de métal qui aurait peut-être été produite en Puisaye-Pays d'Othe et aurait alors été transportée à l'est du Rhin.

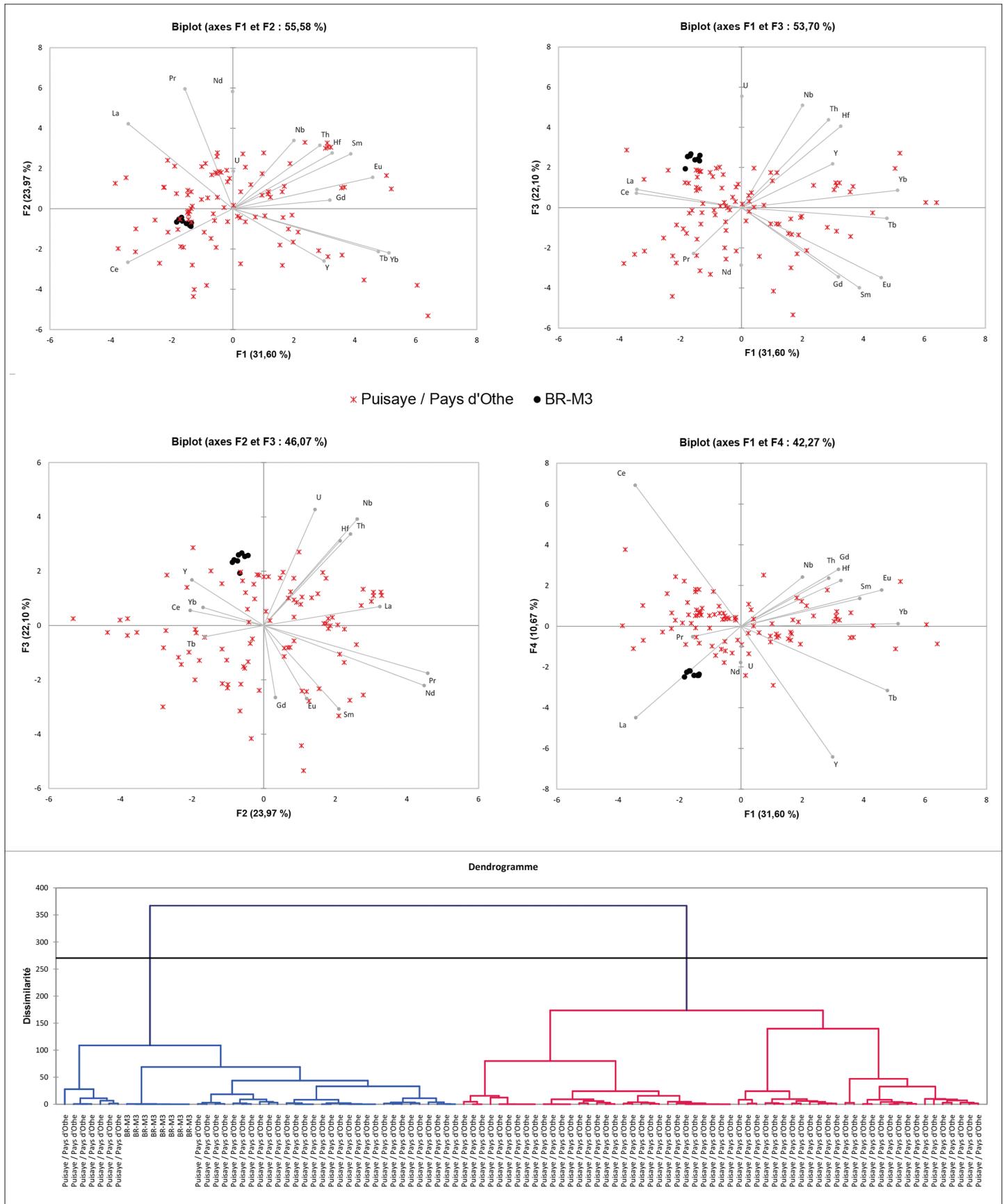


Fig. 13. ACP et CAH entre un objet en métal et un espace de réduction candidat. Exemple de compatibilité incertaine (M. Berranger/CNRS).

Site	Objet	Informations de provenance d'après travaux antérieurs	Résultat à l'échelle de		Résultat après ACP / CAH individualisée par objet
			Cluster	Hypothèse de compatibilité	
Albre "La Reveuge" (Doubs)	Albre		1	Forêt-noire	Aucune compatibilité
Arbois "Pré des Noyers" (Jura)	Arbois CB01 (a)		2	Puisaye / Pays d'Othe	Puisaye / Pays d'Othe
	Arbois CB01 (b)		2	Puisaye / Pays d'Othe	Puisaye / Pays d'Othe
Bragny-sur-Saône "Sous Moussières" (Saône-et-Loire)	BR-M1		5	Aucune compatibilité	
	BR-M2		3	Puisaye / Pays d'Othe	Puisaye / Pays d'Othe
	BR-M3		3	Puisaye / Pays d'Othe	Puisaye / Pays d'Othe ?
	BR-M4		4	Puisaye / Pays d'Othe	Aucune compatibilité
Châlon-sur-Saône "Gué des Piles" (Saône-et-Loire)	SAO.82-07-06 A	Cluster VI des currency-bars de Saône et Jura (Berranger et al. 2021)	3	Puisaye / Pays d'Othe	Puisaye / Pays d'Othe ?
	SAO.82-07-06 B	Cluster VI des currency-bars de Saône et Jura (Berranger et al. 2021)	3	Puisaye / Pays d'Othe	Puisaye / Pays d'Othe
Champdivers "Les grand Glairon" (Doubs)	CHAMP D99-17-05	Cluster VI des currency-bars de Saône et Jura (Berranger et al. 2021)	3	Puisaye / Pays d'Othe	Puisaye / Pays d'Othe
Chatillons-sur-Seine / Vix "Mont Lassois" (Côte-d'Or)	Vix 2010_8A		6	Aucune compatibilité	
	Vix 2010_8B (a)		4	Jura Saoube / Souabe Bavaroise / Bajocien-Bathonien	Aucune compatibilité
	Vix 2010_8B (b)		5	Aucune compatibilité	
	Vix 2010_8B (c)		6	Aucune compatibilité	
	Vix 2010_8C		7	Aucune compatibilité	
	Vix 2014_bef.048 (a)		6	Aucune compatibilité	
	Vix 2014_bef.048 (b)		6	Aucune compatibilité	
	Vix 947-337-1		4	Jura Saoube / Souabe Bavaroise / Bajocien-Bathonien	Jura Saoube / Souabe Bavaroise (provenance à préciser par isotopes)
	Vix 971-6-1		6	Aucune compatibilité	
	Vix D.59-16 (a)		7	Aucune compatibilité	
	Vix D.59-16 (b)		7	Aucune compatibilité	
	Vix-2010_21		6	Aucune compatibilité	
	Vix-2012_FK001 (a)		8	Aucune compatibilité	
	Vix-2012_FK001 (b)		8	Aucune compatibilité	
	Vix-2012_FK002 (a)		2	Puisaye / Pays d'Othe	Aucune compatibilité
	Vix-2012_FK002 (b)		2	Puisaye / Pays d'Othe	Aucune compatibilité
Vix-2012_FK021		5	Aucune compatibilité		
Colmar "Gare de marchandise" (Haut-Rhin)	Colmar		6	Aucune compatibilité	
Durrenzenzen (Haut-Rhin)	Dur.3	CIPIA Groupe 2 (Dillmann et al. 2017, Bauvais et al. 2021)	6	Aucune compatibilité	
	Dur.40-1	CIPIA Groupe 1 (Dillmann et al. 2017, Bauvais et al. 2021)	7	Aucune compatibilité	
	Dur.40-2	CIPIA Groupe 1 (Dillmann et al. 2017, Bauvais et al. 2021)	7	Aucune compatibilité	
	Dur.6		5	Aucune compatibilité	
	Dur48-1		2	Puisaye / Pays d'Othe	Aucune compatibilité
	Dur48-2		1 (1 incl*) et 2 (1 incl*)	Puisaye / Pays d'Othe ou Forêt-Noire	Aucune compatibilité
Eberdingen-Hochdorf "Reps" (Bade-Wurtemberg - All.)	Hochdorf MetC114	Origine Forêt Noire (Dillmann et al. 2017, Bauvais et al. 2021)	1	Forêt Noire	Forêt Noire
	Hochdorf MetC118		6	Aucune compatibilité	
Heiligenberg in Heidelberg "Heidelberg" (Bade-Wurtemberg-All.)	Heiligenberg 41/1	CIPIA Groupe 1 (Dillmann et al. 2017, Bauvais et al. 2021)	6	Aucune compatibilité	
	Heiligenberg 41/2		2	Puisaye / Pays d'Othe	Aucune compatibilité
Heiligenberg 42			7	Aucune compatibilité	
	Marsal 1-1	Même origine indéterminée que Marsal 1-2 (Dillmann et al. 2017, Bauvais et al. 2021)	2	Puisaye / Pays d'Othe	Aucune compatibilité
	Marsal 1-2	Même origine indéterminée que Marsal 1-1 (Dillmann et al. 2017, Bauvais et al. 2021)	2	Puisaye / Pays d'Othe	Aucune compatibilité
	Marsal 3-1		6	Aucune compatibilité	
Marsal 3-2	CIPIA Groupe 2 (Dillmann et al. 2017, Bauvais et al. 2021)	6	Aucune compatibilité		
Pouilly-sur-Saône (Saône-et-Loire)	SAO.81-03-01	Cluster VI des currency-bars de Saône et Jura (Berranger et al. 2021)	3	Puisaye / Pays d'Othe	Puisaye / Pays d'Othe
Renningen (Bade-Wurtemberg - All.)	Renningen		2	Puisaye / Pays d'Othe	Puisaye / Pays d'Othe ?
Roches-les-Blamont (Doubs)	Roches-les-Blamont		8	Aucune compatibilité	
Romain (Meurthe-et-Moselle)	Romain 1-1	CIPIA Groupe 1 (Dillmann et al. 2017, Bauvais et al. 2021)	7	Aucune compatibilité	
	Romain 1-2	CIPIA Groupe 1 (Dillmann et al. 2017, Bauvais et al. 2021)	7	Aucune compatibilité	
Saint-Imoges (Marne)	Saint Imoges		4	Jura Saoube / Souabe Bavaroise / Bajocien-Bathonien	Aucune compatibilité
Saint Marcel "Port Guillot" (Saône-et-Loire)	SAO.85-01-01 B	Cluster II des currency-bars de Saône et Jura (Berranger et al. 2021)	3	Puisaye / Pays d'Othe	Aucune compatibilité
Saint-Thiébaud "Mont Poupet" (Jura)	SAL.05	Cluster II des currency-bars de Saône et Jura (Berranger et al. 2021)	3	Puisaye / Pays d'Othe	Puisaye / Pays d'Othe
	SAL.06	Cluster VI des currency-bars de Saône et Jura (Berranger et al. 2021)	3	Puisaye / Pays d'Othe	Puisaye / Pays d'Othe ?
	SAL.07		2	Puisaye / Pays d'Othe	Puisaye / Pays d'Othe
	SAL.08		4	Jura Saoube / Souabe Bavaroise / Bajocien-Bathonien	Aucune compatibilité
	SAL.11	Cluster VI des currency-bars de Saône et Jura (Berranger et al. 2021)	3	Puisaye / Pays d'Othe	Puisaye / Pays d'Othe
	SAL.24 (a)	Cluster VI des currency-bars de Saône et Jura (Berranger et al. 2021)	3	Puisaye / Pays d'Othe	Puisaye / Pays d'Othe
	SAL24 (b)	Cluster VI des currency-bars de Saône et Jura (Berranger et al. 2021)	3	Puisaye / Pays d'Othe	Puisaye / Pays d'Othe
	SAL.25		5	Aucune compatibilité	
Salins-les-Bains "Bois Bovard-est" (Jura)	WPT 154-1		2	Puisaye / Pays d'Othe	Aucune compatibilité
			3	Puisaye / Pays d'Othe	Puisaye / Pays d'Othe ?
Seingbouse-Farébersviller "Gerspich" (Moselle)	Far 1-2	Rapport isotopique 187Os/188Os incompatible avec Bayerisch Schwaben (Dillmann et al. 2017, Bauvais et al. 2021)	4	Jura Saoube / Souabe Bavaroise / Bajocien-Bathonien	Souabe Bavaroise mais invalidé par rapports isotopiques
	Far1-1		2	Puisaye / Pays d'Othe	Aucune compatibilité
Seurre "L'île au Bœuf" (Côte d'Or)	SAO.77-10-07	Cluster II des currency-bars de Saône et Jura (Berranger et al. 2021)	3	Puisaye / Pays d'Othe	Puisaye / Pays d'Othe ?
Vaire-Arcier (Doubs)	Vaire-Arcier		4	Jura Saoube / Souabe Bavaroise / Bajocien-Bathonien	Aucune compatibilité
Valempoulières "Bois de Rafter" (Jura)	VAL.01		2	Puisaye / Pays d'Othe	Puisaye / Pays d'Othe ?
	VAL.04		5	Aucune compatibilité	
Velaine-en-Haye (Meurthe-et-Moselle)	Velaine 002	Origine Bajocien-Bathonien (Dillmann et al. 2017, Bauvais et al. 2021)	4	Jura Saoube / Souabe Bavaroise / Bajocien-Bathonien	Bajocien-Bathonien
Waiblingen (Baden-Wurtemberg-All.)	Waiblingen		6	Aucune compatibilité	
Xirocourt (Meurthe-et-Moselle)	Xir1-1	CIPIA Groupe 2 (Dillmann et al. 2017, Bauvais et al. 2021)	7	Aucune compatibilité	
	Xir1-2	CIPIA Groupe 2 (Dillmann et al. 2017, Bauvais et al. 2021)	7	Aucune compatibilité	

Fig. 14. Synthèse par objet. Hypothèses de provenance et résultats après comparaison d'un seul objet avec le seul espace de réduction candidat (M. Berranger/CNRS).

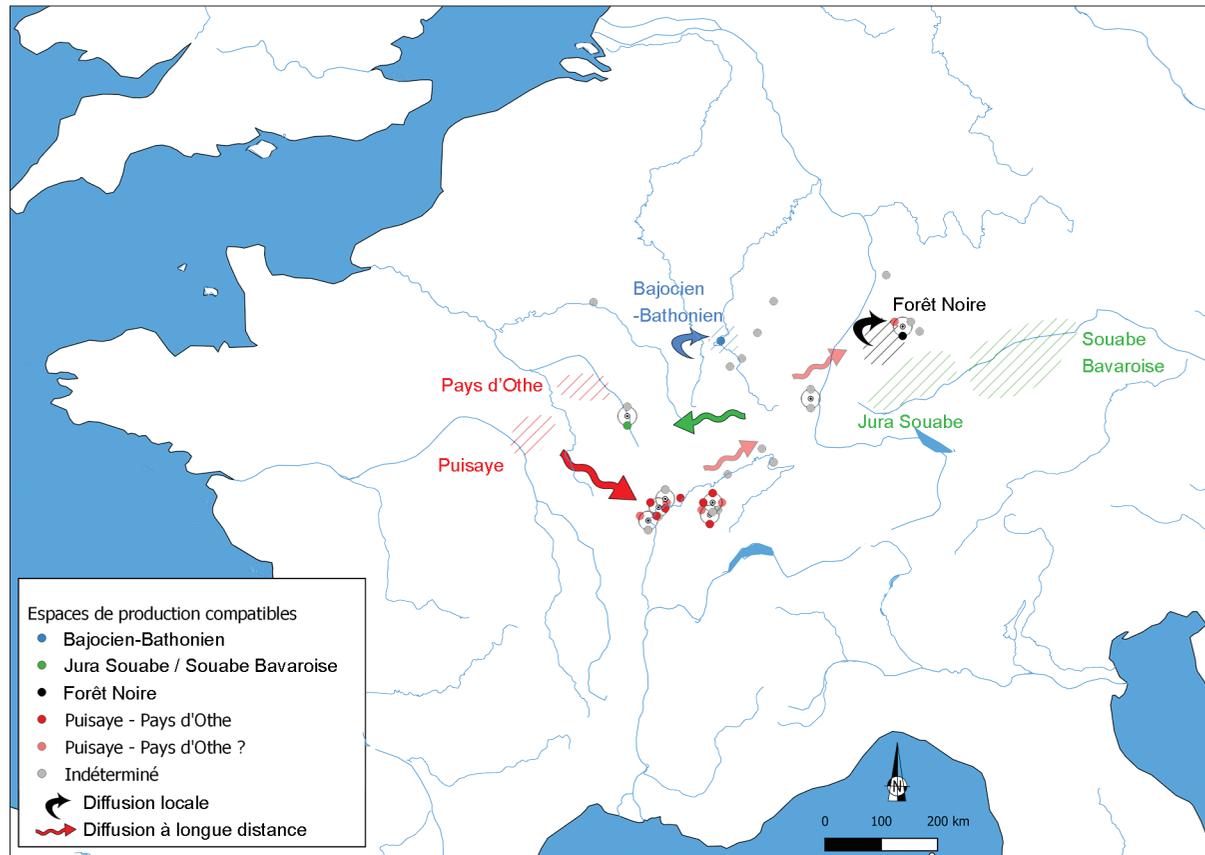


Fig. 15. Première proposition de restitution des réseaux d'échanges en métallurgie du fer, au Hallstatt D – La Tène A (M. Berranger/CNRS).

Ces objets qui ne sont datés ni par méthode radiocarbone, ni par le contexte, mais par leurs seules caractéristiques typologiques, ne permettent pas d'appréhender plus précisément la chronologie de ces échanges durant la période du Premier âge du Fer. Ces matériaux ont-ils été échangés en tant que biens de prestige accompagnant les élites, ou ont-ils circulé dans le cadre d'échanges commerciaux intégrant différentes ressources ? Les mécanismes sous-jacents à ces échanges ne nous sont actuellement pas encore accessibles.

### Un approvisionnement en métal de la Puisaye-Pays d'Othe vers les plaines de Saône, du Doubs et du Jura

La Puisaye-Pays d'Othe constitue un espace de production dont proviendrait une grande partie du corpus étudié ici. La signature chimique de cet espace est compatible avec celle de *currency-bars* provenant des différents dépôts de la région de Salins-les-Bains (compatibilité confirmée avec les dépôts d'Arbois, de Saint-Thiébaud, et de Salins-les-Bains « Bois Bovard » et compatibilité possible avec celui de Valempoulières), ainsi qu'avec des *currency-bars* provenant de la Saône et du Doubs (compatibilité confirmée avec les objets provenant de Champdivers, Pouilly-sur-Saône et un de Châlon-sur-Saône, et compatibilité possible avec les objets de Seurre et de Port Guillot, et un autre objet de Châlon). Des

chutes de forgeage des ateliers Bragny-sur-Saône proviennent de ce même espace.

Il faut souligner que ces objets constituent un ensemble cohérent du point de vue de leur répartition géographique. Ils sont en effet concentrés sur, ou le long des axes fluviaux de la Saône et du Doubs, et dans la région de Salins-les-Bains. Durant cette période les échanges sont multiples entre les plaines de la Saône, du Doubs et la région de Salins-les-Bains qui constitue une zone de passage vers les plateaux Suisses et l'Italie du Nord. Les résultats des analyses engagées ici indiqueraient ainsi que l'un des grands centres de production de fer brut documenté pour la période, la Puisaye-Pays d'Othe, bien que situé à plusieurs centaines de kilomètres a pu approvisionner en métal cette région. La mise en évidence de cette source d'approvisionnement dans différents lieux témoignerait d'une certaine importance ou régularité de ces flux d'échanges dans le temps. Les datations disponibles sur certains des objets provenant de Puisaye-Pays d'Othe le confirment. Ainsi, des demi-produits datés entre le VIII<sup>e</sup>-V<sup>e</sup> s. av. n.è. (par exemple à Saint Thiébaud ou Champdivers), du V<sup>e</sup> s. av. n.è. (Bragny-sur-Saône), tout comme des objets datés entre les IV<sup>e</sup>-III<sup>e</sup> av. n.è. (Valempoulières) traduisent le maintien de cet approvisionnement à longue distance sur la longue durée.

À ce stade, l'hypothèse de l'existence de circuits d'échanges différenciés entre « biens de prestige » et produits ferreux ordinaires reste en partie invalidée pour les objets provenant

de Puisaye-Pays d'Othe. En effet, le métal dont sont constitués plusieurs bipyramidés, les *currency-bars* de la Saône-Doubs, du Jura ainsi que les chutes d'élaboration de Bragny-sur-Saône a la même origine, éloignée.

### L'approvisionnement de Vix et de Bragny-sur-Saône

Il peut paraître hasardeux de raisonner sur l'absence de correspondances, étant donné le faible nombre d'artefacts analysés, en regard du nombre d'objets en fer en circulation au sein des habitats de ces périodes. On se contentera à ce stade de pointer l'absence d'approvisionnement commun entre les objets provenant des pôles de Vix et de Bragny-sur-Saône. Est-ce un effet de l'échantillonnage pris en compte ? Ou leur intégration à des réseaux d'approvisionnement différents ? L'exemple de Vix documente néanmoins des approvisionnements diversifiés, avec une répartition des dix-sept masses de métal étudiées dans six clusters distincts (fig. 10), et un objet provenant d'une zone de production située à l'est du Rhin.

Pour Bragny-sur-Saône, l'échantillonnage doit être étoffé. À ce stade de l'étude, deux objets ont une signature chimique compatible avec la Puisaye-Pays d'Othe, et un autre provient peut-être de ce même espace, ce qui illustre un approvisionnement en métal à longue distance. Deux autres objets ont une provenance différente, indéterminée.

La proximité relative entre Vix et la Puisaye-Pays d'Othe permettait d'envisager un approvisionnement en métal privilégié depuis ce secteur. Cette hypothèse n'est pas confirmée à partir des objets analysés. On constate que les logiques de l'approvisionnement en métal semblent échapper ici à la seule proximité géographique, comme c'est le cas aussi pour d'autres agglomérations de ces périodes (Caillaud 2017) ou pour d'autres périodes (Disser *et al.* 2016).

Les résultats acquis ici révèlent ainsi l'insertion des ateliers de ces riches habitats du Premier âge du Fer au sein de différents réseaux d'échanges de la matière première métallique. La question du contrôle des réseaux par les places centrales reste en revanche jusqu'à présent ouverte. S'agit-il d'un contrôle ou non de ces flux à moyenne ou longue distance et/ou d'une maîtrise ou non de la redistribution locale ?

### Conclusion

Les récents développements méthodologiques en archéoméallurgie permettent à présent de disposer d'outils pour appréhender la provenance des objets ferreux. Il s'agit de protocoles d'analyse longs et complexes, qui doivent être appliqués à des corpus d'objets cohérents afin de répondre à des questionnements ciblés.

Ces méthodologies permettent de retracer les premières lignes reliant espaces de production et de consommation au Premier âge du Fer. Le chemin est encore long afin de restituer l'ensemble du foisonnement de ces échanges pour cette période. Si les demi-produits ont été jusqu'à présents étudiés de manière privilégiée pour appréhender ces questions, il semble à présent nécessaire d'étendre et de multiplier ces approches à partir de l'analyse des déchets de production retrouvés sur les ateliers implantés dans les places centrales de ces périodes.

La question de l'acquisition de données de référence sur les espaces de production est également centrale. La multiplication des lieux de production du fer brut, particulièrement perceptible pour la période du Hallstatt D3-LTA, invite ainsi à systématiser l'analyse chimique des scories de réduction, quelle que soit l'importance des ateliers fouillés. La mise en commun et le partage de ces données de référence paraissent également indispensables au développement de ces approches.

## Bibliographie

- Bauvais 2007. Bauvais S., *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 *et al.* 2018. Bauvais S., Disser A., Dillmann P., La métallurgie du fer à l'âge du Fer dans le bassin versant du Crould : organisation des productions et études de provenance. In Touquet Laporte-Cassagne C. dir., *Les sites ruraux du Second âge du Fer dans le bassin versant du crould en Val d'Oise et ses marges*. 453-506 (Revue Archéologique d'Ile-de-France Suppl. 5).
- Bauvais *et al.* 2021. Bauvais S., Berranger M., Dillmann P., Disser A., Leroy S., Fluzin P., Le fer des principautés : l'économie du fer dans le nord-est de la France au Hallstatt D et à La Tène A1. In Brun P., Chaume B., Sacchetti F. éd., *Vix et le phénomène princier, Actes du colloque de Châtillon-sur-Seine, 2016*, Bordeaux, 219-258 (Ausonius collection DAN@ 5), [en ligne] <https://una-editions.fr/le-fer-des-principautes>.
- Berranger 2014. Berranger M., *Le fer, entre matière première et moyen d'échange, en France du VII<sup>e</sup> au I<sup>er</sup> s. av. J.-C. Approches interdisciplinaires*, Dijon, Éditions Universitaires de Dijon, (Collection art, archéologie, histoire).
- Berranger *et al.* 2017a. Berranger M., Bauvais S., Bouzezzoula M., Leroy S., Disser A., Aubert M., Dillmann P., Fluzin P., Analyse technologique, étude de provenance et datation par le radiocarbone du dépôt de demi-produits ferreux de Durrenentzen (Haut Rhin, France) : une vision renouvelée de l'économie du fer au Premier âge du Fer. *ArchéoSciences*, 41-1, 45-67, [en ligne] <http://archeosciences.revues.org/4883>.
- Berranger *et al.* 2017b. Berranger M., Zaour N., Leroy M., Bauvais S., Cabboi L., Dunikowski C., Organisation des productions sidérurgiques en Gaule (VII<sup>e</sup>-I<sup>er</sup> siècles av. J.-C.) : de la réduction du métal à l'élaboration des demi-produits. In : Marion S., Deffressigne S., Kaurin J., Bataille G., *Production et proto-industrialisation aux âges du Fer, Actes du 39<sup>e</sup> colloque de l'AFEAF, Nancy, 2015*, Bordeaux, 301-334 (Ausonius Mémoires, 47).
- Berranger *et al.* 2019. Berranger M., Dillmann P., Fluzin P., Vega E., Leroy S., Aubert M., Delque-Kolic E., Du produit d'échange à l'objet symbole : de nouvelles données sur les demi-produits de type currency-bar du Val-de-Saône et l'Arc Jurassien. *Gallia – Archéologie des Gaules*, 76/2, 165-189.
- Berranger, Bauvais 2020. Berranger M., Bauvais S., Changements sociétaux et évolution de l'économie du fer du Hallstatt D à La Tène D dans le nord-est de la France. *Bulletin de la Société Préhistorique Française*, 117-4, 641-671.
- Berranger *et al.* 2021. Berranger M., Dillmann P., Fluzin P., Vega E., Leroy S., Aubert M., Delque-Kolic E., A new understanding of the chronology, circulation and function of iron age ferrous semi-products in north-eastern France. *Archaeological and Anthropological Sciences* 13, 102
- Biel 2013. Biel J., Centres de production de l'âge du Fer : l'habitat de La Tène ancienne de Hochdorf (commune d'Eberdingen, Bade-Württemberg). In Krausz S., Colin A., Gruel K., Ralston I., Dechezleprêtre T. dir., *L'âge du fer en Europe - Mélanges offerts à Olivier Buchsensschutz*. Bordeaux, 157-166 (Ausonius Mémoires 32).
- Biellmann 1986. Biellmann P., Les lingots de fer de Durrenentzen. *Annuaire de la société d'histoire de la Hardt et du Ried*, 1.
- Brun, Chaume 2013. Brun P., Chaume B., Une éphémère tentative d'urbanisation en Europe centre-occidentale durant les VI<sup>e</sup> et V<sup>e</sup> siècles av. J.-C. ? *Bulletin de la Société préhistorique française*, 110, 2, 319-349.
- Cabboi *et al.* 2007. Cabboi S., Dunikowski C., Leroy M., Merluzzo P., Les systèmes de production sidérurgique chez les Celtes du Nord de la France. In Milcent P.-Y., *L'économie du fer protohistorique : de la production à la consommation du métal. XXVIII<sup>e</sup> colloque AFEAF, Toulouse, 2004*. Bordeaux, Aquitania Suppl. 14/2, 35-62.
- Caillaud 2017. Caillaud E., *Le fer : réseaux d'échanges et circulation des matières premières métalliques en Aquitaine du VI<sup>e</sup> s. av. J.-C. au VI<sup>e</sup> s. ap. J.-C.*, thèse de doctorat, Université de Poitiers.
- Chaume 2001. Chaume B., *Vix et son territoire à l'âge du fer : fouilles du Mont Lassois et environnement princier*. Montagnac, 2001 (Protohistoire européenne 6).
- Chaume à paraître. Chaume B., *Le complexe aristocratique de Vix/le mont Lassois (fouilles 2011-2017) : synthèses et habitat*, Bordeaux (Ausonius Mémoires).
- Charlton *et al.* 2012. Charlton M.F., Blakelock E., Martinon-Torres M., Young T., Investigating the production provenance of iron artifacts with multivariate methods. *Journal of archaeological Science* 39, 2280-2293.
- Chossenot 1997. Chossenot M., *Recherches sur la Tène moyenne et finale en Champagne. Étude des processus de changement*. (Mémoire de la Société Archéologique Champenoise 12 / Bulletin Suppl. 1).
- Coustures *et al.* 2006. Coustures M.-P., Rico C., Béziat D., Djaoui D., Long L., Domergue C., Tollon F., La provenance des barres de fer romaines des Saintes-Maries-de-la-Mer (Bouches-du-Rhône). Étude archéologique et archéométrique. *Gallia*, 63, 243-261.
- Crew 1994. Crew P., Currency Bars in Great Britain, typology and function. In Mangin M. dir., *La sidérurgie ancienne de l'Est de la France dans son contexte européen, Archéologie et archéométrie, Actes du colloque de Besançon, 1993*. Annales littéraires de l'Université de Besançon, Paris, Les Belles Lettres, 175-176.
- Deffressigne-Tikonoff *et al.* 2002. Deffressigne-Tikonoff S., Tikonoff N., Boulanger-Bouchet K., Chaussé, C., Les gisements d'habitat de la fin du premier âge du fer à Gondreville - Fontenoy-sur-Moselle (54). Le stockage intensif et ses conséquences économiques et sociales. *AMos*, 4, 81-184.
- Desaulty *et al.* 2009. Desaulty A.-M., Dillmann, P., L'Héritier, M., Mariet, C., Gratuze, B., Joron, J.-L., Fluzin, P., Does it come from the Pays de Bray? Examination of an origin hypothesis for the ferrous reinforcements used in French medieval churches using major and trace element analyses. *Journal of Archaeological Science*, 36, (10) 2445-2462.
- Dieudonné-Glad 2017. Dieudonné-Glad N., La production du fer au tournant des VI<sup>e</sup> et V<sup>e</sup> s. a. C. Des changements techniques, économiques et sociaux ? In : Marion S., Deffressigne S., Kaurin J., Bataille G., *Production et proto-industrialisation aux âges du Fer, Actes du 39<sup>e</sup> colloque de l'AFEAF, Nancy, 2015*, Bordeaux, 365-382 (Ausonius Mémoires, 47).

- Dillmann, L'Héritier 2007. Dillmann P., L'Héritier, M., Slag inclusion analyses for studying ferrous alloys employed in French medieval buildings: supply of materials and diffusion of smelting processes. *Journal of Archaeological Science*, 34, 11, 1810-1823.
- Dillmann *et al.* 2015. Dillmann P., Leroy, S., Disser, A., Bauvais, S., Vega, E., Fluzin, P., Dernières avancées autour des études sur la production, la circulation et la datation des métaux ferreux archéologiques. *Les nouvelles de l'archéologie*, 138, 28-34.
- Dillmann *et al.* 2017. Dillmann P., Schwab R., Bauvais S., Brauns M., Disser A., Leroy S., Gassmann G., Fluzin P., Circulation of iron products in the North-Alpine area during the end of the first Iron Age (6th -5th c. BC): A combination of chemical and isotopic approaches, *Journal of Archaeological Science*, 87, 108-124.
- Disser 2014. Disser A., *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.
- Disser *et al.* 2016. Disser A., Dillmann, P., Leroy, M., L'Héritier, M., Bauvais, S., Fluzin, P., Iron supply for the building of Metz cathedral: new methodological development for provenance studies and historical considerations. *Archaeometry*, 58, 493-510.
- Disser *et al.* 2017. Disser A., L'Héritier M., Dillmann P., Arles A., Le chantier de la tour de Mutte à Metz : regards sur la production du fer en Lorraine à la fin du Moyen Age. Fouille de données, analyses prédictives et traitement spatial des données. *Journal de la Société française de Statistique*, 158-2, 13-39
- Disser *et al.* 2020. Disser A., Bauvais S., Dillmann P., Transformations of the chemical signature of slag inclusions throughout experimental refining and first shaping of bloomery iron: new methodological developments. *Journal of Archaeological Science: Reports* 34, part B.
- Dumont 2002. Dumont A., *Les passages à gué de la Grande Saône, approche archéologique et historique d'un espace fluvial (de Verdun sur le Doubs à Lyon)*. Dijon (RAE Suppl. 17)
- Flouest 1993. Flouest J.-L., Activités métallurgiques et commerce avec le monde méditerranéen au V<sup>e</sup> siècle av. J.-C. à Bragny sur-Saône (Saône-et-Loire). In Daubigny A., *Fonctionnement social de l'âge du Fer, opérateurs et hypothèses pour la France*, actes de la table ronde internationale de Lons Le Saunier (Jura), 1990, Lons-le-Saunier, 21-31.
- Flotté, Fuchs 2004. Flotté P., Fuchs M., *La Moselle*. Paris, Académie des inscriptions et Belles Lettres (Carte archéologique de la Gaule 57/1).
- Gassmann, Schäfer 2014. Gassmann G., Schäfer, A., Early iron production in Germany – a short review. In Cech B., Rehren, T. éd. *Early iron in Europe*, Montagnac, 21-32.
- Joan 2003. Joan L., *Le Doubs et le territoire de Belfort*. Paris, Académie des inscriptions et Belles Lettres (Carte archéologique de la Gaule 25-90).
- Kleeman 1981. Kleeman O., Les lingots de fer bipyramidaux courts et épais : les lingots du type Colmar. Etudes offertes à J.-J. Hatt. *Revue archéologique de l'Est*, 32, 109-119.
- Kurz 1995. Kurz G., *Keltische Hort -und Gewässerfunde in Mitteleuropa, deponierung der Latènezeit*. Stuttgart.
- Leroy, Cabboï 2019. Leroy M. et Cabboï, L. éd., *Produire et travailler le fer. Les ateliers de l'est du Bassin parisien du V<sup>e</sup> siècle av. J.-C. au X<sup>e</sup> siècle apr. J.-C.* Paris, Inrap-CNRS (Recherches Archéologiques 16).
- Leroy *et al.* 2012. Leroy S., Cohen, S.X., Verna, C., Gratuze, B., Téreygeol, F., Fluzin, P., Bertrand, L., Dillmann, P., The medieval iron market in Ariège (France). Multidisciplinary analytical approach and multivariate analyses. *Journal of Archaeological Science*, 39, 4, 1080-1093.
- Leroy *et al.* 2014. Leroy S., Dillmann, P., Disser A., L'Héritier M., Bauvais S., Fluzin P., Provenance et circulation des alliages ferreux. In Dillmann P., L. Bellot-Gurlet L. dir., *Circulation et provenance des matériaux dans les sociétés anciennes*, Paris, Editions des archives contemporaines, 73-101.
- Leroy *et al.* 2015a. Leroy S., L'Héritier M., Delqué-Kolic E., Dumoulin J.-P., Moreau C., Dillmann P., Consolidation or initial design? Radiocarbon dating of ancient iron alloys sheds light on the reinforcements of French Gothic Cathedrals. *Journal of Archaeological Science*, 53, 190-201.
- Leroy *et al.* 2015b. Leroy S., Hendrickson M., Vega E., E. Delque-Kolic E., Vega E., Dillmann P., First Direct Dating for the Construction and Modification of the Baphuon Temple Mountain in Angkor, Cambodia. *PLoS ONE* 10, e0141052. doi:10.1371/journal.pone.0141052
- Ludwig, Marzloff 1999. Ludwig R., Marzloff, P., *Der Heiligenberg bei Heidelberg*, Stuttgart.
- Milcent 2006. Milcent P.-Y., Premier âge du Fer médio-atlantique et genèse multipolaire des cultures matérielles laténiennes. In Vitali D., *Celtes et Gaulois, l'Archéologie face à l'Histoire*, 2 : *la Préhistoire des Celtes, Actes de la table ronde de Bologne-Monterenzio, 28-29 mai 2005*. Glux-en-Glenne, Bibracte, 81-105 (Bibracte 12/2).
- Milcent 2017. Milcent P.-Y., Valeurs d'usage et d'échange. La dimension prémonétaire des dépôts en Gaule atlantique du XIII<sup>e</sup> au V<sup>e</sup> s. av. J.-C. *Bulletin de la Société Préhistorique Française*, 114, 711-737.
- Modaressi-Terhani 2009. Modaressi-Terhani D., *Untersuchungen zum früheisenzeitlichen Metallhandwerk im westlichen Hallstatt- und Frühlatènegebiet*. Bochumer Forschungen zur ur- und frühgeschichtlichen Archäologie 2 (Rahden/Westf. 2009).
- Olivier 2000. Olivier L., Le «Briquetage de la Seille» (Moselle) : nouvelles recherches sur une exploitation proto-industrielle du sel à l'âge du Fer. *Antiquités Nationales*, 32, 141-169.
- Schäfer 2014. Schäfer A., Early iron production in the Central German Hinterlands. Current research in the Lahn Valley at Wetzlar-Dalheim (Lahn-Dill District, Hessen). In Cech B., Rehren, T. éd. *Early iron in Europe*, Montagnac, 33-42.
- Schwab *et al.* 2006. Schwab R., Heger, D., Höppner, B. et Pernicka, E., The provenance of iron artefacts from Manching: a multi-technique approach, *Archaeometry*, 48, 3, 433-452.
- Stöllner *et al.* 2020. Stöllner T., Garner J., Zeiler M., The Siegerland as a mining district of the Iron Age: Results of a long term project. Brumlich M., Lehnhardt E., Meyer M. eds., *The coming of Iron. The beginnings of Iron Smelting in Central Europe, Actes du Colloque International Freie Universität de Berlin, 2017*, VML, Rahden/West., 95-126.
- Zaour 2021. Zaour N., *La métallurgie du fer en Normandie et ses marges de l'âge du Fer au Moyen-âge : approches interdisciplinaires ; archéologiques et archéométriques*, thèse de doctorat, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard.
- Zehner 1998. Zehner M., *Haut Rhin*. Paris, Académie des inscriptions et Belles Lettres, 130 (Carte Archéologique de la Gaule 68).

---

## Auteurs

Marion Berranger, Laboratoire Métallurgies et Cultures, IRAMAT, CNRS, UTBM, Belfort, France ; marion.berranger@utbm.fr

Sylvain Bauvais, Laboratoire archéomatériaux et prévision de l'altération – NIMBE, IRAMAT, CEA, CNRS, Université Paris Saclay, CEA Saclay Gif-sur-Yvette, France ; sylvain.bauvais@cea.fr

Alexandre Disser, Laboratoire archéomatériaux et prévision de l'altération – NIMBE, IRAMAT, CEA, CNRS, Université Paris Saclay, CEA Saclay Gif-sur-Yvette, France ; alexandre.disser@cea.fr

Enrique Vega, Laboratoire archéomatériaux et prévision de l'altération – NIMBE, IRAMAT, CEA, CNRS, Université Paris Saclay, CEA Saclay Gif-sur-Yvette, France ; philippe.dillmann@cea.fr

Philippe Dillmann, Laboratoire archéomatériaux et prévision de l'altération – NIMBE, IRAMAT, CEA, CNRS, Université Paris Saclay, CEA Saclay Gif-sur-Yvette, France ; enrique.vega@cea.fr

## Résumé

Dans l'espace nord-alpin, les premiers temps du développement de la sidérurgie sont caractérisés par la multiplication de zones de production de fer brut d'importances inégales, ainsi que par la circulation de volumes de métal significatifs, particulièrement sous la forme de demi-produits de fer. Plusieurs questions sont alors centrales lorsque l'on considère les échanges de ces produits ferreux : à quelle échelle circulent les matières premières métalliques ? La production de fer brute est-elle concentrée ou dispersée ? Qui contrôle ces échanges ?

Afin de tenter d'aborder ces questionnements, cet article présente les méthodologies développées depuis plusieurs années dans le domaine des études de provenance, et basées sur l'étude des filiations minerai-scories-objets en métal. Ces méthodes ont été appliquées à un corpus, inédit par son ampleur, d'une soixantaine d'objets du Hallstatt D - La Tène A dont la signature chimique a été comparée avec six espaces de réduction contemporains. Les résultats de ces analyses permettent de proposer des provenances potentielles, et de poser ainsi les premiers jalons d'une restitution précise des circuits d'échanges en métallurgie.

## Abstract

In the northern Alpine region, the early development of the iron and steel industry was characterised by the multiplication of smelting production zones of differing importance and by the circulation of significant volumes of metal, particularly in the form of semi-finished iron products. Several questions are therefore central when considering the trade in these ferrous products: how far did metallic raw materials circulate? Was the production of iron concentrated or dispersed? Who controlled these exchanges? In an attempt to address these questions, this article presents the methodologies developed over the last few years in the field of provenance studies, based on the study of ore-slag-metal filiations. These methods were applied to a corpus, of an unprecedented size for the period, of some sixty Hallstatt D/La Tène A objects whose chemical signature was compared with six contemporary smelting spaces. The results of these analyses make it possible to propose potential provenances in the objective to reconstruct iron metal exchange circuits.