



*Normes et variabilités au sein de la culture matérielle  
des sociétés de l'âge du Bronze*

Actes de la journée thématique de la Société préhistorique française  
Organisée avec l'Association pour la promotion des recherches sur l'âge du Bronze  
Dijon, 15 juin 2013

Textes publiés sous la direction de Claude MORDANT et Stefan WIRTH  
(Séances de la Société préhistorique française, 10), p. 19-31  
[www.prehistoire.org](http://www.prehistoire.org)

ISSN : 2263-3847 – ISBN : 2-913745-2-913745-70-9

## Productions en série vers 1500 avant notre ère

### Des règles de fabrication au Bronze moyen entre la Manche et les Alpes à la lumière d'une étude morphométrique

Maréva GABILLOT, Fabrice MONNA, Paul ALIBERT, Benjamin BOHARD,  
Estelle Camizuli, Cyril-Hugues DOMMERGUES, Anthony DUMONTET, Benoît FOREL,  
Sylvain GERBER, Ahmed JEBRANE, Rémi LAFFONT, Nicolas NAVARRO,  
Marie SPECHT et Carmela CHATEAU

**Résumé :** Parmi les productions métalliques connues de l'âge du Bronze en Europe, certaines sont considérées comme des productions en série et sont nommées comme telles. Il s'agit en particulier des lames de haches à talon du Bronze moyen au milieu du deuxième millénaire avant notre ère, produites et utilisées massivement en Europe occidentale. Ces objets sont le plus souvent retrouvés en contexte de dépôt, c'est-à-dire qu'ils ont été retirés du circuit de production, qu'ils ont échappé à un éventuel recyclage, puis ont été volontairement rassemblés et enfouis sous terre. On les retrouve entiers, bruts ou prêts à l'emploi. Ils forment des ensembles homogènes de quelques objets ou de plusieurs dizaines, voire de centaines de pièces. De tels ensembles ont d'emblée suscité de nombreuses questions d'interprétation mais de toute évidence, les artisans bronziers protohistoriques ont cherché à reproduire à l'identique les modèles qu'ils avaient conçus. Une simple observation macroscopique montre une recherche des mêmes formes et des mêmes décors, ce qui donne souvent l'impression d'une grande homogénéité de la production de cette période. Il existe même de nombreux exemples de lames de haches dont on peut affirmer qu'elles ont été produites dans le même moule.

Pourtant, si l'on examine la production d'un type dans son ensemble, c'est-à-dire tous les exemplaires considérés comme appartenant à ce même type, il existe, même à l'œil nu, des disparités – notamment de forme – assez importantes. La question est alors de savoir dans quelle mesure les types identifiés à l'œil nu sont réellement cohérents, autrement dit de mesurer le degré de précision dans la reproduction à l'identique des objets si nombreux et ce, au sein d'un territoire très vaste (plusieurs milliers de km<sup>2</sup>). Au-delà de cette question, il s'agit de comprendre les processus de fabrication des objets métalliques au milieu du deuxième millénaire avant notre ère, entre la Manche et les Alpes.

Pour répondre à cette problématique, l'observation macroscopique ne suffisant plus, nous nous sommes attachés à mettre en œuvre des méthodes issues des sciences du vivant, qui utilisent depuis longtemps des outils et des analyses mathématiques permettant de comparer des populations entre elles à partir des formes des individus qui les composent. Jusqu'à présent, nous avons sélectionné deux méthodes principales : la transformée en cosinus discrète (TCD) et les polynômes orthogonaux. L'emploi de ces techniques d'analyse nous permet de quantifier ce que l'on observe à l'œil nu. Ces études ont tout d'abord montré que pour une même famille d'objets, ici les lames de haches dites « à talon », les deux types différents – distingués par leur répartition géographique (type normand et type breton) – avaient une réelle validité statistique en termes de forme, avec toutefois un chevauchement dans l'espace morphométrique. Ce fait prouve que les populations protohistoriques avaient conscience de leur appartenance territoriale, ici la péninsule armoricaine (type dit « breton ») et la vallée de la Seine (type dit « normand ») et qu'elles cherchaient à reproduire un modèle établi. Ces méthodes statistiques permettent également de quantifier la variabilité de forme présente dans chacun des types ; on voit donc bien que l'important est de se rapprocher d'une forme qui porte une signification spatiale et donc culturelle, même s'il ne s'agit pas d'exactes reproductions. Dès lors que l'on s'éloigne des zones de plus grande concentration géographique, on trouve des exemplaires qui ont l'aspect des modèles standards, mais qui se retrouvent en périphérie des espaces morphométriques formés par ces derniers. C'est alors que se pose la question de l'existence de productions locales d'imitations (et de transfert de technologie) dans les secteurs qui ne sont pas censés être des pôles majeurs de fabrication. Ainsi, à travers l'exemple des productions métalliques de haches, la règle de fabrication semble résider dans la volonté de se rapprocher au maximum d'un modèle de référence, sans pour autant que l'imitation soit forcément parfaite. Le degré de conformité ne semble pas être la notion la plus importante, tant que, à l'œil nu, les objets se ressemblent.

**Mots-clefs :** Bronze moyen, production métallique, morphométrie, fabrication en série, imitations.

*Serial production circa 1500 BC: manufacturing rules in the Middle Bronze Age, from the English Channel to the Alps, in the light of geometric morphometrics*

**Abstract:** Some European Bronze Age objects were produced by what has been described as serial metalworking. One particular example is the Middle Bronze Age palstave, massively produced and used in Western Europe during the mid-second millennium BC. These artefacts were often voluntarily buried together in hoards, meaning they were removed from the production network, thus avoiding any recycling. They are found intact, either as rough castings or ready for use. These homogeneous objects are grouped in sets of several items, or in tens, or even in hundreds. Such discoveries have immediately led to numerous questions as to the possible interpretation of this behaviour. It is clear that prehistoric craftsmen must have been seeking to reproduce the models they had designed, as faithfully as possible. Macroscopic observations reveal a quest for the same general shape and ornamentation, suggesting great homogeneity in production during this period. Many examples have been found of palstaves that were produced from exactly the same mould.

Considering the entire production as a whole, and regarding all palstaves as belonging to the same type, some disparities are nevertheless visible, even to the naked eye, particularly with regard to shape. The question is therefore to discover what degree of consistency exists among types usually identified only with the naked eye. It becomes necessary to measure the degree of determination required to duplicate so many objects over such a vast territory (up to several thousands of km<sup>2</sup>). The overarching question is to understand how the production of metallic objects was organised during the mid-second millennium BC, from the English Channel to the Alps.

Macroscopic observations are no longer adequate to answer such questions. It has become necessary to concentrate on methodological techniques commonly used in the life sciences. Mathematical analysis systems are indeed capable of discriminating between populations according to shape. So far, two methods have been selected: 1) the Discrete Cosine Transform (DCT) and 2) orthogonal polynomials. These analysis techniques were used to translate naked eye observations into mathematical expressions. The two typological groups considered in these studies are the Breton type and the Norman type, named after their areas of highest discovery density. Mathematical analysis confirmed the statistical validity of these two typological groups, but with an overlap in the morphometric space. This result proves that each group was seeking to reproduce a specific model, and also confirms that these prehistoric populations were aware of their territorial affiliation: 1) the Breton peninsula, for the Breton type and 2) the Seine Valley, for the Norman type. These statistical methods also make it possible to quantify the variability present in each type. Shape thus acquires a geographic identity, giving rise to a cultural identification, even if the objects differ somewhat from the original model.

As the distance from the two high discovery density zones increases, some palstaves presenting a visual similarity to standard models are in fact mathematically identified as outliers, distant from the centre of the morphospace. This result raises the question of possible local copies, or even imitations, in areas outside the two high discovery density zones, taken to be the two major manufacturing centres. To conclude, this example of prehistoric metal production illustrates that the rule in manufacturing seems to be the desire to get ever closer to a reference model, but that all copies do not have to be perfect.

The degree of congruence does not seem to be the most important aspect, as long as the objects appear similar to the naked eye.

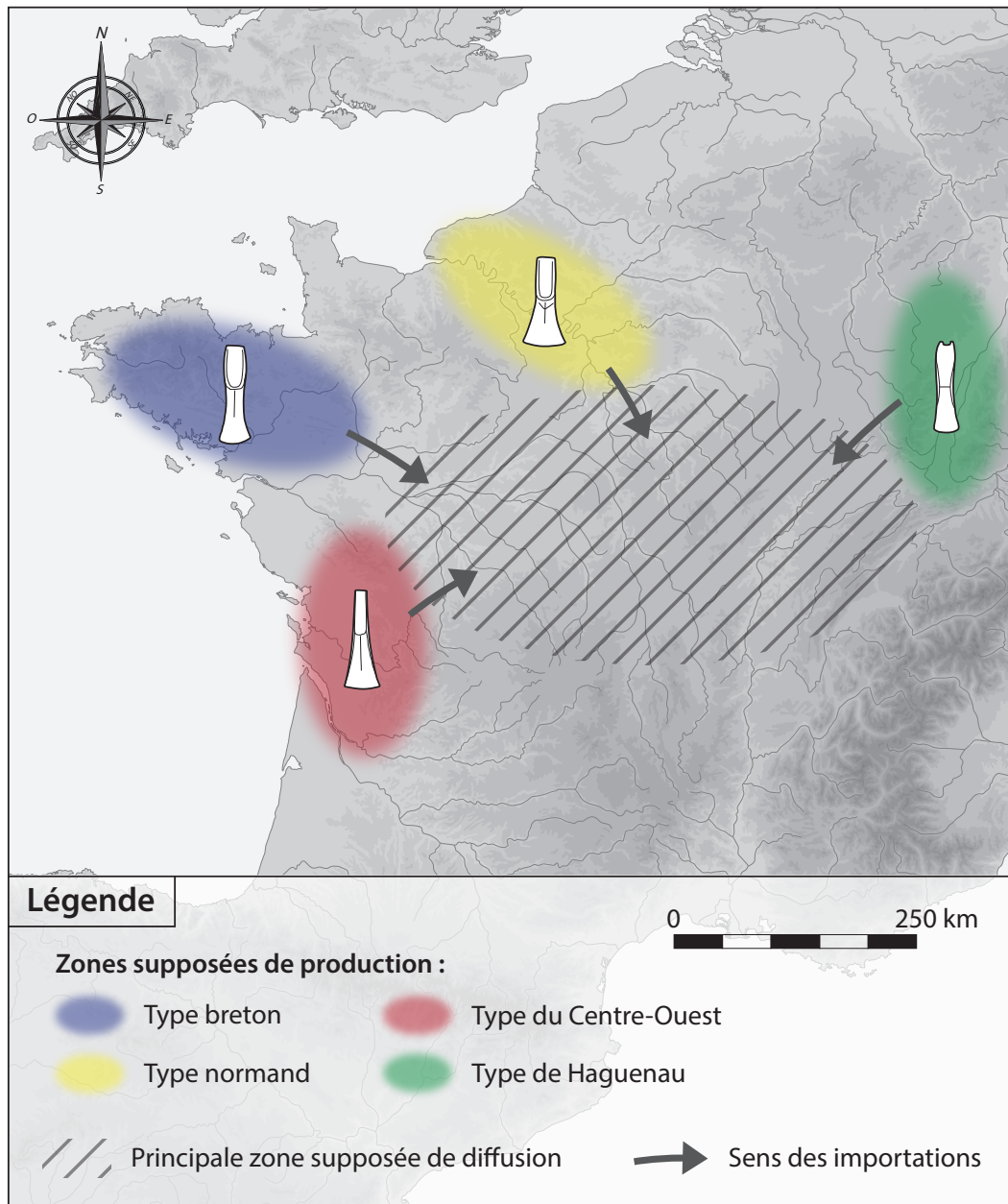
**Keywords:** Middle Bronze Age, metal production, geometric morphometrics, serial production, copies and imitations.

*In memoriam Jacques Briard*

**A**U BRONZE MOYEN en Europe occidentale, les grandes séries de haches à talon retrouvées dans les dépôts, seules ou accompagnées par d'autres familles d'objets, constituent l'un des marqueurs culturels forts pour cette période. Elles ont très tôt été interprétées comme des productions en série (Briard, 1965; Verney et Verron, 1996), tant les objets se ressemblent de prime abord. On retrouve même des exemplaires fabriqués dans le même moule et qui sont donc strictement identiques (Roussot, 1983; Verney, 1991).

Dans toute l'Europe occidentale, un type de haches spécifique à chaque région peut être identifié; chacun de ces types appartenant à la grande famille des haches à talon (Briard et Verron, 1976). Il semble donc admis que vers 1500 avant notre ère, la plupart des communautés humaines se reconnaissent dans le même usage des haches à talon. Entre la Manche et les Alpes, cinq grands types sont reconnus : breton, normand, Centre-Ouest, Haguenau, Rhin moyen (Briard et Verron, 1976). Les dénominations de ces types correspondent aux aires de plus grande concentration de découvertes des objets, zones qui sont considérées comme les lieux de produc-

tion. Chaque type est également présent en périphérie où les individus sont moins nombreux, au sein d'une aire qualifiée de « zone de diffusion ». Chaque type est géographiquement défini à la fois par l'une et l'autre de ces aires. Les études sur la culture matérielle protohistorique reposent sur un postulat, plus ou moins tacitement admis, selon lequel l'organisation de la production métallique est ordonnée en une hiérarchie à deux niveaux : le premier concerne des centres actifs producteurs où sont créés les modèles et le second regroupe des centres passifs et consommateurs où les objets sont importés depuis les secteurs producteurs. Pour l'espace concerné ici, quatre centres producteurs sont identifiés : péninsule armoricaine (type breton), vallée de la Seine (type normand), Poitou (type du Centre-Ouest), moyenne vallée du Rhin (type de Haguenau); l'aire de diffusion, très vaste, se développe de la moyenne vallée de la Loire à la basse vallée de la Seine et à celle du Doubs jusqu'au Jura, ce qui correspond donc approximativement aux actuelles régions Centre, Bourgogne et Franche-Comté (fig. 1). Cette aire de diffusion est considérée comme étant influencée culturellement en grande majorité par les types atlantiques (normand et breton en particulier), en raison du grand nombre d'objets retrouvés (Gabillot *et al.*, 2009).



**Fig. 1** – Carte schématique représentant le point de vue traditionnel de la production métallique au Bronze moyen entre la Manche et les Alpes (d’après Mordant, 1996 ; Gabillot, 1997 ; DAO A. Dumontet).

**Fig. 1** – Simplified map illustrating the classical point of view about Middle Bronze Age metal production from the Channel to the Alps (from Mordant, 1996 ; Gabillot, 1997 ; CAD A. Dumontet).

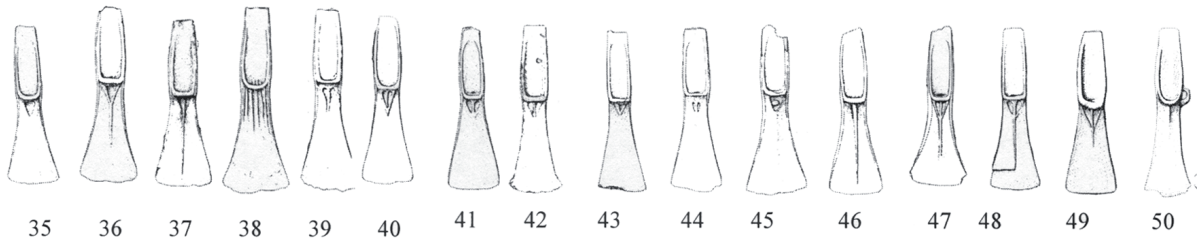
Un examen approfondi sur la base de l’existence des types définis a montré une situation plus complexe. Pour chaque type, il existe ce qu’il est convenu d’appeler des variantes, plus ou moins nombreuses, qui se définissent par rapport à un modèle standard. Des révisions typologiques dans les zones dites « de production », en Bretagne et en Normandie, ont permis d’identifier les variantes de chacun des deux types breton et normand (Gabillot, 2003). La confrontation des variantes présentes dans les deux aires montre de sensibles différences : celles qui sont dénombrées dans l’aire de production ne sont pas toutes présentes dans l’aire de diffusion et quand elles le sont, la proportion de chacune d’entre elles diffère sensible-

ment (fig. 2). D’autre part, l’observation macroscopique détaillée des haches dites « atlantiques », retrouvées dans l’aire dite « de diffusion », montre que leur silhouette présente de nettes dissemblances avec celles provenant de l’aire dite « de production » (Gabillot *et al.*, 2009). On peut donc s’interroger sur le rôle que jouent, en réalité, les présumées aires de production et de diffusion, étant donné que les produits, *a priori* semblables, apparaissent sensiblement différents dès lors que l’on approfondit l’examen macroscopique.

Cette contribution propose d’aborder la question de l’existence d’une norme ayant présidé à la conception et à la fabrication des objets, et de savoir comment se mani-

feste le respect de cette norme au sein d'un territoire identifié par la présence d'objets qui se ressemblent. L'objectif est donc de comprendre dans quelle mesure les artisans qui ont fabriqué ces objets semblables à nos yeux ont eu réellement

la volonté de les reproduire à l'identique. Pour cela, il est nécessaire de se placer en amont de la chaîne opératoire, à un stade de conception des objets, avant même la fabrication du moule qui servira à l'obtention de l'objet attendu.



35

36

37

38

39

40

41

42

43

44

45

46

47

48

49

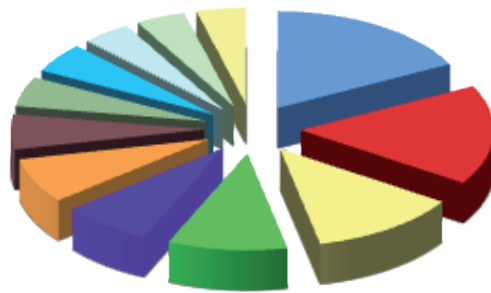
50

■ T37-39 ■ T47 ■ T41

■ T35 ■ T40 ■ T36

■ T50 ■ T44 ■ T49

■ T43 ■ T91 ■ T45



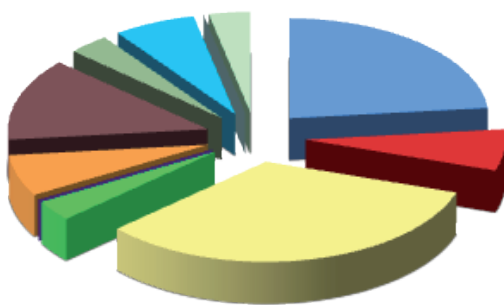
a

■ T37-39 ■ T47 ■ T41

■ T35 ■ T40 ■ T36

■ T50 ■ T44 ■ T49

■ T43 ■ T91 ■ T45



b

**Fig. 2** – Comparaison entre la proportion de chaque variante du type normand (GabilLOT, 2003, pl. 140) présent dans la zone (a) dite « de production », ici la Normandie et celle (b) dite « de diffusion », ici la Bourgogne (CAO M. GabilLOT).

**Fig. 2** – Comparison of the proportion of each variant of the Norman type found (a) in the supposed Normandy production zone, and (b) in the supposed Burgundy diffusion zone (CAO M. GabilLOT).

## MATÉRIEL ET MÉTHODE

### Corpus

Le corpus choisi pour cette démonstration concerne 319 haches à talon bretonnes et 310 normandes appartenant à deux des grands types de France du Nord-Ouest. Ces exemplaires proviennent de dépôts et trouvailles isolées. Ce corpus figure dans la synthèse de M. Gabillot (2003) et la documentation rassemblée dans ce volume a servi de base aux études décrites ci-après.

### Morphométrie et archéologie

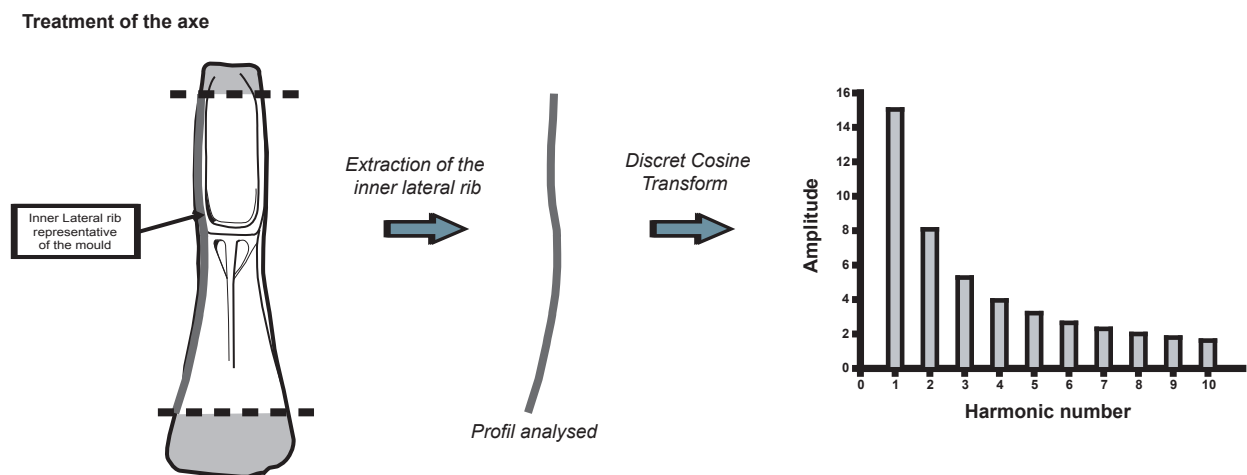
Pour répondre aux objectifs énoncés, il faut dépasser l'observation macroscopique, qui permet d'enregistrer toutes les informations que le cerveau humain peut distinguer à la fois, ce qui correspond finalement à un nombre assez restreint d'éléments. Pour aller plus loin que le constat macroscopique, qui aboutit aux nomenclatures typologiques éprouvées, il faut pouvoir comparer un très grand nombre d'objets simultanément ; cette comparaison à large échelle impose le choix d'un critère pouvant être utilisé de manière systématique. Nous nous sommes donc concentrés sur la silhouette des objets, indépendamment de la taille ; le décor n'ayant pas été pris en compte ici. Une vaste étude comparative de ces conformations (*i. e.* la forme d'un objet sans sa taille) a donc été entreprise en utilisant les approches de la morphométrie géométrique. Ces dernières sont employées dans d'autres disciplines pour distinguer entre elles des espèces ou des populations actuelles ou fossiles : l'emprunt de ces techniques d'analyses a semblé approprié, bien qu'il s'agisse de populations d'objets, certes inertes, mais qui traduisent des intentions conceptuelles des artisans bronziers.

En archéologie, l'emploi de ces techniques constitue d'abord une recherche méthodologique dont le but est de trouver le meilleur moyen de comparer des formes entre elles. Cela suppose de décomposer chaque forme, de la caractériser pour la décrire, afin ensuite de la comparer à une multitude d'autres décomposées de la même manière. Il s'agit ainsi de prendre en compte le critère de forme dans son ensemble et non plus seulement des critères arbitrairement choisis comme la longueur ou la largeur. En effet, ces dimensions ne sont pas pleinement satisfaisantes pour comparer des formes entre elles, puisqu'elles sont les résultantes de tous les gestes qui ont conduit l'objet à son état actuel et qu'elles s'écartent des données primaires liées à la conception initiale de la pièce par l'artisan. La longueur d'un objet, par exemple, est relative à sa durée d'utilisation, ce qui nous éloigne de l'objectif de base qui est l'évaluation d'une norme dans un système de production. En d'autres termes, ce que l'on doit caractériser par la mesure, c'est la forme conçue initialement.

Il nous a donc fallu tout d'abord trouver le meilleur descripteur archéologique ; après plusieurs centaines d'observations macroscopiques et en prenant en compte les contraintes techniques de la fonte, nous avons estimé qu'il s'agissait de ce que nous avons appelé « l'arête faciale interne » sur la longueur non retouchée de la lame (fig. 3).

### Méthode morphométrique par DCT (discrete cosine transform)

Deux méthodes différentes ont été employées. En premier lieu, nous avons adapté à notre sujet une technique d'analyse utilisée à l'origine pour différencier des espèces d'ammonites (Dommergues *et al.*, 2006). Il s'agit d'une analyse de contours ouverts, par l'outil mathématique appelé la « transformée en cosinus discrète » – de l'anglais *discrete cosine transform* (DCT ou TCD en français) –, variante de la « transformée de Fourier ». Ce procédé utilise



**Fig. 3** – Schéma de l'extraction du descripteur archéologique (arête latérale interne de la hache), de sa décomposition par la DCT et représentation du spectre d'amplitude (d'après Forel *et al.*, 2009).

**Fig. 3** – Extraction of the inner lateral rib from the archaeological documentation available: decomposition by DCT and representation as an amplitude spectrum (from Forel *et al.*, 2009).

le principe selon lequel n'importe quelle courbe peut être décomposée en une somme infinie de fonctions trigonométriques ; chacune de ces fonctions peut être caractérisée par une amplitude, qui définit une harmonique (fig. 3). La somme de ces harmoniques est représentée sous la forme d'un spectre d'amplitude. Ici, chaque arête interne de hache va être traitée comme une courbe caractérisée par ses amplitudes. Une première étape consiste à déterminer le nombre minimal d'harmoniques nécessaires pour décrire un individu, ici la hache, sans perte notable d'information. Dans le cas présent, huit harmoniques suffisent, [l'arête interne de chaque hache étant une forme relativement simple. La comparaison des amplitudes décrivant les individus est utilisée par la suite comme variables de formes pour l'analyse statistique (Forel *et al.*, 2009).

### Méthode morphométrique par les polynômes orthogonaux de Legendre

Les courbes sont obtenues de façon identique. La seule différence réside dans le mode de traitement de ces courbes, qui sont ici décrites par des fonctions polynomiales particulières : les polynômes orthogonaux de Legendre. De la même façon que pour la TCD, on détermine le nombre de coefficients nécessaires pour décrire la courbe initiale (fig. 4). Ici, quatre coefficients sont nécessaires (Monna *et al.*, 2013). Ces coefficients sont ensuite utilisés pour décrire les formes et comparer les individus entre eux.

### L'espace morphométrique obtenu

On obtient un tableau (fig. 5) où chaque individu est désigné par un code (première colonne) et défini par un certain nombre de variables numériques : les coefficients. À partir des coefficients descripteurs, on obtient un nuage de points (l'espace morphométrique) par analyse multivariée, l'analyse en composante principale (ACP). Celle-ci consiste à transformer des variables liées entre elles en

de nouvelles variables *décorrélées* les unes des autres : les composantes principales. L'ACP permet de résumer l'ensemble de la variation des individus dans ces composantes principales. En général, quelques composantes résument l'essentiel de la variation initiale. Cela permet de rendre l'information plus lisible. Cette technique permet de visualiser graphiquement la proximité morphologique des individus. Ces individus sont ici codés, selon leur appartenance typologique, par des symboles graphiques (fig. 6), indépendamment de leur provenance géographique. Afin de tester l'espace obtenu en termes d'erreur de mesure, il faut effectuer des tests de reproductibilité ; en effet, il faut s'assurer que le même dessin réalisé par deux personnes différentes ou par une même personne à deux moments différents reste semblable et ne modifie pas l'espace morphométrique de façon notable. Il faut aussi vérifier que la mesure de ces dessins varie peu, pour deux différents dessins de la même hache et pour le même dessin mesuré deux fois. Ces tests montrent que la reproductibilité est bonne (Forel *et al.*, 2009).

## RÉSULTATS

### L'espace morphométrique des haches à talon bretonnes et normandes

Le nuage de points de l'ACP, pris dans sa totalité, présente une cohérence certaine (fig. 6). Du point de vue archéologique, cela signifie que la « famille » des haches à talon de France nord-occidentale existe bel et bien. Par ailleurs, on voit que les deux populations, haches bretonnes et haches normandes découvertes en Bretagne ou en Normandie, se chevauchent, ce qui signifie qu'elles sont proches l'une de l'autre. En d'autres termes, les haches bretonnes ressemblent à leurs homologues normands. À ce stade de la réflexion, on peut donc interpréter ce premier résultat

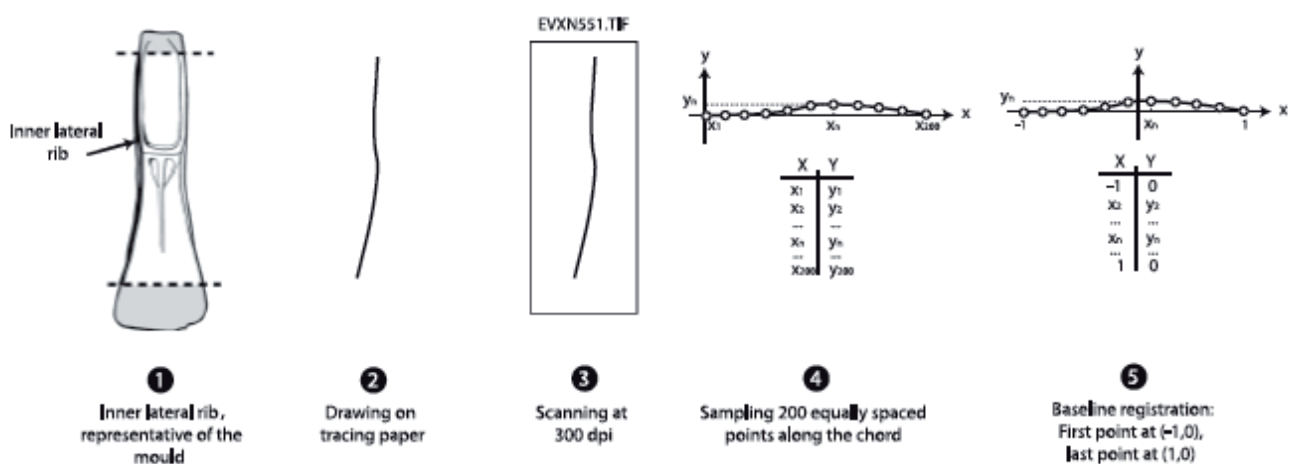


Fig. 4 – Schéma de l'extraction du descripteur archéologique et de sa décomposition en une suite polynômiale (d'après Monna *et al.*, 2013).

Fig. 4 – Data processing. Extraction of the inner lateral rib from the archaeological documentation available, drawing, scanning, sampling, baseline registration, and mathematical treatment (from Monna *et al.*, 2013).

Nom de l'individu (code) ; ici = chaque hache	Éventuellement, code d'une caractéristique, ici typologique	Variable 1	Variable 2	Variable 3
XY123	B (pour type breton)			
DS159	N (pour type normand)			
QM147				

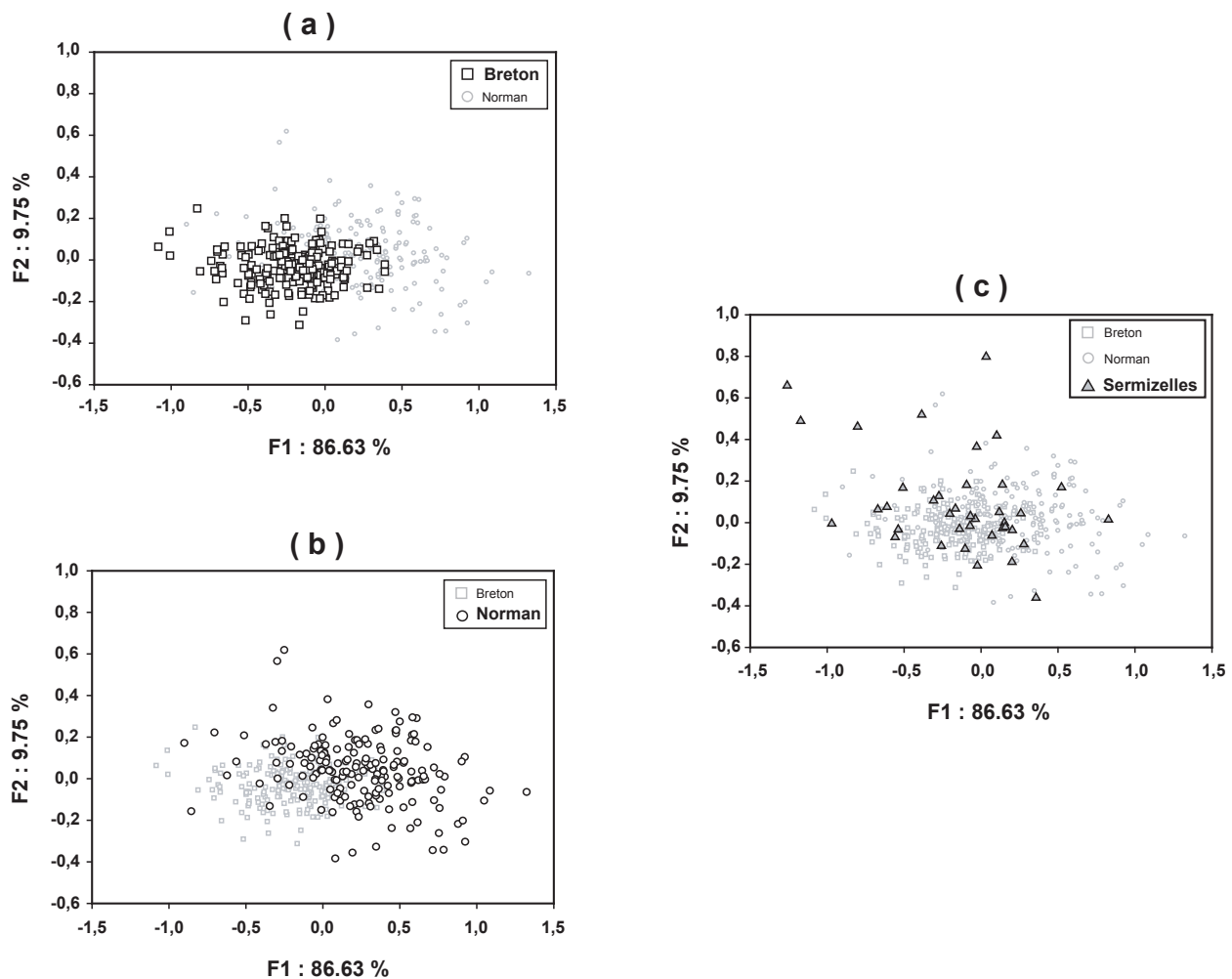
Dans chaque case : valeur chiffrée correspondant aux coefficients de chaque fonction, issus de la décomposition de chaque courbe

**Fig. 5** – Tableau schématique de transformation des données archéologiques en paramètres mathématiques (M. Gabillot).

*Fig. 5* – Schematic processing of archaeological data into mathematical parameters (M. Gabillot).

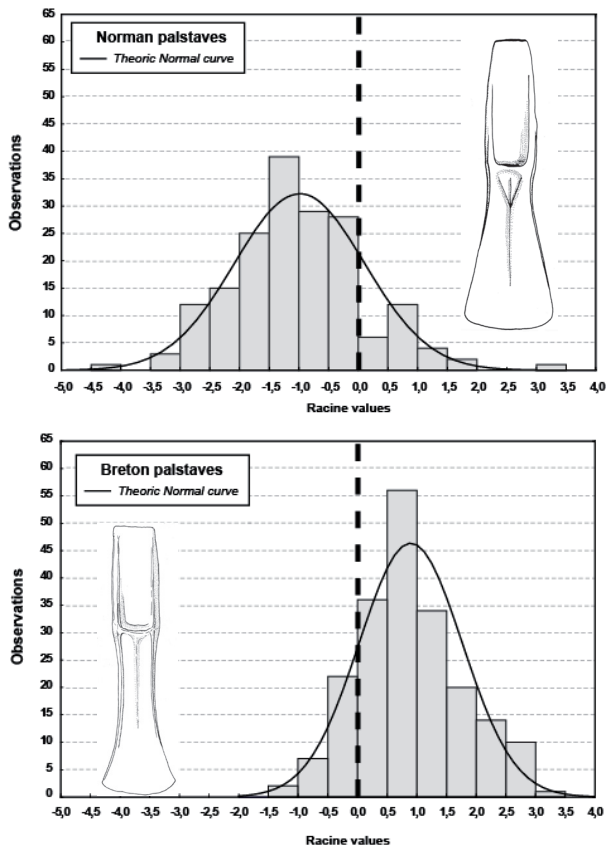
par le fait que cette production de haches suit une certaine convention de forme. En revanche, l'analyse discriminante des deux populations montre qu'elles sont significativement différentes (fig. 7), bien qu'elles aient une intersection non nulle. Ces premiers résultats ne font que confirmer ce que les études typologiques classiques ont montré depuis plusieurs dizaines d'années à partir d'observations macroscopiques. Cependant, à présent, ces faits sont mesurables et il existe un référentiel morphométrique dans lequel on peut introduire d'autres individus et les attribuer typologiquement en cas de doute à l'œil nu. Par ailleurs, il est intéressant de noter que la courbe décrite par l'arête interne des haches à talon constitue un critère suffisant de discrimination entre les deux populations.

À cette étape de l'étude, il est donc clair que des règles de forme des objets ont été établies, puis suivies d'une



**Fig. 6** – Espace morphométrique obtenu pour les deux premiers plans factoriels (F1 et F2), calculés pour l'amplitude des sept premiers harmoniques de la DCT. a : haches bretonnes ; b : haches normandes ; c : haches trouvées en Bourgogne. Chaque symbole correspond à un individu. La détermination typologique est basée sur l'observation archéologique d'après les nomenclatures classiques éprouvées (d'après Forel *et al.*, 2009).

*Fig. 6* – Plot of the first factorial planes (F1 vs F2) computed for the amplitude of the first seven DCT harmonics. Each dot corresponds to a separate specimen. Emphasis is given first to the Breton palstaves (a), then to the Norman palstaves (b), and finally to the Sermizelles palstaves (c), projected into the same morphological space. The determination Norman vs Breton is based on the archaeological typology (after Forel *et al.*, 2009).



**Fig. 7** – Distribution des populations normande et bretonne. L'analyse discriminante a été effectuée en prenant en compte les dix amplitudes produites par la DCT pour les 177 haches normandes et les 203 haches bretonnes. Le seuil a volontairement été placé à l'origine (d'après Forel *et al.*, 2009).

**Fig. 7** – Distribution of discriminant scores for Norman and Breton palstaves. The discriminant analysis was computed taking into account the ten harmonic amplitudes produced by the DCT for the 177 Norman palstaves and the 203 Breton palstaves. The threshold was voluntarily set at zero (after Forel *et al.*, 2009).

manière générale mais aussi en fonction de l'implantation géographique. On observe en effet une certaine disparité pour chacune des populations. Dans l'espace morphométrique, la place occupée par les individus est assez large et ne semble pas de la même taille pour chacune des deux populations. Il semble donc qu'il existe une disparité spécifique pour chacune.

### L'espace morphométrique des haches découvertes en Bourgogne

Poursuivons l'examen des résultats avec la projection de haches provenant de Bourgogne et attribuées aux types breton et normand dans l'espace morphométrique précédemment construit. Il s'agit des exemplaires contenus dans les deux dépôts de Sermizelles, Yonne (Mordant, 1988). Les résultats montrent que cette nouvelle population couvre un vaste espace, certains exemplaires étant localisés à l'intérieur de celui formé par les types normand

et breton, mais d'autres étant clairement en périphérie, voire en dehors. La population des haches de Sermizelles occupe donc un espace morphométrique plus grand que celui de l'ensemble des populations de Bretagne et de Normandie.

Cependant, ces observations sont issues seulement de la lecture de l'espace morphométrique construit par ACP. Pour savoir si les populations sont réellement différentes, il faut mesurer leur disparité pour les comparer.

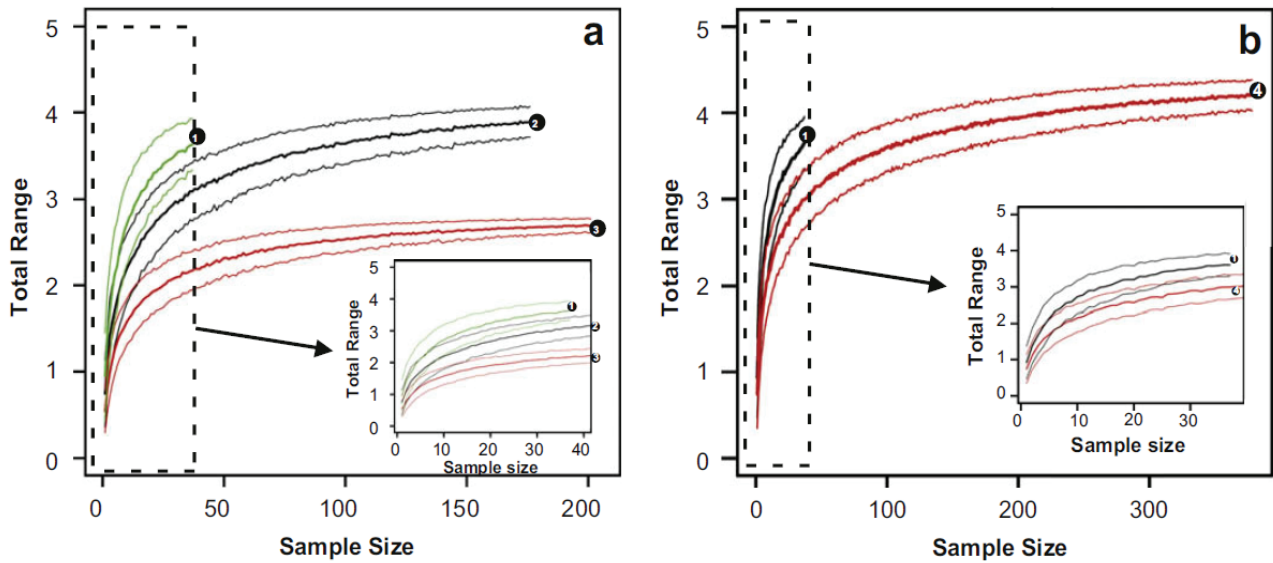
### Mesure de la disparité

Pour réaliser cette mesure, il faudrait que les populations présentent le même effectif; or, ce n'est pas le cas, les exemplaires bourguignons étant bien moins nombreux que leurs équivalents occidentaux, qui ne présentent pas non plus le même effectif. Il est donc nécessaire d'employer une autre procédure statistique pour vérifier que les populations (haches de Bourgogne et ensemble des populations de Bretagne et de Normandie) sont vraiment différentes. Nous avons utilisé une procédure de raréfaction, qui consiste à réduire à un effectif similaire les différents échantillons. Cette procédure a été réalisée via un échantillonnage avec remise (*bootstrap*). Ici, il s'agit d'estimer la variabilité que l'on aurait observée si les trois effectifs breton, normand et de Sermizelles avaient été les mêmes. Ainsi, on peut comparer dans un même graphique les trois populations (fig. 8). Tout d'abord, l'analyse de la disparité à l'intérieur des deux types normand et breton indique des différences en termes de variabilité de forme. Le type normand présente un degré de diversité supérieur à celui du type breton, qui est moins hétérogène. Ce résultat est nouveau car, à l'œil nu, rien n'indiquait *a priori* que les deux populations n'étaient pas aussi homogènes l'une que l'autre.

Par ailleurs, on constate aussi que la disparité de la population de Sermizelles est plus élevée que celle des populations bretonne et normande prises ensemble. Cela pourrait donc signifier qu'au moins une partie de la population des haches de Sermizelles est vraiment différente de celles des deux autres, c'est-à-dire que certaines haches de Sermizelles ne seraient ni bretonnes ni normandes. Pourtant, si on les regarde à nouveau à l'œil nu, ces haches ressemblent beaucoup aux haches normandes et bretonnes, à tel point qu'elles ont été naturellement attribuées à ces types. La confrontation entre l'analyse morphométrique et l'observation macroscopique se heurte donc à un problème car les résultats issus de ces deux raisonnements ne sont pas conformes.

Pour résoudre ce problème, une hypothèse vient naturellement à l'esprit : les haches bourguignonnes seraient, au moins pour une partie d'entre elles, des imitations, des copies, qui ne seraient pas reproduites fidèlement à partir de modèles initiaux. Se pose alors la question de l'identification de ces imitations parmi la population des haches bourguignonnes, c'est-à-dire du seuil à partir duquel on estime que les objets sont des imitations.





**Fig. 8** – a : évolution de la population totale par rapport à celle de l'échantillon calculée par l'usage d'une procédure de raréfaction. 1 : haches à talon de Sermizelles; 2 : haches à talon normandes; 3 : haches à talon bretonnes. (b) Évolution de la population totale par rapport à celle de l'échantillon calculée par l'usage d'une procédure de raréfaction. 1 : haches à talon de Sermizelles; 4 : haches à talon normandes et bretonnes regroupées (Forel *et al.*, 2009).

**Fig. 8** – a: evolution of the total population compared to that of the sample calculated by bootstrap on 1: Sermizelles; 2: Norman; 3: Breton palstaves. b: evolution of the total population compared to that of the sample calculated by bootstrap on 1: Sermizelles; 4: grouped Norman and Breton palstaves (Forel *et al.*, 2009).

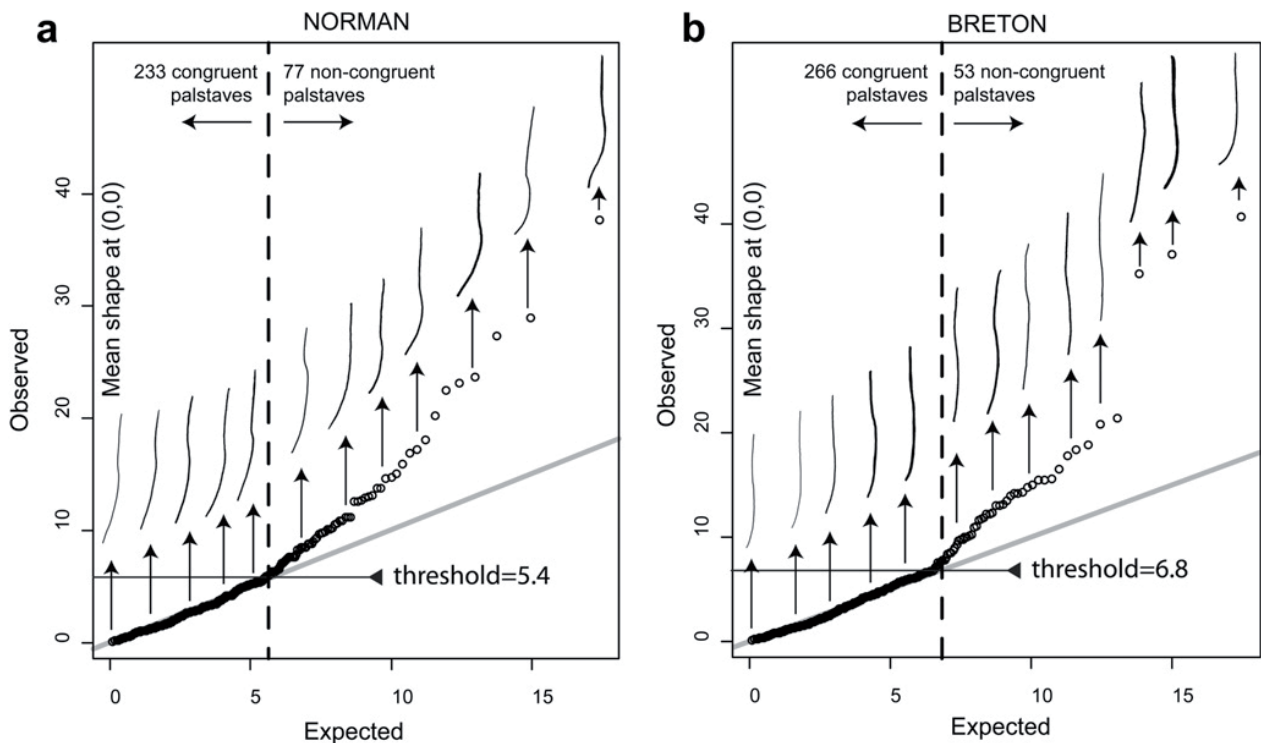
### Mesure de la non-conformité

Là encore, nous avons fait appel à des outils statistiques pour savoir s'il est possible de déterminer un seuil à partir duquel les haches seraient conformes aux modèles et d'autres non. Pour cette deuxième étape, le corpus a été étendu au-delà de la péninsule bretonne et de la Normandie proprement dites. Supposons que la distribution des formes dans chacun des groupes suive une loi normale. Cela signifierait qu'il y a beaucoup d'individus proches de la forme standard et de moins en moins au fur et à mesure que l'on s'éloigne de celle-ci. Une telle distribution peut facilement être traitée à l'aide de la distance de Mahalanobis, confrontée à la loi du  $\chi^2$  (Monna *et al.*, 2013). En d'autres termes, il s'agit de comparer la distribution observée à celle attendue par un modèle basé sur la loi normale. La figure 9, où le modèle est représenté par une droite grise, et les individus par des cercles, nous permet de définir un seuil à partir duquel observation et théorie divergent. Ce seuil sert alors de référence pour séparer les exemplaires conformes de ceux qui ne le sont pas. On obtient deux sous-populations : les objets conformes et les autres, et cela pour chaque type. Bien que les non conformes ressemblent à l'œil nu aux modèles, ils peuvent être interprétés comme des copies. Là encore, la population normande se comporte différemment de la bretonne : le point de divergence (*i. e.* le seuil) est situé plus haut pour les haches bretonnes que pour les haches normandes. Cela signifie qu'il y a relativement plus de haches non conformes dans la famille des haches identifiées comme normandes que dans celle des bretonnes.

### RÉSULTATS ET DISCUSSION

Le fait qu'un seuil existe et qu'on puisse aisément le définir indique que les populations étudiées, ici les haches, sont bien caractérisées par un modèle – qui a lui-même un certain degré de diversité –, mais aussi par d'autres individus qui, à l'œil nu, ressemblent au modèle, plus ou moins fidèlement, mais doivent être exclus de la population dite conforme. Ceci suggère qu'à la période du Bronze moyen, entre la Manche et les Alpes, il existe un contrôle suffisamment fort pour que soient respectés rigoureusement des modèles, mais aussi pour que ces modèles, tellement établis comme étant la règle, soient imités, même de manière approximative. L'existence même de ces copies renforce l'idée selon laquelle le contrôle sur la fabrication des haches est puissant. Par ailleurs, le fait que le nombre de haches non conformes ou de copies soit plus élevé dans une population peut indiquer qu'elle résulte de procédés de production plus diversifiés, que les essais ont été plus nombreux, gage d'un potentiel d'inventivité plus élevé et d'un meilleur degré d'innovation.

En tout état de cause, les deux populations bretonne et normande sont le résultat de systèmes de production différents, ce qui est une nouveauté par rapport à la conception traditionnelle. Il semblerait que les haches à talon normandes procèdent d'une dynamique de production plus ouverte. La plus grande stabilité remarquée dans le modèle breton peut traduire à la fois une plus forte stabilité (contrainte ?) du système, ou au contraire un manque d'innovation.



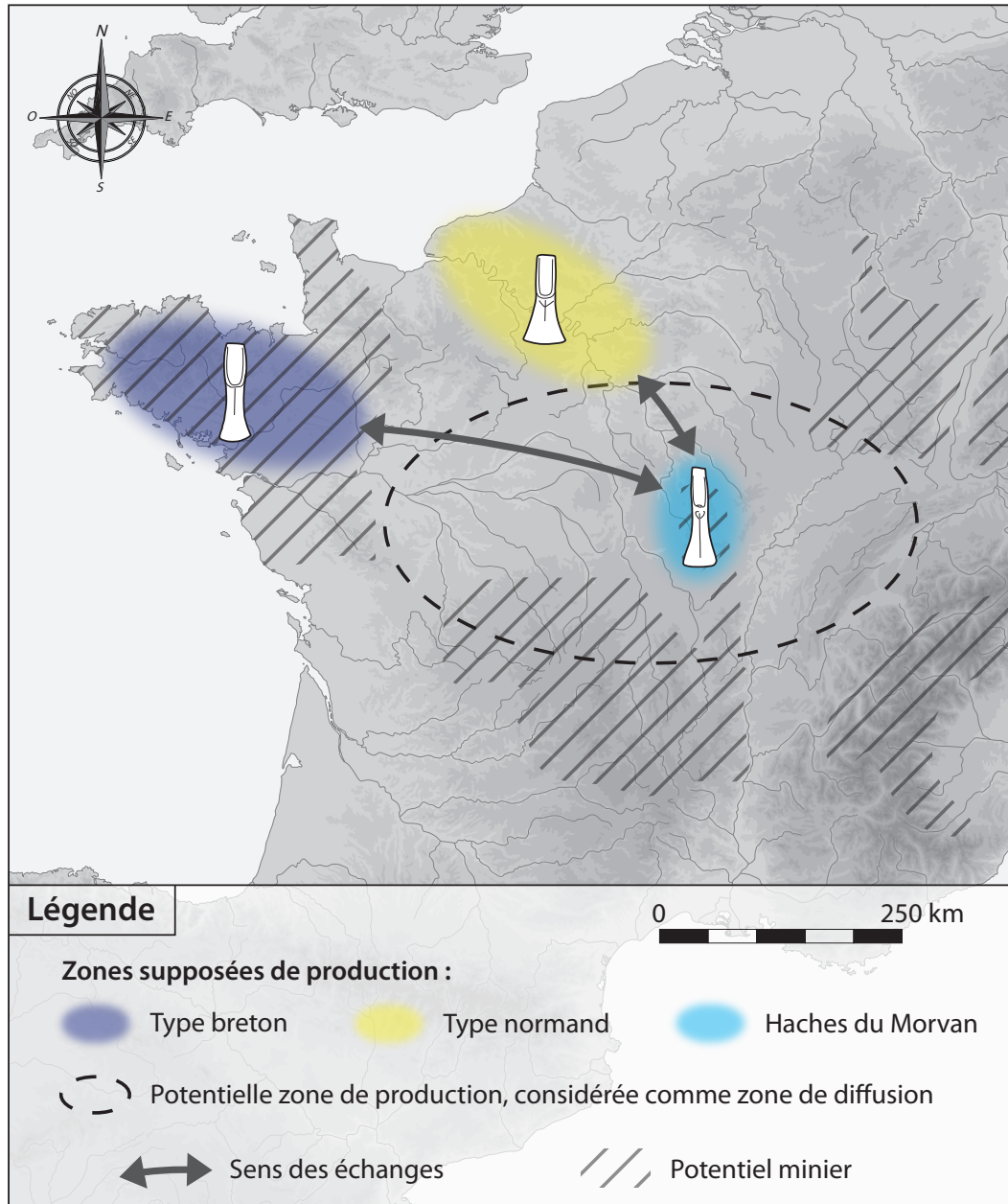
**Fig. 9** – Représentation graphique des populations normande (a) et bretonne (b) observées (séries de cercles) et de la ligne  $x = y$ , correspondant à la conformité avec la distribution normale multivariée. Les valeurs des seuils sont placées à l'endroit où les valeurs observées commencent à diverger des attentes théoriques. Ces seuils séparent les haches en deux catégories : les conformes et les non conformes. Les contours ouverts de certains spécimens sont figurés afin de voir plus clairement la divergence progressive par rapport à la forme « standard » (Monna *et al.*, 2013).

**Fig. 9** – Sample quantiles vs. theoretical quantiles for a  $\chi^2$  distribution with 4 degrees of freedom built on the basis of the squared robust distances for the Norman (a) and Breton (b) groups. The line  $y = 1/4 x$  corresponds to the conformity with multivariate normal distribution. The threshold values are set at the distance where robust distance values start to diverge from theoretical expectations. These thresholds separate the palstaves into two categories: the congruent and non-congruent ones. Open outlines of some specimens are depicted in order to make clearer the progressive divergence from the mean shape (Monna *et al.*, 2013).

En résumé, la cohérence de la famille de haches à talon de France nord-occidentale est validée par l'approche morphométrique. Dans l'ensemble, on peut dire qu'il existe un certain respect des règles de fabrication en ce qui concerne la forme des objets. Ceci suppose un contrôle social suffisamment fort pour que les objets soient reproduits en masse selon un modèle pré-établi dans le temps et l'espace. Cependant, l'espace morphométrique restitué est large, ce qui indique que la variabilité des formes dans chaque type reste forte. Ainsi, ce qui est recherché n'est pas la reproduction exacte d'un modèle mais sa reconnaissance immédiate à l'œil nu. Cette hypothèse est d'autant plus probable que l'on sait par ailleurs que les bronziers de l'époque maîtrisaient aisément le procédé de reproduction à l'identique, avec l'usage de moules permanents (Roussot, 1973 ; Verney, 1991 ; Gabillot, 2001). Le fait que la variabilité soit forte n'est donc pas dû à un manque de savoir technique ; la production doit sembler homogène en première observation. La similarité morphologique stricte se place au second plan. Cela est bien traduit dans l'espace morphométrique construit d'après les mesures prises de manière systématique sur les objets, mais c'est à cette seule condition que l'on peut obtenir ces résultats.

Par ailleurs, on constate des comportements différents selon les types étudiés ; le type normand, qui présente un espace morphométrique plus large, est peut-être soumis à des influences plus variées que le type breton, dont l'occupation de l'espace morphométrique est plus resserrée. Toujours est-il que pour chacun des deux types, des objets conformes à un modèle et d'autres non peuvent être distingués, même s'ils restent comparables à l'œil nu. C'est pour cela que l'on peut proposer l'existence de copies à partir d'un modèle.

Ces études morphométriques ouvrent de nouvelles perspectives. En effet, on peut envisager à ce stade une nouvelle conception de l'organisation de la production métallique au Bronze moyen, au sein du territoire constitué par la localisation des haches bretonnes et normandes, c'est-à-dire entre la Manche et les Alpes. L'existence de plusieurs lieux de production et non pas seulement de deux grands centres situés l'un en Bretagne et l'autre en Normandie est suggérée. Dans cette hypothèse, la Bourgogne a pu jouer un rôle de producteur de ces haches, à partir des ressources minérales disponibles dans le Morvan, pour imiter des modèles morphologiques présents en grande quantité ailleurs (fig. 10). En dehors de l'analyse morphométrique, plusieurs arguments permettent d'étayer



**Fig. 10** – Carte synthétique exprimant un nouvel angle de vue à la lumière de l’analyse morphométrique à travers l’exemple des haches normandes et bretonnes (DAO A. Dumontet).

**Fig. 10** – Schematic map expressing a new point of view in the light of the morphometric analysis of Norman and Breton palstaves (CAD A. Dumontet).

cette proposition. Il s’agit tout d’abord des indices environnementaux d’activités minières et métallurgiques dans le Morvan (Monna *et al.*, 2004), compatibles d’un point de vue chronologique avec cette production de haches à talon. En effet, des signaux de pollution par le plomb ont été mesurés dans la tourbière du Grand-Montarnu à Arleuf, Nièvre (Forel, 2009). Par ailleurs, l’analyse spatiale, corrélée aux mesures de non-conformité, montre que les objets non conformes sont surreprésentés dans les endroits éloignés des prétendues zones de production (Monna *et al.*, 2013, fig. 7). La présence en grand nombre d’objets éloignés d’un modèle-type tendrait à montrer l’existence d’une production locale, identifiable par cette diversité de formes.

Dans tous les cas, ces nouvelles méthodes enrichissent le débat sur les relations entre production et consommation des produits métalliques entre la Manche et les Alpes, lesquelles s’avèrent bien plus complexes que celles liées à la conception traditionnelle du noyau producteur innovant et de la périphérie consommatrice et réceptrice. En guise de réflexion conclusive, on peut proposer de regarder simultanément deux cartes de répartition d’objets : celle des produits finis en silex du Grand-Pressigny (Mallet *et al.*, 2013) et celle des sites ayant livré des haches à talon de type normand (Verney, 1988). Le lieu d’extraction du silex est bien connu par les analyses pétrographiques. Or, l’endroit de plus grande concentration de produits finis

ne correspond pas à cet emplacement en Touraine, mais se situe dans une zone périphérique éloignée de plusieurs centaines de kilomètres. Si l'on regarde la répartition des haches normandes à travers le prisme du modèle de diffusion des objets en silex du Grand-Pressigny, on en déduirait que le lieu de production de ces haches n'est pas la basse vallée de la Seine, mais un lieu situé en Aquitaine, en région Centre ou en Bourgogne. S'il est bien évidemment impossible d'appliquer de la sorte un modèle de diffusion à un autre, il nous semble judicieux de mettre en regard les deux situations afin d'attirer l'attention sur l'interprétation des cartes de répartition des objets en bronze, qui est certainement trop facilement fondée sur l'équation simpliste où le lieu de production correspond à la plus grande concentration de produits finis retrouvés.

L'analyse morphométrique permet de mettre en mesure, au sens mathématique du terme, les témoins du réseau complexe de production entre la Manche et les

Alpes au Bronze moyen. Ce vaste territoire connaît des échanges nombreux dans le domaine de la métallurgie du bronze : procédés de fabrication, matières premières, utilisation de moules, adoption de formes d'objets, etc. L'emploi de formes similaires au sein d'un territoire de plusieurs centaines de kilomètres carrés est un fait bien établi au Bronze moyen ; période durant laquelle la reproductibilité des formes est possible grâce à une grande aptitude au contrôle des paramètres techniques (température de fusion, moules permanents).

**Contribution des auteurs :** Conception du projet : M. G. et F. M. ; typologie : M. G. ; analyses statistiques et mathématiques : B. F., C. D., A. J., F. M. ; morphométrie : P. A., S. G., R. L., F. M., N. N. ; analyse spatiale : E. C., B. B., F. M. ; interprétations et analyses archéologiques : M. G., F. M., E. C., B. F. ; acquisition des données : M. G., B. F., M. S. ; figures de synthèse : M. G., A. D., E. C. ; traduction : C. C.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BRIARD J., VERRON G. (1976) – *Typologie des objets de l'âge du Bronze en France*, III. *Haches*, 1, Paris, Société préhistorique française (Commission du Bronze), 122 p.
- BRIARD J., VERRON G. (1976) – *Typologie des objets de l'âge du Bronze en France*, IV. *Haches*, 2. *Herminettes*, Paris, Société préhistorique française (Commission du Bronze), 90 p.
- DOMMERMUES J.-L., DOMMERMUES C.-H., MEISTER C. (2006) – Exploration of the Oxynoticeratidae Ornamental Morphospace Using the Discrete Cosine Transform (DCT) to Analyze Rib Patterns, *Paleobiology*, 32, 4, p. 628-651.
- FOREL B. (2009) – *La métallurgie des alliages à base de cuivre en Bourgogne et en France orientale à l'âge du Bronze. Approche paléoenvironnementale et étude du mobilier métallique*, thèse de doctorat, université de Bourgogne, Dijon, 203 p.
- FOREL B., GABILLOT M., MONNA F., FOREL S., DOMMERMUES C.-H., GERBER S., DOMMERMUES J.-L., PETIT C., MORDANT C., CHATEAU C. (2009) – Morphometry of Middle Bronze Age Palstaves by Discrete Cosine Transform, *Journal of archaeological Science*, 36, 3, p. 721-729.
- GABILLOT M. (1997) – *Le Bronze moyen en région Centre*, mémoire de maîtrise, université de Bourgogne, Dijon, 2 vol., 269 p.
- GABILLOT M. (2003) – *Dépôts et production métallique du Bronze moyen en France nord-occidentale*, Oxford, Archaeopress (British Archaeological Reports, International Series 1174), 471 p.
- GABILLOT M., FOREL B., NAUDIN A., MONNA F., LOSNO R., PININGRE J.-F., MORDANT C. (2009) – Influences atlantiques dans les productions métalliques en Bourgogne et Franche-Comté au Bronze moyen, in A. Richard, P. Baral, A. Daubigney, G. Kaenel, C. Mordant et J.-F. Piningre (dir.), *L'isthme européen Rhin-Saône-Rhône dans la Protohistoire. Approches nouvelles en hommage à Jacques-Pierre Millotte*, actes du colloque (Besançon, 16-18 octobre 2008), Besançon, Presses universitaires de Franche-Comté (Annales littéraires ; Environnement, sociétés et archéologie), p. 133-144.
- MONNA F., JEBRANE A., GABILLOT M., LAFFONT R., SPECHT M., BOHARD B., CAMIZULI E., CHATEAU C., ALIBERT P. (2013) – Morphometry of Middle Bronze Age Palstaves, Part II. Spatial Distribution of Shapes in Two Typological Groups, Implications for Production and Exportation, *Journal of archaeological Science*, 40, p. 507-516.
- MONNA F., PETIT C., GUILLAUMET J.-P., JOUFFROY-BAPICOT I., BLANCHOT C., DOMINIK J., LOSNO R., RICHARD H., LÉVÊQUE J., CHATEAU C. (2004) – History and Environmental Impact of Mining Activity in Celtic Aeduan Territory Recorded in a Peat Bog (Morvan, France), *Environmental Science and Technology*, 38, 3, p. 657-673.
- MORDANT C. (1996) – Approche de la notion d'atelier de bronzier au Bronze final en Europe moyenne, in J.-P. Mohen (dir.), *La vie préhistorique*, Paris, Société préhistorique française et Dijon, Faton, p. 118-121.
- MORDANT C. (1996) – Sermizelles (Yonne), in M.-P. Koenig, J.-F. Piningre et S. Plouin (dir.), *Il y a 3500 ans... Les tumulus de Haguenau et le Bronze moyen en Europe*, catalogue de l'exposition (Haguenau, 6 avril-30 septembre 1988), Haguenau, Direction des antiquités d'Alsace, p. 35-39.
- ROUSSOT A. (1973) – Les haches en bronze de Thonac (Dordogne), *Bulletin de la Société historique et archéologique du Périgord*, 100, p. 127-134.
- VERNEY A. (1991) – La production en série d'objets métalliques à l'âge du Bronze : les dépôts de La Chapelle-du-Bois-des-Faulx (Eure), in J. Cuisenier (dir.), *Matière et figure*, Paris, La Documentation française (Études et travaux – École du patrimoine, 3), p. 117-135.
- VERNEY A., VERRON G. (1996) – La production en série d'objets métalliques à la fin du Bronze moyen et l'étude des dépôts, in J.-P. Mohen (dir.), *La vie préhistorique*, Paris, Société préhistorique française et Dijon, Faton, p. 222-227.

**Mareva GABILLOT,**  
**Fabrice MONNA,**  
**Benjamin BOHARD,**  
**Anthony DUMONTET,**  
**Benoît FOREL,**  
**Marie SPECHT**  
UMR 6298 ArTeHiS,  
université de Bourgogne,  
6, bd Gabriel,  
21000 Dijon  
mareva.gabillot@u-bourgogne.fr  
fabrice.monna@u-bourgogne.fr  
anthony.dumontet@u-bourgogne.fr

**Paul ALIBERT,**  
**Cyril-Hugues DOMMERMUES**  
**Rémi LAFFONT,**  
**Nicolas NAVARRO**  
UMR 6282 Biogéosciences,  
université de Bourgogne,  
6, bd Gabriel,  
21000 Dijon  
paul.alibert@u-bourgogne.fr  
cyril.dommergues@gmail.com  
remi.laffont@u-bourgogne.fr  
nicolas.navarro@u-bourgogne.fr

**Estelle CAMIZULI**  
EPHE,  
UMR 7041 ArScAn (Pres Hesam),  
Maison Archéologie & Ethnologie,  
René-Ginouvès,  
21, allée de l'Université,  
92023 Nanterre cedex  
estelle.camizuli@ephe.sorbonne.fr

**Sylvain GERBER**  
The Biodiversity Lab,  
University of Bath,  
Claverton Down,  
Bath, BA2 7AY (United Kingdom)  
srg49@cam.ac.uk

**Ahmed JEBRANE**  
UMR 5584 Institut de mathématiques  
de Bourgogne,  
université de Bourgogne,  
9, rue Alain Savary,  
21000 Dijon  
jebrane@u-bourgogne.fr

**Carmela CHATEAU**  
UFR SVTE,  
université de Bourgogne,  
6, bd Gabriel,  
21000 Dijon  
carmela.chateau@u-bourgogne.fr