



**HAL**  
open science

# Commentaires sur l'utilisation des copies de flûtes archéologiques en os – Enquête méthodologique et épistémologique

Etienne Safa

► **To cite this version:**

Etienne Safa. Commentaires sur l'utilisation des copies de flûtes archéologiques en os – Enquête méthodologique et épistémologique. La flûte, de la Préhistoire au Moyen Âge, 2016, Langentière, France. hal-03539786

**HAL Id: hal-03539786**

**<https://hal.science/hal-03539786>**

Submitted on 22 Jan 2022

**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.

# Commentaires sur l'utilisation des copies de flûtes archéologiques en os : Enquête méthodologique et épistémologique sur les études sonores

Etienne Safa

UMR CNRS 6298 ARTEHIS, école doctorale SEPT

22 janvier 2022

## Résumé

Voici quelques décennies que l'archéomusicologie tente des études sonores de vestiges d'instruments présumés musicaux. Malgré le temps écoulé depuis les premiers travaux du genre, la question de l'influence des méthodes sur les résultats produits n'a que rarement été posée, ou bien à peine explorée. Il manque, en sorte, une mise en perspective épistémologique. L'outil méthodologique et épistémologique que s'est avéré être l'apprentissage artisanal nous a justement poussé dans cette direction : à la recherche des phénomènes à l'œuvre dans la manufacture ainsi que dans l'usage de copies de flûtes en os. Les biais recherchés touchent autant les dimensions acoustiques et physiques de l'objet que méthodologiques et psychologiques du chercheur. Dans ces travaux inspirés des sciences expérimentales, sociales et cognitives, le chercheur, aussi bien que l'objet et les méthodes, sont tous trois sujets d'étude.

**Mots-clefs :** flûtes, épistémologie, méthodologie, culture musicale, psychologie, expériences, manufacture, artisanat, impression 3D, tomographie, statistiques, acoustique.

## 1 Introduction

Lorsque le projet d'un apprentissage artisanal inséré au sein d'une recherche doctorale en archéomusicologie fut esquissé, nous étions loin d'ima-

gner qu’il nous amènerait à puiser dans les sciences expérimentales et cognitives les outils d’une mise en examen des méthodes couramment employées aujourd’hui dans ce domaine. La tournure épistémologique et méthodologique de ces travaux nous a ainsi entraîné dans la recherche de ce que l’on pourrait appeler un “paradigme”, c’est à dire la conception théorique tentant de rassembler l’ensemble des phénomènes, des types d’explications envisageables et des types de faits à découvrir au sein d’une science donnée [5] - ici, l’archéomusicologie des flûtes en os.

Loin d’en voir le bout, nous avons pour l’heure engagé les premiers pas visant à comprendre ces phénomènes dans leur ensemble, appuyant nos réflexions sur les résultats de plusieurs expériences qui seront détaillées dans cet article. Chacune de ces expériences contribue à améliorer les suivantes, aussi nous efforcerons-nous d’en décrire aussi bien les limites que les implications et le potentiel, dans l’espoir d’apporter une contribution épistémologique satisfaisante à l’archéomusicologie des flûtes.

Cet article se focalisera donc sur la comparaison des résultats sonores de ces diverses expériences, ainsi que sur leurs explications et leurs implications pour la recherche

## 2 Contexte et travaux connexes

Dans sa recherche d’un paradigme, ce travail vise en premier lieu à comprendre les phénomènes sous-jacents aux résultats sonores produits sur la base de copies, répliques et *fac-simile* de flûtes en os. Il prend racine à la fois dans l’apprentissage d’un savoir-faire artisanal (pour plus de détails, voir l’article “Artisans-chercheurs” dans cette même publication) et dans la rencontre d’autres praticiens-chercheurs. Les transformations perceptives et cognitives provoquées par cet apprentissage sont à l’origine de la plupart des questionnements qui ont mené à conduire les expériences décrites dans cet article. De fait, l’humain prend une place centrale dans ce paradigme, dont nous essayons de comprendre l’influence à travers les sciences expérimentales, la sociologie et les sciences cognitives.

La recherche du son des flûtes archéologiques a cependant d’ores et déjà un certain vécu, illustré par diverses méthodes. On peut diviser ces dernières en quatre principales approches :

**L’utilisation musicale du vestige :** les premières tentatives menées, entre les années 1950 et 1970 consistaient à utiliser l’instrument archéologique lui-même pour produire des sons [2]. Outre les fortes probabilités d’erreur résidant dans la reconstruction de l’embouchure afin

de rendre la flûte fonctionnelle, il convient de souligner le risque d'endommagement du vestige archéologique.

**L'archéologie expérimentale** : très répandue aujourd'hui, elle s'applique à de nombreux vestiges archéologiques, dont les vestiges sonores [4, 8, 7, 6, 12]. Cependant, si son regard technique lui permet d'explorer les causes tracéologiques ainsi que les modes de production de l'objet, elle peine à en révéler avec efficacité les aspects culturels et sonores ainsi qu'à appréhender le savoir-faire ayant servi à sa fabrication.

**L'impression 3D** : nouvelle venue dans notre discipline, elle nous permet aujourd'hui de proposer des restitutions physiques de plus ou moins grande précision à partir d'images 3D. Dans notre cas, ce sont celles à rayons X qui nous intéressent pour leur capacité à capturer les volumes internes de la flûte [1, 9, 10]. Par la suite, l'imprimante 3D se charge de donner corps à l'image, que ce soit en plastique, en résine, en céramique ou en métal [11, 14].

**La synthèse sonore** : cette méthode demande au chercheur de saisir une série de dimensions relevées sur l'instrument afin d'en recréer un modèle 3D, lequel permettra à son tour d'obtenir une restitution sonore numérique grâce à des logiciels spécialisés [3].

Ces approches, si différentes soient-elles, ont toutes un point commun : la recherche des sons de la flûte, telle qu'elle existait et sonnait dans le passé (ses fréquences, ses intervalles, sa gamme). La démarche de praticien-chercheur nous a au contraire mené à une approche bien différente, considérant la relativité du son vis-à-vis de l'instrumentiste, de sa culture et du contexte dans lequel il est joué. Ces dimensions seront au cœur de l'ensemble du discours du présent article.

### 3 Terminologie

Cet article utilisera la terminologie suivante, établie d'après les observations issues de l'apprentissage artisanal ainsi que des expériences conduites pour cette recherche.

**Morphologie** : formes naturelles de l'os (intérieures et extérieures).

**Géométrie** : formes manufacturées (intérieures et extérieures) de façon volontaire ou non.

**Morphologie sonore** : renvoie aux portions acoustiques de la morphologie de l'os, qui en définissent le potentiel sonore (en d'autres termes :

la cavité intérieure). Par définition, chaque os possède une morphologie (et donc une morphologie sonore) qui lui est propre.

**Géométrie sonore :** renvoie aux portions acoustiques de la géométrie de la flûte, qui contribuent à en définir les sonorités finales, et ce qu'elles soient manufacturées de façon volontaire (délibérément) ou non (géométrie accidentelle ou inconsciente). Par définition, la géométrie sonore n'inclue pas le façonnage des surfaces extérieures tant qu'il ne modifie pas la profondeur des perforations.

**T0, T1, T2, etc. :** désignation systématique des doigtés primaires de la flûte dont l'ouverture se fait dans l'ordre croissant des trous de jeu, et donc des fréquences (du plus grave, le fondamental, au plus aigu, tous trous ouverts). T0 indique ainsi que tous les trous sont bouchés, T1 que seul le premier trou est débouché, T2 les deux premiers, etc.

**F0, F1, F2, etc. :** désignation systématique des flûtes expérimentales. F0 fait référence à la flûte témoin (le référentiel de l'expérience auquel on compare les copies), tandis que F1, F2, F3, etc. renvoie aux différentes copies de celle-ci. Afin d'avoir un référentiel sûr (fonctionnel, mesurable et réutilisable) permettant d'évaluer les résultats des copies (manufacturées comme imprimées en 3D), nous avons choisi d'utiliser une flûte manufacturée plutôt qu'une flûte archéologique.

**Variabilité morphologique des os :** fait référence à l'impossibilité de trouver, dans la nature, deux os parfaitement identiques. Si chaque os est au départ différent de tous les autres, alors les sons qui résulteront de son façonnage ne peuvent appartenir qu'à lui : chaque flûte doit être considérée comme unique, et chaque os est un défi lancé au savoir-faire de l'artisan. De fait, ce dernier ne peut se contenter d'en copier les mesures sur un autre os, au risque de produire un instrument totalement différent, sinon défectueux.

**La souplesse fréquentielle :** renvoie au champ de liberté de l'instrumentiste dans la définition de la fréquence émise. De par leur morphologie, les flûtes en os laissent en effet la possibilité d'ajuster, en cours de jeu, la fréquence émise par un même doigté. Cet ajustement se fait uniquement par la pression, la vitesse et l'orientation du souffle. Il peut être effectué de manière consciente ou non.

## 4 Copies par impression 3D

Les résultats des expérimentations menées sur les copies par impression 3D ayant déjà été présentés dans deux communications antérieures [13, 14],

nous nous contenterons ici d'en synthétiser l'essence.

## 4.1 Protocole et spécificités techniques

**Objectifs :** tenter d'illustrer la variabilité des productions de copies par impression 3D.

**Témoin et échantillon :** un tibia de chèvre, une copie manufacturée, trois copies imprimées en 3D.

**Choix de la géométrie sonore :** afin de simuler l'étude d'une flûte archéologique, nous avons choisi de nous inspirer d'une des géométries les plus représentées par les vestiges découverts à ce jour : une fenêtre en D, un canal à peine retaillé et quelques trous de jeu [2].

**Outils de fabrication :** le couteau et la râpe en acier. Le bloc est en liège vernis, choisi pour sa durabilité.

**Outils d'imagerie 3D :** scanner micro-tomographique, trois passages pour une précision inférieure à 50  $\mu\text{m}$ .

**Outils de modélisation 3D :** logiciel Blender pour préparer le modèle 3D à l'impression et pour modéliser l'os trabéculaire qui ne ressort pas sur le scanner 3D.

**Outils d'impression 3D :** deux imprimantes filaires (plastique) et une imprimante laser haute définition (résine).

**Impression :** imprimées entre janvier et mai 2016.

**Capture et analyse sonore :** souffle naturel (à la bouche) aussi homogène que possible, enregistré sur un smartphone pour relever les fréquences au cas par cas sur Audacity.

## 4.2 Synthèse

Ces expérimentations avaient pour but de tester la fidélité sonore de la copie par scanner, modélisation puis impression 3D d'une flûte originalement taillée au couteau dans un tibia de chèvre. Difficilement lisible par les scanners 3D, l'os trabéculaire (contenu à l'intérieur de l'épiphyse au pied de la flûte) fut rendu en un nuage de plus de 600 objets qui imposa de faire un choix : le supprimer ou bien tenter de le restituer (fig. 1). Trois impressions différentes furent ainsi réalisées, correspondant à deux états de modélisation ainsi qu'à deux technologies d'impression :

1. Une impression filaire avec retrait de l'os trabéculaire (plastique, orange)
2. Une impression filaire avec reconstitution par modélisation 3D du volume occupé par l'os trabéculaire (plastique, blanche)

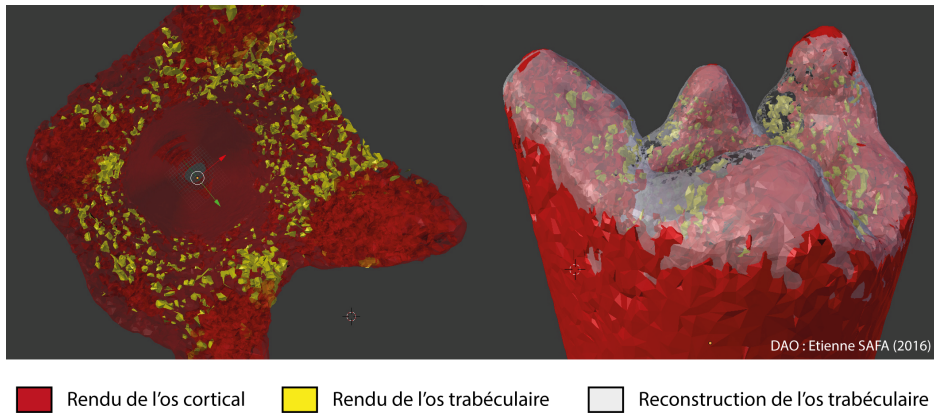


FIGURE 1 – Reconstruction de l'os trabéculaire

3. Une impression résine haute définition en utilisant la même image 3D que la précédente (résine, blanche)

Les résultats, auxquels fut adjointe une copie manufacturée dans un second os de chèvre, montrent une différence très significative de la copie en os, tandis que les trois copies imprimées en 3D émettent un son bien plus proche de l'original. Parmi ces derniers, l'impression haute définition en résine est, de loin, la plus performante (fig. 2).

Pour une bonne compréhension, ce graphe doit être lu comme suit :

1. Chaque pointe représente une des notes primaires de la flûte, ordonnées dans le sens horaire du plus grave au plus aigu.
2. La ligne noire représente la flûte d'origine, F0, dont on cherche à atteindre les sonorités. De fait, elle est à 0 sur l'échelle des différences.
3. Les aires colorées représentent les différentes tentatives (ici, les différentes copies) d'atteindre ces sonorités. Elles sont placées sur l'échelle en fonction de leur différence par rapport à F0 (en négatif vers le grave, vers le centre ; en positif vers l'aigu, vers l'extérieur).

Ces résultats s'expliquent d'une part, par la variabilité morphologique des os (en ce qui concerne la copie manufacturée) et, d'autre part, du fait que si les impressions 3D sont créées directement à l'image de l'original, elles n'en cumulent pas moins les marges d'erreur de chacune des étapes de leur fabrication (scanner, modélisation éventuelle, impression, sonorisation). Ainsi, même la technologie la plus précise ne parvient pas à des résultats parfaits.

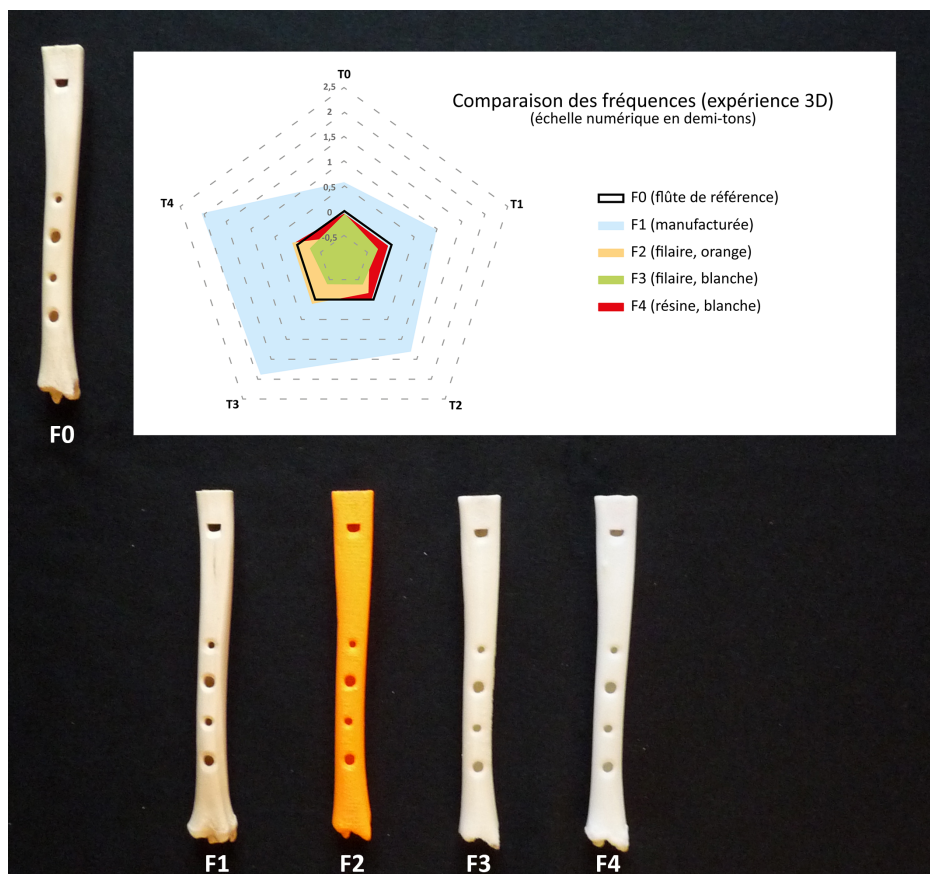


FIGURE 2 – Analyse des copies imprimées en 3D



## 5 Copies manufacturées

Entre sa primeur dans l'histoire méthodologique et technologique de la recherche, l'aspect artisanal et culturel des objets archéologiques et le coût financier des impressions 3D, la manufacture de copies se place dans le paysage de l'archéomusicologie comme une alternative véritablement digne d'intérêt. Elle a jusqu'aujourd'hui été principalement mise en œuvre par l'archéologie expérimentale, et bénéficie donc de l'approche technique et technologique de cette discipline. Cependant, certaines dimensions des flûtes en os demeurent relativement peu explorées, voire méconnues. Parmi celles-ci, la plus problématique est certainement la variabilité morphologique (et donc sonore) des os (voir Terminologie). Dès lors que cette dernière est prise en considération, plusieurs questions se posent quant aux résultats des études sonores produits à partir de copies et *fac-simile* manufacturés dans des os : les sons d'une copie manufacturée d'une flûte en os sont-ils véritablement identiques à ceux de l'original ? De quelle manière et dans quelle mesure la variabilité morphologique en influence-t-elle les sonorités ? Peut-on produire une estimation des fréquences de la flûte originale à travers la réalisation d'un échantillon statistique ? Quelle serait la fiabilité de celui-ci ?

Répondre à ces questions est le but des deux expériences artisanales que nous détaillerons ci-après. Toutes deux consistent en la manufacture de multiples copies dont les sons furent enregistrés, mesurés puis comparés pour tenter de produire une estimation, via un calcul statistique, des fréquences de la flûte originale. La première comprend un certain nombre d'erreurs qui n'ont été perçues que plus tard, lors de la conduite de la seconde expérience qui invalida résultats présentés en janvier 2016 [13]. Nous avons cependant jugé bon de la décrire afin d'en témoigner et d'attirer l'attention sur leurs implications. Leurs résultats respectifs seront analysés plus loin, dans les considérations épistémologiques sur les biais dans l'usage des copies).

### 5.1 Préambule : façonner une simple copie en tibias de chèvre

Commençons par répondre à la première des quatre questions posées précédemment : les sons d'une copie manufacturée d'une flûte en os sont-ils véritablement identiques à ceux de l'original ? Le test est simple et la comparaison nettement remarquable : façonner une flûte, puis en produire une copie dans un autre os du même type (voir Copies par impression 3D). Le résultat est sans équivoque : les sons de la copie diffèrent nettement de ceux de l'original. Une simple observation de la morphologie des os permet d'en comprendre la raison : les os ne sont tout simplement pas identiques. Ils va-

rient de façon plus ou moins subtile dans leur largeur, dans leur épaisseur, dans l'ouverture de la cavité intérieure et dans l'importance de l'étranglement central. Il apparaît donc clairement qu'une copie manufacturée d'une flûte en os a toutes les chances de produire un son différent de l'originale.

## 5.2 5 copies d'une flûte en fémur de cerf

Les résultats de cette expérience ayant déjà été décrits dans une communication antérieure [13, 14], nous nous contenterons à nouveau d'en synthétiser l'essence.

### 5.2.1 Protocole et spécificités techniques

**Objectifs** : déterminer l'influence des limites appliquées par la morphologie sonore et la variabilité morphologique sur les résultats sonores issus de copies manufacturées.

**Témoin et échantillon** : six fémurs de cerfs semblables, dont un de latéralité différente. Cinq copies est le minimum de l'échantillonnage statistique et ne permet qu'un aperçu peu précis des phénomènes impliqués.

**Choix de la géométrie sonore** : afin de faciliter la manufacture des copies, nous avons choisi une géométrie régulière : fenêtre rectangulaire, canal à murs droits et à voûte légère. Les trois trous de jeu sont sub-circulaires car taillés partiellement au couteau. L'os trabéculaire du pied de la flûte a été partiellement ouvert au couteau pour accorder le fondamental.

**Outils de fabrication** : le couteau et la râpe en acier. Le bloc est en liège vernis, choisi pour sa durabilité.

**Outils de mesure** : un pied à coulisse.

**Manufacture** : fabriquées en janvier 2016, une flûte après l'autre.

**Capture et analyse sonore** : souffle naturel (à la bouche) aussi homogène que possible, enregistré sur un smartphone pour relever les fréquences au cas par cas sur Audacity.

**Analyse statistique** : les données recueillies dans un tableur ont été analysées selon la loi de Student à l'aide des tables statistiques servant de référentiel dans le cadre de celle-ci. Les calculs ont été faits sur la base d'un intervalle de confiance à 95% et du nombre d'observation correspondant au nombre d'individus formant l'échantillon (ici, 5).

Echantillon	T0	T1	T2	T0-T1	T1-T2
Flûte 1	-0.79	-0.64	-0.71	0.15	-0.06
Flûte 2	-0.05	0.26	0.36	0.17	0.16
Flûte 3	-0.67	-0.66	-0.71	-0.30	-0.15
Flûte 4	-0.95	-0.92	-1.01	0.01	-0.04
Flûte 5	-0,40	-0,46	-0,42	-0,09	0,13
Moyenne	-0,57	-0,49	-0,50	-0,09	0,01

TABLE 1 – Différence des sons des cinq copies avec ceux de F0

### 5.2.2 Synthèse

Six fémurs de cerf furent sélectionnés afin de façonner, pour l'un une flûte qui devait servir de référentiel, pour les autres les copies de cette dernière. L'ensemble de l'ouvrage était fait uniquement au couteau, et les sons furent relevés un par un. Les données ainsi générées ont par la suite fait l'objet d'analyses statistiques afin de calculer, à partir de cet échantillon, le son de la flûte d'origine (voir le tableau ci-dessous).

Les résultats présentent un échec sur le calcul des fréquences (environ un quart de ton de différence), mais une certaine réussite sur celui des intervalles. Ils se sont donc avérés beaucoup plus performants que nous ne l'aurions pensé, peu ou prou équivalents à ceux proposés par l'impression 3D.

## 5.3 15 copies d'une flûte en radius de cerf

### 5.3.1 Protocole et spécificités techniques

**Objectifs :** vérifier la fiabilité des résultats des cinq copies, donner plus de probabilités à la survenue d'un biais ou d'un phénomène inaperçu auparavant, déterminer la fiabilité de la méthode de l'échantillon de copies manufacturées.

**Témoin et échantillon :** seize radius de cerf. Les seize flûtes représentent à part égale les deux latéralités (huit radius gauche, huit radius droit). La morphologie des os est variable, tantôt un peu plus graciles, tantôt un peu plus robustes.

**Choix de la géométrie sonore :** afin de faciliter la manufacture des copies, nous avons choisi une géométrie régulière et une mécanisation partielle des outils : fenêtre rectangulaire, canal à murs droits et à

voûte légère et quatre trous de jeu circulaires. Un trou d'accord fut nécessaire pour accorder la flûte correctement. Le pied fut percé de deux perforations plutôt que d'être ouvert au couteau.

**Prototypage :** quatre os furent utilisés pour le prototypage de la flûte afin de lui conférer une géométrie idéale, faisant ainsi correspondre chaque perforation au diamètre d'un foret.

**Outils de fabrication :** le couteau et la râpe en acier pour façonner ce qui ne peut l'être autrement (l'embouchure, qui comprend le conduit d'air, la fenêtre et le biseau). Toutes les autres perforations (trous de jeu, perce du pied et trou d'accord) furent faites à la perceuse afin de systématiser autant que possible la marge d'erreur. Le bloc est en liège vernis, choisi pour sa durabilité.

**Outils de mesure :** un pied à coulisse numérique pour une mesure à 0.1 mm près, une sonde pour mesurer la profondeur des perforations.

**Manufacture :** fabriquées en août 2016. Les quinze copies furent réalisées dans une dynamique de production en série afin d'en améliorer les performances et de révéler le plus tôt possible les éventuels biais de manufacture : chaque étape de fabrication fut répétée sur les quinze copies avant de passer à la suivante. La profondeur de chaque perforation fut vérifiée en quatre points (haut, bas, gauche et droit) afin d'être, si nécessaire, retravaillée par l'extérieur (ce fut la plupart du temps le cas). Comparée à l'usage d'un couteau, l'utilisation d'une perceuse pour réaliser les perforations permet de systématiser la marge d'erreur de la manœuvre en utilisant toujours le même outil et toujours le même foret pour la perforation considérée.

**Capture et analyse sonore :** toutes les flûtes, référentiel et copies, furent enregistrées directement sur Audacity avec le microphone de l'ordinateur. Chaque enregistrement correspond à une minute de jeu musical dans lequel furent prélevées 15 observations de chacune des cinq notes de la flûte. L'analyse statistique de ces quinze fréquences permet de prendre en compte la variabilité du souffle naturel, qui n'est jamais homogène.

**Analyse statistique :** les données recueillies dans un tableur ont été analysées selon la loi de Student à l'aide des tables statistiques servant de référentiel dans le cadre de celle-ci. Les calculs ont été faits sur la base d'un intervalle de confiance à 95% et du nombre d'observation correspondant au nombre d'individus formant l'échantillon (ici, 15). Chaque note, pour chaque flûte, n'est ainsi pas représentée par une valeur mesurée mais par une moyenne des différentes fréquences émises

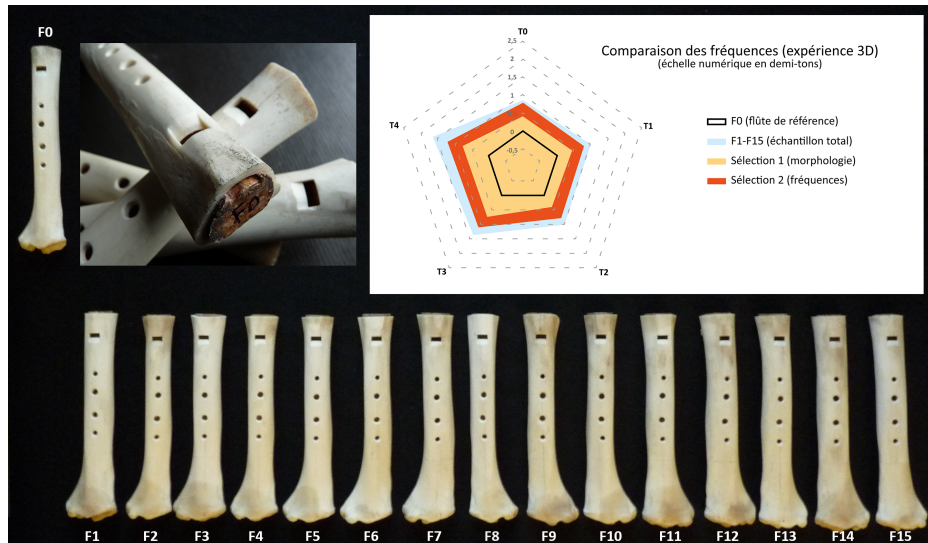


FIGURE 3 – Analyse des 15 copies manufacturées

pendant la minute de jeu. Chacune des quinze copies est ainsi représentée par cinq notes moyennes. On tire ensuite une nouvelle moyenne des quinze flûtes, pour chaque note, produisant de ce fait l'estimation finale des sons de l'originale.

### 5.3.2 Analyse des résultats

Les résultats des analyses statistiques décrites à la fin du protocole expérimental sont synthétisés dans le graphe ci-après (fig. 3), lequel peut être lu de la même manière que le précédent du même type.

La différence conséquente entre la moyenne de la totalité de l'échantillon (en bleu) et la flûte d'origine (en noir) ressort d'emblée : la méthode n'est assurément pas fonctionnelle. Cela s'explique en grande partie, et encore une fois, par la forte variabilité morphologique des os : il y a tout simplement trop d'inconnues, depuis l'épaisseur des os jusqu'à leur volumétrie interne, en passant par l'emprise de l'os trabéculaire et les risques d'erreur de manufacture. La variabilité morphologique des os a plus de poids que l'échantillon de copies associé à une analyse statistique, tout simplement parce qu'elle en définit le potentiel initial. Cela montre bien à quel point la facture instrumentale sur perce naturelle (os, corne, sureau, etc.) repose sur la considération de l'individu, par l'adaptation du savoir-faire de l'artisan aux spécificités et aux caractéristiques de chaque support.

Prises indépendamment, toutes ces copies (exceptée une) montrent une

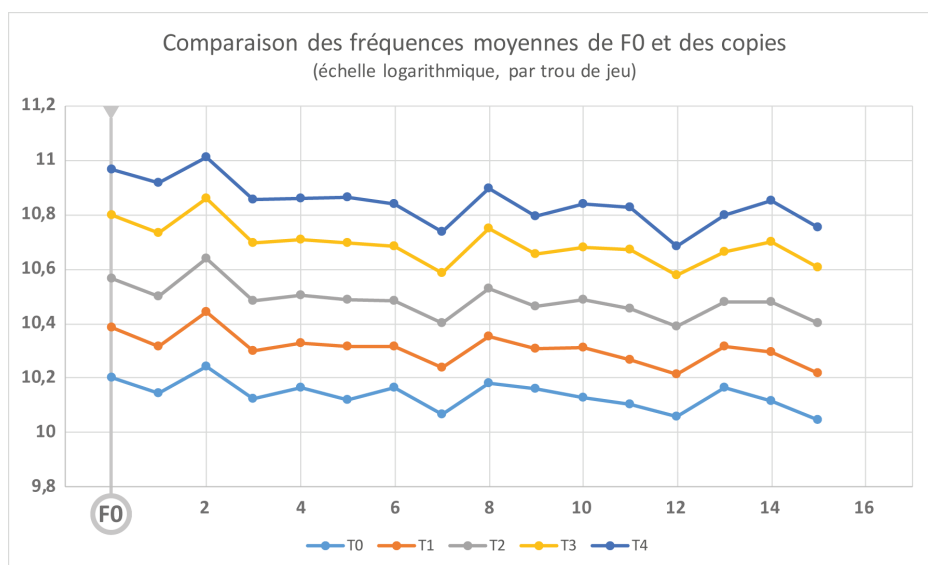


FIGURE 4 – Comparaison des fréquences de chaque individu

différence significative (et nettement audible) avec l'originale (fig. 4). Seule la copie numéro 8 fait preuve d'une certaine ressemblance, ce qui s'explique en réalité par le fait qu'il s'agit du second radius du même animal. Certaines copies émettent un son relativement instable, ce qui est probablement dû à une plus forte incompatibilité de leur morphologie avec la géométrie sonore de F0 qui leur est appliquée.

Ces observations illustrent et démontrent bien les deux points suivants :

1. La géométrie sonore d'une flûte en os n'est fonctionnelle que pour ladite flûte, considérant l'intégrité de l'individu.
2. À moins d'une exceptionnelle ressemblance entre deux os (un fait vraisemblablement rare en dehors du cas de deux os de même provenance), copier la géométrie sonore d'une flûte en os sur un autre os implique une différence voire une déficience sonore.

Les deux autres aires du graphe précédent représentent deux sélections différentes au sein de l'échantillon : la première, en jaune, correspond aux flûtes s'illustrant par leur proximité morphologique avec l'originale (au nombre de cinq) et la seconde en rouge, correspond aux flûtes dont la différence des fréquences moyennes par rapport au référentiel est inférieure à un huitième de ton (au nombre de dix). Ces deux sélections ont ainsi fait l'objet d'une nouvelle moyenne pour laquelle les paramètres de la table Student furent accordés selon le nombre d'observations données (5 pour la première sélec-

tion, 10 pour la seconde). Malgré la sélection d'individus selon des critères de proximité avec l'originale, l'estimation ne s'en voit donc que peu améliorée et demeure insatisfaisante.

Plutôt que de les améliorer, l'accroissement de l'échantillon statistique à quinze copies a donc en réalité invalidé les résultats de l'analyse des cinq copies en fémurs de cerfs.

## 6 Considérations épistémologiques et méthodologiques

L'analyse des résultats produits par ces expériences permet de remettre en question certaines tendances de la recherche archéomusicologique. Elle met en lumière, de surcroît, certains biais issus de nos méthodes et de notre culture. Malgré son aspect pratique, la méthode des copies laisse un certain nombre d'inconnues que notre étude espère contribuer à dévoiler à travers une approche aussi systématique que possible des mécanismes acoustiques, cognitifs et psychologiques liés à la fois à la production et à l'expérimentation de ces copies. Cette section de l'article propose un retour épistémologique sur les résultats fournis par les expérimentations précédentes afin d'offrir certains éclairages sur les phénomènes étudiés.

### 6.1 Quelques éclairages sur l'impression 3D

Pour pallier aux biais des machines et prendre bonne mesure des marges d'erreur dans la production d'exemplaires imprimés en 3D, il faudrait en réalité produire ici aussi un échantillon statistique viable (une quinzaine d'exemplaires) pour chaque option (dans notre cas : avec et sans reconstruction de l'os trabéculaire). Les limites budgétaires tendent alors rapidement à s'imposer, raison pour laquelle nous avons choisi de nous contenter de ces quelques essais qui, à défaut de pouvoir évaluer ces modes de copie, permettent d'illustrer la présence des diverses marges d'erreur.

### 6.2 Quelques éclairages sur la manufacture

La variabilité morphologique des os implique une différence d'épaisseur corticale<sup>1</sup> d'un os à l'autre. Si cette dimension présente une certaine homogénéité (un même profil) au sein d'une famille (par exemple les radius de cerf)

---

1. L'épaisseur corticale désigne l'épaisseur de la paroi de l'os, depuis sa surface interne vers sa surface externe.

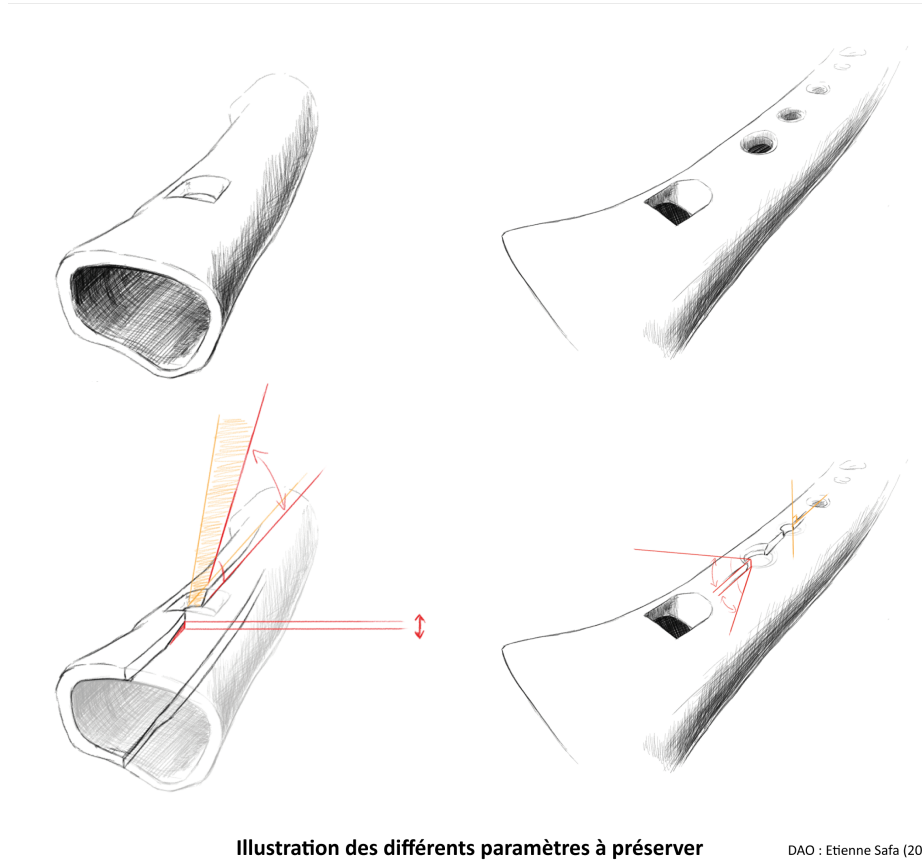


FIGURE 5 – Comparaison des fréquences de chaque individu

d'os sains (sans traumatismes pathologiques), elle demeure néanmoins légèrement variable d'un os à l'autre et diffère d'un point à l'autre d'un individu. Tantôt plus importante et tantôt plus fine, sa morphologie finale dépend fortement de la nutrition et des conditions de croissance de l'animal.

Comme évoqué plus haut, la profondeur des perforations a une nette influence sur la qualité ainsi que sur la fréquence du son émis. De fait, la variabilité de l'épaisseur corticale implique une variabilité dans la profondeur des perforations des copies, malgré leur repositionnement exact sur un nouvel os (fig. 5). Il en va ainsi pour la fenêtre autant que pour les trous de jeu, d'accord et de pied. Cette situation nous met ainsi face à un choix :

nt de la géométrie sonore.

taite vis-à-vis de l'original.



Nous nous trouvons là dans une certaine contradiction avec la définition populaire de la copie : fabriquer une copie organologique d'une flûte en os produira presque toujours une flûte dont l'aspect sera légèrement différent. Par extension, tenter d'en copier l'aspect sur un autre os produira une géométrie sonore différente, et faussera donc les résultats acoustiques. Il apparaît évident que les paramètres organologiques ont la priorité sur l'aspect visuel de l'instrument. Il semble donc nécessaire de faire en sorte de conférer à chacune de ces perforations une profondeur identique à celles présentes sur la flûte de référence, ce qui contraint à retailler la surface extérieure de l'os quitte à provoquer certaines dissemblances dans l'aspect visuel de la copie.

### 6.3 Sonorités de l'instrument contre sons de l'instrumentiste

La tendance actuelle à vouloir conférer à tout objet une valeur, une quantité propre, semble manifeste. "Tout est mesurable", pourrait-on dire. En témoigne la majorité des publications archéomusicologiques portant sur l'étude sonore des vestiges d'instruments : tôt ou tard apparaît une portée musicale accompagnée de sa clef de sol et de quelques notes posées sur les lignes. Parfois, l'instrument est représenté, figurant ainsi sa tablature [4, 11]. Cette manifestation d'une volonté de trouver la vraie mesure des choses est un fait particulièrement intéressant à observer sur le plan socio-culturel et peut-être aussi sur le plan psychologique : y aurait-il un sentiment de gêne, conscient ou non, à ne pas donner de valeur à un son lorsqu'on expose une étude sonore ? Quelle qu'en soit la raison, l'utilisation d'une portée musicale n'est pas dénuée de sens ni d'implications : elle suggère un mode de pensée aussi bien qu'une métrique (et donc une esthétique) musicale. Sans précisions supplémentaires, la clef de sol évoque inévitablement aux lecteurs occidentaux leur propre éducation musicale (qu'elle soit modeste ou approfondie) : elle leur évoque les sons qu'ils connaissent bien et qu'ils entendent tous les jours. Elle est donc proprement rattachée à une culture et à une esthétique sonore. Pour formuler cela de manière plus concrète : lorsque les sons d'une flûte néanderthale sont placés sur une portée musicale accompagnée d'une clef de sol, doit-on présumer que les hommes du passé l'avaient accordée en A440 ?

Vient alors la question suivante : de quels biais ou phénomènes cognitifs l'emploi de ce système de notation dans la recherche archéomusicologique témoigne-t-il ?

**Il pourrait être le reflet d'un biais psychologique,** le chercheur employant instinctivement le système de notation musicale qu'il connaît déjà (de manière plus ou moins approfondie) pour mentionner les sons

dont il souhaite parler, sans soupçonner ce qu'implique son usage sur ses propres interprétations autant que sur celles des lecteurs.

**Il pourrait être le reflet d'un biais culturel :** lors du jeu de l'instrument, l'expérimentateur peut avoir tendance à accorder de manière inconsciente les sons qu'il produit (plus encore avec les flûtes en os dont la souplesse fréquentielle est remarquable). Cela survient tout simplement parce qu'il est difficile d'écouter et d'accepter des sons discordants, et que cette discordance ne peut être issue que d'un jugement esthétique influencé par la culture musicale de l'auditeur. En ayant fait l'expérience, nous avons pu nous-même nous rendre compte de cette tendance lors de l'enregistrement audio des copies. De manière générale, cet accordage intuitif n'était repéré qu'*a posteriori*, nous obligeant à refaire l'enregistrement depuis le début. Tenter de pallier à ce phénomène a nécessité une certaine concentration afin d'accepter les sons des copies. C'est aussi ce qui a poussé au choix de représenter leurs sons non pas par des valeurs mesurées, mais plutôt par des fréquences moyennes, calculées à partir d'une minute de jeu dont nous tirâmes 15 observations pour chaque trou de jeu.

Pour être employées en tant que simple référentiel de notation sonore servant à titre comparatif, la portée musicale et sa clef devraient ainsi être accompagnée de diverses mentions précisant, par exemple, le mode ou la fréquence d'accordage. Cependant, malgré cette précaution, ce système de notation demeurerait avant tout quantitatif, axé sur la proposition d'une série de fréquences qui seraient propres à l'instrument de musique lui-même. Une partie des expériences décrites ci-dessus a démontré, au contraire, qu'un tel discours n'est pas véritablement représentatif des sons que l'on entend lorsque l'expérimentateur joue de cet instrument : possédant à la fois l'accordage initial et les fréquences de jeu moyennes de la flûte F0 dans l'expérience des 15 répliques (radius de cerf), il fut possible d'en comparer l'intention initiale avec la réalité du jeu musical.

Dans le diagramme suivant (fig. 6), F0 est représentée par deux lignes :

1. Son accordage initial en A440 (ligne bleue) qui suit une gamme pentatonique en D, E, F, A, B.
2. Ses fréquences de jeu moyennes (ligne rouge) qui reflètent la réalité du jeu musical (15 observations sur une minute de jeu), et qui diffère légèrement de son accordage initial.

Ces observations illustrent la différence entre l'accordage *a priori* de l'instrument et le jeu musical de l'instrumentiste. Elles démontrent donc que les sons entendus par l'auditeur (ou enregistrés par le microphone) ne sont pas à

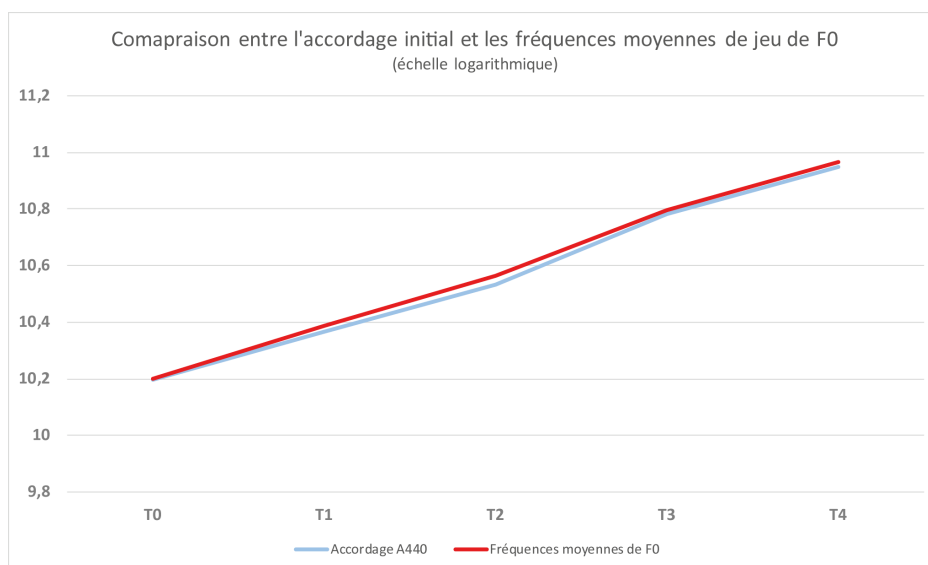


FIGURE 6 – Représentation de l'accordage et de la réalité musicale de F0

proprement parler les sons de l'instrument, mais plutôt ceux de l'expérimentateur à travers ce dernier. Cette considération remet fortement en question la perception d'un instrument sonore comme "entité définie par une série de fréquences mesurables", et le replace plus volontiers dans un rôle d'outil sonore. En tant qu'outil, l'instrument peut donc être détourné et son usage adapté afin de produire les résultats désirés. Il est caractérisé par un potentiel sonore plutôt que par des fréquences, ces dernières ne résultant que de l'action humaine et demeurant propres à l'instrumentiste.

Quelle est donc, compte tenu de tout cela, la réalité sonore du vestige archéomusicologique étudié ? À quel point sommes-nous éloignés, non seulement de par notre propre culture et les biais qu'elle implique, mais aussi du fait de l'état souvent lacunaire des objets issus de fouilles archéologiques, dont la forme préservée et étudiée aujourd'hui par les chercheurs est donc issue de l'interprétation des restaurateurs et de la restitution archéologique ?

Cela fait-il véritablement sens de vouloir en connaître les fréquences, lorsque même dans le passé une flûte a pu être prêtée, changer de mains, de propriétaire ou tout simplement utilisée d'une manière qui ne nous effleure pas encore l'esprit ?

## 7 Conclusions

À l'issue de ces expériences et à la lumière de l'interprétation de leurs résultats, il semble à présent crucial de considérer les flûtes comme des outils pourvoyeurs de sons, tous relatifs à l'usage que l'on en fait et donc à l'homme qui s'en sert. Cet homme, qu'il s'agisse de l'instrumentiste du passé ou de l'expérimentateur contemporain, ne peut faire autrement que d'en appeler à ses connaissances ainsi qu'à sa culture musicale lorsqu'il en joue. De fait, les sons émis sont propres à celui qui les émet, et non à l'instrument qu'il tient dans ses mains. Au regard de cette considération, la démarche qui consiste à tenter d'apposer une série de fréquences à un instrument, toute conditionnelle qu'elle soit, semble délaissier les particularités culturelles et organologiques de ce dernier, et ne peut résulter qu'en la déformation de sa réalité vécue (dans le passé) et perçue (de nos jours).

La méthode des copies, qu'elles soient manufacturées ou imprimées en 3D, apparaît dès lors relativement peu fiable. Certes du fait des marges d'erreurs physiques, mais aussi et surtout à cause de la nature même des résultats qu'elle engendre et qui lui sont inaliénables : des valeurs de fréquences, qui ne peuvent donc faire autrement que de se placer dans la démarche précédemment décrite. Si nous n'avons pas encore pu la tenter, la synthèse sonore lui sera probablement similaire sur ce point puisqu'elle produit un résultat fréquentiel.

Tout compte fait, la seule approche qui semble viable au regard de ces conclusions est celle qui consiste à explorer le potentiel de l'instrument : ses possibilités, ce qu'il a à offrir, son "profil sonore" plutôt que ses sons et ses fréquences. Assez ironiquement, cette solution était évidente, car c'est là le fondamental du travail de l'artisan lorsqu'il cherche à apprendre à façonner un nouvel instrument de musique : il s'agit du travail de prototypage. À travers ce procédé, l'artisan explore ses possibilités en se basant sur les paramètres observables d'un modèle qu'il a sous les yeux, puis en les appliquant à plusieurs supports, quitte à sacrifier un peu de matière première et de temps afin d'en comprendre le fonctionnement. Cet exercice, à la base de l'apprentissage et du développement d'un savoir-faire, pourrait bien, à travers son approche fonctionnelle et qualitative, apporter une réponse à l'étude des sonorités du passé.

Nous ne pourrions donc vraisemblablement jamais entendre les sons des flûtes archéologiques. Cependant, nous pouvons chercher à les comprendre.

## Références

- [1] A BELLIA. « The virtual reconstruction of an ancient musical instrument : the aulos of selinus ». Anglais. In : *Proceedings of Digital Heritage*. 2015, p. 55-58.
- [2] Christine BRADE. *Die mittelalterlichen Kernspaltflöten Mittel-und Nordeuropas, Ein Beitrage zur Überlieferung prähistorischer und zur Typologie mittelalterlicher Kernspaltflöten*. allemand. T. Band. 14. Neumünster : Wachholtz, 1975.
- [3] René CAUSSÉ, Benoît MILLE et Robert PIECHAUD. « Restitution sonore numérique des cornua de Pompei ». In : *Sound Making : Handcraft of Musical Instruments in Antiquity*. Sous la dir. de Sibylle EMERIT, Sylvain PERROT et Alexandre VINCENT. Paris : IRCAM, 2016. URL : <http://medias.ircam.fr/x27292e>.
- [4] Tinaig CLODORÉ-TISSOT. « Fiche témoins sonores du Néolithique et des Âges des métaux ». français. In : *Industrie de l'os préhistorique, Instruments sonores du Néolithique à l'aube de l'Antiquité* Cahier XII (2009).
- [5] CNRTL. *CNRTL (Centre National de Ressources Textuelles et Lexicales)*. 2015. URL : <http://www.cnrtl.fr/>.
- [6] Carlos GARCÍA BENITO. « Methodology for the reconstruction of prehistoric aerophones made of hard animal material ». In : *Actas das IV Jornadas de Jovens em Investigação Arqueológica - JIA 2011*. Sous la dir. de João CASCALHEIRA et Célia GONÇALVES. T. 2. Faro : Universidade do Algarve, 2011, p. 411-416.
- [7] Carlos GARCÍA BENITO, Marta ALCOLEA et Carlos MAZO. « Experimental study of the aerophone of Isturitz : Manufacture, use-wear analysis and acoustic tests ». In : *Quaternary International* (2015). ISSN : 10406182.
- [8] Carlos GARCÍA BENITO et Raquel JIMÉNEZ. « Archaeoacoustics, experimental archaeology and music : theoretical and methodological challenges in music archaeological research ». In : *Actas das IV Jornadas de Jovens em Investigação Arqueológica - JIA 2011*. Sous la dir. de João CASCALHEIRA et Célia GONÇALVES. T. 2. Universidade do Algarve, 2011, p. 409-410.
- [9] F. GATTONI et al. « Unusual application of com-puterized tomography : the study of musical instruments ». In : *Radiol. Med.* 97.3 (1999), p. 170-173.

- [10] N. KOUMARTZIS et al. « A new music instrument from ancient times : modern reconstruction of the greek lyre of hermes using 3D laser scanning, advanced computer aided design and audio analysis ». In : *J. New Music Res.* 44.4 (2015), p. 324-346.
- [11] D KUNEJ et I TURK. « New perspectives on the beginnings of music : Archaeological and musicological analysis of a middle Paleolithic bone "flute" ». In : *The Origins of Music*. Sous la dir. de N. L. WALLIN, B. MERKER et S. BROWN. 2000, p. 235-268. ISBN : 0262232065.
- [12] Susanne C MÜNDEL, Friedrich SEEBERGER et Wulf HEIN. « The Geissenklösterle flute : discovery, experiments, reconstruction ». Allemand. In : *Studien zur Musikarchäologie. Archäologie früher Klangerzeugung und Tonordnung*. Sous la dir. d'Ellen HICKMANN, Ann D KILMER et Ricardo EICHMANN. T. 3. 1950. Rahden : Verlag M. Leidorf, 2002, p. 107-118.
- [13] Etienne SAFA. « Handcrafting in archaeomusicological research : record of a one-year apprenticeship alongside a traditional-flute-maker and its application to sound archaeology ». In : *Sound Making : Handcraft of Musical Instruments in Antiquity*. Sous la dir. de Sibylle EMERIT, Sylvain PERROT et Alexandre VINCENT. Paris : IRCAM, 2016. URL : <http://medias.ircam.fr/xcf6cf9>.
- [14] Etienne SAFA et al. « Digital and Handcrafting Processes Applied to Sound-Studies of Archaeological Bone Flutes ». In : *Digital Heritage - Progress in Cultural Heritage : Documentation, Preservation, and Protection*. Sous la dir. de Marinos IOANNIDES et al. T. 2. Nicosia : Springer, 2016, p. 184-195. ISBN : 9783319484969.