



**HAL**  
open science

# Os qui roule n'amasse pas mousse. Une expérimentation sur le tri différentiel des vestiges lithiques et osseux dans un écoulement turbulent

Marc Thomas, Emmanuel Discamps, Mathieu Lejay, Xavier Muth,  
Jean-Guillaume Bordes

## ► To cite this version:

Marc Thomas, Emmanuel Discamps, Mathieu Lejay, Xavier Muth, Jean-Guillaume Bordes. Os qui roule n'amasse pas mousse. Une expérimentation sur le tri différentiel des vestiges lithiques et osseux dans un écoulement turbulent. *PALEO: Revue d'Archéologie Préhistorique*, 2023, 33. hal-04701865

**HAL Id: hal-04701865**

**<https://hal.science/hal-04701865v1>**

Submitted on 6 Nov 2024

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

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



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial 4.0 International License

# OS QUI ROULE N'AMASSE PAS MOUSSE. UNE EXPÉRIMENTATION SUR LE TRI DIFFÉRENTIEL DES VESTIGES LITHIQUES ET OSSEUX DANS UN ÉCOULEMENT TURBULENT

Marc Thomas<sup>a</sup>  
Emmanuel Discamps<sup>a</sup>  
Mathieu Lejay<sup>a,b</sup>  
Xavier Muth<sup>c</sup>  
Jean-Guillaume Bordes<sup>d</sup>

**a.** TRACES, UMR 5608 CNRS Université Toulouse Jean Jaurès, 5, Allées A. Machado, 31058, Toulouse Cedex 1, France.

**b.** GeoArchEon Sarl, 55210, Vigneulles-les-Hattonchatel, France.

**c.** Get in Situ, CH1097 Riex, Switzerland.

**d.** PACEA UMR 5199 CNRS Université Bordeaux, CNRS, B2, All. Geoffroy Saint-Hilaire, 33400 Talence, France.

PALEO 33  
DÉCEMBRE 2023  
PAGES 146 À 163

**MOTS-CLÉS** tri différentiel, expérimentation, écoulement turbulent, taphonomie, Paléolithique, archéozoologie.

Les vestiges lithiques et fauniques constituent les principaux témoins des occupations paléolithiques. Les proportions relatives de ces matériaux au sein des assemblages sont utilisées pour définir la fonction des sites ou parties de site. Or, de nombreux processus naturels sont susceptibles d'occulser des tris sur les ensembles de vestiges, parmi lesquels les écoulements turbulents, intervenant dans de nombreux domaines (e.g. fluviale, ruissellement concentré). Afin d'évaluer cet impact, de nombreuses expérimentations ont déjà été réalisées, mais peu d'entre elles ont concerné à la fois les vestiges fauniques et lithiques. Ainsi, l'impact comparé des écoulements de régime turbulent sur ces deux types de vestiges reste difficile à caractériser. De plus, la plupart des expérimentations connues concernent des ossements complets, parfois encore articulés, rendant toute comparaison difficile avec le référentiel fossile où les ossements sont fracturés et brûlés lors des activités de subsistance.

Dans cet article, nous présentons les résultats d'une expérimentation dont l'objectif était d'évaluer l'impact relatif d'un écoulement turbulent sur différentes catégories (silex, vestiges osseux brûlés et non brûlés, tissu compact et spongieux) et classes de taille de vestiges. Le principal résultat de cette expérimentation est la mise en évidence d'une mobilité plus forte de toutes les catégories et classes de taille de vestiges fauniques par rapport aux vestiges lithiques, et ce quelle que soit leur taille.

Le tri généré est corrélé à la densité des vestiges, soit, du plus mobile au moins mobile : l'os spongieux brûlé, l'os compact brûlé, l'os spongieux non brûlé, l'os compact non brûlé et le silex.

Par ailleurs, nous avons pu mesurer qu'un tri dimensionnel même léger des vestiges lithiques implique un tri conséquent des ensembles de vestiges fauniques. Dans le cas inverse, lorsque l'analyse granulométrique des vestiges lithiques ne révèle pas de tri, nos expérimentations soulignent que ce résultat ne peut être avancé comme argument pour un bon degré d'intégrité des ensembles fauniques.

Ainsi, lorsque des processus sédimentaires impliquant des écoulements concentrés sont mis en évidence par les études géoarchéologiques, des précautions doivent être prises concernant les interprétations d'ordre archéozoologique.

**Rolling Bones Gather No Moss. An experimental investigation of differential sorting of lithic and bone remains in a turbulent flow**

Lithic and faunal remains are often the main evidence of Palaeolithic occupations and can occur on sites in highly variable proportions. The variety of remains and their relative proportions provide the best means for elucidating activities carried out on-site as well as for characterizing site function. However, numerous sedimentary processes can sort remains, including turbulent flow that can occur in different contexts (e.g., fluvial episodes, runoff in channels). While numerous experiments have explored the consequences of such phenomena in archaeological contexts, few have been carried out using both faunal and lithic remains, meaning that the relative impact of turbulent flows on these two artefact types remains difficult to characterize. Moreover, most previous experiments involved complete, sometimes still articulated bones. This important limitation makes it difficult to compare experimental analyses with data obtained from Palaeolithic archaeological contexts, where most bones are fractured as part of subsistence activities or fragmented by natural processes after discard (e.g., trampling, freezing). Consequently, it is difficult to quantify the differential transport of remains according to type. Here, we present the results of experiments designed to test the differential mobility of the two main artefact types found on Palaeolithic sites – flint and bone – in a context of turbulent flow.

For this study, an experimental corridor was installed outdoors, on private land in the commune of Lamothe-Fénelon, in the Lot département of southwestern France. The corridor's substrate comprised loose centimetric gravels and limestone pebbles dispersed on a slightly more compact layer produced by trampling and leaching of the same materials as well as a finer, sandy fraction. The surface had a regular topography, with a slope of 4 to 5 degrees. The experimental corridor was divided into a) an upstream quadrangular corridor (4 m long and 1 m wide, with its greatest length in the direction of the steepest slope), delimited by two parallel metallic rails and divided into sixteen 25-cm-wide segments labelled "A" to

"P"; and b) an unrestricted zone, denoted "Q", downstream of the corridor. For each experiment, 1) a pile of knapped flint comprising variously-sized pieces and bone fragments (burnt and unburnt bone, compact and spongy tissue) were placed in bays "A" and "B"; 2) 66 litres of water were emptied from a tank into the experimental corridor eight times (approximately 528 litres in total); 3) objects were recorded per bay in the upstream zone (bays "A" to "P"), as well as in the downstream zone ("Q"). For each run of the experiment, photogrammetric models were generated, and photographs were taken every half-second using GoPro cameras placed above the experimental corridor.

Statistical analyses highlight differential mobility according to:

- type of material: bone remains are more mobile than flint remains. Regardless the size class, bays A and B always yielded more flint than bone remains.
- bone structure: spongy bone is significantly more mobile than compact bone.
- size: smaller materials between 4 and 20 mm are more mobile than remains longer than 20 mm.
- combustion stage: burnt bones are more easily set in motion by water.

The sorting of the material during the experiments is directly correlated with the density of the remains. For the same size class, burnt cancellous bone is the most mobile, followed by burnt compact bone, unburnt cancellous bone, unburnt compact bone and, finally, flint. Overall, our experiments revealed all categories and size classes of faunal remains to be more readily displaced by water flow compared to lithic remains, regardless their size. This differential mobility has important implications for zooarchaeological interpretations. Using the data generated during our experiments, we carried out a discriminant analysis of burnt bone assemblages per bay based on criteria traditionally used by Palaeolithic zooarchaeologists. The displacement of cancellous bone by turbulent flow produced a bone assemblage downstream that could be misinterpreted as evidence of the use of bone as fuel. At the same time, bone clusters resulting from the use of bone as fuel could be depleted in burnt cancellous elements due to water action, and therefore unrecognized in zooarchaeological analyses.

Based on the results of our experiments, minor size sorting of lithic remains is accompanied by a significant sorting of all types of faunal remains, or even their almost total disappearance. Conversely, when no sorting is evident, our experiments nevertheless demonstrate that this is not necessarily indicative of well-preserved faunal assemblages. Our results show that assessing the integrity of bone assemblages on archaeological sites cannot be based on the size distribution of lithic artifacts alone. Furthermore, in cases where

---

**KEY-WORDS** Differential sorting, experimentation, water flow, taphonomy, Palaeolithic, zooarcheology

geoarchaeological studies have highlighted sedimentological processes involving turbulent flow, precaution must be taken in zooarchaeological interpretations, particularly regarding the representation of the axial skeleton, the presence of burnt bones, or the potential use of bone as fuel.

---

## INTRODUCTION

La détermination de la fonction des sites archéologiques repose sur la caractérisation du contenu et de l'organisation des nappes de vestiges qui les constituent, en particulier par le biais des analyses techno-économiques et archéozoologiques. Cependant, dans les années 1960 à 1990, de nombreux travaux ont mis en évidence que les ensembles de vestiges ne sont pas directement le reflet des occupations passées (Villa 1982 ; Schick 1986 ; Nash, Petraglia 1987). En effet, ils ont subi, entre leur formation et leur fouille, des perturbations dont la nature et l'intensité doivent être mesurées au mieux afin d'établir la robustesse des données disponibles aux chercheurs et susceptibles d'interprétations d'ordre archéologique. Cette évaluation de la fiabilité des données passe en particulier par une compréhension détaillée des processus de formation des sites (Schiffer 1983 ; Texier 2000 ; Stein 2001).

Parmi ces derniers, les écoulements turbulents participent à la sédimentation de nombreux sites, notamment dans les plaines d'inondation des cours d'eau (Shackley 1978 ; Petraglia, Nash 1987). Dans la nature, les écoulements de régime turbulent se manifestent par exemple dans les rivières, les torrents et les chenaux. Les particules les plus fines sont transportées par suspension alors que les particules les plus grossières, en contact permanent ou intermittent avec le lit sont transportées par charriage, c'est-à-dire, par roulement, glissement et saltation (Bravard, Petit 1997 ; Bertran *et al.* 2006).

L'aptitude d'un écoulement à transporter des particules par charriage est lié à sa force tractrice dont l'intensité dépend de la section mouillée déterminée par la forme du lit et la hauteur d'eau, de la pente et de la rugosité du substrat (Hanson 1980 ; Bravard, Petit 1997). L'aptitude d'une particule à être mise en mouvement par une telle force dépend de sa taille, de sa forme et de sa densité (Hanson 1980 ; Schick 1986). Si les forces menant à sa stabilité, liées à ces derniers paramètres, dépassent celles de la force tractrice, alors la particule reste immobile. À l'inverse, si la force tractrice est supérieure aux forces de stabilité de la particule, alors elle est mise en mouvement (Shields 1936).

Or, les objets archéologiques, tout comme les particules sédimentaires subissent l'action des processus sédimentaires. Cependant, la forme et la densité des objets archéologiques sont très variables selon le matériau concerné (*e.g.* os versus silex). Ces deux derniers paramètres laissent ainsi supposer une mobilité différentielle de ces matériaux lorsqu'ils sont soumis à un écoulement concentré.

Le ruissellement recouvre une réalité différente puisque la lame d'eau n'atteint que quelques millimètres d'épaisseur ne submergeant pas totalement la plupart des objets et impliquant ainsi des interactions plus fortes avec le substrat (rugosité). L'effet « *splash* » provoqué par l'impact des gouttes d'eau sur le sol et les objets est également à prendre en compte dans ce contexte (De Ploey 1983 ; Lenoble 2005). Les conséquences du ruissellement sur les vestiges lithiques ont été caractérisées par Lenoble (2005) dans plusieurs

expérimentations. Pour mesurer les tris dimensionnels occasionnés par les différentes formes de ruissellement, l'auteur propose d'utiliser un diagramme triangulaire au sein duquel la répartition des échantillons testés est comparée à la répartition de débitages expérimentaux et à des aires obtenues grâce à des expérimentations de ruissellement en milieu naturel.

De nombreux travaux ont été dédiés à l'identification de ces processus sur le terrain. Certains se concentrent sur l'analyse des sédiments (Bertran *et al.* 2004 ; Lenoble 2005 ; Miall 2014 ; Macphail, Goldberg 2018) et d'autres sur l'analyse des objets archéologiques (Schiffer 1983 ; Schick 1986 ; Lenoble 2005). Les deux approches doivent être combinées afin de réellement permettre l'identification des processus sédimentologiques sur les sites et la caractérisation de leur impact sur les ensembles de vestiges (Lenoble, Bordes 2001 ; Lenoble 2005).

Afin de mettre en évidence les conséquences de la mobilité différentielle des vestiges dans les écoulements à régime turbulent (expériences en enceinte ou en domaine fluvial) et d'évaluer son impact sur les ensembles de vestiges, l'approche expérimentale a joué un rôle majeur. On peut diviser ces expérimentations en fonction de leurs matériaux d'étude<sup>1</sup> :

- vestiges lithiques : Isaac 1967 ; Schick 1986 ; Petraglia, Nash 1987 ;
- vestiges fauniques : Voorhies 1969 ; Dodson 1973 ; Behrensmeier 1975 ; Boaz, Behrensmeier 1976 ; Korth 1979 ; Hanson 1980 ; Coard, Dennell 1995 ; Blob 1997 ; Trapani 1998 ; Coard 1999 ; Domínguez-Rodrigo *et al.* 2019 ;
- vestiges lithiques et fauniques : Schick 1986.

L'homogénéité de la densité (environ 2,65) et de la forme (plate à l'exception des nucléus et percuteurs) des vestiges lithiques placent leur dimension comme le meilleur paramètre décrivant leur mobilité dans les écoulements concentrés (Schick 1986). Puisque forme et densité sont homogènes, l'analyse granulométrique permet à elle seule de mettre en évidence de manière fiable l'impact des écoulements concentrés sur les vestiges lithiques. En contexte archéologique, l'analyse granulométrique des vestiges lithiques est ainsi l'outil privilégié afin de mettre en évidence un tri des ensembles de vestiges (Lenoble 2005 ; Bertran *et al.* 2006). Mener ce type d'analyse sur les vestiges lithiques offre en effet deux principaux avantages : le premier est que le potentiel de préservation de ce matériau est meilleur que l'os, le second est que la distribution par classe de taille des vestiges lithiques est prévisible. Les ensembles de vestiges lithiques archéologiques peuvent en effet être comparés à des référentiels de débitages expérimentaux. La distribution granulométrique de la fragmentation de l'os est quant à elle dépendante de trop nombreux paramètres (*e.g.* combustion fragmentation post-abandon plus forte causée par le gel ou le piétinement) et ne peut être modélisée.

Selon les travaux expérimentaux cités ci-dessus, tous les paramètres (*i.e.* taille, forme et densité) jouent dans la mobilité des vestiges fauniques (micro-vertébrés et restes humains compris) mais à des degrés divers selon les

auteurs et leurs expérimentations. Les vestiges fauniques mettent en effet en évidence une grande variabilité de taille, de forme (Trapani 1998) et de densité (pour du mouton, allant de 0,89 pour une vertèbre lombaire à 2,19 pour une molaire ; Behrensmeier 1975). Aucun de ces paramètres ne permet à lui seul d'identifier et de décrire les tris opérés par des écoulements concentrés lorsque transféré au référentiel fossile. Ainsi, la plupart des auteurs (Voorhies 1969 ; Dodson 1973 ; Korth 1979 ; Blob 1997 ; Trapani 1998) proposent de classer les os en trois groupes, des plus mobiles (groupe 1) aux moins mobiles (groupe 3). Si le rang de certains os est très variable (*e.g.* crâne) ces classements opposent clairement les os du squelette axial (vertèbres, côtes, sternum) aux mandibules, toutes dans le groupe 3 quelles que soient les espèces considérées. Les os longs sont pour la plupart dans un groupe intermédiaire ou dans le groupe 3.

En plus de la mobilité différentielle des ossements selon les parties anatomiques, plusieurs auteurs ont mis en évidence que les os encore articulés sont plus mobiles que les os désarticulés car ils opposent une surface plus conséquente à l'écoulement (Coard, Denell 1995 ; Trapani 1998 ; Coard 1999). Coard (1999) met également en évidence que les os secs sont plus mobiles que les os mouillés. Enfin, les résultats d'une expérimentation menée par Domínguez-Rodrigo *et al.* (2019) mettent en avant que le type de tissu (compact versus spongieux) et la forme (plat, cylindre, cube-sphère) sont des paramètres déterminants dans la mobilité des ossements, indépendamment de leur taille.

Seules certaines expériences en milieu naturel réalisées par Schick (1986) impliquent à la fois des vestiges lithiques et des vestiges fauniques. Dans chacune d'entre elles, les vestiges fauniques possèdent une mobilité plus importante que les vestiges lithiques. L'expérience numéro 34 de cette autrice a particulièrement attiré notre attention car elle met en évidence la disparition quasi totale des ossements (principalement complets et peu nombreux) disposés (seulement 1 sur 17 a été retrouvé) dans une plaine d'inondation lors d'une crue alors que seuls les vestiges lithiques inférieurs à 20 mm ont été également mobilisés par les écoulements. Selon Schick (1986), lors de la crue, le courant n'a jamais atteint une force suffisante pour mettre en mouvement et transporter des vestiges lithiques de taille supérieure et a agi sur une longue durée, expliquant que tous les vestiges mobiles dans ces conditions (*i.e.* les ossements notamment) n'ont pas été retrouvés en aval car ils ont été transportés sur une grande distance.

Grâce à des expérimentations et en prenant en compte la dimension et la densité des différentes parties anatomiques du squelette (plusieurs espèces confondues), Behrensmeier (1975) calcule la taille équivalente de grains de quartz dont l'aptitude à la mobilité serait égale. Ainsi, d'après ses calculs, une molaire de cheval, une molaire de mouton, un métatarse de bovidé et une côte de bovidé auraient par exemple la même mobilité que des grains de quartz d'un diamètre respectivement d'environ 27 mm, 9 mm, 8 mm et 3 mm (nombres arrondis à l'unité).

[1] La revue bibliographique n'est pas exhaustive.

Néanmoins, la majorité de ces expérimentations ont porté sur une gamme de matériaux uniquement et pas de concert sur un ensemble de vestiges lithiques et fauniques, comme trouvés en contexte archéologique. De plus, dans la plupart d'entre elles, les ossements mobilisés dans les expérimentations sont complets (Isaac 1967 ; Voorhies 1969 ; Behrensmeyer 1975). Ce dernier facteur crée une limite non négligeable lorsqu'il s'agit de comparer les résultats obtenus à des contextes archéologiques paléolithiques où les ossements sont, pour une immense majorité, fracturés par les humains dans le cadre des activités de subsistance, ou fragmentés par l'action de processus naturels postérieurs à l'abandon des objets (e.g. piétinement, gel). Ainsi, il reste difficile de quantifier le transport *a priori* différencié des vestiges selon leur nature.

S'il apparaît clair que lorsqu'un tri dimensionnel est mis en évidence sur les vestiges lithiques, les ensembles fauniques souffrent en conséquence de tris plus conséquents car ces vestiges sont moins denses et possèdent généralement des formes plus compactes (e.g. cylindres, sphères plus susceptibles d'être mobilisées) même lorsqu'ils sont fragmentés, reste ouverte la question de savoir si, en l'absence de tri granulométrique apparent sur les vestiges lithiques, les ensembles fauniques ont pu subir un tri. C'est ce que suggèrent les calculs de Behrensmeyer (1975) et c'est ce que nous proposons de vérifier par une expérimentation.

Ainsi, l'expérimentation que nous décrivons dans cet article a pour objectif de mettre en évidence la mobilité différentielle des principaux matériaux retrouvés dans les ensembles de vestiges des sites paléolithiques lorsqu'ils sont soumis à un écoulement de régime turbulent (*i.e.* concentré).

## 1 | MATÉRIEL ET MÉTHODE

Nous décrivons dans la partie suivante la composition de l'amas expérimental, ses modalités de fabrication et le déroulement de l'expérimentation. L'ambition de l'expérimentation n'est pas de reproduire l'action d'un processus sédimentaire spécifique. Ainsi, les choix effectués ont été opérés afin de favoriser la mise en mouvement des différents vestiges dans un écoulement concentré afin d'observer les tris opérés.

| Classe de taille | [4-10[ | [10-20[ | [20-31,5[ | [31,5-50[ | > 50 |
|------------------|--------|---------|-----------|-----------|------|
| Effectif         | 483    | 165     | 65        | 40        | 3    |

## La cellule expérimentale

La cellule expérimentale a été installée en extérieur, sur un terrain privé de la commune de Lamothe-Fénelon (Lot). Le substrat, au fond de la cellule est composé de graviers centimétriques et de cailloutis calcaire en surface (castine communément utilisée pour aménager les chemins) reposant sur une couche un peu plus compacte (piétinée, lessivage naturel) composée des mêmes matériaux et d'une fraction plus fine, sableuse. Le terrain présente une topographie régulière avec une pente de 4 à 5°.

De l'amont vers l'aval, la cellule est constituée de (fig. 1) :

- un bac de déversement de 66 litres d'eau d'1 m de large. Lors de la troisième expérimentation, une plateforme métallique d'environ 1 m de long, d'une vingtaine de centimètres de large et de quelques millimètres d'épaisseur, a été ajoutée à la suite du bac pour éviter une érosion trop importante du substrat à l'endroit de la chute de l'eau, cela afin de garder les paramètres de l'expérimentation constants entre les différents essais ;
- un dispositif amont quadrangulaire de 4 m de long sur 1 m de large, la longueur étant placée dans l'orientation de la plus grande pente. Cette partie de la cellule est délimitée par deux rails parallèles et elle est divisée en seize travées de 25 cm de large dénommées par des lettres de « A » à « P ». Des cibles photogrammétriques sont disposées sur les rails et trois caméras (GoPro 5) sont situées au-dessus de la cellule ;
- une zone avale, notée « Q », qui correspond à un espace non aménagé pour les besoins de l'expérimentation voué à recueillir les vestiges ayant dépassé les 4 m de transport.

## L'amas expérimental

Pour les besoins de l'expérimentation, M. Brenet (INRAP – PACEA) a taillé un bloc de silex Sénonien noir selon un concept de débitage Discoïde (Mourre 2003). Toutes les pièces de largeur maximale supérieure à 4 mm ont été conservées (n = 756). Les vestiges lithiques ont été décomptés après tamisage, c'est donc la largeur maximale des vestiges qui détermine leur classe de taille. Les classes de taille retenues sont 4 mm, 5 mm, 10 mm, 20 mm, 31,5 mm et 50 mm.

Six ossements de sanglier (*Sus scrofa*, individu adulte ; 2 fémurs, 2 humérus et 2 scapulas) et deux de vache (*Bos taurus*, individu relativement jeune aux épiphyses partiellement soudées ; un humérus et un radio-ulnaire) ont été fracturés<sup>2</sup>. Après le retrait de l'ensemble des tissus

## TABLEAU 1

Répartition par classe de taille des vestiges lithiques taillés pour l'expérimentation

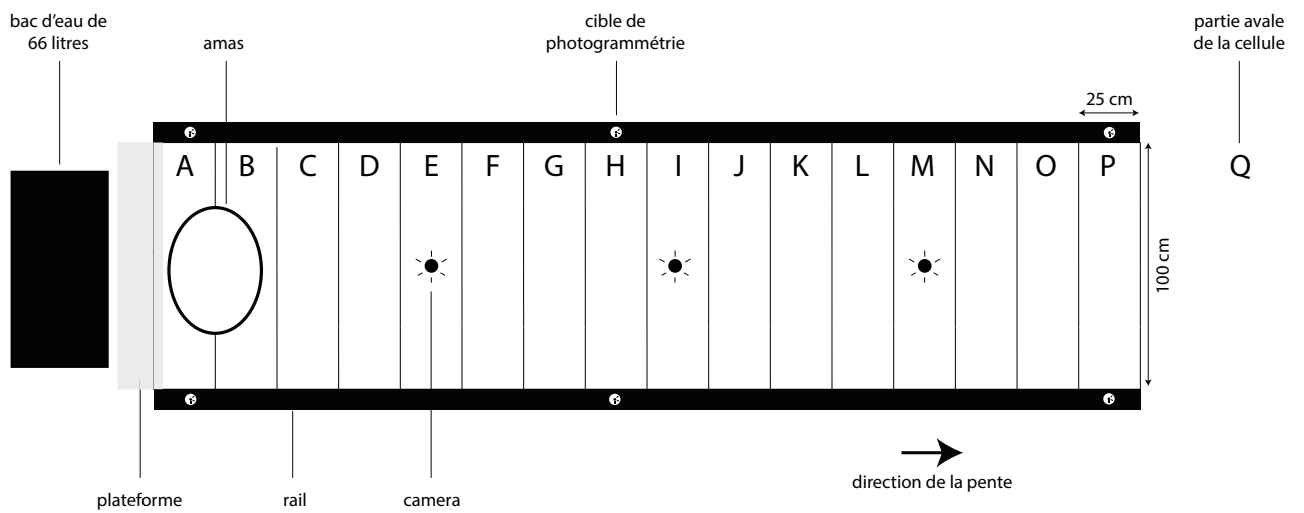
*Size class distribution of the lithic remains knapped for the experiment.*

[2] Les os étaient congelés frais, ils ont été retirés du congélateur quelques heures avant la réalisation de l'expérimentation.

A.



B.



— FIGURE 1 —

A. photo de la cellule expérimentale ; B. schéma de la cellule expérimentale

A. photo of the experimental cell; B. schematic view of the experimental cell

mous, tous les os de sanglier ont été fracturés sur une enclume en pierre à l'aide d'un galet. Les os de vache ont été placés dans un feu de bois. L'objectif n'était pas de constituer un amas osseux ressemblant en tous points à un assemblage archéologique, mais uniquement d'obtenir des fragments de taille, de tissus (*i.e.* compact et spongieux) et de stades de combustion (*i.e.* carbonisé et non brûlé) divers. Les restes du foyer ont été tamisés (maille de 4 mm) à l'eau et triés afin de récupérer les ossements. Tous les os obtenus ont ensuite été classés par type de tissu (spongieux, compact), stade de combustion (carbonisé ou non brûlé) et par classe de taille tel qu'illustré dans le **tableau 1**.

Afin d'éviter les confusions lors de l'expérimentation et de faciliter les décomptes, les fragments osseux présentant à la fois des tissus spongieux et compacts ont été écartés, pour ne garder que les fragments très majoritairement constitués d'os spongieux ou compact. Les objets ont été colorés à l'aide de bombes de chantiers en différentes couleurs selon leur catégorie afin de faciliter leur récolte en fin d'expérimentation (os compacts en rose, os spongieux en orange, silex en jaune, os carbonisés non peints).

Une disposition en amas assez dense des vestiges, comme s'il s'agissait d'un amas de rejet, a été décidée afin de s'assurer que tous les vestiges quelle que soit leur nature soient soumis aux mêmes conditions expérimentales. Le choix de tester la mobilité de chaque matériau un à un aurait demandé de maîtriser parfaitement les conditions d'écoulement. La disposition en amas implique des modifications locales de l'écoulement concentré lorsque des effets de masquage ou de surexposition (Lenoble 2005) entrent en jeu. Ce sont des phénomènes qui interviennent également en contexte archéologique lorsque les nappes de vestiges sont riches.

**Déroulement de l'expérimentation**

Lors d'une expérimentation, les étapes suivantes sont suivies :

- 1) disposition de l'amas expérimental dans les travées A et B. Les vestiges sont déposés les uns après les autres puis mélangés à la main afin de rendre leur disposition aléatoire (**fig. 2A**) ;
- 2) un modèle photogrammétrique de l'amas expérimental est effectué avant déversement du bac (**fig. 2A**), à l'aide d'un appareil photo numérique reflex Nikon D5 ;
- 3) remplissage du bac avec de l'eau claire (66 litres) ;

4) les trois caméras GoPro sont réglées pour prendre une photographie toutes les demi-secondes. Le déclenchement des trois appareils disposés à environ 1,80 m au-dessus de la cellule, tous les mètres (en longueur), est synchronisé. Les GoPro sont allumées et entament l'enregistrement photographique ;

5) le bac préalablement rempli est déversé. Le temps de déversement est chronométré afin de le conserver relativement constant, entre 6 et 10 secondes. Pendant l'expérimentation, des observations visuelles et des notes sont prises. Après déversement, les GoPro sont arrêtées ;

Les étapes 3), 4) et 5) sont répétées huit fois, soit un volume cumulé d'eau déversée de 528 litres. Le temps entre chaque déversement est d'environ une minute, soit le temps de remplissage du bac.

6) pour chacune des expérimentations, un modèle photogrammétrique de toute la cellule expérimentale est effectué après les huit déversements (**fig. 2B**) ;

récolte la plus exhaustive possible des objets par travée dans le dispositif amont, et dans la zone aval (travée Q) ;

7) décompte des vestiges par travée.

L'expérience a été répétée trois fois sans qu'aucun paramètre ne soit modifié si ce n'est les effectifs de départ. En effet, d'une expérience à l'autre, certaines pièces, souvent les plus petites n'ont pu être retrouvées : il s'agit d'un très faible nombre de pièces (< 2% de l'effectif total). Afin de pallier ce problème, les pourcentages par catégorie dans la section suivante sont réalisés à partir du nombre total de pièces retrouvées en fin d'expérimentation et non pas sur l'effectif total en début d'expérience (amas disposés dans les travées A et B).

**Traitement des photographies acquises lors de l'expérimentation**

Pour l'une des trois expérimentations, des orthophotographies de la cellule expérimentale ont été obtenues par photogrammétrie avant et après les déversements (respectivement **fig. 2 A** et **B**), en utilisant le logiciel Agisoft Metashape. Grâce aux modèles 3D issus des deux relevés photogrammétriques, deux modèles numériques de terrain (MNT) pour chacun des deux états ont été générés. La **figure 2C** correspond à la soustraction des deux MNT. Elle met en évidence les volumes de sédiment déplacés lors des écoulements.

Sur l'orthophotographie montrant l'état de la cellule en fin d'expérimentation, les centroïdes des objets ont été détectés automatiquement selon leur couleur.

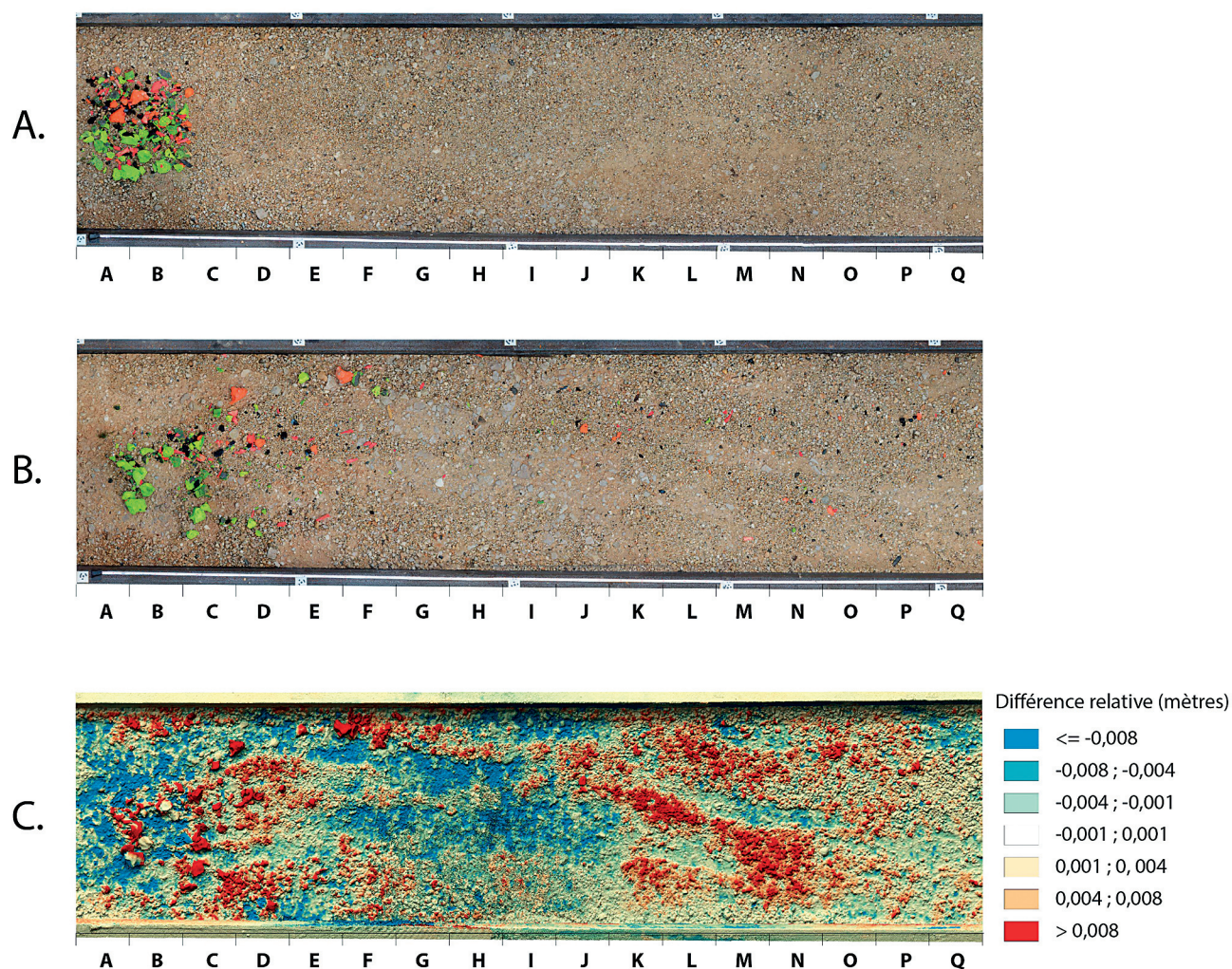
|               | os        |       |           |       | total |     |
|---------------|-----------|-------|-----------|-------|-------|-----|
|               | spongieux |       | compact   |       |       |     |
|               | non brûlé | brûlé | non brûlé | brûlé |       |     |
| longueur (mm) | [4 ; 20]  | 31    | 101       | 59    | 88    | 279 |
|               | ]20 ; 30] | 13    | 22        | 16    | 42    | 93  |
|               | ]30 ; 40] | 5     | 5         | 12    | 12    | 34  |
|               | ]40 ; 50] | 2     | 3         | 11    | 3     | 19  |
|               | > 50      | 3     | 1         | 14    | 2     | 20  |
| total         | 54        | 132   | 112       | 147   | 445   |     |

**TABLEAU 2**

Répartition par classe de taille, par type de tissu et stades de combustion des restes osseux utilisés pour constituer l'amas expérimental

*Size class distribution, tissue type and stage of combustion of the bone remains used in the experiment.*





— FIGURE 2 —

Pour l'une des trois expérimentations : A. orthophoto obtenue par photogrammétrie de la cellule expérimentale avant premier déversement ; B. orthophoto obtenue par photogrammétrie de la cellule expérimentale en fin d'expérimentation ; C. différence entre les modèles numériques de terrain de la topographie du substrat en début et en fin d'expérimentation. La couleur rouge révèle une altitude positive, la couleur bleue une altitude négative.

For one of the three experiments: A. Orthophoto obtained by photogrammetry of the experimental cell before the first flow; B. Orthophoto obtained by photogrammetry of the experimental cell at the end of the experiment; C. Difference between the elevation terrain models of the substrate topography at the beginning and end of the experiment. Red indicates a positive elevation, blue a negative elevation.

Malheureusement, nous n'avons pas pu distinguer les restes fauniques brûlés spongieux des restes fauniques brûlés compacts car ces derniers n'ont pas été colorés différemment. Les objets détectés sont projetés par catégorie sur la **figure 3**.

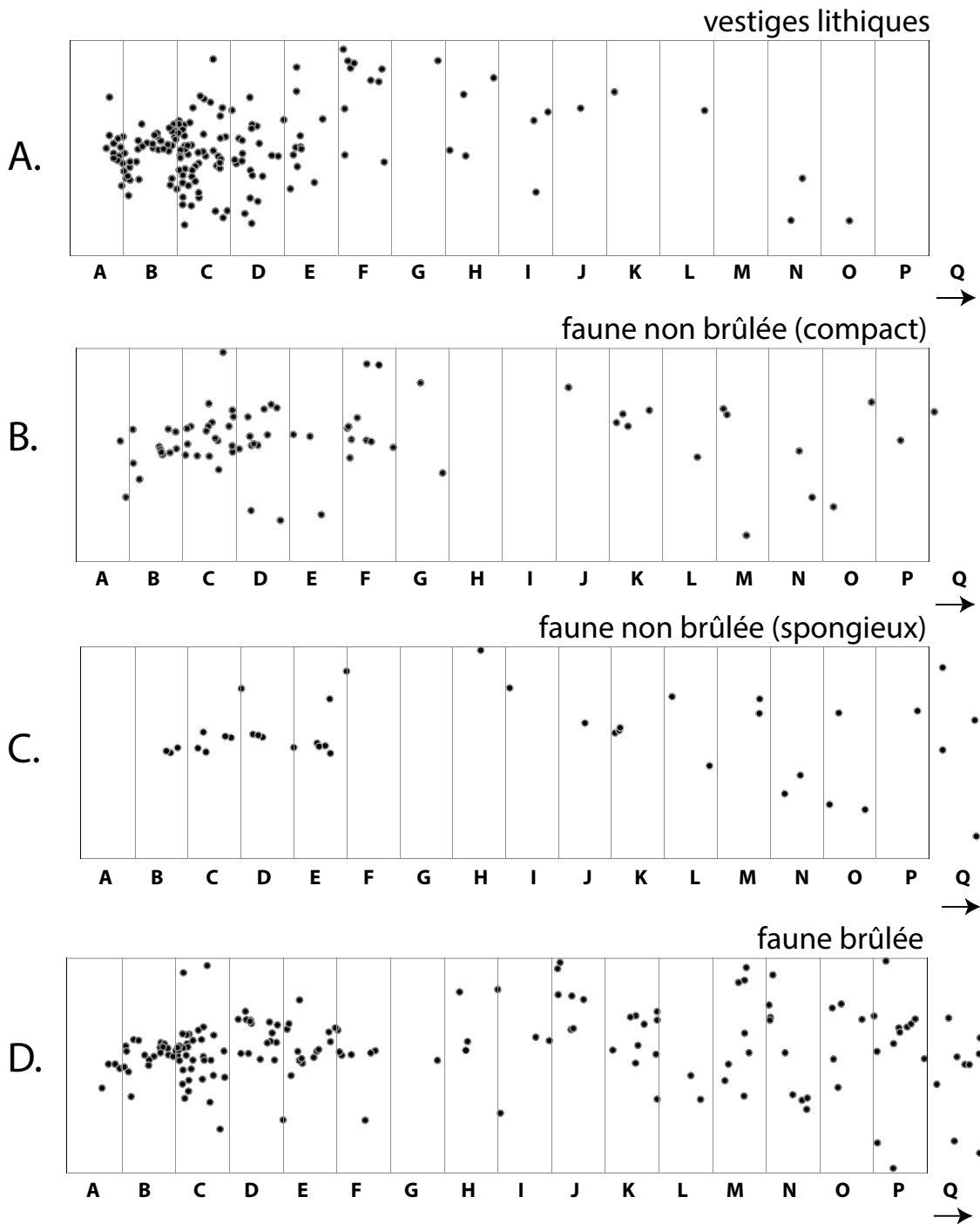
L'ensemble des données brutes (décomptes, photographies et vidéo) issues de ces expérimentations sont disponibles, sous licence libre, sur la plateforme NAKALA : <https://nakala.fr/10.34847/nkl.d7d46tq9>

## 2 | MOBILITÉ DIFFÉRENTIELLE DES VESTIGES

### Observations générales des conséquences de l'écoulement

Lors des deux à trois premiers déversements, l'écoulement produit s'apparente à un écoulement concentré dont le régime est turbulent et dont l'épaisseur varie entre un et, localement, deux centimètres (**fig. 2C**). Dans la zone source, l'eau déversée est claire, au fur et à mesure de son écoulement, l'eau se charge légèrement en sédiment fin sans qu'il n'y ait de modification importante de ses caractéristiques (*i.e.* écoulement peu chargé).

Les premiers déversements du bac ont de fortes conséquences sur l'amas expérimental. Les ossements en particulier sont mis en mouvement dès le premier déversement, certains d'entre eux sortent même du



— FIGURE 3 —

Pour l'une des trois expérimentations : localisation en fin d'expérimentation des vestiges : A. en silex ; B. fauniques tissus compacts ; C. fauniques tissus spongieux ; D. fauniques brûlés

For one of the three experiments: Location at the end of the experiment of A. flint; B. compact tissue faunal remains; C. spongy tissue faunal remains; D. burnt faunal remains.

dispositif amont pour terminer dès le premier déversement dans la travée « Q », à plus de 4 m du bac. Lors des premiers déversements, ce sont les flancs de l'amas résiduel qui sont les plus touchés même si de faibles déplacements des éléments les moins mobiles se produisent en son centre et forment des figures de blocage. Au fur et à mesure, l'amas est étiré dans la travée C et sa densité diminue (fig. 2B et 3).

Après le déversement de trois à quatre bacs, un certain équilibre se crée. L'eau emprunte des rigoles profondes d'environ deux centimètres, formées lors des déversements précédents (fig. 2C). Certains vestiges *a priori* très mobiles restent bloqués dans les travées A et B, soit par la présence de plus grosses pièces, soit situés dans des espaces inter-rigoles que l'eau n'emprunte plus. Au huitième déversement, plus aucun vestige n'est mis en mouvement. Le système a atteint un équilibre.

La disposition des objets en amas et les modalités de déversement de l'eau (i.e., eau claire directement au-dessus de l'amas) influencent l'intensité du tri produit. Dans les premiers stades de l'expérience (avant l'incision de rigoles), ce mode de déversement favorise la mise en mouvement de toutes les pièces, même sur de courtes distances. Cela ne permet pas le piégeage d'éléments de petites tailles sous de gros éléments immobiles. L'interaction entre pièces de différentes tailles se limite alors à des figures de blocage ou au piégeage de petits éléments au contact des plus gros. Un tri supérieur serait observé sans disposition en amas des vestiges, mais à l'inverse, ce tri serait probablement moindre si un réel « effet amas » (Lenoble, 2005) était observé.

Le déplacement des vestiges s'opère de manière intermittente soit par saltation et roulement pour les vestiges les plus mobiles, respectivement plats et cubiques ou sphériques soit par glissement de quelques centimètres pour les vestiges les moins mobiles.

En fin d'expérimentation, la disposition des vestiges se divise en quatre, dont des zones : « source » dans les travées A à C, une zone intermédiaire faiblement redistribuée D à F, de transit G à P et de dépôt « Q » (fig. 2 et 3).

## Comparaison du résultat des trois expérimentations

Afin de comparer les résultats des trois expériences réalisées, une Analyse factorielle en Composante Principale (ACP) a été effectuée sous R (R Core Team 2022) à l'aide du package « FactoMineR » (Lê et al. 2008) sur les données centrées et réduites des effectifs par matériau et par classe de taille des cellules en fin de chaque expérimentation. La variable « id\_exp » (numéro des expériences de 1 à 3) est classée en variable qualitative supplémentaire afin d'observer son comportement vis-à-vis du contenu de chaque cellule pour chacune des expériences réalisées. La figure 4 met en évidence une nette superposition des ellipses formées par la variable « id\_exp » dans l'espace factoriel soulignant l'homogénéité de leurs résultats. Cela nous autorise à cumuler les résultats des trois expériences afin de disposer d'effectifs plus conséquents et de simplifier les analyses statistiques suivantes.

## Comparaison de l'aptitude à la mobilité des objets selon leur nature et leur taille

Afin de se rapprocher de la réalité des méthodes de fouille employées sur la plupart des sites, les données sont présentées en séparant d'une part les pièces supérieures

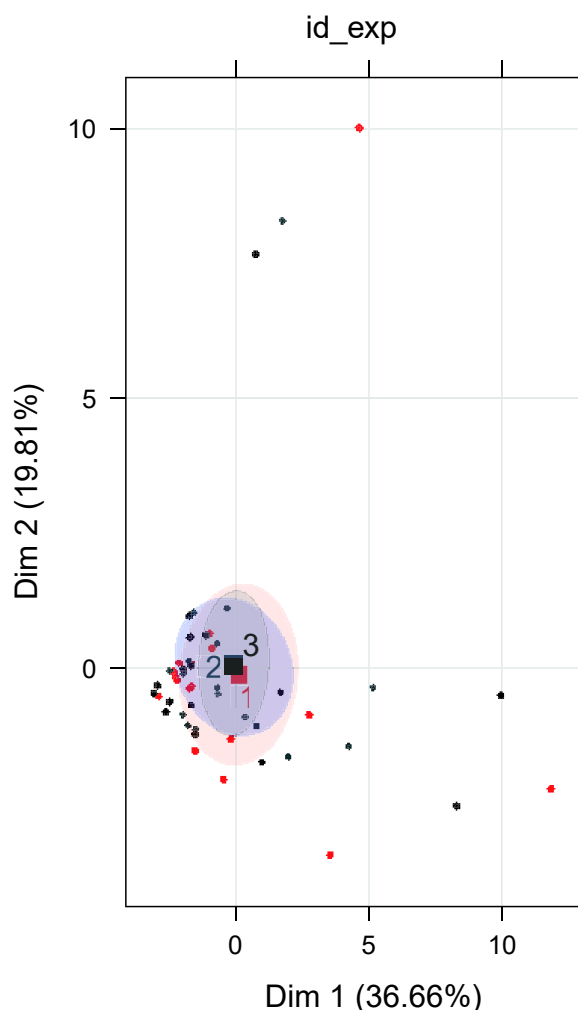


FIGURE 4

Ellipses de confiance autour de la variable qualitative supplémentaire « id\_exp » dans l'espace factoriel de l'ACP sur le contenu de chaque cellule en fin d'expérimentation. Les points rouges, gris et noirs correspondent à l'emplacement des variables dans l'espace factoriel (respectivement des expérimentations 1, 2 et 3).

Confidence ellipses around the additional qualitative variable « id\_exp » in the factorial space of the PCA on the content of each cell at the end of the experiment. The red, grey, and black dots correspond to the location of the variables in the factor space (respectively of experiments 1, 2 and 3).

à 20 mm généralement isolées et coordonnées en trois dimensions et les pièces inférieures à 20 mm retrouvées dans les refus de tamis (maille de 4 mm). Aussi, dans la plupart des graphiques, les travées sont regroupées 2 à 2 afin de simplifier leur lecture et de disposer d'effectifs plus solides.

Les histogrammes suivants synthétisent le résultat des expérimentations par grandes catégories de vestiges. Lorsque cela n'est pas précisé le contenu du cumul des travées A et B dans les graphiques correspond à celui observé en fin d'expérimentation. La mention contraire « A+B initial » correspond à la composition de l'amas de départ (i.e. à 100 % de chaque catégorie).

Plus de 50 % des vestiges de 4 à 20 mm ont été transportés au-delà des travées A et B (fig. 5). Le constat est le même pour les vestiges supérieurs à 20 mm à l'exception des vestiges en silex pour lesquels moins de 50 % ont été transportés au-delà de la zone source (63 % d'entre eux sont toujours dans la travée AB, fig. 6). Cette dernière catégorie de matériau est la moins mobile et ce, quelle que soit la dimension des vestiges. Quelle que soit la taille des vestiges, dans l'ordre des plus forts taux de résidualisation (travée AB) et des distances parcourues (i.e. les autres travées) se placent l'os spongieux, l'os compact puis le silex. À partir de ce graphe, il est difficile d'appréhender le rôle de la variable « état de combustion des os » dans la mobilité des objets.

Les figures 5, 6 et 7 permettent de mettre en avant quatre observations :

- Une mobilité différentielle des vestiges selon le matériau : quelle que soit la classe de taille considérée, les vestiges osseux, quel que soit le tissu (i.e. compact versus spongieux), sont plus mobiles que les vestiges en silex. Quelles que soient les classes de taille considérées, les travées A et B en fin d'expérimentation recueillent toujours plus de vestiges en silex que de vestiges osseux (63 % et 43 % de silex contre toujours moins de 40 % de vestiges osseux quelles que soient leurs propriétés, fig. 5 et 6).

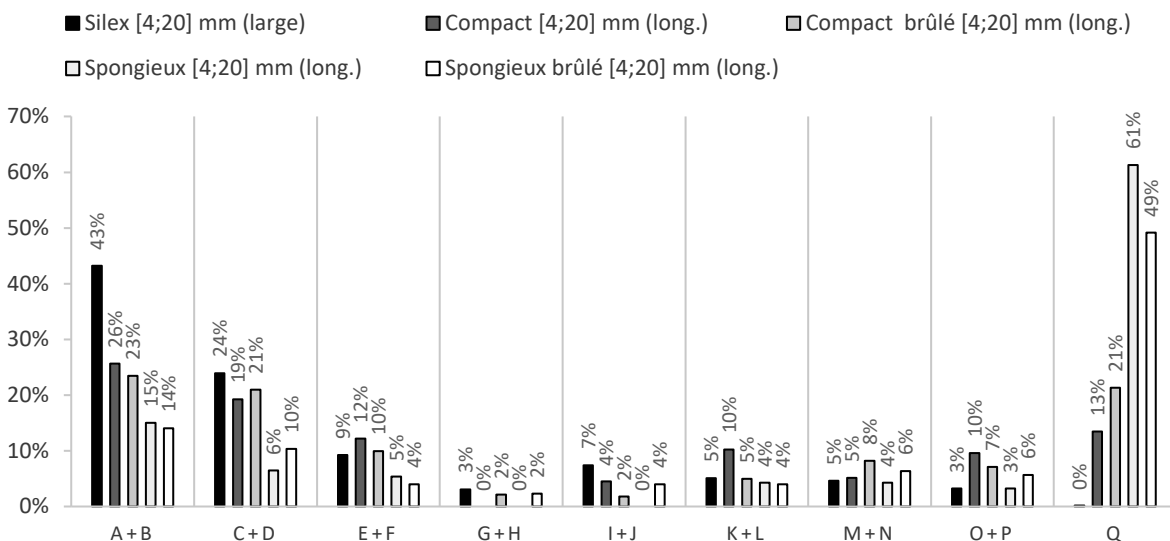
- Une mobilité différentielle des vestiges selon la structure osseuse : l'os spongieux est sensiblement plus mobile que l'os compact selon les données recueillies. En effet, parmi les ossements compacts et spongieux de longueur supérieure à 20 mm, respectivement 24 % et 14 % d'entre eux n'ont pas été mis en mouvement (fig. 6). Les proportions s'inversent dans la travée Q avec respectivement 3 % d'os compact contre 26% d'os spongieux (fig. 6). Le constat est similaire pour les ossements de longueur inférieure à 20 mm (fig. 5).

- Une mobilité différentielle selon la taille des vestiges : quelle que soit leur nature, les vestiges entre 4 et 20 mm sont plus mobiles que les vestiges de longueur supérieure à 20 mm (fig. 5 et 6). Par exemple, seuls les vestiges lithiques de plus petites dimensions (i.e. dont la largeur est comprise entre 4 et 10 mm ou 10 et 20 mm) ont été mobilisés jusqu'à la partie aval de la cellule (fig. 7).

Une mobilité différentielle des vestiges osseux selon leur stade de combustion : cette variable met en évidence des résultats similaires pour ses deux modalités (carbonisé versus non brûlé) : par exemple, pour les ossements compacts inférieurs à 20 mm respectivement brûlés et non brûlés, 23 % et 26 % étaient dans la travée A+B contre 21 % et 13 % dans la travée Q (fig. 5). Afin de répondre à cette question, des analyses statistiques supplémentaires sont entreprises dans la section suivante.

### Ordre de mobilité des vestiges

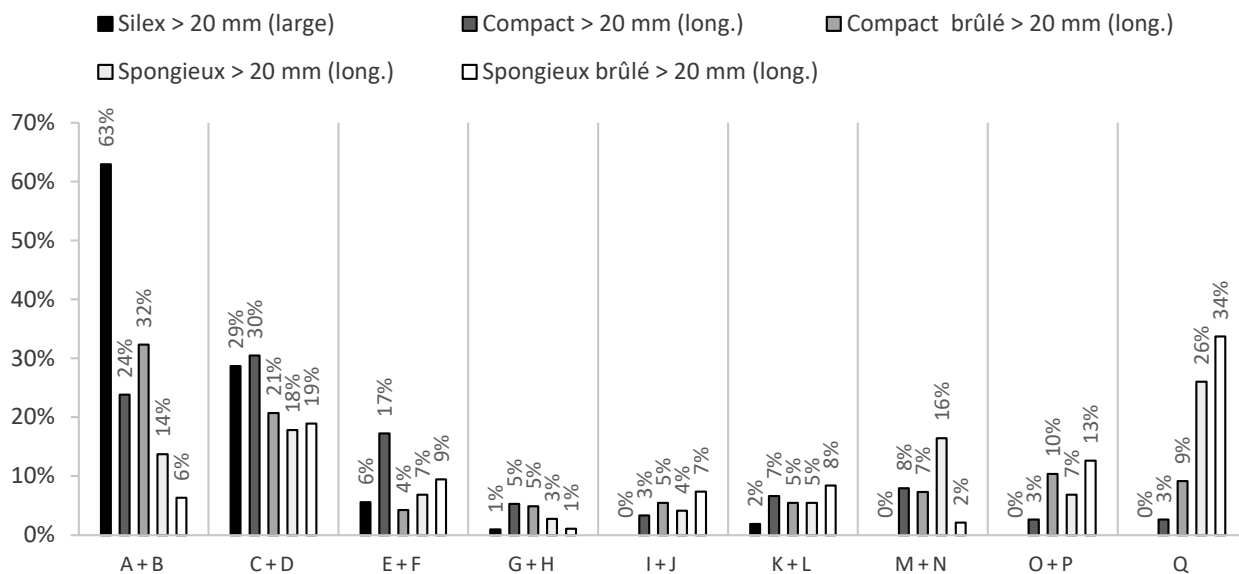
Une Analyse Factorielle des Correspondances (AFC) a été réalisée à l'aide du logiciel Past3 (Hammer et al. 2001) sur les effectifs des principales catégories de matériaux retrouvés par travée. Les deux premiers axes décrivent respectivement 74,7 % et 12 % de la variabilité du nuage de points (fig. 8). La disposition en parabole des modalités (chaque catégorie de matériau par classe de taille) autour de l'origine du repère met en évidence un « effet Guttman » traduisant une structure d'ordre sur l'ensemble



— FIGURE 5 —

Histogramme de pourcentage par catégorie de matériau du contenu inférieur à 20 mm de chaque cellule en fin d'expérimentation.

Histogram of the percentage, by category of material, of the content < 20 mm of each cell at the end.



— FIGURE 6 —

Histogramme de pourcentage par catégorie de matériaux du contenu supérieur à 20 mm de chaque cellule en fin d'expérimentation.

*Histogram of the percentage by category of the contents > 20 mm of each cell at the end.*

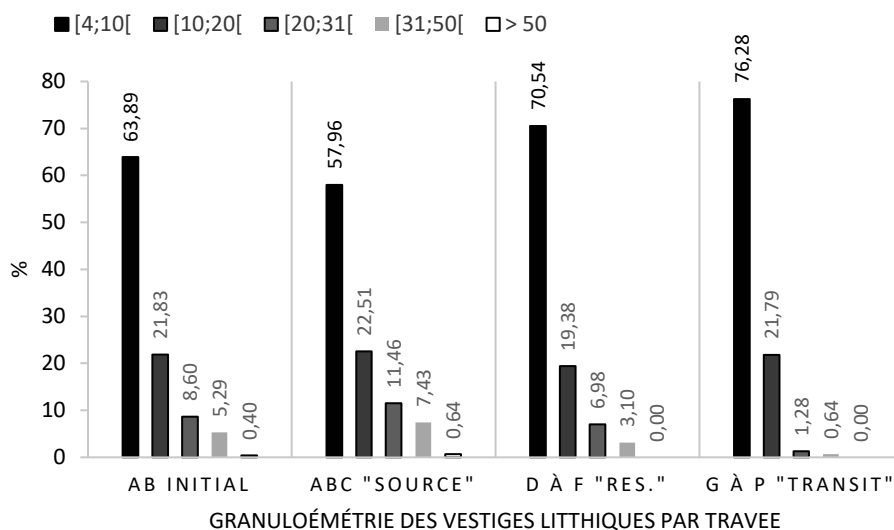


FIGURE 7

Histogramme des pourcentages de vestiges en silex par classe de taille (largeurs) et par zone observée en fin d'expérimentation.

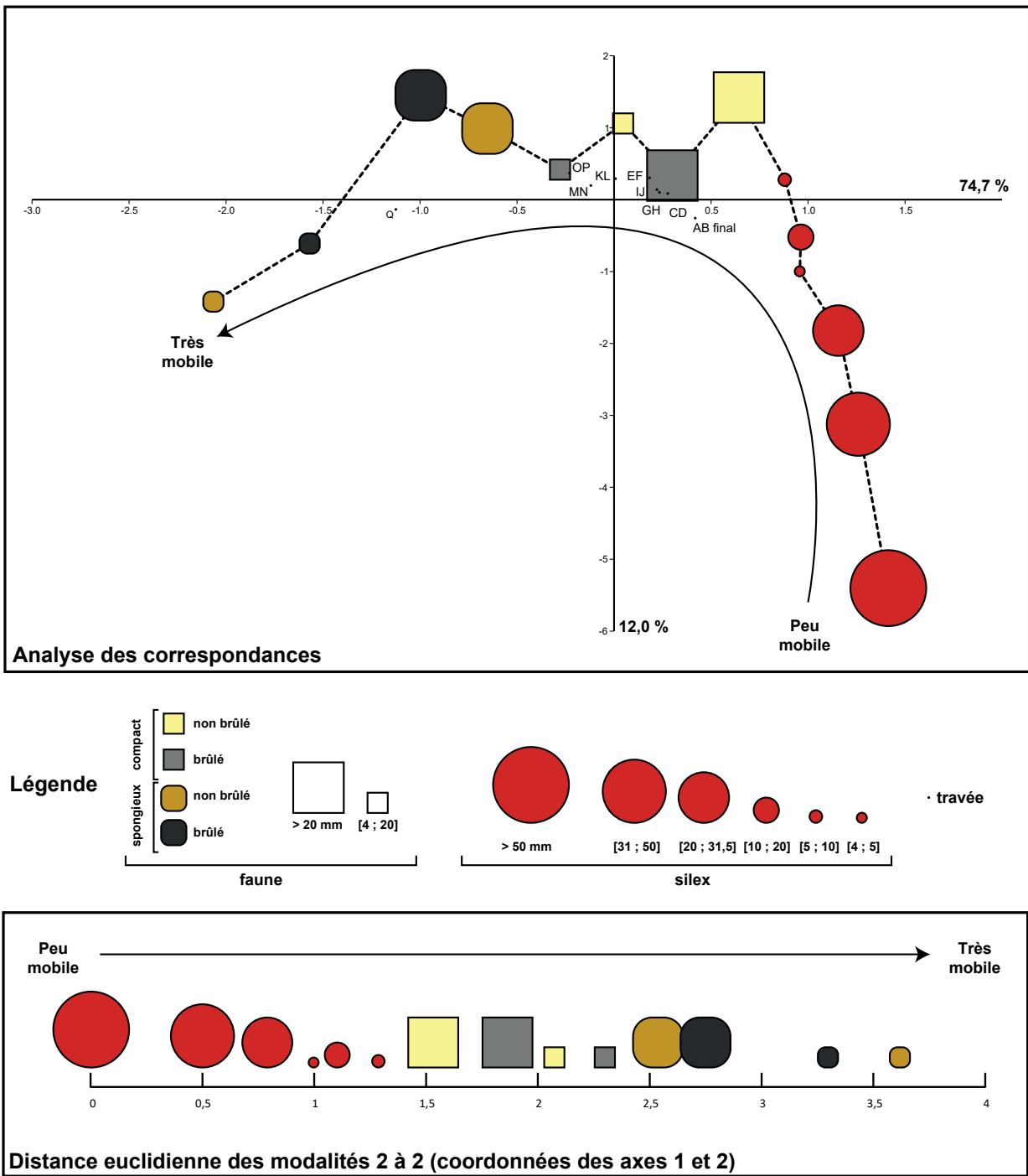
*Histogram of percentages of flint remains by size class (widths) per area after the end of experiment.*

des lignes et des colonnes (*i.e.* les travées). Le premier axe oppose les valeurs extrêmes (*i.e.* silex > 50 mm et les os spongieux [4 ; 20] mm) alors que le deuxième axe oppose les individus dont la réponse est « moyenne » comparativement aux deux extrêmes (Escofier, Pagès 1998, p. 205). La distance euclidienne calculée deux à deux d'après les coordonnées des deux premiers axes entre les différentes catégories d'objets dans l'ordre d'apparition dans la parabole (*i.e.* matérialisée par la ligne pointillée dans l'AFC) donne l'ordre de l'aptitude à la mise en mouvement et au transport des catégories d'objets. Ainsi, dans l'ordre croissant apparaissent (**fig. 8**) :

- Silex > 50 mm
- Silex [50 ; 31,5] mm
- Silex [31,5 ; 20] mm
- Silex [4 ; 5] mm

- Silex [10 ; 20[ mm
- Silex [5 ; 10[ mm
- Os compact non brûlé > 20 mm
- Os compact brûlé > 20 mm
- Os compact non brûlé [4 ; 20[ mm
- Os compact brûlé [4 ; 20[ mm
- Os spongieux non brûlé > 20 mm
- Os spongieux brûlé > 20 mm
- Os spongieux brûlé [4 ; 20[ mm
- Os spongieux non brûlé [4 ; 20[ mm

Le classement observé est très intuitif sauf pour le silex compris dans l'intervalle [4 ; 5] mm. Cette dernière catégorie de vestiges est celle contenant les objets les plus plats utilisés dans l'expérimentation. Deux phénomènes pourraient expliquer ce résultat contre-



— FIGURE 8 —

A : Analyse Factorielle des Correspondances sur le contenu de chaque travée en fin d'expérimentation. B : distance euclidienne 2 à 2 de chaque variable. C : légende.

A : correspondence analysis of the content of each cell at the end of the experiment; B : 2 by 2 Euclidean distance of each variable; C : legend.

intuitif. D'une part, les graviers composant le substrat ont pu masquer les vestiges en silex les plus plats et ainsi favoriser leur stabilité. D'autre part, ces vestiges très plats sont beaucoup plus vite enfouis par du sédiment et ne sont ainsi plus soumis à la force tractrice de l'écoulement.

L'effet Guttman observé sur l'AFC et l'ordre observé mettent en évidence la primauté du facteur densité sur le facteur taille. Cette tendance indique une corrélation

entre l'ordre de tri et la densité des matériaux : depuis le silex dont la densité est proche de 2,65 (densité du quartz) en passant par les matériaux de densité intermédiaire, l'os compact non brûlé (densité moyenne de 1,65 d'après Behrensmeier 1975) et l'os spongieux non brûlé (densité moyenne de 1,11 d'après Behrensmeier 1975) jusqu'aux os compacts et spongieux brûlés (l'os perd environ 30 % de sa masse lors de la combustion d'après Zazzo et al. 2009).

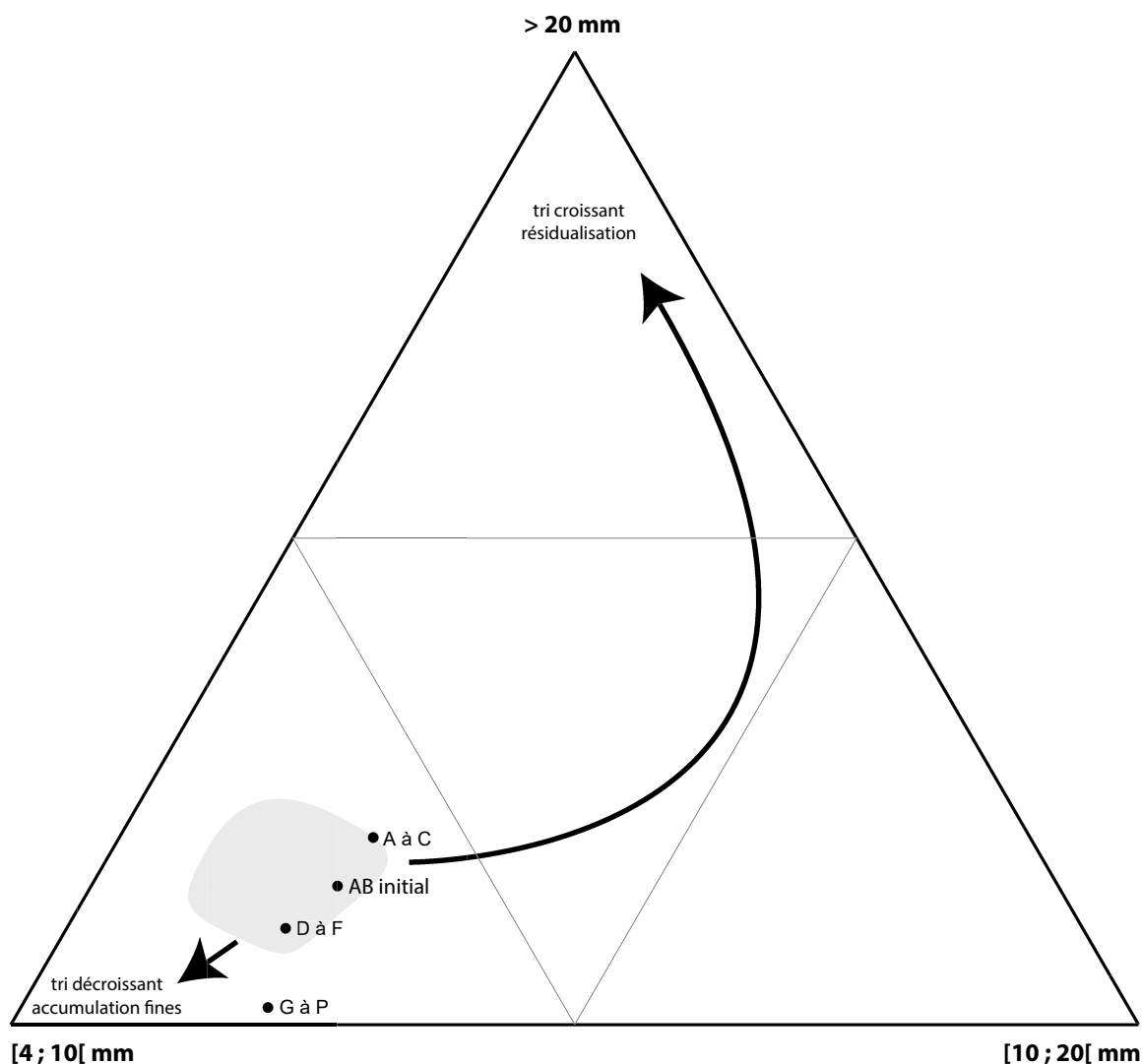
Enfin, ces dernières analyses statistiques montrent une plus forte mobilité de tous les vestiges osseux quels que soient leur taille, leur structure et leur état de combustion vis-à-vis des plus petits vestiges en silex engagés dans cette expérimentation.

### Application de la méthode du diagramme triangulaire développée par Lenoble (2005)

La méthode proposée par Lenoble (2005) permet notamment la comparaison de la granulométrie d'assemblages lithiques archéologiques à des référentiels expérimentaux au sein d'un diagramme ternaire où chaque pôle est associé au pourcentage d'éléments retenus après tamisage dans une colonne composée de trois tamis de différentes mailles. Parmi les mailles de tamis proposées par plusieurs auteurs (Lenoble 2005 ; Bertran *et al.* 2006 ; Bertran 2023) nous avons retenu des mailles de 20 mm, 10 mm et 4 mm. Par ailleurs, nous avons adapté le modèle expérimental au concept de débitage

utilisé dans cette expérimentation en ne prenant en compte que les débitages expérimentaux Discoïde (aire grisée) réalisés sur silex (données Bertran *et al.* 2006). L'enveloppe des débitages expérimentaux représente l'hypothèse nulle, soit l'absence de tri significatif. (Schick 1986 ; Lenoble 2005). La prise en compte des débitages Discoïde uniquement a pour conséquence de réduire le périmètre de l'enveloppe des débitages expérimentaux.

Nous avons appliqué cette méthode aux différentes travées de l'expérimentation regroupées au sein d'une zone « source » A à C, d'une zone de redistribution intermédiaire D à F et d'une zone de transit G à P. Les zones « source » et de redistribution intermédiaire se situent dans l'aire de répartition des débitages expérimentaux alors que la zone de transit souffre d'un léger déficit en vestiges de petite dimension (**fig. 9**). Toutes expériences confondues, la travée Q, considérée comme une zone de dépôt ne recueille qu'un vestige lithique de largeur inférieure à 10 mm.



— FIGURE 9 —

Analyse granulométrique des vestiges en silex par zones observées en fin d'expérimentation d'après la méthode proposée par Lenoble (2005). L'aire de répartition des débitages expérimentaux a été adaptée aux débitages Discoïde.

Particle size distribution analysis of the flint remains per area at the end of experiments according to the method proposed by P. Lenoble (2005). The distribution area of the experimental knapping has been adapted to the Discoid concept.

L'amas lithique de la zone source ne met pas en évidence de tri selon l'analyse granulométrique réalisée et peut ainsi être considéré comme peu dégradé : en l'absence d'élément microlithique, un tel niveau de dégradation n'a pas de conséquence pour l'analyse technologique de ce type d'industrie.

### Application du modèle développé par Costamagno et al. (2009) sur les ossements brûlés

Une analyse discriminante des ensembles d'os brûlés par travées a été réalisée en fonction des critères et du référentiel de Costamagno et al. (2009) sur le logiciel Past3 (Hammer et al. 2001). Alors que l'amas expérimental et les travées amont se situent proche du pôle « Nettoyage du camp ou combustible », la partie aval de la cellule (i.e. « Q ») recueille un ensemble de vestiges situé proche du pôle « combustible » (fig. 10). En favorisant le déplacement des os spongieux, l'écoulement concentré a produit, en aval, des ensembles osseux qui pourraient être interprétés, à tort, comme l'évidence de l'utilisation de l'os comme combustible. En parallèle, des amas osseux résultant de l'utilisation de l'os comme combustible pourraient être, à la suite de l'action d'écoulements turbulents, appauvris en éléments spongieux brûlés, et donc non reconnus.

carbonisés dont les proportions ne reflètent de fait aucune activité anthropique selon les modèles publiés (Costamagno et al. 2009). De plus, n'ont été insérés dans l'amas expérimental que les vestiges en silex supérieurs à une maille de tamisage de 4 mm alors que d'autres modèles de diagrammes triangulaires prennent en compte une maille plus fine de 2 mm comme limite inférieure (Lenoble 2005). Peut-être aurions-nous eu un tri plus conséquent en prenant en compte la fraction de 2 mm, voire un début de mise en mouvement comparable à certaines catégories de vestiges fauniques. Enfin, les ossements brûlés appartenaient à un individu (*Bos taurus*) relativement jeune, ce qui a pu créer une différence de densité supplémentaire avec les autres ossements.

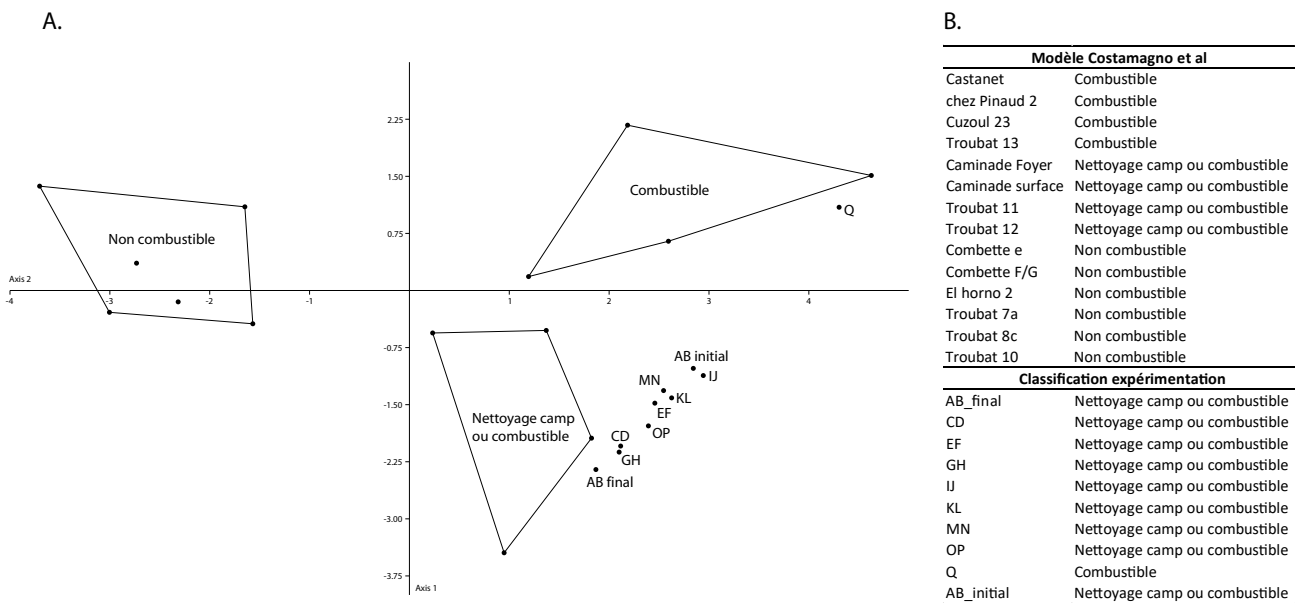
La disposition des objets en amas et les modalités de déversement de l'eau (i.e., eau claire directement au-dessus de l'amas) influencent également l'intensité du tri produit (cf. § « Observations générales des conséquences de l'écoulement »).

L'intensité de la force tractrice exercée lors des écoulements est inconnue et rend de ce fait cette expérimentation difficilement reproductible à l'identique. Cependant, le résultat homogène des trois expérimentations montre l'aspect reproductible de nos essais entre eux et que seule l'intensité du tri serait différente si cette expérimentation était refaite avec le même protocole. De plus, l'objectif de l'expérimentation n'était pas de reproduire un processus sédimentaire particulier mais de questionner le transport différentiel des vestiges et surtout leur ordre de tri, ce critère n'impactant ainsi pas les résultats.

## 3 | DISCUSSION

### Limites de l'expérimentation

L'amas expérimental comporte lui-même quelques limites par sa constitution même puisqu'il n'est pas directement comparable au registre archéologique. En effet, l'ensemble des pièces brûlées ne comportent que des restes



— FIGURE 10 —

Analyse discriminante des ensembles d'ossements brûlés par travée en fonction du modèle publié par S. Costamagno et al. (2009). A. projection dans l'espace factorielle du modèle et des données de l'expérimentation par travée ; B. classification.

Discriminant analysis of burnt bones per cell according to the model published by S. Costamagno et al. (2009). A. scatterplot in the factorial space of the model and the experimental data per cell; B. classification.



Les caractéristiques de l'écoulement produit posent question sur le transfert des résultats obtenus au référentiel archéologique. L'écoulement produit se situe en effet en marge du domaine du ruissellement (absence de charge sédimentaire dans la zone source et d'effet « splash », hauteur d'eau significative) et se distingue aussi du domaine fluvial (hauteur d'eau moindre) où la force tractrice exercée peut être plus intense et surtout agit sur une durée plus longue. Les tris observés dans le domaine fluvial seront mieux exprimés comme c'est le cas dans la plupart des exemples évoqués ci-après.

L'écoulement concentré réalisé dans cette expérimentation a mis en évidence que tous les vestiges osseux quelles que soient leur structure (compact versus spongieux) et leur taille sont plus mobiles que des vestiges lithiques supérieurs à 4 mm. Cette expérimentation a ainsi valeur de contre-exemple (« spoiler approach » ; Wandsnider 1987) qui doit alerter les archéologues sur une surinterprétation tentante des résultats de l'analyse granulométrique par son extension à l'ensemble des vestiges fauniques (en l'absence de méthode pour quantifier les tris sur ce dernier matériau). Pour ce faire, un seul exemple contradictoire suffit et ne nécessite pas de tester ou d'identifier tous les paramètres en jeu (Wandsnider 1987).

Ainsi, si ces limites ne permettent pas un transfert direct au référentiel fossile, en les gardant à l'esprit, les résultats de cette expérimentation sont suffisants pour soulever certaines conséquences archéologiques et les mettre en perspective avec d'autres expérimentations et certains contextes archéologiques. L'ensemble de ces limites et des résultats obtenus justifieraient la reproduction de telles expérimentations en enceinte afin de pouvoir calculer les forces tractrices nécessaires pour mettre en mouvement les différents types de vestiges discutés dans cet article et ce, en prenant en compte des vestiges lithiques entre 2 et 4 mm.

### Conséquences archéologiques

Nos résultats font écho à des observations déjà réalisées en contexte fluvial (Domínguez-Rodrigo *et al.* 2019) : les os spongieux sont plus mobiles que les os compacts. Les os compacts ont ainsi tendance à être surreprésentés dans les zones résidualisées. Or, les zones résidualisées sont les plus riches et ont ainsi tendance à être fouillées de manière privilégiée. Cela peut impacter la représentation du squelette axial (majoritairement composé d'ossements où les portions spongieuses sont plus développées) et par voie de conséquence, les interprétations sur les stratégies de transport des éléments de carcasses et la fonction des occupations.

Les groupes proposés par plusieurs auteurs (Voorhies 1969 ; Dodson 1973 ; Korth 1979 ; Blob 1997 ; Trapani 1998) selon la mobilité des ossements complets mettent également en évidence la plus forte mobilité des parties du squelette axial (*e.g.* vertèbres, côtes, sternum) vis-à-vis des os des membres. Cependant, leur utilisation comme proxy afin d'identifier et de caractériser des tris, pose la question de l'équifinalité des interprétations possibles lorsqu'un tri impliquant le groupe 1 est mis en évidence : s'agit-il d'un transport différentiel des parties du squelette par les groupes humains ou d'un tri causé par des processus naturels ?

Les ossements brûlés sont globalement plus mobiles que les ossements non brûlés, quel que soit le tissu considéré. L'interprétation des modalités de combustion des ossements (Costamagno *et al.* 2009) peut ainsi être impactée. Les écoulements concentrés peuvent causer des sous-représentations ou des surreprésentations d'os brûlés et surtout d'os spongieux brûlés.

L'absence de tri granulométrique selon la méthode développée par Lenoble (2005) pour les vestiges lithiques supérieurs à 4 mm dans la zone source et la zone résidualisée (transportée sur une courte distance) en fin d'expérimentation, alors qu'une majorité des restes osseux ont été mobilisés par l'écoulement, interpelle. L'analyse granulométrique des vestiges lithiques est à notre connaissance la seule méthode développée afin de quantifier de manière fiable un tri sur les ensembles de vestiges archéologiques. Or, d'après notre expérimentation, il apparaît que les résultats de l'analyse granulométrique des vestiges lithiques ne peuvent être étendus à l'ensemble des vestiges récoltés sur les sites archéologiques. Ainsi, lorsqu'un tri est mis en évidence par l'analyse granulométrique des vestiges lithiques, les ensembles fauniques ont nécessairement subi des tris plus conséquents. À l'inverse, en l'absence de tri apparent sur les vestiges lithiques, les ensembles de vestiges osseux associés ont pu être largement remobilisés et triés.

Ce dernier résultat trouve écho dans l'expérience numéro 34 de Schick (1986) et dans les calculs de Behrensmeier (1975) évoqués en introduction.

Des exemples analogues existent en contexte archéologique. L'un des exemples est décrit par Shackley (1978) sur le site d'Orangia en Afrique du Sud où une crue a remobilisé tous les ossements et la fraction la plus fine des industries lithiques, *a priori* sans déplacer les vestiges lithiques de plus grande dimension.

Le tri vertical observé sur les nappes de vestiges contenus dans des dépôts interprétés comme le résultat de crues de la Vézère à l'abri inférieur du Moustier (Texier *et al.* 2020) illustre les mêmes tendances. Alors que les ensembles de vestiges lithiques ne mettent pas en évidence de tri ou un tri très léger sur la fraction [2 ; 4[ mm, une stratigraphie de crue est observée avec un classement vertical avec de bas en haut : les vestiges lithiques, les vestiges fauniques puis les vestiges fauniques brûlés (Thomas *et al.* 2019 ; Texier *et al.* 2020).

---

## CONCLUSION

Malgré de nombreuses expérimentations de ruissellement et d'écoulements concentrés menées sur des ensembles de vestiges de toutes natures, peu d'outils sont à la disposition des archéologues afin d'en évaluer l'impact de manière quantifiée, notamment concernant la mise en évidence des tris sur les ensembles de vestiges fauniques. L'interprétation des résultats de l'analyse granulométrique des vestiges lithiques ne peut être étendue aux ensembles de vestiges fauniques ou d'autres types de vestiges (*e.g.* colorants, charbons de bois, matière dure animale) du fait de leurs propriétés physiques spécifiques et par conséquent de leurs réactions variables aux processus à l'œuvre. Cependant, l'analyse de la fabrique (*i.e.* analyse

statistique de leur orientation et inclinaison, Bertran et Lenoble 2002 ; McPherron 2018) pourrait être mise à profit afin de comparer les résultats obtenus entre vestiges lithiques et fauniques (Thomas *et al.* 2019). Lorsque les os présentent une forte orientation préférentielle unimodale ou bimodale, alors des tris ont pu intervenir selon le tissu osseux et le stade de combustion. Quantifier ces tris reste difficile et d'autres outils analytiques doivent être développés afin d'y parvenir. Dans cette optique, combiner les approches menées sur les vestiges archéologiques (*e.g.* granulométrie des vestiges lithiques, fabriques, recherches de figures remarquables) et sur leur contexte sédimentaire (faciès et microfaciès des dépôts) reste une nécessité.

## REMERCIEMENTS

Cette expérimentation a été réalisée en octobre 2019 dans le cadre du module d'expérimentation du Master Bio-géosciences de l'Université de Bordeaux, parcours Préhistoire, à l'initiative de M. Thomas, E. Discamps et J.-G. Bordes. Nous souhaitons remercier les étudiants de cette promotion 2019 K. Baltazart, M. Bocquel, G. Capelle, A. Duchenois-Ott, J. Legay, C. Martin, C. Prignon et M. Raymond, ainsi que C. Dancette (Université Toulouse Jean Jaurès, TRACES) et M. Brenet (INRAP, PACEA). L'Université de Bordeaux (UF Sciences de la Terre et de l'Environnement) et le projet Idex STEP ITAP (Immersion dans les Terrains de L'Anthropologie Biologique et de la Préhistoire) ont financé cette semaine à Lamothe-Fénelon. Enfin, merci à B et P. Ranouil qui nous ont autorisés à éroder leur terrain de façon turbulente.

Nous souhaitons remercier A. Lenoble, P. Goldberg et un troisième relecteur pour leurs conseils qui ont permis une nette amélioration de cet article. Nous remercions particulièrement A. Lenoble pour sa lecture très méticuleuse de ce texte.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BEHRENSMEYER A.K. 1975 - *The taphonomy and paleoecology of Plio-Pleistocene vertebrate assemblages east of Lake Rudolf, Kenya*, p. 473-578.

BERTRAN P. 2023 - *Comments on the paper entitled "Particle size distribution: An experimental study using southern African reduction methods and raw materials"* by de la Peña *et al.* (*PLoS ONE*. 2022; 17(12): e0278867).

BERTRAN P., CLAUD É., DETRAIN L., LENOBLE A., MASSON B., VALLIN L. 2006 - Composition granulométrique des assemblages lithiques. Application à l'étude taphonomique des sites paléolithiques. *Paleo, Revue d'archéologie préhistorique*, 18, p. 7-36.

BERTRAN P., CLÉMENT B., MEUNIER M., TEXIER J.-P., COURBOULEIX S., COUSSOT P. 2004 - Dépôts de pente continentaux. Dynamique et faciès, *Quaternaire (Paris)*, 1, p. 1-259.

BERTRAN P., LENOBLE A. 2002 - Fabriques des niveaux archéologiques : méthode et premier bilan des apports à l'étude taphonomique des sites paléolithiques. *Paleo, Revue d'archéologie préhistorique*, 14, p. 13-28.

BLOB R.W. 1997 - Relative hydrodynamic dispersal potentials of soft-shelled turtle elements: implications for interpreting skeletal sorting in assemblages of non-mammalian terrestrial vertebrates. *Palaeos*, p. 151-164.

BOAZ N.T., BEHRENSMEYER A.K. 1976 - Hominid taphonomy: transport of human skeletal parts in an artificial fluvial environment, *American Journal of Physical Anthropology*, 45, 1, p. 53-60.

BRAVARD J.-P. G., PETIT F. 1997 - Les cours d'eau, dynamique du système fluvial, *L'Information Géographique*, 62, 2, p. 93.

COORD R. 1999 - One bone, two bones, wet bones, dry bones: transport potentials under experimental conditions. *Journal of Archaeological Science*, 26, 11, p. 1369-1375.

COORD R., DENNELL R.W. 1995 - Taphonomy of some articulated skeletal remains: transport potential in an artificial environment. *Journal of Archaeological Science*, 22, 3, p. 441-448.

COSTAMAGNO S., THÉRY-PARISOT I., CASTEL J.C., BRUGAL J.-P. 2009 - Combustible ou non? Analyse multifactorielle et modèles explicatifs sur des ossements brûlés paléolithiques, *gestion des combustibles au Paléolithique et au Mésolithique nouveaux outils, nouvelles interprétations fuel management during the Palaeolithic and Mesolithic period*, p. 61.

DE PLOEY J. 1983 - *Rainfall simulation runoff and soil erosion*, vol. 4, Catena Verlag, 214 p.

DODSON P. 1973 - The significance of small bones in palaeoecological interpretation. *Rocky Mountain Geology*, 12, 1, p. 15-19.

DOMÍNGUEZ-RODRIGO M., BAQUEDANO E., BARBA R., URIBELARREA D., GIDNA A. 2019 - The river that never was: Fluvial taphonomy at Olduvai Bed I and II sites and its bearing on early human behavior. *Quaternary International*, 526, p. 26-38.

ESCOFIER B., PAGÈS J. 1998 - *Analyses factorielles simples et multiples*. Dunod, Paris, p. 284.

HAMMER Ø., HARPER D.A., RYAN P.D., others 2001 - Past: Paleontological statistics software package for education and data analysis. *Palaentologia electronica*, 4, 1, p. 9.

HANSON C.B. 1980 - Fluvial taphonomic processes: models and experiments, *Fossils in the making: Vertebrate taphonomy and paleoecology*. The University of Chicago Press, p. 156-181.

HILL A.P., BEHRENSMEYER A.K. 1980 - *Fossils in the Making, Vertebrate taphonomy and paleoecology*. The University of Chicago Press, 345 p.

ISAAC G.L. 1967 - Towards the interpretation of occupation debris: some experiments and observations. *Kroeber Anthropological Society Papers*, 37, p. 31-57.

KORTH W.W. 1979 - Taphonomy of microvertebrate fossil assemblages. *Annals of the Carnegie Museum*, 48, p. 235-285.

- LÊ S., JOSSE J., HUSSON F. 2008 - FactoMineR: an R package for multivariate analysis. *Journal of statistical software*, 25, p. 1-18.
- LENOBLE A. 2005 - *Ruissellement et formation des sites préhistoriques : référentiel actualiste et exemples d'application au fossile*. BAR International Series, 1363, 216 p.
- LENOBLE A., BORDES J.-G. 2001 - Une expérience de piétinement et de résidualisation par ruissellement., In: L. BOURGUIGNON, I. ORTEGA ET M.-C. FRÈRE-SAUTOT. *Préhistoire et approche expérimentale*. Éditions Monique Mergoïl, p. 295-311.
- MACPHAIL R.I., GOLDBERG P. 2018 - *Applied soils and micro-morphology in archaeology*. Cambridge University Press, 630 p.
- MCPHERRON S.P. 2018 - Additional statistical and graphical methods for analyzing site formation processes using artifact orientations. *PLOS ONE*, 13, 1.
- MIALL A.D. 2014 - *Fluvial depositional systems*, vol. 14, Springer, 322 p.
- MOURRE V. 2003 - Discoïde ou pas discoïde ? Réflexions sur la pertinence des critères techniques définissant le débitage discoïde. *BAR International Series*, 1120, p. 1-18.
- NASH D.T., PETRAGLIA M.D. 1987 - Natural formation processes and the archaeological record. *BAR International Series*, 352, 212 p.
- PETRAGLIA M.D., NASH D.T. 1987 - The impact of fluvial processes on experimental sites. In: *Natural formation processes and the archaeological record*. *BAR International Series*, 352, p. 108-130.
- R CORE TEAM 2022 - *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. Vienna, Austria, R Foundation for Statistical Computing, <https://www.R-project.org/>.
- SCHICK K.D. 1986 - Stone Age sites in the making: experiments in the formation and transformation of archaeological occurrences. *BAR International Series*, 319, 328 p.
- SCHIFFER M.B. 1983 - Toward the identification of formation processes. *American Antiquity*, 48, 4, p. 675-706.
- SHACKLEY M.L. 1978 - The behaviour of artefacts as sedimentary particles in a fluvial environment. *Archaeometry*, 20, 1, p. 55-61.
- SHIELDS A. 1936 - Application of similarity principles and turbulence research to bed-load movement.
- STEIN J.K. 2001 - A review of site formation processes and their relevance to geoarchaeology. *Earth sciences and archaeology*, p. 37-51.
- TEXIER J.-P. 2000 - A propos des processus de formation des sites préhistoriques/About prehistoric site formation processes. *Paleo, Revue d'Archéologie Préhistorique*, 12, 1, p. 379-386.
- TEXIER J.-P., DISCAMPS E., GRAVINA B., THOMAS M. 2020 - Les dépôts de remplissage de l'abri inférieur du Moustier (Dordogne, France) : lithostratigraphie, processus de formation et évolution du système géomorphologique. *Paleo, Revue d'archéologie préhistorique*, 30-2, p. 320-345.
- THOMAS M., DISCAMPS E., GRAVINA B., TEXIER J.-P. 2019 - Analyse taphonomique et spatiale de palimpsestes d'occupations moustériennes de l'abri inférieur du Moustier (Dordogne, France). *Paleo, Revue d'archéologie préhistorique*, 30-1, p. 278-299.
- TRAPANI J. 1998 - Hydrodynamic sorting of avian skeletal remains. *Journal of Archaeological Science*, 25, 5, p. 477-487.
- VILLA P. 1982 - Conjoinable pieces and site formation processes. *American Antiquity*, 47, 2, p. 276-290.
- VOORHIES M.R. 1969 - Taphonomy and population dynamics of an early Pliocene vertebrate fauna, Knox County, Nebraska, 69 p.
- WANDSNIDER L. 1987 - Natural formation process experimentation and archaeological analysis. *Natural Formation Processes and the Archaeological Record*, p. 150-185.
- ZAZZO A., SALIÈGE J.-F., PERSON A., BOUCHER H. 2009 - Radiocarbon Dating of Calcined Bones: Where Does the Carbon Come from? *Radiocarbon*, 51, 2, p. 601-611.