



Muséum National d'Histoire Naturelle



**International Master in
Quaternary and Prehistory**

Traces d'utilisation et préférence manuelle

**Développement et application d'une nouvelle méthode de
quantification des traces d'utilisation sur des outils en pierre pour la
détermination de la main (gauche ou droite) ayant utilisé l'outil.**

Julia Cabanès

**Tuteurs : Antony Borel (UMR 7194 - CNRS/MNHN)
Emmanuelle Pouydebat (UMR 7179 - CNRS/MNHN)**

Année académique 2018/2019



**Università
degli Studi
di Ferrara**



UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI



Résumé

De nos jours, environ 90% de la population humaine est droitère. Cette préférence manuelle est le résultat de la latéralisation du cerveau humain, liée à la complexification des capacités cognitives au cours de l'évolution humaine. Les aires cérébrales liées à la préférence manuelle sont aussi impliquées dans le contrôle du langage et de processus en lien avec la fabrication d'outils. L'identification du taux de gauchers et de droitiers chez les hominidés fossiles permettrait donc à la fois d'apporter des données nouvelles pour décrire l'évolution de la préférence manuelle chez les hominidés, mais aussi de mieux comprendre le développement des facultés cognitives complexes au cours de l'évolution humaine, notamment l'apparition du langage.

Les objectifs de cette étude sont donc de proposer une nouvelle méthode quantitative de caractérisation des traces, et de tester son potentiel et son applicabilité dans l'identification de la main (droite ou gauche) ayant utilisé l'outil. Les polishes d'utilisation, micro-écaillures et résidus d'outils en silex issus de deux expérimentations de sciage de bois ont été documentés, géoréférencés à l'aide d'un système d'information géographique (SIG) et mesurés pour constituer la base de données de référence de l'étude. Une modélisation par apprentissage machine (méthode des k plus proches voisins, k-NN) a ensuite permis d'identifier la main ayant utilisé les outils testés avec une certitude de 87% (+/- 10.32%). L'identification de la face externe des outils a également été possible dans 87.5% des cas. Bien que statistiquement non significatif, ce résultat est encourageant et ouvre de nouvelles perspectives méthodologiques pour l'identification de la main ayant utilisé l'outil. Il est nécessaire de continuer l'exploitation de ces données pour identifier de nouveaux paramètres de classification qui permettent d'augmenter ce pourcentage d'identification en contexte expérimental. Les résultats sont néanmoins prometteurs et démontrent le potentiel de la méthode et de certains paramètres testés. Il sera dans le futur indispensable d'intégrer davantage d'outils à l'échantillon afin d'améliorer le modèle et de pouvoir le valider avant d'envisager une première application en contexte archéologique.

Mots clés : préférence manuelle / traces d'utilisation / capacités cognitives complexes / archéologie expérimentale / outils lithiques / tracéologie.

Abstract

Nowadays, about 90% of the human population is right-handed. This handedness is the results of human brain lateralization, related to the increasing complexity of cognitive abilities over human evolution. Brain areas related to handedness are also involved in language monitoring and processes related to tool-manufacturing. Identifying the rate of right-handed and left-handed among fossil hominids would allow to bring data in order to describe the evolution of human handedness across time and lead to a better understanding of the development of complex cognitive abilities, including language appearance.

The objectives of this study are to propose a new quantitative method for traces characterization, and to test its potential and applicability for the identification of the hand (right or left) that have used the tool. Polishes, microscars and residues on tools made of flint, resulting from 2 experimentations of wood sawing have been measured, geolocated by the mean of a geographic information system (GIS) and measured in order to build the reference database of the study. A machine learning system (k nearest neighbours method, k-NN) allowed to identify the hand that used the tools tested with 87% (+/- 10.32%) of certitude. The identification of the external face of tools have also been possible in 87.5% of the cases. Although this result is not statistically significant it still encouraging and open new methodological perspectives regarding the identification of the hand that used the tool. It is necessary to pursue the exploitation of the data to identify new parameters of classification that could increase the percentage of identification in experimental context. These results are however encouraging and demonstrate the potential of the method and of some parameters tested. It is also essential in the future to integrate more tools into the study in order to improve the model and to validate it before envisaging a first application in archaeological context.

Key words : handedness / use-wear traces / complex cognitive abilities / experimental archaeology / lithic tools / use-wear analysis.

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier le Professeur François Sémah et le Professeur Denis Vialou, responsables de la spécialité Quaternaire et Préhistoire de ce master, pour m'avoir permis d'étudier au sein du Muséum National d'Histoire Naturelle où j'ai pu m'épanouir tant intellectuellement que personnellement.

Je remercie vivement Chafika Falguères et David Pleurdeau, les responsables du master *Erasmus Mundus*, pour m'avoir permis de vivre cette fantastique expérience ainsi que Carlos Lorenzo pour son accueil chaleureux à l'Université Rovira i Virgili de Tarragone.

Je tiens à témoigner toute ma reconnaissance et à remercier particulièrement Antony Borel, mon encadrant, pour sa grande disponibilité, tout le temps qu'il m'a consacré et l'aide qu'il m'a apportée. Ses enseignements et conseils ont rendu cette étude passionnante et m'ont confortée dans l'idée de poursuivre dans cette voie.

Je remercie Emmanuelle Pouydebat, pour son encadrement et ses conseils avisés au moment de la rédaction.

Merci à Gema Chacòn et Andreu Ollé, pour leurs conseils éclairés et l'aide qu'ils m'ont apportée à Tarragone.

Mes remerciements à Gema Chacòn, Xavier Gallet, Matthieu Lebon et Andreu Ollé, pour m'avoir fourni le matériel nécessaire au bon déroulement de mon stage et pour m'avoir conseillée lorsque j'en avais besoin.

Ma reconnaissance au personnel de l'IPHES et du Musée de l'Homme pour m'avoir fourni l'espace et le matériel nécessaire au bon déroulement du stage en laboratoire.

Ma gratitude à Alexis, Hector, Irene, Kenza, Marie, Morgane, Pierre et David Pleurdeau pour avoir consacré du temps à la réalisation de mon expérimentation.

Je tiens aussi à remercier Hélène Monod pour son soutien et ses bons conseils, ainsi que Lloyed et Lauriane pour l'aide précieuse qu'ils m'ont apportée.

Enfin, je souhaite exprimer toute ma gratitude et mes plus sincères remerciements à toute ma famille. Pour leur aide et leur compréhension. Merci à mes parents, pour leur soutien et leur patience.

SOMMAIRE

Résumé / Abstract	p.3
Remerciements	p.5
Sommaire	p.6
1. <u>INTRODUCTION</u>	p.8
1.1 La préférence manuelle chez les hominidés	p.9
1.1.1 Latéralité et capacités cognitives complexes.....	p.9
1.1.2 La préférence manuelle chez les primates non-humains.....	p.10
1.2 Le projet PrémHo	p.14
1.2.1 Archéologie et préférence manuelle.....	p.14
1.2.2 Du modèle expérimental à l'application archéologique.....	p.16
1.3 Contexte et problématique du stage	p.18
2. <u>MATÉRIEL ET MÉTHODES</u>	p.20
2.1 Déroulement des expérimentations	p.21
2.2 Méthodes d'acquisition pour les traces d'utilisation	p.24
2.2.1 Résidus.....	p.24
2.2.2 Altérations de surface.....	p.24
2.3 Documentation des traces après utilisation	p.29
2.3.1 Orientation du tranchant et géoréférencement.....	p.29
2.3.2 Résidus.....	p.29
2.3.3 Micro-écaillures.....	p.31
2.3.4 Polis d'utilisation.....	p.33
2.4 Statistiques et traitement des données	p.36
3. <u>RÉSULTATS</u>	p.38
3.1 Tracéologie	p.39
3.1.1 Analyse des résidus	p.39
3.1.1.1 Identification de la préférence manuelle et de la main ayant utilisé l'outil.....	p.39
3.1.1.1.1 Distribution et envahissement des résidus le long du tranchant.....	p.39
3.1.1.1.2 Pourcentage du tranchant de l'outil envahi par les résidus.....	p.44
3.1.1.1.3 Aires et périmètres des zones de résidus.....	p.45
3.1.1.2 Identification de la face externe.....	p.47

3.1.2	Analyse des polis d'utilisation	p.48
3.1.2.1	Identification de la préférence manuelle et de la main ayant utilisé l'outil.....	p.48
3.1.2.1.1	Distribution et envahissement des polis le long du tranchant.....	p.48
3.1.2.1.2	Pourcentage de la longueur du bord altéré par les polis d'utilisation.....	p.52
3.1.2.1.3	Paramètres qualitatifs.....	p.52
3.1.2.2	Identification de la face externe.....	p.54
3.1.3	Analyse des micro-écaillures	p.55
3.1.3.1	Identification de la préférence manuelle et de la main ayant utilisé l'outil.....	p.55
3.1.3.1.1	Distribution et envahissement des microécaillures le long du tranchant.....	p.55
3.1.3.1.2	Localisation de la micro-écaillure la plus envahissante sur le tranchant de l'outil.....	p.59
3.1.3.1.3	Paramètres qualitatifs.....	p.60
3.1.3.2	Identification de la face externe.....	p.62
3.2	Statistiques et traitement des données	p.64
3.2.1	Identification de la face externe : synthèse des données.....	p.64
3.2.2	Analyses en composantes principales et analyses bi-variées.....	p.66
3.2.3	Méthode d'attribution de score.....	p.70
3.2.4	Tests du plus proche voisin.....	p.74
4.	<u>DISCUSSION</u>	p.76
4.1	Efficacité de la méthode : vers une identification de la main ayant utilisé l'outil....	p.77
4.2	Identification de la préférence manuelle vs. identifcaiton de la main ayant utilisé l'outil.....	p.79
4.3	Identification de la face externe de l'outil au moment de son utilisation.....	p.82
4.4	Influence des paramètres individuels et des paramètres liés à l'outil sur les résultats.....	p.84
4.5	Perspectives méthodologiques.....	p.86
5.	<u>CONCLUSION</u>	p.88
	Bibliographie	p.90
	Table des illustrations	p.95
	Table des tableaux.....	p.95
	Table des figures.....	p.96
	Table des annexes	p.99
	Annexes	p.100

1. INTRODUCTION

1.1. LA PRÉFÉRENCE MANUELLE CHEZ LES HOMINIDÉS

L'asymétrie latérale, ou latéralité, est un phénomène complexe observé chez de nombreuses espèces animales telles que les oiseaux (genre *Columba*) (Güntürkün, 1997), les baleines (*Megaptera novaeangliae*) (Canning *et al.* 2011) et les éléphants (*Elephas maximus*) (Keerthipriya, 2015).

La latéralité implique que certaines fonctions cérébrales vont être préférentiellement prises en charge par un hémisphère ou l'autre du cerveau (Eustache *et al.* 2008). Chez l'humain, bien que l'exemple le plus familier soit la **préférence manuelle**, d'autres manifestations comportementales de la latéralité existent, telles que la préférence du pied, l'œil directeur ou les asymétries liées à l'orientation acoustique (Fitch, 2013).

La préférence manuelle se définit par la tendance d'un individu à utiliser une main plutôt que l'autre dans l'accomplissement d'une activité spécifique (e.g. Uomini et Gowlett, 2013). De nos jours, entre 74% et 96% des humains utilisent préférentiellement la main droite (Annett, 1985) selon les différentes populations, qui présentent donc très généralement une majorité de droitiers. On peut donc parler de latéralisation, car une même préférence manuelle est présente à l'échelle des populations.

1.1.1 LATERALITÉ ET CAPACITÉS COGNITIVES COMPLEXES

Le cerveau humain présente une asymétrie fonctionnelle. Les régions cérébrales responsables des différentes facultés cognitives sont réparties en deux hémisphères : l'hémisphère droit contrôle les fonctions ayant trait aux perceptions visuo-spatiales, tandis que l'hémisphère gauche a un rôle d'avantage analytique et contrôle les tâches de haute précision (Eustache *et al.* 2008). C'est notamment dans l'hémisphère gauche que se trouvent les aires de Broca et de Wernicke, liées au **langage** articulé et à la mémoire des mots (Corballis, 2003).

Or, l'hémisphère gauche contrôle le comportement moteur de la partie droite du corps et inversement. La dominance d'un hémisphère chez un individu expliquerait l'utilisation préférentielle de la main opposée dans la réalisation d'activités manuelles. Pour 80% des femmes et 95% des hommes actuels, c'est **l'hémisphère du langage articulé qui est dominant** (Arslan, 2016), ce qui pourrait expliquer la majorité de droitiers observée dans la population humaine actuelle.

Parmi les primates, seuls les humains semblent présenter une préférence manuelle généralisée à l'échelle de l'espèce. L'origine de cette spécificité serait étroitement liée à **l'émergence des capacités cognitives complexes** au cours de l'évolution des hominins. Le niveau de complexité de la tâche effectuée pourrait avoir joué un rôle crucial dans ce processus (Corballis, 1987 ; Fagot et Vauclair, 1991). La planification motrice implique en effet une préférence manuelle d'autant plus importante que l'activité réalisée est complexe. L'introduction de tâches complexes dans le quotidien des humains de la préhistoire telles que **la taille d'outils** pourrait être une cause de cette latéralisation manuelle (Llorente *et al.* 2008).

En plus du langage, l'hémisphère gauche serait en effet responsable de la capacité à tailler les outils (Corballis, 2003). L'exercice de ces deux facultés active la même région du cerveau, comme le démontrent les expériences menées par imagerie cérébrale d'Uomini *et al.* (2013). Ces deux fonctions auraient émergé dans le même temps, favorisant l'utilisation préférentielle de la main droite dans les tâches manuelles. L'hémisphère gauche est de plus responsable de la fonction d'apprentissage des séquences et de la capacité à planifier et coordonner des actions motrices (Hardwick *et al.* 2013), ce qui aurait d'autant plus encouragé une évolution vers une préférence manuelle droite.

La question du moment de l'émergence de cette latéralité dans l'évolution se pose alors. Une hypothèse la placerait au moment de la dichotomie entre l'espèce humaine et les primates non-humains (Uomini *et al.* 2013). Uomini *et al.* (2013) proposent également une émergence avec le développement de l'Acheuléen au paléolithique inférieur. La production des outils durant ce techno-complexe est en effet caractérisée par des actions planifiées et une organisation hiérarchisée des gestes, ce qui aurait pu impliquer une évolution des capacités cognitives complexes et donc l'émergence de la préférence manuelle droite.

Identifier le taux de droitiers et de gauchers chez les ancêtres de l'Homme moderne permettrait donc non seulement de renseigner sur l'évolution de la préférence manuelle chez les hominins, mais aussi de **mieux comprendre les modalités de développement des facultés cognitives complexes au cours de l'évolution de l'Homme.**

1.1.2 LA PRÉFÉRENCE MANUELLE CHEZ LES PRIMATES NON-HUMAINS

Mise à part l'espèce humaine, les primates présentent généralement une importante variation inter et intra-spécifique concernant la préférence manuelle, notamment pour les

tâches unimanuelles. Les facteurs de cette forte variabilité pourraient être le type et la vitesse de la tâche réalisée (Pouydebat *et al.* 2014), sa complexité ainsi que l'environnement dans lequel a évolué l'individu (milieu naturel ou en captivité) (Fagot et Vauclair, 1991 ; Mosquera *et al.* 2012). L'étude de la préférence manuelle chez les primates non-humains pourrait apporter de nouvelles informations quant à l'origine de la latéralité chez les hominés.

Une préférence manuelle significative de la main droite serait observée chez les primates non-humains pour les actions bimanuelles (Meguerditchian *et al.* 2010), c'est-à-dire une tâche où les deux mains sont impliquées dans l'accomplissement d'une action avec une main plus active que l'autre. La théorie des « **tâches complexes** » proposée par Fagot et Vauclair (1991) suggère en effet qu'au niveau de la population, la préférence manuelle n'existerait que dans le cadre d'activités dites complexes, impliquant une coordination bimanuelle et/ou des gestes de précision. Selon cette théorie, la main droite serait préférentiellement utilisée dans la réalisation de ces actions complexes, au niveau de la population (Spinozzi *et al.* 1998 ; Vauclair *et al.* 2005 ; Hopkins *et al.* 2011) (Fig. 1).



Figure 1 : Chimpanzé utilisant un outil en pierre lors d'une tâche unimanuelle. ©Cyril Ruoso / Biosphoto.

Bien que certaines activités de manipulation d'objets à l'aide d'une seule main soient parfois plus complexes que les tâches impliquant l'utilisation d'outil (Craist *et al.* 2009), ce sont ces activités nécessitant la manipulation d'un outil qui semblent induire la préférence manuelle la plus importante. L'étude de Pouydebat *et al.* (2010) a cependant démontré que l'utilisation d'outil n'implique pas nécessairement une préférence de la main droite. Dans le

cadre de la réalisation d'une tâche complexe impliquant un outil (par exemple pêche aux termites), les gorilles (*Gorilla gorilla gorilla*) de cette étude ont préférentiellement utilisé la main gauche. Cette étude démontre qu'à l'échelle de l'individu, la préférence manuelle peut changer selon la tâche (saisir avec puissance, saisir avec précision, saisir un outil), ce qui est également observé chez les humains actuels. Ces résultats sont cependant basés sur l'observation de trois individus uniquement.

A l'échelle de l'individu chez les primates non-humains, et de la population chez l'humain, **plus la tâche est complexe et plus la préférence manuelle semble marquée.**

Selon d'autres auteurs (Rogers, 2009), **la nature de la tâche** aurait davantage d'influence sur la préférence manuelle que le niveau de complexité de cette tâche, dépendant notamment du type d'objet impliqué (animé ou non, en mouvement rapide ou non). De récentes recherches démontrent effectivement l'influence de ce paramètre sur la préférence manuelle, à la fois chez les grands singes et chez les enfants humains (Forrester *et al.* 2011 ; Forrester *et al.* 2013 ; Quaresmini *et al.* 2014). Les observations sur les singes écureuils (*Saimiri sciureus*) et les capucins (*Sapajus spp.*) suggèrent que lorsque la proie est en mouvement rapide, c'est un système moteur guidé par les signaux visuels qui va induire le mouvement manuel (hémisphère droit) (King et Landau, 1993 ; Pouydebat *et al.* 2014). Le geste de saisie sera donc lié à la main gauche. La saisie d'un objet immobile sera au contraire liée au système moteur impliquant la main droite.

Selon MacNeilage *et al.* (1987), **la posture du corps** aurait sensiblement joué en faveur d'une préférence manuelle droite chez nos ancêtres arboricoles. Dans un premier temps, les hominidés fossiles auraient développé une spécialisation de l'hémisphère droit (responsable du traitement des informations visuelles), favorisant ainsi la recherche de nourriture. L'utilisation préférentielle de la main gauche observée chez les strepsirrhiniens actuels pour certaines tâches pourrait être une manifestation comportementale de cette adaptation fonctionnelle (MacNeilage *et al.* 1987). La main gauche étant requise pour ces mouvements visuellement guidés, une spécialisation posturale impliquant une suspension par le membre supérieur droit aurait été induite. Cette spécialisation posturale aurait ensuite entraîné une spécialisation de la main droite (hémisphère gauche) pour la manipulation dans l'espace et la coordination bimanuelle, suite au développement de la main préhensile et du pouce opposable.

Cependant, des études menées chez les lémuriens démontrent que la préhension unimanuelle est très rare (Reghem, 2018), les lémuriens se stabilisant souvent avec leurs pieds pour avec les deux mains libres dans la réalisation de tâches complexes, comme la préhension de proie rapide.

Enfin, d'autres auteurs suggèrent un rôle de la **posture bipède** à l'origine de la préférence manuelle au cours de l'évolution des humains (Sanford *et al.* 1984 ; Bradshaw, 1991 ; Braccini *et al.* 2010). L'émergence de la bipédie aurait permis la libération des membres supérieurs, favorisant le développement d'activités manuelles telles que la taille et l'utilisation d'outil ainsi que les gestes de communication. L'observation de chimpanzés (Braccini, 2009), de gibbons et de gorilles (Olson *et al.* 1990 ; Bardo *et al.* 2015) en captivité suggère que les individus utilisant un outil debout ou réalisant une tâche dans cette position, présentent une latéralité manuelle plus marquée que ceux réalisant ces activités en position assise. La posture érigée implique en effet de fortes contraintes spatiotemporelles, puisqu'elle requiert un ajustement dynamique du corps afin de compenser la gravité (Fortuyn, 1982). Aucune corrélation significative n'a cependant pu être établie avec l'émergence d'une préférence manuelle pour l'une ou l'autre main.

1.2. LE PROJET PRÉHMO

1.2.1 ARCHÉOLOGIE ET PRÉFÉRENCE MANUELLE

Des recherches ont préalablement été menées dans différents domaines de l'archéologie pour tenter de discriminer les droitiers des gauchers, à partir de fossiles et des vestiges culturels qui leur sont associés (pour une synthèse : Uomini et Gowlett, 2013).

La paléoanthropologie s'est par exemple intéressée aux asymétries des membres supérieurs du squelette, suggérant une majorité de droitiers au paléolithique supérieur (Steele, 2000 ; Steele et Uomini, 2005 ; Lazenby, 2006), ainsi qu'au paléolithique moyen, pour des espèces telles qu'*Homo heidelbergensis* et *Homo neanderthalensis* (Lozano *et al.* 2009 ; Poza-Rey *et al.* 2015). La forme des méninges du cerveau des individus fossiles a également fait l'objet de recherches sur la latéralisation, par le biais d'études d'endocrânes fossiles (Balzeau *et al.* 2012 ; Poza-Rey *et al.* 2015).

Les mains négatives de l'art rupestre au paléolithique supérieur sont pour la plupart des mains gauches (Delluc et Delluc, 1993 ; Clot *et al.* 1995), ce qui pourrait suggérer que la main droite était sollicitée pour manipuler les pigments et réaliser la peinture, ou pour le maintien de l'éclairage (Uomini, 2009). Cela corroborerait l'hypothèse selon laquelle les hommes du paléolithique supérieur seraient majoritairement droitiers.

Les dents peuvent être considérées comme une « troisième main » chez certaines espèces d'homininés (par exemple tenir une peau entre les dents et la tirer d'une main pour la tendre pendant que la seconde main coupe la peau avec un outil), comme le suggère les études sur Néanderthal (Fruyer *et al.* 2016). Cette utilisation spécifique des dents provoquerait des striations labiales sur la dentition antérieure des mandibules fossiles. Les striations orientées vers la droite indiqueraient une préférence manuelle droite et inversement, du moins pour ce type d'action (Bermúdez de Castro *et al.* 1988 ; Poza-Rey *et al.* 2015 ; Fiore *et al.* 2015 ; Fruyer *et al.* 2016).

Cependant le mauvais état de conservation des fossiles anciens rend les études paléoanthropologiques très complexes pour ces périodes. S'ajoute à cela une mauvaise représentativité statistique due à la rareté des ossements pour les périodes anciennes.

Présents depuis au moins 3,3 millions d'années (Harmand, 2015), les **outils en pierre** sont souvent les vestiges les plus abondants dans les sites archéologiques et relativement bien conservés dans le temps. Ils se prêtent donc très bien à l'étude de l'évolution de la latéralité et de la cognition chez les hominidés.

Les travaux s'intéressant à l'industrie lithique pour l'identification de la préférence manuelle concernent en général les stigmates de taille. Il s'agit de déterminer la préférence manuelle du tailleur à partir de paramètres tels que la **position du cortex** sur la face dorsale de l'outil (Thot, 1985). Cette méthode mettrait en évidence des particularités dans la prise en main du nucléus et dans son sens de rotation, selon que la taille est réalisée par un gaucher ou un droitier. La préférence manuelle serait alors corrélée à la position du cortex sur la face dorsale : lorsque le cortex se situe sur la partie gauche de la face dorsale, le tailleur est gaucher, s'il est sur la partie droite le tailleur est droitier. Des tests ont cependant montré que le sens de rotation du nucléus lors de la taille ne dépend pas seulement de la préférence manuelle, puisqu'un même tailleur peut aussi bien produire des éclats où le cortex est situé sur la droite de la face dorsale que sur la gauche (Patterson et Sollberg, 1986 ; Pobiner, 1999).

La **position du cône de percussion** des éclats (Rugg et Mullane, 2001) a également fait l'objet de recherches, suggérant que les cônes de percussion des éclats produits par les droitiers seraient déjetés vers la droite tandis que les cônes des éclats produits par les gauchers seraient déviés vers la gauche.

Ces différents travaux ont récemment été repris (Bargalló et Mosquera, 2014 ; Bargalló *et al.* 2017), dans l'objectif d'ajouter de nouveaux critères d'observation et de déterminer quels stigmates de taille sont significativement liés à la préférence manuelle du tailleur. D'après les résultats, l'étude d'un seul paramètre pour déterminer la préférence de la main droite ou gauche lors de la taille n'est pas suffisante, une combinaison de plusieurs critères serait nécessaires ainsi qu'un minimum de 8 éclats produits par le même tailleur. Cependant, les éclats porteurs de l'ensemble des paramètres requis sont rares et ces critères ne sont pas systématiquement diagnostics. **Déterminer avec succès la préférence manuelle à partir de stigmates de production sur les outils apparaît donc très complexe.**

Cette conclusion est confirmée par un test à l'aveugle visant à tester l'applicabilité des trois méthodes citées précédemment, avec pour support les éclats issus du débitage de 10 bifaces par des droitiers et des gauchers (Ruck *et al.* 2015). Selon les résultats, il apparaît impossible d'identifier significativement la préférence manuelle du tailleur, ni à partir d'un éclat, ni à l'échelle d'un assemblage. Ces méthodes seraient notamment biaisées par le fait qu'elles reposent sur des observations qualitatives visuelles, sujettes à la subjectivité de l'observateur. L'utilisation de paramètres quantitatifs basés sur des analyses statistiques apparaît donc nécessaire à la mise en place d'une méthode fiable.

Enfin, Bargalló *et al.* (2018) propose d'identifier la préférence manuelle à partir de la **répartition spatiale des éclats**, de la densité des dépôts et de leur amplitude autour du tailleur

après la taille. Les résultats de ces expérimentations ont mis en évidence une différence dans la répartition des résidus de taille dans l'espace, selon la préférence manuelle du tailleur, bien qu'il existe une superposition entre les deux groupes droitiers et gauchers. Cette technique pourrait être appliquée en contexte archéologique, mais seulement pour les sites n'ayant pas subi d'altérations post-dépositionnelles et où les événements de taille ont été bien préservés.

Quelques études tracéologiques mentionnent la préférence manuelle par l'analyse de **traces d'utilisation** sur les outils (Semenov, 1964 ; Keeley, 1977 ; Cahen *et al.* 1979 ; D'Errico, 1988). Or, ces travaux partent souvent du postulat que les outils sont tenus selon l'orientation technique lors de l'utilisation. Le mode de préhension et de manipulation varie cependant beaucoup selon les individus pour l'exécution d'une même tâche (Borel *et al.* 2017) et pour un résultat pouvant s'avérer tout aussi efficace. Aucune étude préalable n'a de plus été réalisée à partir d'un référentiel expérimental statistiquement représentatif. C'est ce que propose de réaliser le **projet PrémHo** (Préférence Manuelle chez les Hominidés fossiles), dans le cadre duquel a été réalisé ce travail de stage.

Il s'agit d'un projet pluridisciplinaire ayant pour objectif de vérifier s'il est possible d'identifier la préférence manuelle des utilisateurs d'outil à partir de l'analyse des traces d'utilisation à leur surface. Si cela s'avère possible, par le développement de nouvelles méthodes et de nouveaux modèles d'analyse, **des données inédites et fondamentales pour décrire l'évolution de la latéralité chez l'Homme pourront être obtenues afin de mieux comprendre les modalités d'émergence et de développement des capacités cognitives complexes.**

1.2.2 DU MODELE EXPÉRIMENTAL A L'APPLICATION ARCHÉOLOGIQUE

L'expérimentation tient une place majeure dans le projet PrémHo, puisqu'une application sur du matériel archéologique ne pourra se faire que lorsque les nouveaux modèles expérimentaux seront testés et validés. Afin de produire un modèle fiable et *a posteriori* applicable en contexte archéologique, une **base de données expérimentales** de références de stigmates (résidus, stries, microfractures, polis) doit être constituée pour permettre la détermination de paramètres d'intérêt pour l'identification de la préférence manuelle.

De nombreux facteurs peuvent en effet influencer la morphologie des stigmates d'utilisation et brouiller la signature d'une utilisation des outils dans la main droite ou gauche. Les variations des caractères inter et intra-individuels des expérimentateurs (sexe de l'individu,

habileté, puissance, mode de préhension...) (Walker, 1978 ; Jobson, 1986 ; Prasciunas, 2007 ; Borel *et al.* 2017 ; Key et Lycett, 2018), le matériau, la forme et la taille de l'outil ou encore les modalités de la tâche effectuée sont des paramètres à prendre en compte, qui nécessitent la mise en place de protocoles expérimentaux pour en évaluer l'impact et/ou les contrôler.

Le contrôle de l'effet de chacune de ces variables sur les traces lors des expérimentations permet d'isoler l'influence des facteurs techniques sur la morphologie des traces. Il s'agit d'isoler certains paramètres pour les tester et les recombinaison ensuite, et recontextualiser petit à petit le protocole vers des conditions archéologiques.

Pour contrôler les variables liées à l'outil, les premières expérimentations du projet ont été menées sur une soixantaine de moulages d'une même pointe Levallois. Ces outils standardisés avaient été conçus en verre sodocalcique, un matériau se fracturant de la même manière que des matières premières utilisées par les Hommes de la préhistoire, telles que le silex ou l'obsidienne. Suite à ces expérimentations, différents paramètres relatifs aux traces d'utilisation ont été décrits et/ou mesurés sur les outils. Un paramètre en particulier, celui de la localisation de la plus grande micro-écaillage produite sur le tranchant de l'outil, a permis une détermination de la préférence manuelle avec 76% de réussite. Plus de modifications étaient également observées sur les tranchants utilisés par les droitiers que par les gauchers concernant les micro-écaillures.

D'autres expérimentations ont ensuite été réalisées sur des outils en silex non standardisés. Ils constituaient les supports de l'étude réalisée dans le cadre du stage en laboratoire de Master 1, où il s'agissait de participer à la mise en place d'un protocole permettant de caractériser et coder la position des résidus et microfractures sur des tranchants d'outils, de façon quantitative, notamment grâce aux systèmes d'information géographiques (SIG).

Des **analyses quantitatives** permettraient en effet de limiter le biais lié à la subjectivité de la catégorisation. Il est rare que les traces observées correspondent totalement aux standards des catégories établies. Certaines traces peuvent ne pas être classées de la même façon par des observateurs différents. Les données qualitatives ne sont pas à écarter mais plutôt à combiner avec des paramètres quantitatifs qui permettraient une comparaison objective des différentes pièces.

L'applicabilité de cette nouvelle méthode d'analyse des traces d'utilisation pour l'identification de la préférence manuelle a été testée sur deux outils (Cabanès, 2018) : l'un utilisé de la main gauche et l'autre de la main droite. Des différences entre les deux modes de préhension ont pu être mises en évidence, cependant ces résultats n'étaient qu'illustratifs. Des tests statistiques sur un grand panel d'outils sont essentiels afin de déterminer s'il existe un modèle de traces spécifiques à l'utilisation de l'outil avec la main droite ou la main gauche.

1.3. CONTEXTE ET PROBLÉMATIQUE DU STAGE

Ce travail s'inscrit dans la continuité de l'expérience de laboratoire de Master 1, au cours duquel les bases d'une méthode d'acquisition et de localisation des micro-écaillures et des résidus à la surface d'outils en pierre ont été posées et appliquées sur un outil utilisé par un gaucher et un outil utilisé par un droitier, afin de vérifier s'il est possible d'identifier la préférence manuelle de l'utilisateur à partir de la caractérisation des traces d'utilisation. Cette première tentative s'est avérée prometteuse et nous avons alors décidé de poursuivre le développement de cette méthode en ajoutant un type de trace incontournable en tracéologie : les micro-polis d'utilisation. Contrairement aux résidus (sauf cas très exceptionnels), les polis sont relativement résistants à l'épreuve du temps et leur distribution générale, comme celle des micro-écaillures, peut être identifiable à la surface des outils en contexte archéologique.

L'objectif de ce stage de recherche est donc **de poursuivre le développement de cette méthode de caractérisation quantitative** (et qualitative) des traces d'utilisation à la surface d'outils en pierre tout en l'appliquant sur du matériel expérimental afin de **vérifier s'il est possible, à partir des traces d'utilisation à la surface des outils, d'identifier la préférence manuelle de l'utilisateur**. Il s'agit donc de proposer ici une méthode qui permette la comparaison d'éclats en pierre, *a priori* très différents en terme de morphologie, en coordonnant chacune des traces identifiées au moyen d'un système d'information géographique (SIG). Cette méthode sera testée sur un corpus de 32 pièces, utilisées par des gauchers pour certaines et par des droitiers pour d'autres, issues de deux séries expérimentales afin de voir si les caractéristiques des traces d'utilisation présentent des spécificités selon la main ayant utilisé l'outil.

Un échantillon plus important devra être étudié afin d'obtenir des résultats représentatifs. Toutefois, la durée de ce stage ne permet pas de considérer l'étude d'un nombre plus élevé d'objets. Il s'agit plutôt ici d'obtenir des données qui permettent d'ajuster la méthode et de proposer une chaîne d'acquisition, traitement, exploration, visualisation et test permettant de cibler dès à présent certains paramètres pouvant amener à l'identification de la main ayant utilisé l'outil. Un taux de détermination correcte de la main ayant utilisé l'outil supérieur à 90% est souhaité dans ce contexte expérimental pour valider le modèle.

Parmi les 32 pièces du corpus, 8 ont été utilisées de la main non préférentielle des expérimentateurs. L'analyse des stigmates sur ces 8 outils permettra d'évaluer la variabilité des traces produites lors d'une saisie de l'outil par une même main chez des individus de préférence manuelle différente.

Les traces seront également analysés indépendamment sur les deux faces des outils (externe et interne) pour voir si des stigmates spécifiques à la préférence manuelle de l'utilisateur seraient situés sur une face plutôt que l'autre. Déterminer la face externe et la face interne d'un outil en contexte archéologique permettrait également de donner de précieuses indications sur l'orientation de l'outil durant son utilisation et ouvrirait de nouvelles pistes de méthodes pour déterminer la préférence manuelle des utilisateurs. Par exemple, si la face externe de l'outil est connue, déterminer l'avant et l'arrière de l'outil au moment de son utilisation ou bien la direction du mouvement permettrait de déduire la main ayant tenu l'outil durant son utilisation.

Les données issues du traitement de ces bords d'outils participeront à la création d'une banque de données expérimentales de référence. Pour faciliter une future application des méthodes et modèles développés dans ce projet, l'utilisation de logiciels *open source* et d'équipements relativement accessibles est favorisée dans la mesure du possible.

2. MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1 DÉROULEMENT DES EXPÉRIMENTATIONS

Le matériel étudié au cours de ce travail est constitué de deux séries expérimentales d'outils en silex (provenant de Kremenets, Ukraine). Seize de ces outils ont été utilisés au cours d'une expérimentation menée en dehors du cadre de ce stage, et qui a eu lieu à Szazhalombatta (Hongrie) en Avril 2017. Seize autres outils ont été utilisés à Madrid (Espagne) en Avril 2018 au cours d'une expérimentation que j'ai menée en prévision de ce stage.

Seize personnes ont participé à la première expérimentation. Il s'agissait pour les participants de réaliser une activité de **sciage de bois** avec des lames en silex durant 20 minutes, à l'aide de leur main préférentielle (Fig. 2). Le panel d'expérimentateurs comprenait 12 droitiers et 4 gauchers. Dans le cadre de ce travail, cette série a été étudiée de façon complémentaire pour augmenter le corpus de données concernant les résidus.

La seconde expérimentation a réuni 8 individus : 4 droitiers et 4 gauchers, 2 hommes et 2 femmes pour chaque catégorie. L'activité demandée était la même que lors de la première série (sciage de bois). Dans une première séance de 20 minutes, les individus devaient réaliser la tâche avec leur main préférentielle. Ils devaient ensuite recommencer avec un autre outil, en utilisant leur autre main lors d'une seconde séance de 20 minutes.



Figure 2 : Positionnement d'un individu droitier lors de l'expérimentation de 2017 (Szazhalombatta, Hongrie).

©Lauriane Vieli.

Des baguettes de bois standardisées ont été utilisées. Il s'agissait de baguettes en bois sans nœud d'une longueur de 50cm pour 1,8cm de diamètre. De même, la tâche de sciage a

été choisie car elle semblait induire moins de variabilité individuelle dans la méthode d'utilisation de l'outil et dans le mode de préhension, contrairement à une tâche de raclage par exemple.

Lors de la seconde expérimentation, les participants ont été isolés les uns des autres afin d'éviter les biais d'imitation et d'observation. Au début de chaque séance, des informations personnelles étaient recueillies auprès des participants sous la forme d'un questionnaire (âge, poids, taille, préférence manuelle, etc.), plusieurs mesures et les contours de la main utilisée ont été relevés. Toutes les informations recueillies n'ont pas été analysées par la suite, l'objectif de certaines questions étant simplement de masquer aux utilisateurs l'objectif principal de l'expérimentation.

Le participant avait pour consigne de choisir un outil, non standardisé, parmi la cinquantaine qui lui était présentée sur une table. Afin de ne pas influencer l'expérimentateur sur la façon de saisir l'outil, les pièces ont préalablement été étalées toutes ensemble sur la table dans des positions aléatoires.

Une fois l'outil choisi, l'expérimentateur devait s'asseoir sur une chaise et scier la baguette de bois numérotée qui lui était attribuée. Un carré de cuir à placer sur les genoux ainsi que des gants étaient à disposition des participants pour leur confort, et ainsi limiter les biais de préhension liés à d'éventuelles douleurs. Les gants étaient cependant souples et fins pour limiter les possibles modifications des sensations de préhension.

Durant la première minute de sciage, l'utilisateur pouvait changer sa position de préhension pour trouver celle qui lui convenait le mieux, cependant il devait garder la baguette de bois en position horizontale sur les genoux. Cette minute écoulée, l'expérimentateur avait pour consigne de garder la même position de préhension sur l'outil. La pièce ne devait plus être retournée ni changée de main et le même bord devait être utilisé tout au long de la séance. L'utilisateur pouvait faire autant de pauses qu'il le souhaitait, le chronomètre étant arrêté pendant ce temps.

Tout au long de cette étude, la **face « externe »** de l'outil est définie par la face de l'outil tournée vers l'extérieur lors de son utilisation et la **face « interne »** celle tournée vers l'expérimentateur (Fig. 3). Les termes « avant » et « arrière » de l'outil seront préférentiellement utilisés à « proximal » et « distal » afin de tenir compte de l'orientation de la direction du mouvement de l'objet et non de son orientation technologique.



Figure 3 : Outil utilisé par une droitère avec la face interne tournée vers l'individu et la face externe tournée vers l'extérieur. ©Lauriane Vieli.

Chaque séance de sciage a été documentée par vidéo et photographie avec un appareil Nikon D7500 DSLR ainsi que par écrit. Les participants étaient invités à décrire leurs impressions à l'oral tout au long de l'expérimentation. Une fois la séance terminée, chaque outil était rangé dans un sachet mini-grip individuel libellé. Dans le cas où la baguette de bois avait été sciée en plusieurs morceaux, les différents bouts sont également numérotés.

2.2 MÉTHODES D'ACQUISITION POUR LES TRACES D'UTILISATION

2.2.1 RÉSIDUS

Les deux faces des 32 outils du corpus ont été photographiées avec un appareil Nikon Reflex D31000 équipé de l'objectif VR 18-55mm (exemple : Fig. 4). Une acquisition macrographique (format .JPG) est en effet suffisante pour localiser la majeure partie des résidus et réaliser des mesures par la suite. Les photographies sont détournées dans le logiciel GIMP puis exportées en format .tif.



Figure 4 : Photographies macroscopiques des faces ventrale (à gauche) et dorsale (à droite) de l'outil T007. Les résidus à l'aspect brillant sont visibles à l'œil nu sur les tranchants.

2.2.2. ALTÉRATION DE SURFACE

Les paramètres analysés concernent deux types d'altérations de surface : les **polis d'utilisation** et les **micro-écaillures**. Lors du sciage, un contact s'opère sur les deux faces de l'outil mais la pièce n'est généralement pas tenue parfaitement à 90° par rapport à la baguette de bois. Des différences peuvent donc être observées dans la dispersion et les caractéristiques des stigmates entre les faces externes et internes et éventuellement selon que l'outil est tenu de la main droite ou gauche. **L'identification des positions des faces de l'outil au moment de son utilisation apparaît donc essentielle** pour mener à bien ce projet. En plus d'apporter une information importante sur l'orientation de l'objet lors de l'utilisation, identifier la face externe et interne pourrait permettre de trouver des paramètres spécifiques à la main utilisée.

Une fois les résidus documentés, chaque pièce est lavée pour pouvoir visualiser et caractériser les altérations de surface (qui pourraient être masquées par les résidus) sur chaque face des outils. Les outils sont placés dans des sachets minigrip individuels. Une solution

d'eau savonneuse neutre sans phosphate (Derquim LM02) est versée dans les sachets qui sont ensuite placés dans la cuve à ultrason durant 10 minutes. Pour retirer les résidus organiques du tranchant, de l'eau oxygénée à 15% est versée dans le sachet qui est ensuite placé dans une cuve à ultrasons durant 5 minutes. Pour nettoyer la pièce des résidus graisseux tels que les traces de doigts, la pièce est placée dans un sachet contenant de l'acétone avant d'être plongée dans la cuve à ultrason durant 10 minutes. Les pièces sont rincées à l'eau après chaque lavage. Si des résidus restent enchâssés, des lavages supplémentaires sont réalisés.

La localisation et caractérisation des micro-écaillures et des polis peut ensuite être réalisée. Elle nécessite cependant un grossissement plus fort que pour la simple localisation des résidus avec, de plus, une haute résolution (quelques microns). Afin de pouvoir visualiser la distribution de ces traces sur l'ensemble des bords des outils et réaliser des mesures, il est donc nécessaire de produire des **panoramas de chaque tranchant**, pour les faces dorsales et ventrales. Bien que ce processus soit très coûteux en temps, il s'agit quasiment du seul moyen d'accéder à cette documentation (exception faite de quelques équipements non accessibles pour notre étude et encore très rares d'une façon générale ; e.g. microscope à variation de focus de type Alicona InfiniteFocus G5 ou μ CMM).

La méthode de caractérisation des polis et micro-écaillures développée dans cette étude a été appliquée aux 16 pièces du corpus issu de la seconde série expérimentale, qui comprend les 8 utilisés de la main préférentielle et 8 outils utilisés de la main non préférentielle.

Micro-écaillures

Afin de documenter les **micro-écaillures**, les reconstitutions panoramiques des tranchants ont été réalisées à un grossissement x40, sous une lumière annulaire, avec un microscope numérique Hirox RH-2000 équipé d'une lentille MXB 2016 Z.

Plusieurs tests ont été effectués pour choisir le mode de réalisation des panoramas des tranchants. D'abord, des mosaïques en trois dimensions ont été réalisées avec le mode semi-automatique du microscope numérique. Après la définition d'un point de départ et d'arrivée et d'un point haut et bas (pour la topographie de surface) sur le bord de l'outil, le microscope prend automatiquement les photographies le long du bord en réalisant des piles d'images et des focus étendus si nécessaire. Il assemble ensuite toutes ces images pour constituer la mosaïque. L'algorithme d'assemblage en mosaïque de ce microscope s'est cependant avéré peu performant

avec un comportement très aléatoire. Les panoramas obtenus en utilisant cette méthode sont de qualité généralement très moyenne et comportent beaucoup d'artefacts et de distorsions.

La seconde méthode que nous avons testée consistait à prendre manuellement des photographies, à l'aide du microscope numérique, sur toute la longueur du bord, en faisant des piles d'image et focus étendus si nécessaire. Ces images ont ensuite été exportées et assemblées dans le logiciel Image Composite Editor (ICE). La qualité du panorama obtenu par ce moyen s'est avérée très bonne. Cette méthode de reconstitution a donc été retenue pour réaliser les 32 panoramas (2 faces des 16 outils) nécessaires à cette étude.

Les panoramas des tranchants sont exportés en format .tif puis détourés dans le logiciel GIMP, avant d'être exportés en format .tif (Fig.5).



Figure 5 : Panorama du tranchant de la face ventrale de l'outil T016. Photographies prises au microscope numérique Hirox RH-2000 équipé de la lentille MXB 2016 Z, au grossissement x40. La reconstitution du panorama a été réalisée dans le logiciel ICE en mode structuré.

Polis

Afin de trouver le type de lumière adéquat à la visualisation des polis, les pièces ont été observées sous différents éclairages. Le microscope Hirox RH-2000 dispose d'une source de lumière permettant de travailler avec une lumière uniquement coaxiale (adapté à la visualisation des polis et aux forts grossissements), avec une lumière uniquement annulaire ou bien avec une combinaison des deux. Habituellement, la lumière coaxiale est utilisée, et même essentielle, pour l'observation des polis d'utilisation. Cependant le grossissement auquel les photos ont dû être prises ne pouvait pas être trop important car plus le grossissement est fort et plus le champ de vision de l'objectif diminue. Un champ de vision trop faible impliquerait la multiplication du nombre de photographies à prendre pour documenter la zone d'intérêt. Cela aurait pour conséquence d'accroître très fortement le temps d'acquisition ainsi que le nombre potentiel d'erreurs et/ou d'échecs lors des assemblages en mosaïque.

Un compromis entre grossissement, type de source de lumière et champ de vision a donc été fait. Les tests menés ont montré qu'un grossissement de 200x (grossissement minimum pour une observation optimale des polis), avec la lentille MXB-5000REZ (« Mid-Range »), offrait un champ de vision suffisant ($1515,38\mu\text{m}$) pour limiter le nombre d'images à

acquérir. Différentes configurations de source de lumière ont alors été testées : une lumière pleinement coaxiale (Fig. 6A), un mélange de lumière coaxiale et annulaire (2^e cran de l'anneau de contrôle du microscope : fig. 6B, 5^e cran de l'anneau : fig. 6C) et lumière pleinement annulaire (Fig. 6D). La lumière uniquement coaxiale a permis d'obtenir les meilleures images et a donc été choisie pour l'ensemble de la documentation des polissages d'utilisation.

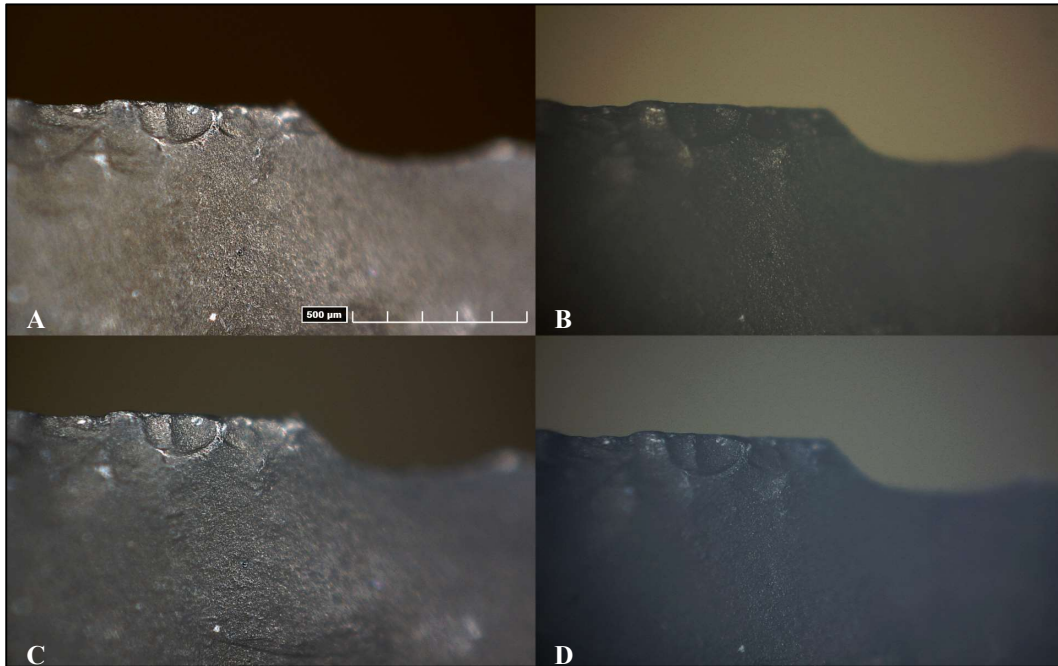


Figure 6 : Tests d'éclairage pour l'acquisition des polissages d'utilisation. A : lumière coaxiale totale, B : mélange de lumière coaxiale et annulaire (2^e cran de l'anneau de contrôle du microscope), C : mélange de lumière coaxiale et annulaire (5^e cran), D : lumière annulaire totale. Objectif MXB-5000REZ : Mid-Range : x200, équipement RH-2000, LED 255, vitesse d'obturation automatique, gamma contraste élevé, CV=1515,38µm

Afin de visualiser les polissages sur le tranchant de l'outil, une réorientation fréquente de la pièce est nécessaire car la surface de l'outil doit impérativement être perpendiculaire à la source lumineuse. Or, le bord des outils présente de nombreux plans différents surtout lorsqu'ils sont accidentés et présentent de nombreuses micro-écaillures. Pour cette raison, la réalisation d'un panorama d'un bord complet en une seule fois, qui nécessiterait que la pièce reste immobile, a été impossible.

Différents essais ont donc été menés afin d'évaluer la faisabilité d'une reconstitution du tranchant en plusieurs morceaux à assembler par la suite dans le logiciel ICE. Cependant, le temps requis pour l'acquisition complète du tranchant s'est avéré trop important (4 heures pour 2cm de tranchant, avec des pièces allant jusqu'à 14cm de long) au grossissement x200.

Une recombinaison des mosaïques des différentes portions du tranchant aurait par ailleurs induit une distorsion de la reconstitution finale du bord, puisque les portions de panorama auraient été réalisés sous différents angles.

Or, il avait initialement été prévu que les polis soient caractérisés et localisés sur le tranchant de l'outil à l'aide d'un SIG, selon la méthode de documentation des résidus précédemment mise en place (Cabanès 2018). Cette méthode impliquait des panoramas complets des tranchants, indispensables à la localisation des traces sur le bord de l'outil ainsi qu'au relevé des mesures microscopiques à l'aide du SIG.

Ainsi, au lieu d'une reconstitution complète du bord, des mosaïques individuelles de chaque poli pour les 32 faces d'outils ont été réalisées (Fig. 7). Bien que chronophage (8 heures d'acquisition en moyenne par face d'outil), cette méthode s'est tout de même révélée plus rapide qu'une reconstitution complète du tranchant. Les mesures ont ensuite été prises sur les panoramas des polis, directement à l'aide de l'interface de contrôle du microscope numérique.

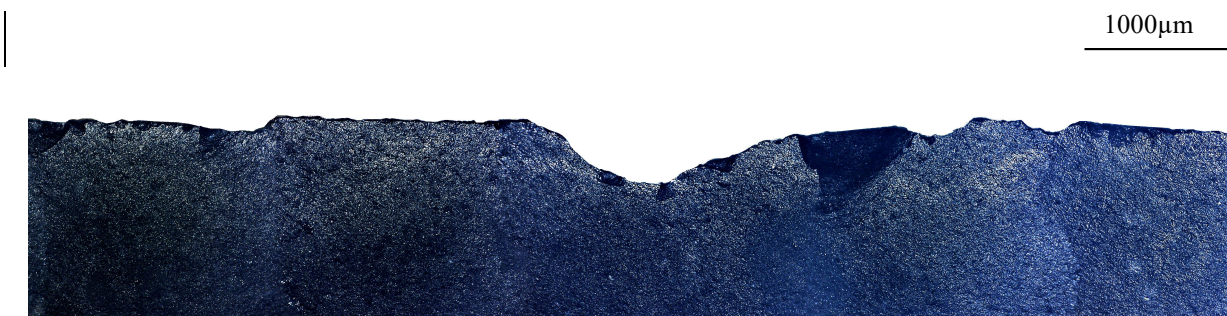


Figure 7 : Panorama d'un poli sur la face dorsale de l'outil T009. Objectif MXB-5000REZ : Mid-Range : x200, microscope Hirox RH-2000.

2.3 DOCUMENTATION DES TRACES APRES UTILISATION

Les traces d'utilisation (i.e. résidus, micro-écaillures et polis) ont été documentées quantitativement et qualitativement à l'aide d'un SIG et de différents logiciel de traitement d'image. Les localisations des traces ainsi que leurs longueurs le long du tranchant ont été converties en pourcentages par rapport à la longueur totale du tranchant, afin de pouvoir plus tard comparer la répartition des traces sur les bords des outils tout en limitant l'impact de la taille des pièces sur les données. Enfin, les paramètres quantitatifs et qualitatifs analysés ici ont été déterminés et étudiés à partir de statistiques descriptives et inférentielles dans l'objectif de tester le potentiel et l'applicabilité de la méthode.

2.3.1 ORIENTATION DU TRANCHANT ET GÉORÉFÉRENCEMENT

Afin de localiser les stigmates sur les tranchant d'outil et de documenter les traces quantitativement, la pièce doit être géoréférencée. Une grille d'orientation et de géoréférencement commune à l'ensemble des pièces a été créée dans le logiciel Inkscape. La dimension de cette grille doit être supérieure à celle de la plus grande pièce de la série, soit ici une grille de 15cm sur 6cm avec ($X = [0 ; 15] ; Y = [-3 ; 3]$).

Tous les panoramas des bords et les photographies macroscopiques des outils sont positionnés dans cette grille. La première extrémité du tranchant est placée sur le point de coordonnées (0 ; 0) et l'autre extrémité sur l'axe des abscisses (Fig. 8). L'image n'est pas encore exportée à ce stade du protocole car la localisation du début de chaque poli devra être matérialisée sur le tranchant dans le logiciel Inkscape, lors d'une prochaine observation de l'outil sous l'Hirox.

2.3.2 RÉSIDUS

Afin de caractériser les résidus des outils, les photographies macroscopiques des deux faces des 32 pièces orientées dans la grille de géoréférencement sont importées dans le logiciel QuantumGIS pour y être géoréférencées. Différents paramètres quantitatifs vont être relevés :

- **aire** de la zone de résidus (en μm^2)
- **périmètre** de la zone de résidus (en μm)
- **envahissement** des résidus, tous les 2500 μm le long du tranchant de l'outil (en μm).
- **localisation** des résidus, caractérisée par une coordonnée X relevée tous les 2500 μm sur le tranchant de l'outil.
- **pourcentage du bord** portant des résidus.

Afin de réaliser les mesures de l'envahissement tous les 2500 μ m sur le tranchant, une grille est créée avec des mailles verticales espacées de 2500 μ m et superposée à l'image de l'outil. Une ligne de mesure est tracée le long des mailles de la grille, entre le bord du tranchant et la fin des résidus (Fig. 8). Une fois toutes les lignes tracées, leurs longueurs sont calculées avec la calculatrice de champ à l'aide de la formule « \$length*1000000 ». Un facteur 1000000 est en effet ajouté afin de convertir les mesures du mètre au micron. Chaque mesure d'envahissement (y compris les mesures nulles) est associée à sa coordonnée X qui correspond à la localisation de cette mesure d'envahissement des résidus sur le bord.

Un polygone est dessiné en suivant la forme de la zone des résidus (Fig. 9) afin de calculer son aire et son périmètre, par les formules « \$area*1000000000000 » et « \$perimeter*1000000 ». Comme pour les mesures d'envahissement, les facteurs 1000000000000 et 1000000 sont appliqués afin de convertir les mesures respectivement du mètre carré au micromètre carré et du mètre au micron. La totalité des images des outils après traitement dans le logiciel QGIS pour la caractérisation des résidus sont disponibles en annexe (Annexe 1).

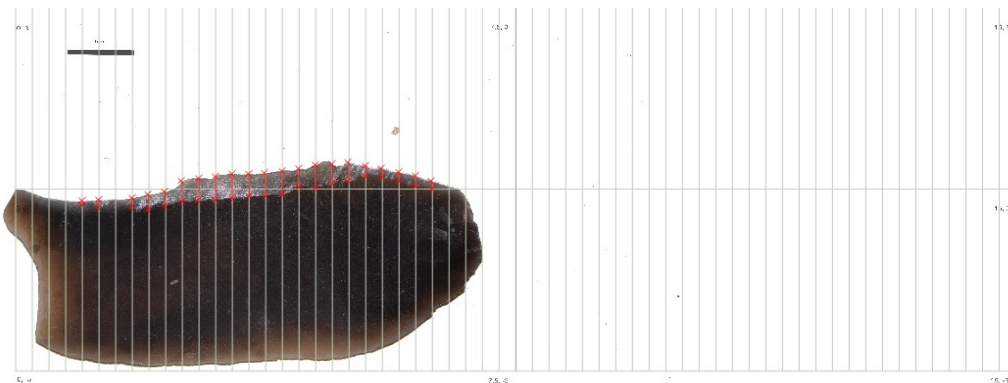


Figure 8 : Grille de mesure avec des mailles espacées de 2500 μ m, placée sur la photographie géoréférencée de la face ventrale de l'outil T003. En rouge : mesures de l'envahissement le long des mailles de la grille. QGIS 2.18.16

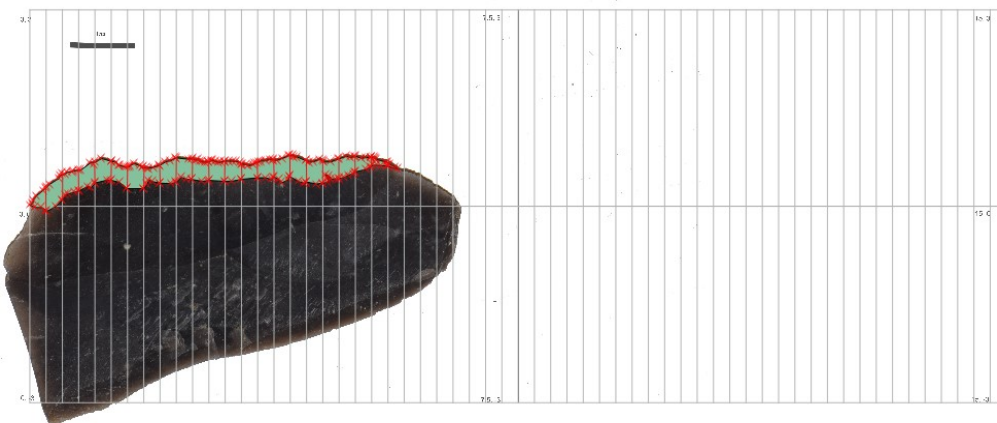
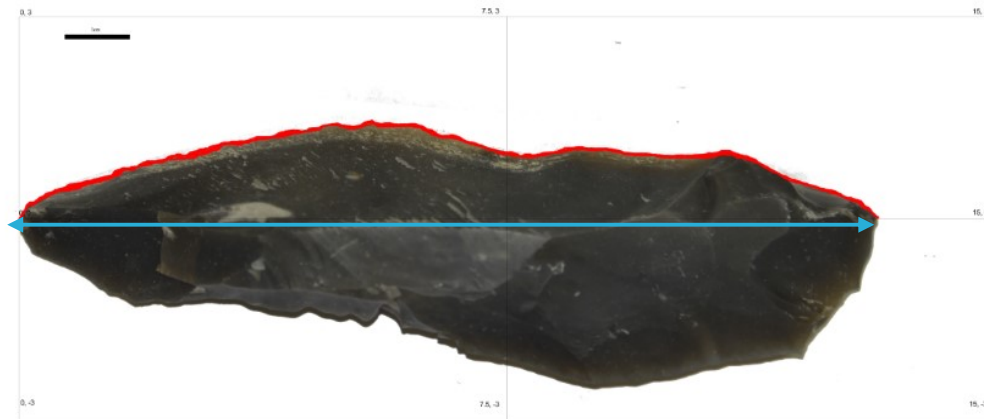


Figure 9 : Polygone représentant la zone de résidus de la face dorsale de l'outil T001. QGIS 2.18.16

La longueur du tranchant est également mesurée, selon deux façons : en **mesure « réelle »** le long du bord, suivant les irrégularités du tranchant, et **par projection** du bord sur l'axe $Y=0$ (Fig.10).



Légende :

- Mesure de la longueur du tranchant le long du bord (longueur réelle)
- Mesure de la longueur du tranchant par projection du bord sur l'axe $v=0$

Figure 10 : Illustration des deux manières de relever la longueur des tranchants.

Toutes les données acquises dans QGIS sont exportées dans des tableurs spécifiques à chaque face d'outil en vue d'un traitement dans le logiciel R. Au total, les résidus ont été mesurés et localisés à 3522 endroits sur les tranchants des outils.

2.3.3 MICRO-ÉCAILLURES

Le protocole de caractérisation des micro-écaillures développé ici a été appliqué sur les 16 pièces issues de la seconde série expérimentale, pour un total de 2939 micro-écaillures documentées. Les panoramas des deux faces de ces outils, préalablement orientés et géoréférencés, ont été documentés dans QGIS.

Des polygones ont été tracés en suivant la forme de chaque micro-écaillure afin de relever des paramètres quantitatifs (Fig. 11) :

- **aire** de chaque micro-écaillure (μm^2),
- **périmètre** de chaque micro-écaillure (μm),
- **envahissement** et **position** de la micro-écaillure la plus envahissante de la face (μm).

La **localisation** et la distribution des micro-écaillures ont été prises en mesure linéaire, **par projection** des extrémités de la micro-écaillure sur l'axe des abscisses. Lorsque les micro-

écaillures se chevauchaient, leurs localisations ont été comptées en groupe, c'est-à-dire que les localisations ont été prises de part et d'autre de ce groupe et non individuellement, afin de permettre de futures représentations graphiques et le traitement des données. Le nombre de micro-écaillures présentes sur chaque face d'outil a été comptabilisé. Ces données ont ensuite été reportées dans des tableurs spécifiques à chaque face d'outil. La totalité des panoramas des tranchants d'outils traités dans QGIS pour la documentation des micro-écaillures est disponible en annexe (Annexe 2).

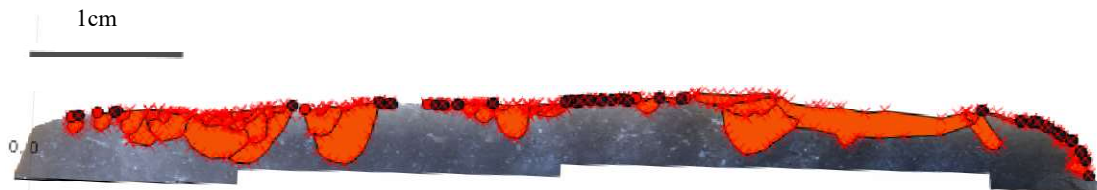


Figure 11 : Documentation quantitative des micro-écaillures à l'aide de polygones superposés aux microenlèvements. Points oranges : localisation de début des micro-écaillures, points noirs : localisation de fin des

La distance entre le début de la première micro-écaillure et le point 0 du tranchant, ainsi que la distance entre la fin de la dernière micro-écaillure et la fin du tranchant sont mesurées.

Des paramètres qualitatifs ont aussi été intégrés à l'étude. L'**orientation** des micro-écaillures a été déterminée selon trois catégories (Fig. 12) :

- les micro-écaillures orientées vers l'avant de l'outil
- les micro-écaillures orientées vers l'arrière de l'outil
- les micro-écaillures perpendiculaires au tranchant.

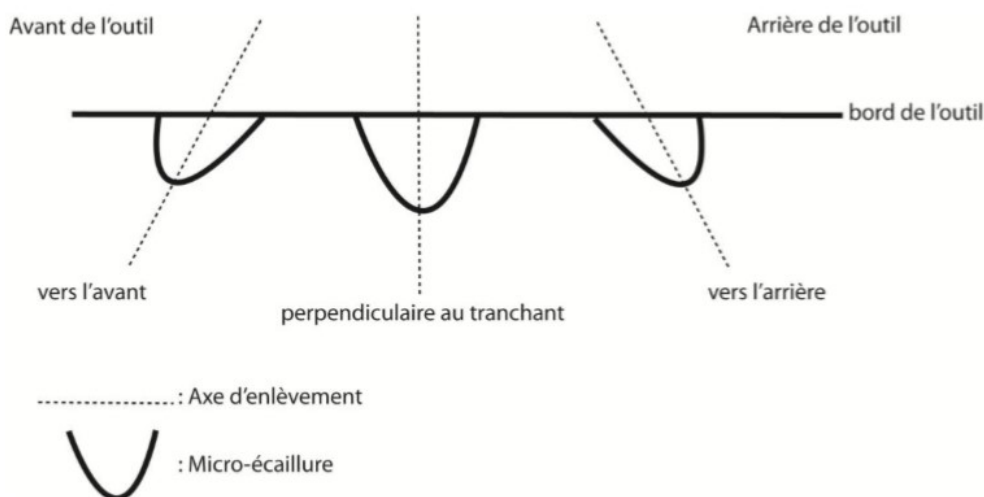


Figure 12 : Description de l'orientation des micro-écaillures. © Alice Rodriguez.

Le type de terminaison a aussi été décrit selon la typologie définie par le Ho Ho Committee (1979). (Fig. 13) :

- de type « fracture » lorsque le bord a subi un microenlèvement net,
- de type « plume » lorsque la délimitation de la micro-écaillure est presque lisse,
- de type « escalier » lorsque la délimitation de la micro-écaillure est marquée,



Figure 13 : Typologie de terminaison des micro-écaillures, définie par le Ho Ho Committee (1979).

2.3.4 POLIS D'UTILISATION

Par poli d'utilisation, nous entendons ici toute zone de la surface altérée par l'utilisation, il peut donc s'agir de polis typiques, très développés, ainsi que des zones encore très faiblement altérées. Comme pour l'analyse des micro-écaillures, les 16 pièces du corpus issues de l'expérimentation de 2018 ont été caractérisées, correspondant à un total de 15 127 observations chacune documentée pour 7 variables.

Comme vu précédemment, suite à l'impossibilité de réaliser des panoramas complets des tranchants au grossissement x200 ici, les localisations des polis n'ont pas pu être relevées à l'aide du logiciel QGIS comme il en était pour les résidus. Une autre méthode est donc appliquée pour localiser ces traces. Lorsqu'un poli est observé au microscope, son emplacement de début et de fin est reporté visuellement sur le panorama réalisé précédemment en x40, pour la caractérisation des micro-écaillures, orienté dans le fichier Inskape. Le début et la fin de chaque poli est ainsi matérialisé par un petit segment (Fig. 14). Les polis pourront ainsi être géolocalisés en même temps que l'image de la pièce dans le logiciel QGIS et leurs coordonnées relevées. Cette image est ensuite exportée d'Inkscape au format .png par défaut. Les polis ne sont pas directement localisés dans le logiciel QGIS sur l'image géoréférencée puisque l'export de l'image en format .png depuis le logiciel Inkscape va réduire la résolution de l'image, diminuant donc la précision des localisations qui doivent être reportés visuellement.

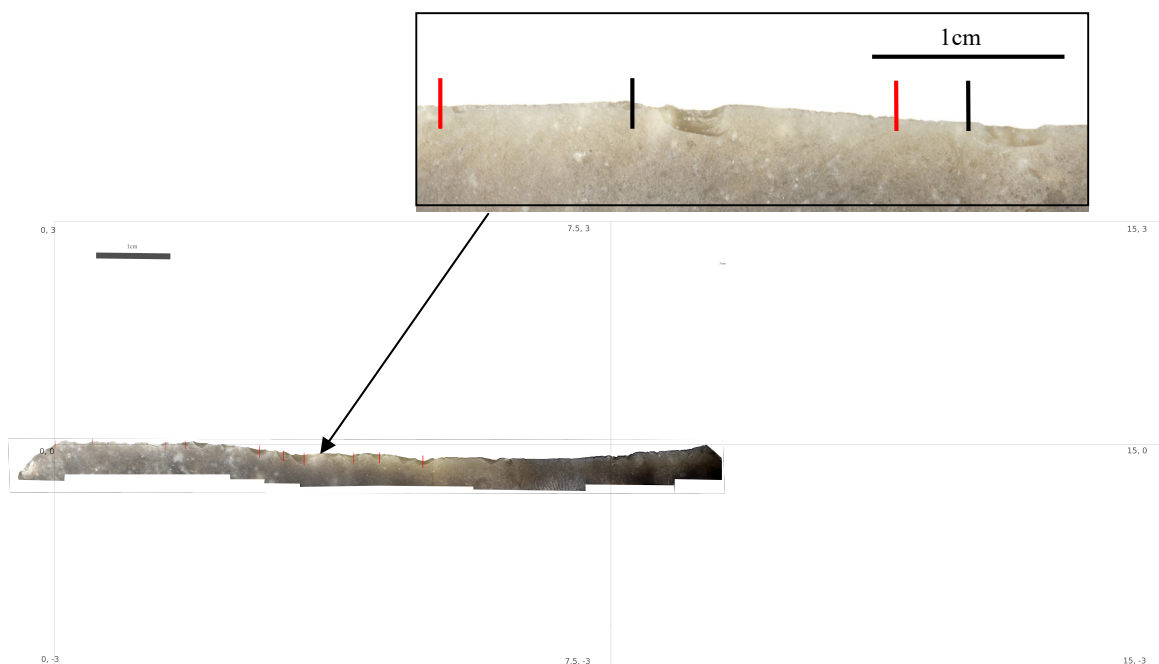


Figure 14 : Représentation de la localisation du début et de la fin de chaque poli sur le tranchant d'un outil (dans la grille d'orientation) par de petits segments rouges. Encadré : zoom du tranchant.

Les mesures sont réalisées directement sur le panorama du poli dans l'interface du microscope numérique. A l'aide de l'outil « grille », un quadrillage aux mailles espacées de 100 μ m est superposé au panorama dans le logiciel. Des mesures de l'**envahissement des polis tout les 100 μ m** peuvent ainsi être relevées le long des mailles de la grille (Fig. 15). Les mesures sont reportées au fur et à mesure dans un tableur spécifique à chaque face d'outil. La longueur du poli le long du tranchant est aussi mesurée, puis le pourcentage de la longueur du tranchant altérée par les polis est calculé. L'aire et le périmètre des polis ne sont pas mesurés pour les polis car il s'agit de zones hétérogènes.

Des paramètres qualitatifs sont également relevés :

- **Type de trame** : lâche, serrée, unie, mixte (lorsque la trame est lâche ou serrée dépendant des zones d'un même poli), lâche près du bord et serrée en-dessous, serrée près du bord et lâche en-dessous (Fig. 16).
- **Distance par rapport au bord** : de type « proche » lorsque le poli touche le bord, « éloignée » lorsqu'il ne touche pas le bord (Fig. 17).

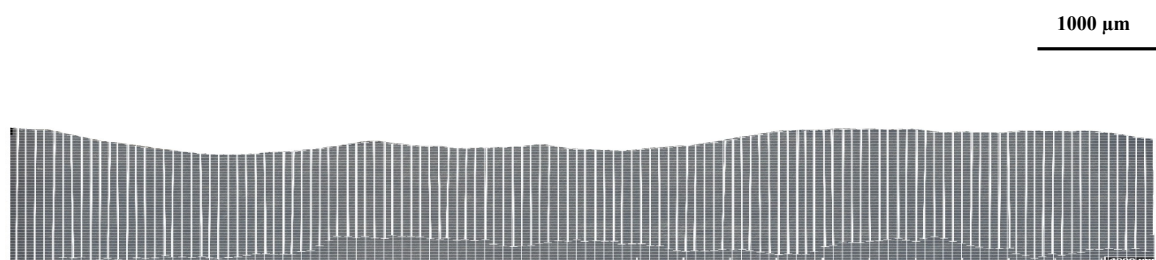


Figure 15 : Quadrillage aux mailles espacées de 100 μ m, superposées au panorama d'un poli dans le logiciel de l'Hirox. Segments blanc : mesures de l'envahissement des polis tous les 100 μ m le long des mailles de la grille.

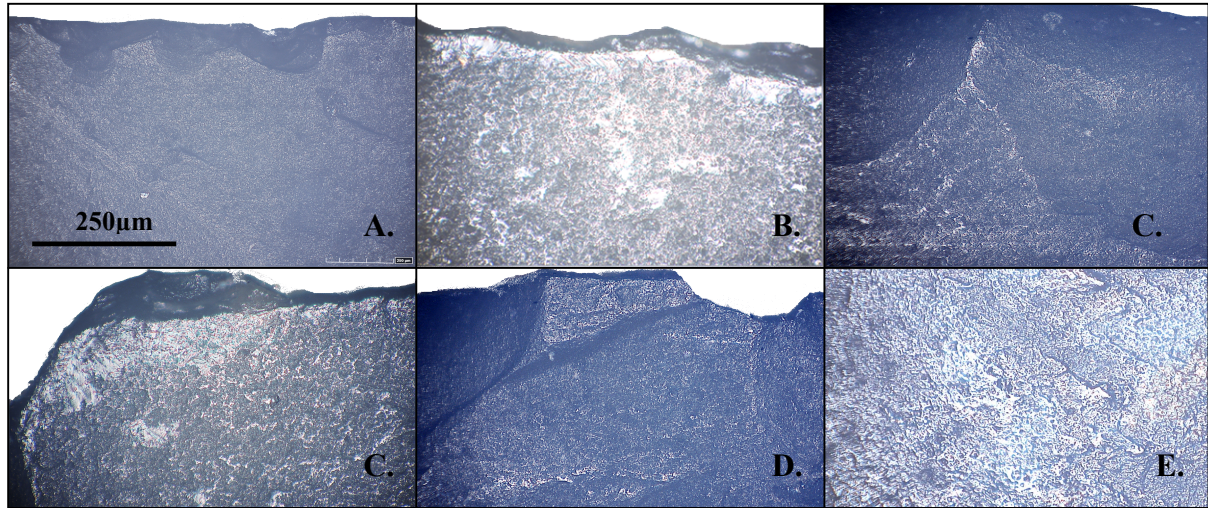


Figure 16 : Illustration des différents types de polis. Objectif MXB-5000REZ : Mid-Range : x200, microscope Hirox RH-2000. A : trame lâche, B : trame serrée, C : trame lâche près du bord et serrée en-dessous, D : trame serrée près du bord et lâche en-dessous, E : trame mixte, F : trame unie.

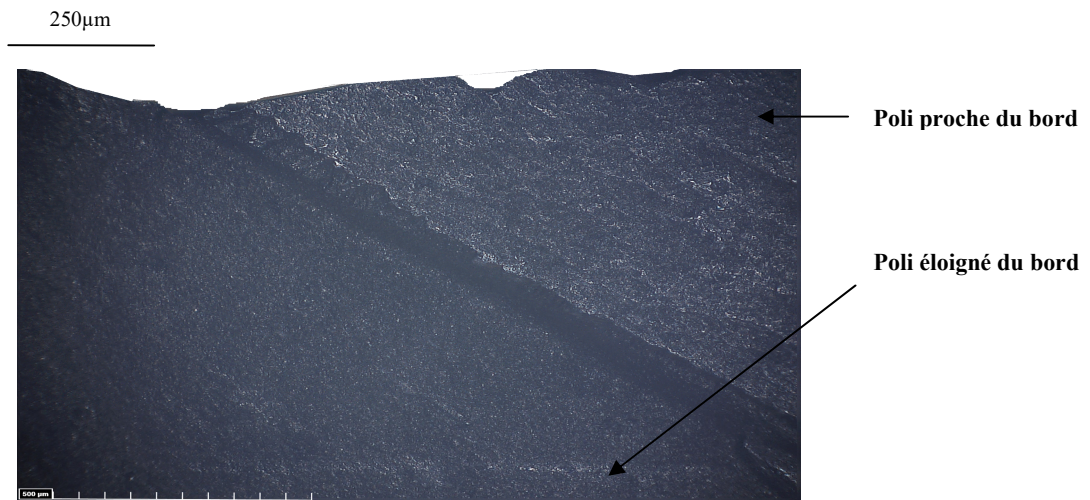


Figure 17 : Photographie d'un poli éloigné du bord et d'un poli proche du bord, sur la face ventrale de l'outil T012. Objectif MXB-5000REZ : Mid-Range : x200, équipement Hirox RH-2000, LED 255.

Les panoramas des tranchants en x40 orientés dans la grille Inskape, mis à l'échelle et portant les localisations des polis sont ensuite importés dans le logiciel QGIS. Les quatre coins de la grille d'orientation sont géoréférencés : chaque zone de la pièce est ainsi associée à des coordonnées à échelle réelle dans un repère spécifique à l'outil et des mesures peuvent être prises. Les coordonnées X et Y de début et de fin des polis sont relevées et reportées dans un tableur spécifique à chaque face d'outil

2.4 STATISTIQUES ET TRAITEMENT DES DONNÉES

Chaque paramètre analysé a d'abord fait l'objet de **statistiques descriptives** (moyennes, écarts-types, fréquences, etc.) pour évaluer son potentiel d'identification de la main ayant utilisé l'outil. Bien que le corpus soit de petite taille, **des tests non paramétriques U de Mann-Whitney** ont été appliqués (les pré-requis du t-test n'étant jamais respectés) afin de vérifier la significativité statistique des tendances observées sur des paramètres quantitatifs entre deux groupes. Les paramètres d'intérêt ont été analysés indépendamment sur les deux faces des outils pour tenter de distinguer la face externe et la face interne par l'étude des traces d'utilisation.

Pour explorer les données quantitatives (i.e. nombre d'extrémité du tranchant altérées par les polis, les micro-écaillures et les résidus, pourcentage de la longueur du tranchant altéré par les polis et les résidus, etc.), des **analyses en composantes principales (ACP)** et **bi-variées** ont été réalisées en combinant différents paramètres, dans un premier temps pour tous les outils puis seulement pour les outils utilisés de la main préférentielle.

La méthode des k plus proches voisins (k -NN, de l'anglais *k-nearest neighbors*) a été appliquée à l'aide du logiciel R (version 3.4.3). Cette méthode d'apprentissage supervisé en intelligence artificielle permet d'estimer la probabilité de bon classement de chaque pièce et d'apprécier la fiabilité du modèle et la pertinence des paramètres testés. L'évaluation de la fiabilité du modèle a été réalisé par validation croisée, plus particulièrement avec le mode « *repeated k-fold cross validation method* ». Cette méthode consiste dans un échantillon de n objets, à effectuer les apprentissages sur $n-1$ objets et à tester le modèle sur l'objet retiré. L'opération est reproduite n fois. Dans un premier temps, tous les outils ont été inclus dans la construction du modèle. Ensuite seuls les outils utilisés de la main préférentielle ont été conservés. Différentes combinaisons de paramètres ont été expérimentées, orientée par les résultats des ACP et des analyses bi-variées.

Une méthode « d'attribution de scores », reposant sur les probabilités d'observation de chaque résultat pour les différents paramètres d'intérêt selon la préférence manuelle de l'utilisateur et la main utilisée, a été appliquée sur les 16 outils issus de la seconde série expérimentale.

Dans un premier temps, les probabilités de classement de l'outil ont été calculées pour les quatre catégories possibles (outils utilisés de la main droite par les droitiers, de la main droite par les gauchers, de la main gauche par les gauchers, de la main gauche par les droitiers), afin d'estimer si la main ayant tenu l'outil et la préférence manuelle de l'utilisateur peuvent être distinguées par l'étude des traces.

Afin de tester l'efficacité de la méthode pour retrouver uniquement **la préférence manuelle de l'utilisateur**, tout en prenant en compte la variabilité des traces dues à une utilisation de l'outil par la main non préférentielle, les données des outils utilisés par les expérimentateurs de même préférence manuelle ont été fusionnées pour former deux catégories : « utilisateur droitiers », « utilisateurs gauchers ». Les probabilités de retrouver la préférence manuelle de l'utilisateur d'après les paramètres d'intérêt a été calculée pour les 16 outils du corpus issu de la seconde expérimentation.

De même, pour tester l'efficacité de la méthode quant à la bonne détermination de **la main ayant utilisé l'outil**, en prenant en compte les variations potentielles dues à une utilisation de la main préférentielle ou non, ce sont les données concernant les outils utilisés d'une même main, indépendamment de la préférence manuelle de l'utilisateur, qui ont été fusionnées pour former deux catégories : « outils utilisés de la main droite » et « outils utilisés de la main gauche ».

Enfin, les outils utilisés de la main non préférentielle des utilisateurs sont retirés de la base de données à partir de laquelle les probabilités de classement des outils sont calculées, pour **tester uniquement les outils utilisés de la main préférentielle**. Les 16 pièces issues de la première série expérimentale sont ajoutée au corpus pour cette partie de l'étude (qui ont été analysées pour les paramètres relatifs aux résidus). Ces 16 outils ne sont pas inclus dans la base de données pour les étapes précédentes car cela aurait entraîné une sous-représentation des données pour les outils utilisés de la main non préférentielle, qui auraient été seulement 8 contre 24 outils utilisés de la main préférentielle.

Les paramètres non discriminants ont ensuite été retirés au fur et à mesure pour améliorer la probabilité de bonne classification de l'outil.

3. RÉSULTATS

3.1 TRACÉOLOGIE

Pour chaque outil analysé, la préférence manuelle de l'utilisateur, la main (droite ou gauche) utilisée pour tenir l'outil ainsi que sa face externe (dorsale ou ventrale) sont récapitulés dans un tableau en annexe (Annexe 3).

3.1.1 ANALYSE DES RESIDUS

3.1.1.1 Identification de la préférence manuelle et de la main ayant utilisé l'outil

3.1.1.1.1 Distribution et envahissement des résidus le long du tranchant

Des graphiques représentant l'envahissement des résidus en fonction de leur localisation sur les tranchants ont été réalisés pour les faces internes et externes de chaque outil, afin de caractériser la distribution des traces de manière quantitative (Fig. 18). Pour limiter l'influence de la longueur du tranchant sur les résultats, les longueurs des bords ont été converties en pourcentage.

Pour 6 des 8 **outils utilisés de la main gauche par les gauchers**, la longueur du tranchant affectée par les résidus est bien plus importante sur une face que sur l'autre (T001, T003, T007, T038, T045, T087). Mis à part les outils T047 et T007, l'envahissement des résidus est relativement équivalent entre les deux faces d'un même outil. **En moyenne**, l'envahissement des résidus pour les outils utilisés de la main gauche par les gauchers est de **2938 μ m sur la face interne** avec un **écart-type de 1159 μ m**, et de **2247 μ m sur la face externe** avec un **écart-type de 880 μ m**.

Pour les deux faces de 10 outils sur les 16 **utilisés de la main droite par les droitiers** (T002, T006, T044, T046, T055, T056, T082, T106, T131, T102) les résidus ne se trouvent pas au début du tranchant (entre 0% et 20% du tranchant) mais sont présents à la fin. Pour 2 outils (T008, T043) c'est l'inverse, les résidus sont présents au début du tranchant (à partir de 0% du tranchant) mais pas à la fin (entre 60% et 100% du tranchant). Pour T002 et T0155, les outils ne sont ni présent au début ni à la fin du tranchant. Enfin pour les outils T005 et T132, les résidus se concentrent sur une extrémité de chaque face, mais des extrémités différentes. **L'envahissement moyen** des résidus pour les outils utilisés de la main droite par les droitiers

est de **2273 μm pour la face interne** avec un **écart-type de 860 μm** , et de **2119 μm pour la face externe** avec un **écart-type de 970 μm** .

Concernant les 4 **outils utilisés de la main droite par les gauchers**, les résidus envahissent près de la totalité du bord pour 2 outils (T009 et T016), et ont tendance à se concentrer sur une seule moitié du tranchant pour les outils T014 et T015 (sur la portion du bord comprise entre 57% et 100% du tranchant). La face externe présente une seconde zone de résidus qui se trouve elle au début du tranchant, entre 10% et 35%. **En moyenne**, l'envahissement des résidus pour les outils utilisés de la main droite par les gauchers est de **3099 μm sur la face interne** avec un **écart-type de 1151 μm** , et de **3419 μm sur la face externe** avec un **écart-type de 877 μm** .

Pour 2 des 4 **outils utilisés de la main gauche par les droitiers**, les résidus se concentrent sur une seule partie de l'outil (T011 à l'avant, T013 à l'arrière). Les résidus de l'outil T010 envahissent la quasi-totalité du tranchant pour les deux faces. Deux zones de résidus distinctes sont observées pour l'outil T012 : les deux zones de la face externe sont identiques à celles de la face interne mais « inversées » sur le tranchant. **L'envahissement moyen** des résidus pour ces quatre outils est de **2774 μm pour la face interne** avec un **écart-type de 587 μm** , et de **2841 μm pour la face externe** avec un **écart-type de 635 μm** .

L'envahissement moyen des résidus le long du tranchant est très semblable entre les faces internes et externes pour les outils utilisés d'une même main par des personnes de même préférence manuelle (Fig. 19). Les 8 outils utilisés de la main gauche par les gauchers présentent un envahissement moyen de plus en plus important en se rapprochant du milieu du tranchant, formant une sorte de « courbe en cloche » (l'envahissement maximum pour les deux faces est sur la portion comprise entre 35% et 65% du tranchant). Pour les 16 outils utilisés de la main droite par les droitiers, l'envahissement moyen des résidus croît de façon linéaire jusqu'à 60% du tranchant, où il stagne pour les faces externes et décroît linéairement pour les faces internes, jusqu'au bout du tranchant.

Les 8 outils utilisés de la main non préférentielle des utilisateurs présentent une décroissance de l'envahissement moyen des résidus au milieu du tranchant pour les faces externes (sur la portion comprise entre 40% et 60% du tranchant pour les outils utilisés de la main gauche par les droitiers, entre 25% et 58% pour les outils utilisés de la main droite par les gauchers). Cette décroissance est aussi présente pour les faces internes des outils utilisés

de la main gauche par les droitiers (entre 40% et 62% du tranchant). Pour les outils utilisés de la main droite par les gauchers, l'envahissement moyen des résidus est moins important au début du tranchant (entre 0 et 35% du tranchant).

La présence de résidus sur les **extrémités** des tranchants a été analysée (Tab. 1). Douze outils présentent pour leurs **deux faces une unique extrémité affectée par les résidus** : 7 ont été utilisés de la main droite par les droitiers (T005, T008, T044, T046, T048, T106, T132), 2 utilisés de la main gauche par les gauchers, (T004, T045), 2 utilisés de la main gauche par les droitiers (T011, T012) et 1 utilisé de la main droite par un gaucher (T014).

Trois outils ne présentent **pas de résidus sur les deux extrémités et pour les deux faces**, ils ont été utilisés de la main droite par les droitiers (T002, T043, T155).

Dix outils présentent des résidus sur **une seule extrémité pour une seule face** : 4 utilisés de la main gauche par les gauchers (T001, T003, T038, T087), 4 de la main droite par les droitiers (T006, T055, T056, T131), 1 utilisé de la main droite par les gauchers (T015) et 1 utilisé de la main gauche par les droitiers (T013).

Sept outils **présentent des résidus sur deux extrémités d'une même face pour au moins une face** : 2 utilisés de la main gauche par les gauchers (T007, T0047), 2 utilisés de la main droite par les droitiers (T006, T057, T082), 2 utilisés de la main droite par les gauchers (T009, T016) et 1 utilisé de la main gauche par un droitier (T010).

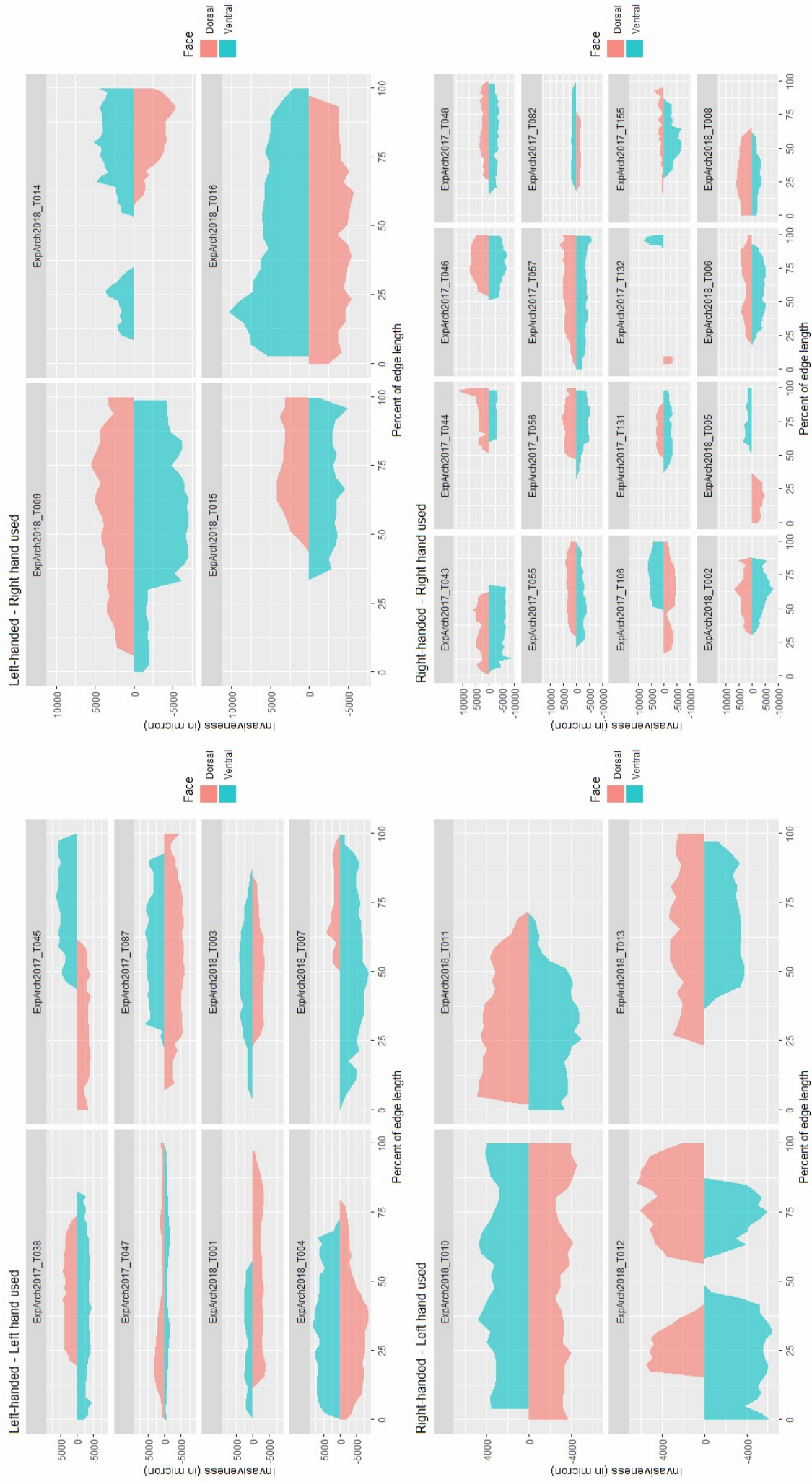


Figure 18 : Représentations des envahissements des résidus en fonction de leurs distributions sur la longueur du tranchant (en pourcentage), selon la préférence manuelle de l'utilisateur et la main utilisée (droite ou gauche). En rose : face dorsale, en bleu : face ventrale. Graphiques au-dessus de l'axe des abscisses : face interne, graphiques en-dessous de l'axe des abscisses : face externe.

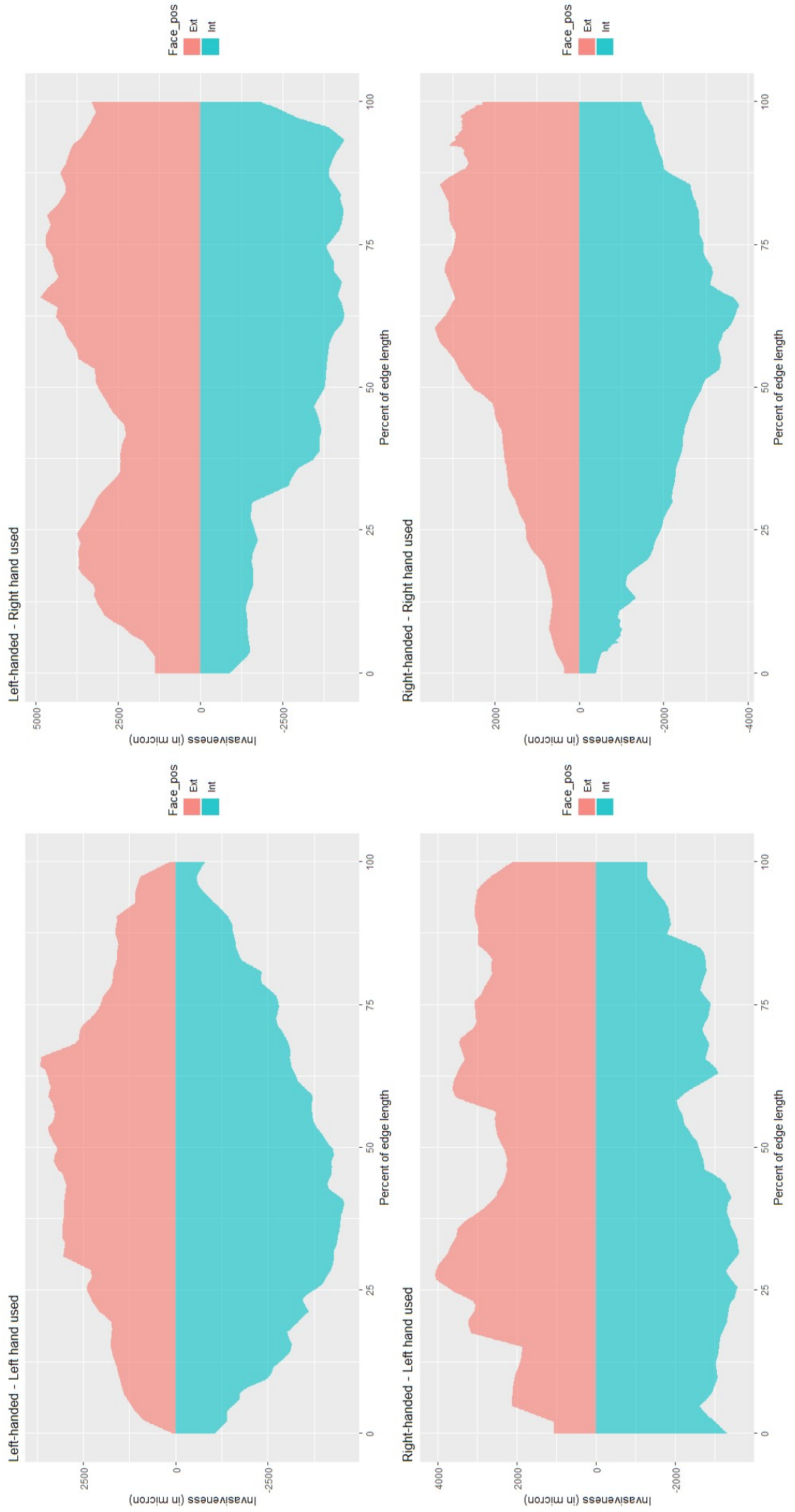


Figure 19 : Représentations des moyennes des envahissements des résidus en fonction de leur distributions sur la longueur du tranchant (en pourcentage), selon la préférence manuelle de l'utilisateur et la main utilisée (droite ou gauche). En rose : face externe, en bleu : face interne.

N° de l'outil	Préférence manuelle de l'utilisateur	Main tenant l'outil durant son utilisation	Nombre d'extrémité affectées par des résidus (face externe)	Nombre d'extrémités affectées par des résidus (face interne)
T001	L	L	0	1
T002	R	R	0	0
T003	L	L	1	0
T004	L	L	1	1
T005	R	R	1	1
T006	R	R	1	0
T007	L	L	0	2
T008	R	R	1	1
T009	L	R	1	2
T010	R	L	2	2
T011	R	L	1	1
T012	R	L	1	1
T013	R	L	1	0
T014	L	R	1	1
T015	L	R	1	0
T016	L	R	1	2
T038	L	L	0	1
T043	R	R	0	0
T044	R	R	1	1
T045	L	L	1	1
T046	R	R	1	1
T047	L	L	2	2
T048	R	R	1	1
T055	R	R	1	0
T056	R	R	1	0
T057	R	R	2	1
T082	R	R	2	0
T087	L	L	0	1
T106	R	R	1	1
T131	R	R	0	1
T132	R	R	1	1
T155	R	R	0	0

Tableau 1 : Nombre d'extrémités du tranchant affectées par les résidus (par face). L : main gauche, R : main droite. En gris clair : outils pour lesquels aucune extrémité du tranchant n'est altérée par les résidus pour les deux faces, en gris foncé : outils pour lesquels une extrémité du tranchant est affectée par les résidus pour chaque face.

3.1.1.1.2 Pourcentage du tranchant de l'outil envahi par les résidus

Les 8 outils utilisés de la main gauche par les gauchers (T001, T003, T004, T007, T038, T045, T047, T087) présentent au moins une face avec un envahissement du tranchant supérieur à 80%, dont un tranchant envahi à 100% pour la face externe (T047). Deux des 16 outils utilisés de la main droite par les droitiers ont une face avec 100% de la longueur du tranchant envahie par les résidus (T057, T132). Deux des 4 outils utilisés de la main droite par les gauchers (T009, T016) ont au moins une face dont le tranchant est envahi à 100%. Tous les autres outils ont un tranchant envahi à moins de 80% par les poliss (Tab. 2).

N° de l'outil	Préférence manuelle de l'utilisateur	Main tenant l'outil durant son utilisation	Pourcentage du bord altéré par des résidus (face externe)	Pourcentage du bord altéré par des résidus (face interne)
T001	L	L	54,465	98,31
T002	R	R	57,303	47,461
T003	L	L	81,692	55,078
T004	L	L	75,01	80,164
T005	R	R	48,75	38,99
T006	R	R	79,57	67,822
T007	L	L	45,045	97,512
T008	R	R	66,416	63,659
T009	L	R	95,358	100
T010	R	L	100	100
T011	R	L	77,695	75,122
T012	R	L	71,196	72,707
T013	R	L	79,545	63,47
T014	L	R	69,859	44,424
T015	L	R	53,439	63,155
T016	L	R	89,567	100
T038	L	L	53,54	87,6
T043	R	R	58,86	58,64
T044	R	R	48,342	43,28
T045	L	L	48,7	98,76
T046	R	R	48,21	46,89
T047	L	L	100	98,09
T048	R	R	73,381	75,54
T055	R	R	65,48	75,377
T056	R	R	58,12	66,24
T057	R	R	97,1	100
T082	R	R	61,93	44,427
T087	L	L	79,13	90,97
T106	R	R	52,1	75,135
T131	R	R	40,132	56,084
T132	R	R	100	67,116
T155	R	R	77,47	56,71

Tableau 2 : Pourcentage du tranchant portant des résidus, selon la préférence manuelle de l'utilisateur, la main utilisée et la face de l'outil (interne ou externe). L : main gauche, R : main droite. En gris : outils dont le pourcentage de longueur du tranchant altéré par les polés est supérieur à 80% pour au moins une face.

3.1.1.1.3 Aires et périmètres des zones de résidus

En moyenne, **les aires des résidus sont plus importantes sur les faces internes pour les outils utilisés par les gauchers** (de la main droite ou de la main gauche : voir fig. 20 et 21). Inversement, **les outils utilisés par les droitiers présentent des aires en moyenne plus importantes sur les faces externes que les faces internes**. La moyenne (écart type + dans graph) des aires la plus importante est de $382\ 823\ 093\ \mu\text{m}^2$ avec un écart-type de $137\ 449\ 187\ \mu\text{m}^2$ (soit une moyenne de $3,82\text{cm}^2 \pm 1,37\ \mu\text{m}^2$), calculée pour les faces internes des outils utilisés de la main gauche par les gauchers.

Le périmètre des zones de résidus pour les outils utilisés de la main préférentielle est deux à trois fois plus grand que pour les outils utilisés de la main non préférentielle (Fig. 20 et 21). Pour les faces internes et externes, le périmètre moyen maximum est calculé pour les outils utilisés de la main droite par les droitiers (face interne : 471 488µm +/- 172 129µm; face externe : 348 785µm +/- 128 425µm), contre un périmètre moyen minimum atteint pour les outils utilisés de la main droite par les gauchers (face interne : 148 507µm +/- 69 128µm ; face externe : 120 566µm +/- 56 427µm). Les écarts-types se superposant largement entre les mesures des aires et des périmètres selon la main ayant utilisé l’outil et la préférence manuelle de l’utilisateur, les différences observées entre les moyennes doivent être très nuancées.

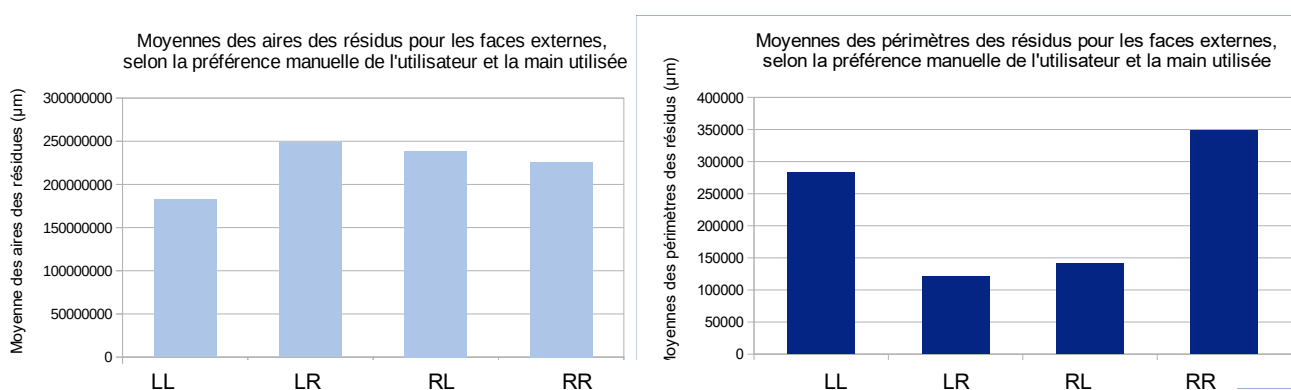


Figure 20 : Moyennes des aires et des périmètres des zones de résidus pour les faces externes des outils, selon la préférence manuelle de l'utilisateur et la main ayant tenu l'outil . LL : outils utilisés de la main gauche par les gauchers, LR : outils utilisés de la main droite par les gauchers, RL : outils utilisés de la main gauche par les droitiers, RR : outils utilisés de la main droite par les droitiers.

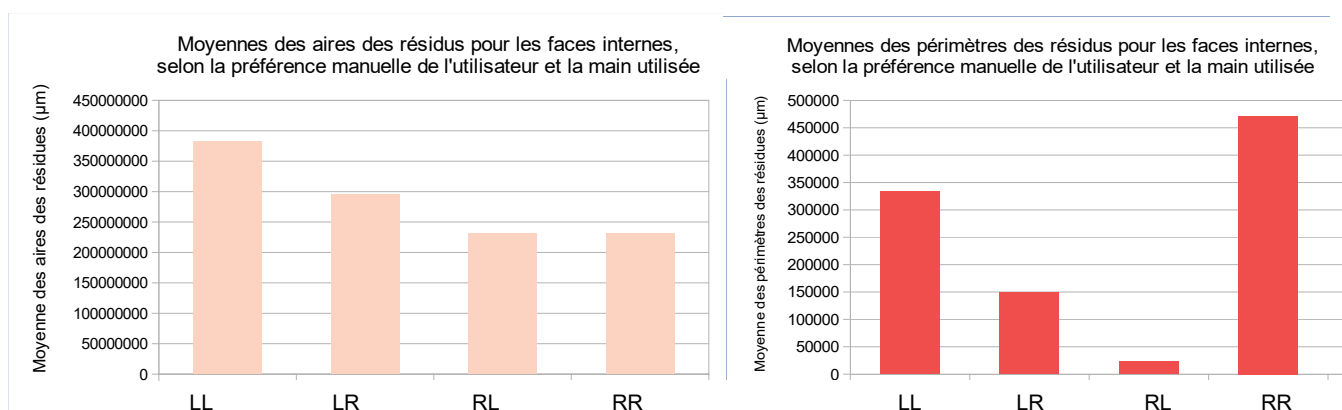


Figure 21 : Moyennes des aires et des périmètres des zones de résidus pour les faces internes des outils, selon la préférence manuelle de l'utilisateur et la main ayant tenu l'outil . LL : outils utilisés de la main gauche par les gauchers, LR : outils utilisés de la main droite par les gauchers, RL : outils utilisés de la main gauche par les droitiers, RR : outils utilisés de la main droite par les droitiers.

3.1.1.2 Identification de la face externe

Graphiquement, aucune tendance ne se dégage quant à l'envahissement des résidus en fonction de leur localisation sur le tranchant, selon qu'ils se trouvent sur la face interne ou externe. Un test U de Mann-Whitney montre qu'au seuil de 5%, **la différence entre les moyennes des envahissements des résidus entre les faces externes et internes** (indépendamment de la main utilisée et de la préférence manuelle) **n'est pas significative** ($W = 6$, p -value = 0,6857) (Tab. 3), les écarts-types se superposent également largement.

Moyenne et écarts-types des envahissements des résidus (μm)

	LL	LR	RL	RR
Face ext.	2247 (+/- 880)	2119 (+/- 877)	2841 (+/- 635)	3419 (+/- 970)
Face int.	2938 (+/- 1159)	2273 (+/- 1151)	2774 (+/- 587)	3099 (+/- 860)

Tableau 3 : Envahissements moyens des résidus selon la préférence manuelle de l'utilisateur, de la main utilisée et la face (interne ou externe de l'outil). LL : outil utilisé de la main gauche par un gaucher, LR : outil utilisé de la main droite par un gaucher, RL : outil utilisé de la main gauche par un droitier, RR : outil utilisé de la main droite par un droitier.

Des différences entre les faces internes et externes sont observées quant au **pourcentage de longueur du tranchant affectées par les résidus**, mais un test U de Mann-Whitney a montré qu'au seuil de 5%, cette tendance n'est **pas statistiquement significative** ($W = 0.9371$, p -value = 0.06189).

En moyenne, **le périmètre de la zone de résidus** est toujours plus élevé pour les faces internes que les faces externes. De plus les tendances observées entre les faces concernant les aires et périmètres des résidus ne sont **pas non plus significatives** au seuil de 5% selon un test U de Mann-Whitney ($W = 4$, p -value = 0.3094).

3.1.2 ANALYSE DES POLIS D'UTILISATION

3.1.2.1 Identification de la préférence manuelle et de la main ayant utilisé l'outil

3.1.2.1.1 Distribution et envahissement des poliss le long du tranchant

Des graphiques représentant l'envahissement des poliss en fonction de leur localisation sur le tranchant ont été réalisés afin de caractériser la distribution des traces quantitativement (Fig. 22).

Pour 3 des 4 **outils utilisés de la main gauche par les gauchers**, les poliss sont présents sur une unique extrémité de chaque face (T001, T003, T007). Pour l'outil T004, les poliss sont présents sur une extrémité de la face externe et aucune de la face interne (outil T004). **L'envahissement moyen** des poliss pour les outils utilisés de la main gauche par les gauchers est de **758 μm pour la face interne** avec un **écart-type de 740 μm** , et de **1238 μm pour la face externe** avec un **écart-type de 721 μm** .

Les poliss des **outils utilisés de la main droite par les droitiers** se répartissent de deux manières sur les tranchants :

- à l'avant et à l'arrière du tranchant, avec des traces présentes sur les deux extrémités du bord pour une face de l'outil (outils T002 et T008),
- au milieu du tranchant, avec une absence de traces sur les deux extrémités des deux faces des outils (outils T005 et T006).

En moyenne, l'envahissement des résidus pour les outils utilisés de la main droite par les droitiers est de **848 μm sur la face interne** avec un **écart-type de 461 μm** , et de **1068 μm sur la face externe** avec un **écart-type de 825 μm** .

Pour 2 des 4 **outils utilisés de la main droite par les gauchers**, les poliss se trouvent sur les deux extrémités des tranchants pour les deux faces (outils T014, T016). Les poliss sont présents sur toute la longueur du bord utilisé pour l'outil T016. Pour l'outil T009, les poliss se concentrent au milieu du tranchant et ne sont pas présents sur les extrémités du bord, pour les deux faces. Les poliss de l'outil T015 sont présents sur une extrémité de la face externe et aucune de la face interne. **L'envahissement** des résidus est le plus important pour les outils utilisés de la main gauche par les gauchers, avec une moyenne de **2211 μm pour la face interne** avec un **écart-type de 1091 μm** , et de **2848 μm pour la face externe** avec un **écart-**

type de 1303 μm . Un envahissement supérieur à 10 000 μm pour 3 outils sur 4 (T014, T015, T016 vs. T009).

Concernant les **outils utilisés de la main gauche par les droitiers**, la pièce T010 présente des polissures sur les deux extrémités de sa face interne et sur aucune des extrémités de la face externe. Les polissures de l'outil T011 sont présentes sur une extrémité de chaque face. Pour l'outil T012, les polissures ne sont pas présentes sur les extrémités pour les deux faces. Enfin les polissures sont présentes sur une extrémité de la face externe pour l'outil T013 et sur aucune de la face interne. **En moyenne**, l'envahissement des résidus pour les outils utilisés de la main droite par les droitiers est de **748 μm sur la face interne** avec un **écart-type de 468 μm** , et de **689 μm sur la face externe** avec un **écart-type de 469 μm** .

Les **outils utilisés par les droitiers de la main gauche ou droite** présentent les polissures les moins envahissantes (< 6100 μm).

En moyenne (Fig. 23), les polissures d'utilisation sont également plus envahissantes sur les **outils utilisés de la main droite par les gauchers**, avec 3 pics supérieurs à 5000 μm sur la face externe, respectivement localisés à 5%, 61% et 84% du tranchant. Pour les **outils utilisés de la main droite par les droitiers**, le maximum d'envahissement moyen est de 3300 μm (face externe, localisé à 24% du tranchant) et les polissures les plus envahissantes se concentrent au milieu du tranchant pour les faces externes. Pour les **outils utilisés de la main gauche par les gauchers**, l'envahissement moyen maximum est de 3000 μm , localisé à 20% du tranchant. L'envahissement moyen maximum des polissures pour les **outils utilisés de la main gauche par les droitiers** est le plus faible : 2500 μm , situé à 80% sur la longueur du tranchant.

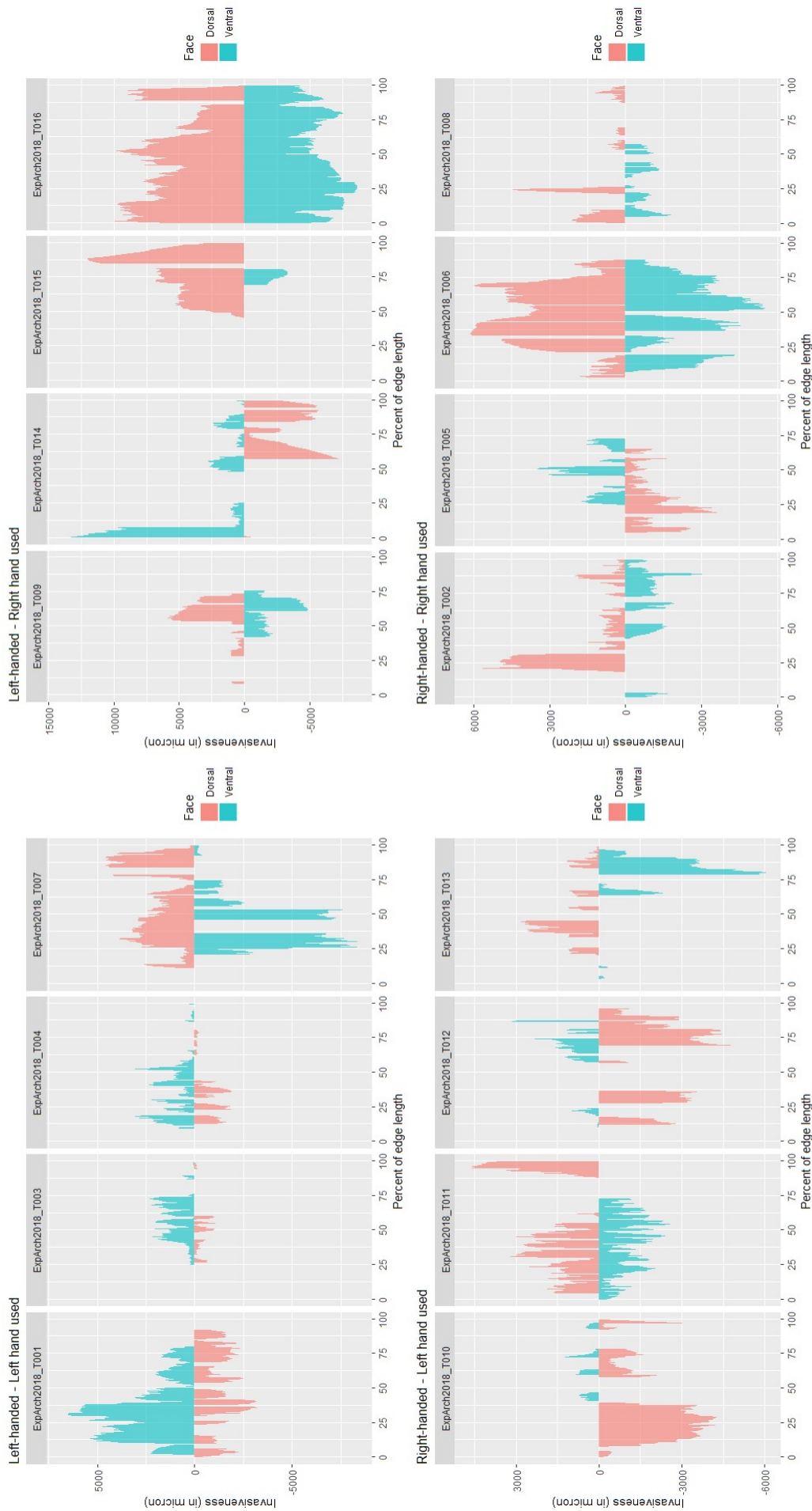


Figure 22 : Représentations des envahissements des polis d'utilisation en fonction de leurs distributions sur la longueur du tranchant (en pourcentage), selon la préférence manuelle de l'utilisateur et la main utilisée (droite ou gauche). En rose : face dorsale, en bleu : face ventrale. Graphique au-dessus de l'axe des abscisses : face interne, graphique en-dessous de l'axe des abscisses : face externe.

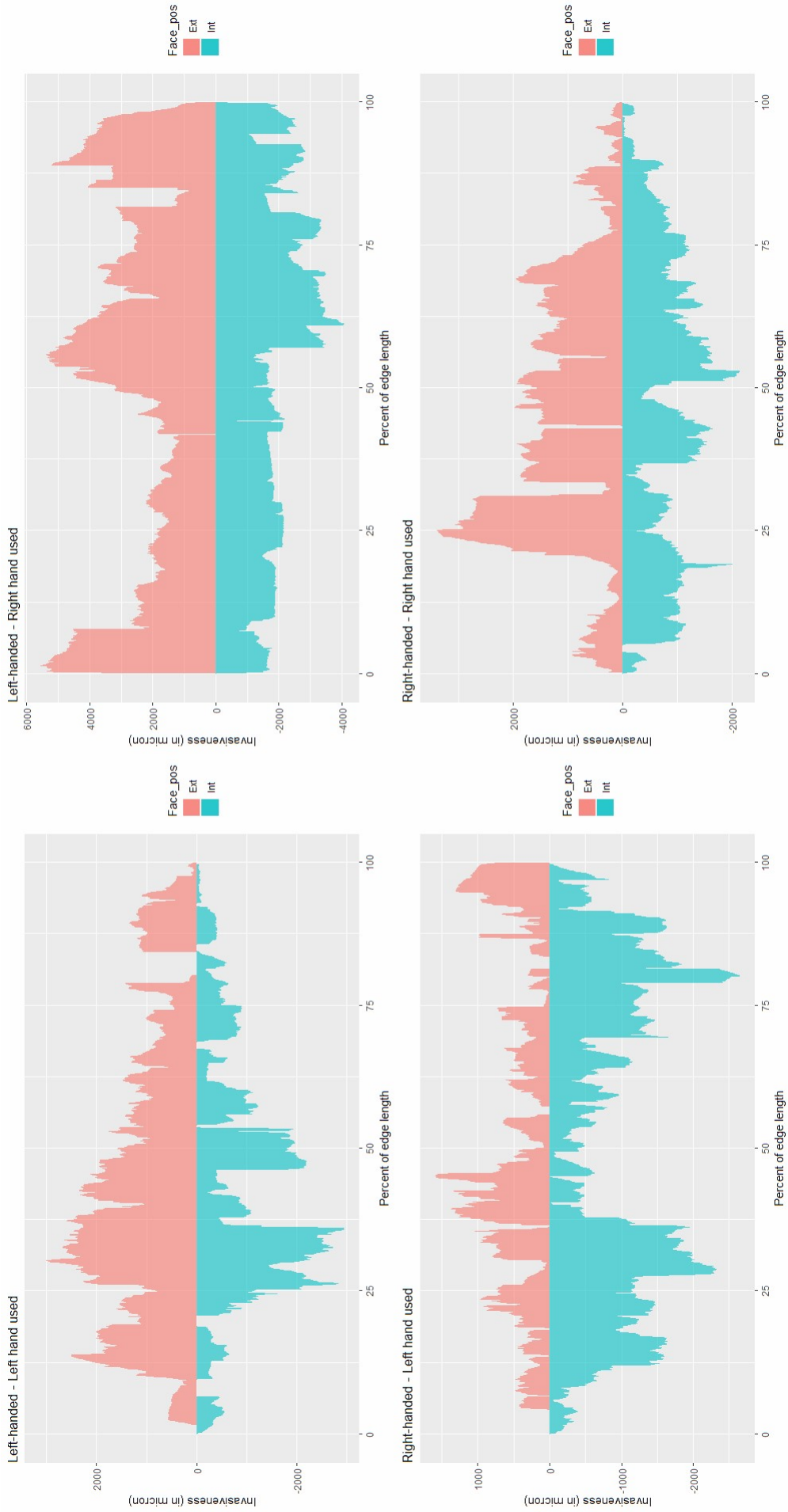


Figure 23 : Représentations des moyennes des envahissements des pols d'utilisation en fonction de leurs distribution sur la longueur du tranchant (en pourcentage), selon la préférence manuelle de l'utilisateur et la main utilisée (droite ou gauche). En rose : face externe, en bleu : face interne.

3.1.2.1.2 Pourcentage de la longueur du bord altéré par les polis d'utilisation

Pour 2 des 4 outils utilisés de la main gauche par les gauchers (T001 et T007), les polis altèrent plus de 80% du tranchant pour une face. Les polis de l'outil T016, **utilisé de la main droite par un individu gaucher** envahissent 100% du tranchant pour les deux faces (ces polis ne sont pas toujours très développés et peuvent parfois correspondre à un simple émoussement de surface). Les polis des autres outils altèrent moins de 80% de la longueur du tranchant pour les deux faces. Cependant, le test U de Mann-Whitney a montré que cette tendance n'est pas statistiquement significative ($W = 166$, $p\text{-value} = 0.1573$).

N° outil	Pourcentage de la longueur du tranchant altéré par les polis (face externe)	Pourcentage de la longueur du tranchant altéré par les polis (face interne)
T001	90,29	74,62
T002	61,94	46,36
T003	59,9	30,23
T004	67,29	38,44
T005	32,64	56,78
T006	79,04	73,61
T007	95,68	48,88
T008	44,46	33,43
T009	40,68	37,99
T010	22,53	60,01
T011	67,32	74,05
T012	46,32	31,47
T013	42,69	31,85
T014	52,61	41,02
T015	61,87	12,06
T016	100	100

Tableau 4 : Pourcentage de la longueur du tranchant altéré par les polis d'utilisation pour les faces externes et internes des outils. En gris foncé : outils avec un pourcentage de longueur du tranchant altéré supérieur à 80% et différents de 100%, en gris clair : outils avec un pourcentage de longueur du tranchant altéré égal à 100%.

3.1.2.1.3 Paramètres qualitatifs

Les 16 faces des outils utilisés avec la main préférentielle des utilisateurs présentent en moyenne 4% de polis de **type « éloignés »** du bord contre 96% « **proche** » du bord. Pour les 16 face des outils utilisés avec la main non préférentielle de l'utilisateur, les polis « éloignés du bord » concernent 19% des polis en moyenne contre 81% de type « proches » du bord (Fig. 24). Un test du X^2 de Pearson ($X\text{-squared} = 826.72$, $df = 1$, $p\text{-value} < 2.2e\text{-}16$) démontre qu'au seuil de 5%, **cette différence observée entre les outils tenus de la main préférentielle vs. non préférentielle est significative.**

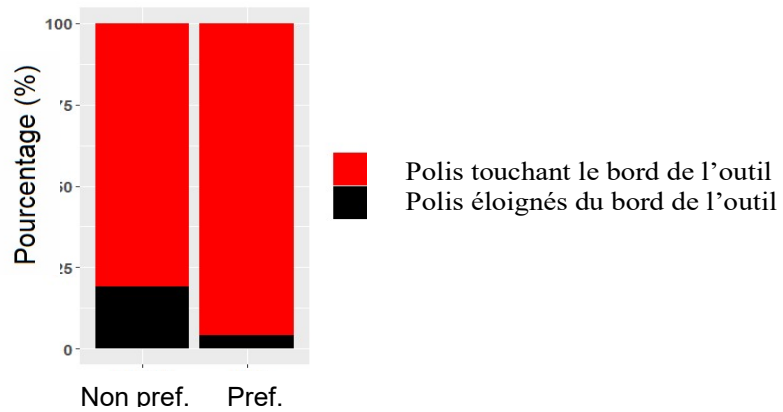


Figure 24 : Distribution des poliss éloignés du bord (en noir) vs. proches du bord (en rouge) selon que l'outil est tenu de la main préférentielle de l'utilisateur ou non.

Les outils utilisés de la main non préférentielles ont un taux de poliss à **trame serrée** plus élevé que les outils utilisés de la main préférentielle (33% et 43% respectivement pour les outils utilisés de la main droite et gauche par la main non préférentielle ; 21% et 17% pour les outils utilisés de la main gauche et droite de la main préférentielle) (Fig. 25).

Le type de **trame "lâche près du bord - serré en dessous"** est largement plus représenté pour les outils utilisés de la main gauche par les gauchers (28%). Les outils utilisés de la main droite par les droitiers présentent le taux le plus élevé de poliss à **trame lâche près du bord et lâche en dessous** (18%).

Seuls les outils utilisés de la main droite par les droitiers présentent une trame de poli de type **unie**, et il n'y a que les outils utilisés de la main gauche par les droitiers où les poliss présentent le type de **trame « mixte »**. Les outils utilisés par les droitiers ont un taux de poliss à **trame lâche** plus élevé que ceux utilisés de la main gauche (64% et 57% pour les outils utilisés respectivement de la main droite par les droitiers et par les gauchers ; 39% et 38% respectivement pour les outils utilisés de la main gauche par les gauchers et par les droitiers).

Un test du χ^2 de Pearson montre que les différentes proportions de types de trame en fonction de la préférence manuelle de l'utilisateur et la main utilisée **sont significatives** au seuil de 5% ($X\text{-squared} = 108$, $df = 15$, $p\text{-value} = 4.009e-16$).

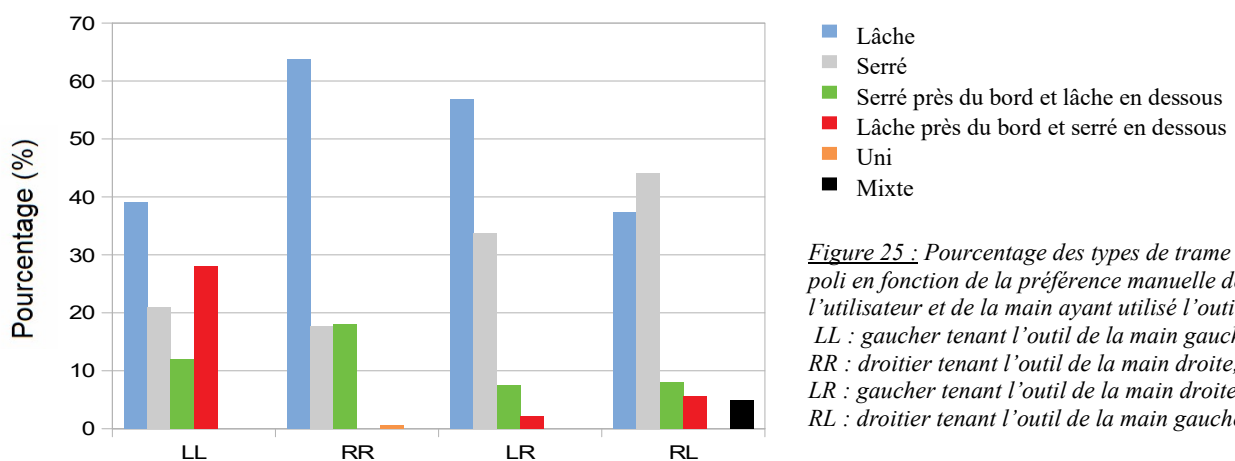


Figure 25 : Pourcentage des types de trame de poli en fonction de la préférence manuelle de l'utilisateur et de la main ayant utilisé l'outil. LL : gaucher tenant l'outil de la main gauche, RR : droitier tenant l'outil de la main droite, LR : gaucher tenant l'outil de la main droite, RL : droitier tenant l'outil de la main gauche.

3.1.2.2 Identification de la face externe

Graphiquement, aucune tendance n'est observée quant à l'envahissement des polis entre les faces internes et externes des outils, en fonction de leur localisation sur le tranchant, de la main utilisée et de la préférence manuelle de l'utilisateur. Un test U de Mann-Whitney le confirme en montrant qu'au seuil de 5%, **la différence entre les moyennes des envahissements des polis entre les faces externes et internes n'est pas significative** ($W = 10$, $p\text{-value} = 0.6857$) (Tab. 5), les écarts-types se superposent également largement.

Moyennes et écarts-types des envahissement des polis (μm)

	LL	LR	RL	RR
Face ext.	1238 (+/-721)	1068 (+/- 1303)	2848 (+/- 469)	689 (+/- 825)
Face int.	758 (+/- 740)	848 (+/- 1091)	2211 (+/- 468)	748 (+/-461°)

Tableau 5 : Envahissements moyens des polis d'utilisation selon la préférence manuelle de l'utilisateur, de la main utilisée et la face (interne ou externe de l'outil. LL : outil utilisé de la main gauche par un gaucher, LR : outil utilisé de la main droite par un gaucher, RL : outil utilisé de la main gauche par un droitier, RR : outil utilisé de la main droite par un droitier.

Pour 13 outils sur 16 (Tab. 6) soit 81% des cas, **le pourcentage de la longueur du tranchant envahi par les polis d'utilisation est plus élevé sur la face externe que la face interne**. Cependant, le test U de Mann-Whitney a montré que **cette tendance n'est pas statistiquement significative** ($W = 166$, $p\text{-value} = 0.1573$). Un test du X^2 de Pearson démontre qu'au seuil de 5%, les différences observées entre les faces internes et externes quant à **la distance des polis par rapport au bord n'est pas significative** ($X\text{-squared} = 524.21$, $df = 1$, $p\text{-value} = 0.3806$), **de même pour les types de trames** ($X\text{-squared} = 106$, $df = 15$, $p\text{-value} = 0,2729$).

N° outil	Pourcentage de la longueur du tranchant altérée par les polis (face externe)	Pourcentage de la longueur du tranchant altérée par les polis (face interne)
T001	90,29	74,62
T002	61,94	46,36
T003	59,9	30,23
T004	67,29	38,44
T005	32,64	56,78
T006	79,04	73,61
T007	95,68	48,88
T008	44,46	33,43
T009	40,68	37,99
T010	22,53	60,01
T011	67,32	74,05
T012	46,32	31,47
T013	42,69	31,85
T014	52,61	41,02
T015	61,87	12,06
T016	100	100

Tableau 6 : Comparaison des pourcentages de longueur des tranchants altérés par les polis d'utilisation, entre les face externe et interne d'un même outil. En rouge : pourcentage supérieure pour la face interne que pour la face externe.

3.1.3 ANALYSE DES MICROÉCAILLURES

3.1.3.1 Identification de la préférence manuelle et de la main ayant utilisé l'outil par les micro-écaillures

3.1.3.1.1 Distribution et envahissement des micro-écaillures le long du tranchant

Des graphiques représentant la distribution des micro-écaillures sur les tranchants des outils pour les deux faces ont été réalisés afin de caractériser la localisation des traces quantitativement (Fig. 26). Sur les graphiques, chaque micro-écaillure (ou groupement de micro-écaillures lorsqu'elles sont chevauchantes) est matérialisée par un rectangle dont la taille a été estimée à partir des mesures d'aire et de longueur de chaque micro-écaillure.

Concernant **les outils utilisés par les gauchers de la main gauche**, les micro-écaillures sont présentes sur la quasi totalité du tranchant pour les outils T001 (face externe : portion altérée comprise entre 2% et 100% du tranchant, face interne : entre 0% et 95%), T004 (face externe : entre 5% et 87,5%, face interne : entre 3% et 99%) et T007 (faces externe et interne : entre 5% et 100%). L'outil T003 ne présente pas de micro-écaillures sur les 25% de début et de fin du tranchant pour la face interne ; la face externe est altérée entre 0% et 80% du tranchant (mise à part une micro-écaillure à 96% du tranchant).

Pour **les outils utilisés par les droitiers de la main droite**, l'outil T002 présente des micro-écaillures entre 3% et 98% du tranchant pour la face externe, relativement éparses, et entre 5% et 80% du tranchant pour la face interne, éparses également. Les 2 faces de l'outil T005 présentent des micro-écaillures proches les unes des autres sur toute la longueur du tranchant. Pour l'outil T006, la face externe présente des micro-écaillures entre 12% et 100% du tranchant, très éparses entre 12% et 37% et devenant plus serrées sur la suite du bord. Concernant la face interne, les micro-écaillures sont présentes entre 0 et 90% du tranchant. Pour les deux faces, les micro-écaillures sont de petite taille sur la portion du tranchant comprise entre 0 et 30% (envahissement maximum = 100µm environ) et deviennent plus grande entre 37% et 100% du tranchant (jusqu'à 3000µm d'envahissement). Les micro-écaillures pour l'outil T016 sont présentes sur toute la longueur du tranchant (jusqu'à 16000µm à 25% du tranchant) et de taille moins importante sur la fin du tranchant.

Pour **les outils utilisés de la main gauche par les droitiers**, les micro-écaillures de l'outil T010 sont présentes entre 5% et 100% du tranchant pour la face externe et entre 0% et

95% pour la face interne. Pour l'outil T011, les micro-écaillures sont présentes entre 0% et 100% du tranchant pour la face externe et entre 5% et 100% pour la face interne. Pour les deux faces de l'outil T012, les micro-écaillures sont présentes entre 0 et 100% du tranchant et sont très proches les unes aux autres. Enfin pour l'outil T013, les micro-écaillures sont présentes entre 6% et 90% du tranchant et sont éparées entre 75% et 90%. Pour la face interne, les micro-écaillures altèrent entre 0% et 100% du tranchant mais de façon éparse.

Concernant **les outils utilisés par les gauchers de la main droite**, les micro-écaillures sont présentes sur la face externe de l'outil T009 entre 8% et 88% du tranchant, notamment de façon éparse entre 13% et 30% du tranchant, et entre 10% et 90% sur la face interne. Les micro-écaillures sur la face externe de l'outil T014 sont serrées les unes aux autres tout le long du tranchant. Pour la face interne, les micro-écaillures sont présentes entre 3% et 100% du tranchant, éparées entre 50% et 100% et plus envahissantes sur la face interne entre 10% et 37%. Concernant l'outil T015, les micro-écaillures sont présentes sur 100% de la longueur du tranchant pour les deux faces. Enfin, les micro-écaillures de l'outil T016 sont présentes sur 100% du tranchant pour la face interne et serrées les unes aux autres, en étant les moins envahissantes sur la portion comprise entre 0% et 23% du tranchant. Pour la face interne, les micro-écaillures altèrent la portion du tranchant comprise entre 0% et 87% et sont les moins envahissantes entre 5% et 37% et entre 52% et 87% du tranchant.

Concernant la **moyenne des envahissements des micro-écaillures en fonction de leur localisation sur le tranchant** (Fig. 27), les micro-écaillures sont les plus envahissantes à 50% du tranchant pour les deux faces **des outils utilisés de la main gauche par les gauchers** (jusqu'à 2000 μm pour les deux faces) **et les droitiers** (jusqu'à 1000 μm pour les deux faces).

Pour **les outils utilisés de la main droite par les droitiers**, l'envahissement maximum moyen des micro-écaillures est situé à 21% du tranchant pour la face externe et à 25% pour la face interne, environ égal à 4500 μm pour les deux faces. L'envahissement moyen pour le reste du tranchant est toujours inférieur à 2500 μm .

Concernant **les outils utilisés de la main droite par les gauchers**, l'envahissement maximum moyen des micro-écaillures se situe entre 54% et 59% pour la face externe (jusqu'à 1200 μm), et à 20% pour la face interne (jusqu'à 1000 μm). L'envahissement moyen des micro-écaillures est le moins élevé sur la portion du bord comprise entre 4% et 20% du tranchant pour la face externe (jusqu'à 400 μm). Pour la face interne, l'envahissement moyen des micro-écaillures est variable, fluctuant entre 250 μm et 1000 μm tout au long du tranchant.

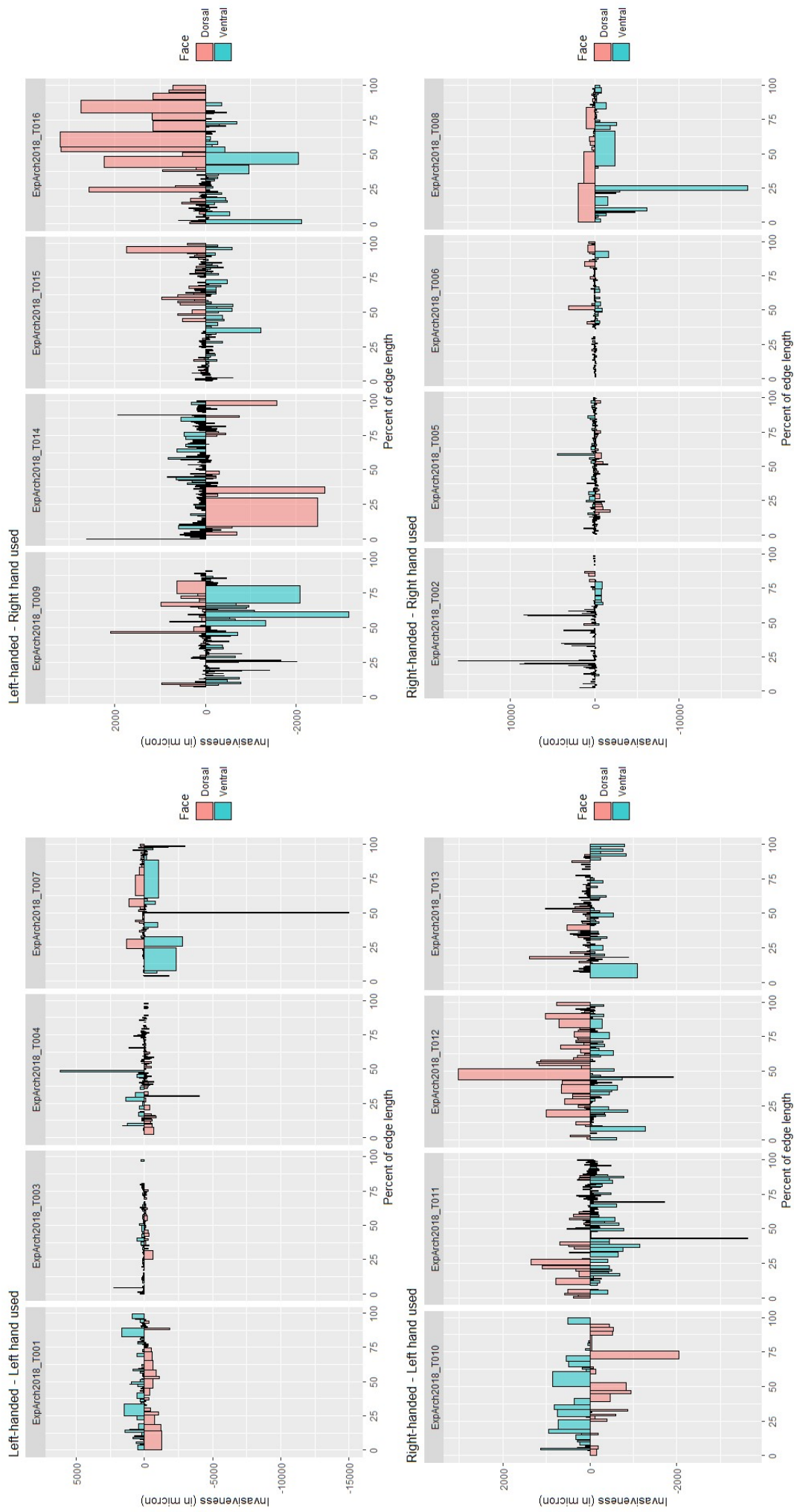


Figure 26 : Représentations des envahissements des micro-écaillures en fonction de leurs distribution sur la longueur du tranchant (en pourcentage), selon la préférence manuelle de l'utilisateur et la main utilisée (droite ou gauche). En rose : face dorsale, en bleu : face ventrale. Graphique au-dessus de l'axe des abscisses : face interne, graphique en-dessous de l'axe des abscisses : face externe.

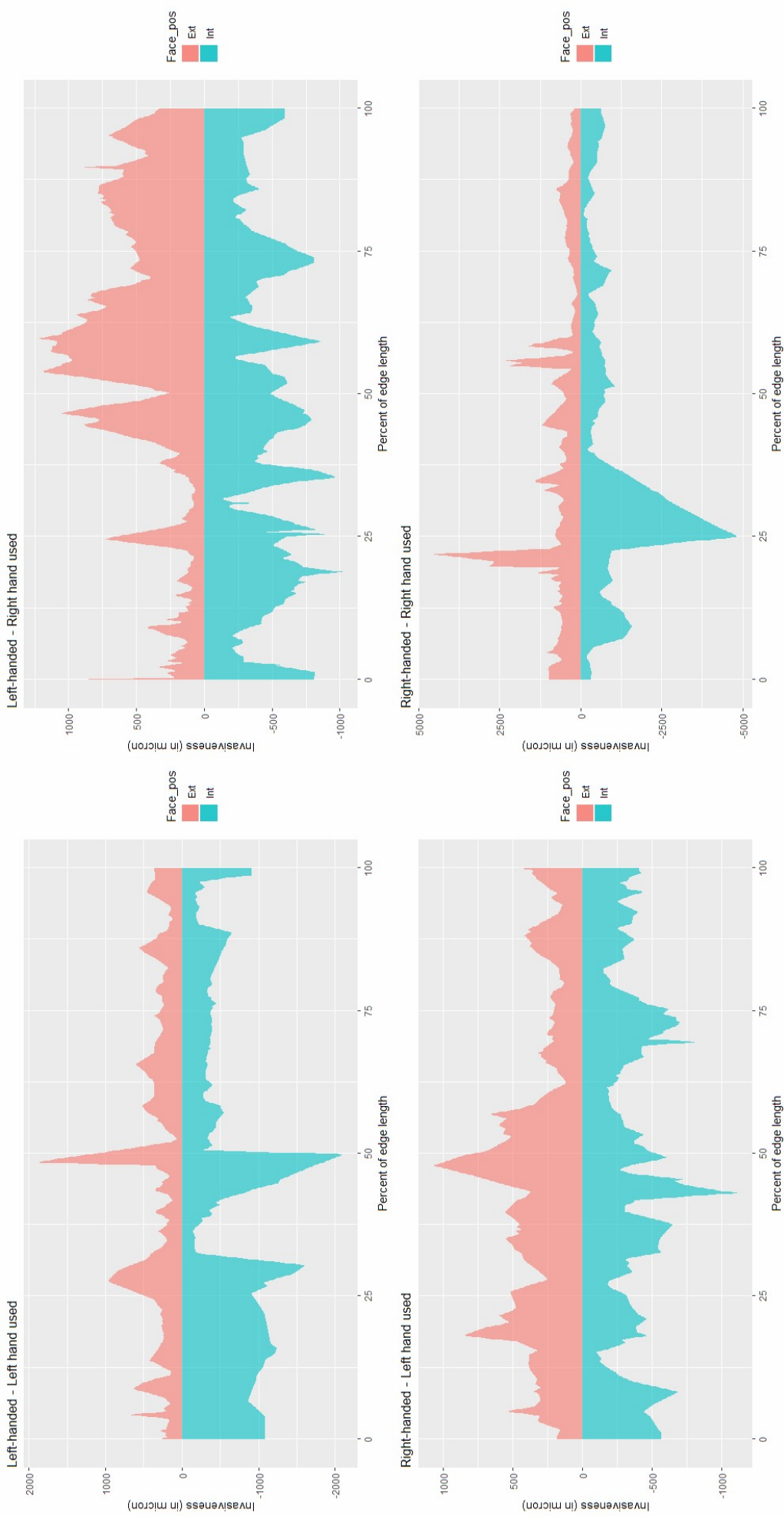


Figure 27 : Représentations des moyennes des envahissements des micro-écaillures en fonction de leurs distribution sur la longueur du tranchant (en pourcentage), selon la préférence manuelle de l'utilisateur et la main utilisée (droite ou gauche). En rose : face externe, en bleu : face interne.

Tous les outils utilisés de la main gauche par les gauchers (T001, T003, T004, T007) ne présentent jamais de micro-écaillures sur les deux extrémités du tranchant à la fois, pour une même face d'outil. Autrement dit, la distance entre la première micro-écaillure et le point 0 du tranchant et la distance entre la dernière micro-écaillure et la fin du tranchant sont différentes de 0.

Au contraire, la moitié des outils utilisés de la main droite par les gauchers (T014, T016) et les droitiers (T005, T008), ainsi que la moitié des outils utilisés de la main gauche par les droitiers (T010, T012) présentent une micro-écaillure sur les deux extrémités d'une face.

3.1.3.1.2 Localisation de la micro-écaillure la plus envahissante sur le tranchant de l'outil

Pour 4 outils (T001, T003, T004, T015), la micro-écaillure la plus envahissante est l'une des plus proches des extrémités (T001 et T003 : 1^{ère} micro-écaillure du tranchant, T004 : 3^e micro-écaillure en partant de la seconde extrémité, T015 : 2^{nde} micro-écaillure du tranchant). Dans ces quatre cas, **l'utilisateur est gaucher**, dont 3 outils utilisés de la main gauche et 1 de la main droite (Tab. 7).

N° outil	Localisation de la micro-écaillure la plus envahissante sur le tranchant de la face externe (en%)	Localisation de la micro-écaillure la plus envahissante sur le tranchant de la face interne (en%)
T001	9	0
T002	52	61
T003	55	23
T004	83	45
T005	37	15
T006	45	5
T007	73	71
T008	70	27
T009	32	59
T010	71	67
T011	71	35
T012	49	43
T013	56	44
T014	22	19
T015	2	32
T016	14	42

Tableau 7 : Localisation du début de la micro-écaillure la plus envahissante sur les tranchants des faces internes et externe des outils. Les longueurs des tranchants et localisation des début de micro-écaillures sur le tranchant sont converties en pourcentages. En gris : micro-écaillure localisées sur à moins de 10% du début/de la fin du tranchant.

3.1.3.1.3 Paramètres qualitatifs

Type d'orientation

Pour les 2 faces des 16 outils analysés, les micro-écaillures de type « perpendiculaire » sont largement majoritaires (faces externes : Fig. 28, faces internes : Fig. 29), représentant entre 59% et 73% des micro-écaillures. Les types « vers l'avant » et « vers l'arrière » sont beaucoup moins représentés et en proportion relativement équivalente selon la face, la main utilisée et la préférence manuelle de l'utilisateur, mis à part les faces internes des outils utilisés de la main droite par les gauchers où le taux de micro-écaillure « vers l'avant » est le double de celui des micro-écaillures « vers l'arrière ».

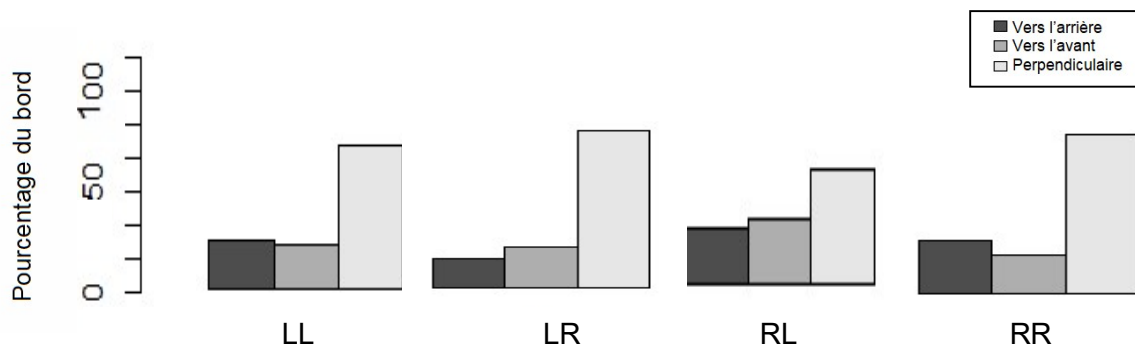


Figure 28 : Taux de micro-écaillures pour les trois types d'orientation (« vers l'arrière », « perpendiculaire », « vers l'avant ») selon la préférence manuelle de l'utilisateur et la main utilisée, pour les faces externes. LL : outils utilisés de la main gauche par les gauchers, LR : outils utilisés de la main droite par les gauchers, RL : outils utilisés de la main gauche par les droitiers, RR : outils utilisés de la main droite par les droitiers.

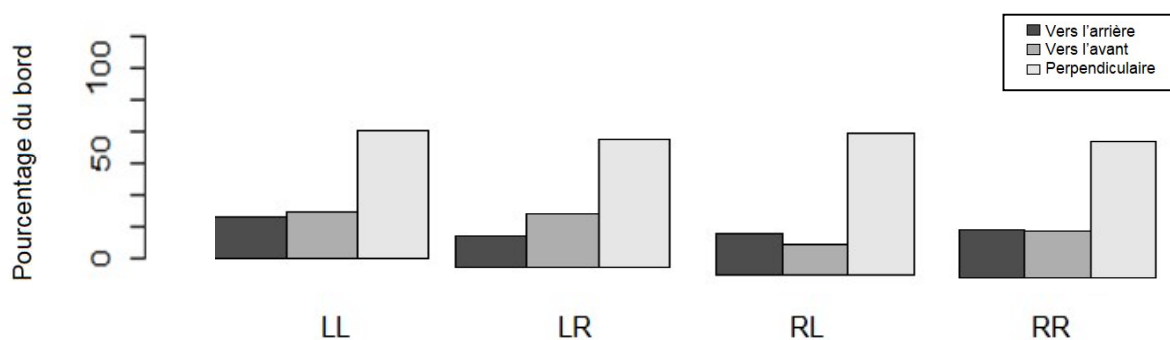


Figure 29 : Taux de micro-écaillures pour les trois types d'orientation (« vers l'arrière », « perpendiculaire », « vers l'avant ») selon la préférence manuelle de l'utilisateur et la main utilisée, pour les faces internes. LL : outils utilisés de la main gauche par les gauchers, LR : outils utilisés de la main droite par les gauchers, RL : outils utilisés de la main gauche par les droitiers, RR : outils utilisés de la main droite par les droitiers.

Type de terminaison

Pour tous les outils, les micro-écaillures de type « en escalier » sont très majoritaires comparées aux micro-écaillures « en plume » (faces externes : Fig. 30, face interne : Fig. 31), étant de 2 à 5 fois plus représentées sur les tranchants selon la face de l’outil, la main utilisée et la préférence manuelle de l’utilisateur. Mis à part pour les outils utilisés de la main droite par les droitiers, ce sont les faces externes qui portent le plus de micro-écaillures « en plume ».

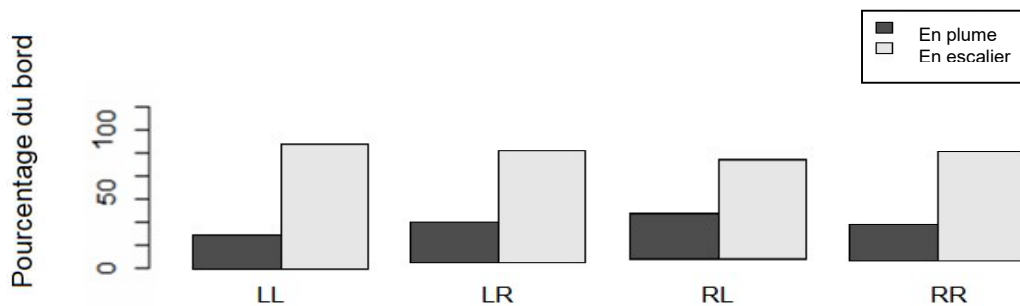


Figure 30 : Taux de micro-écaillures pour les deux types de terminaison (« en escalier », « en plume ») selon la préférence manuelle de l'utilisateur et la main utilisée, pour les faces externes. LL : outils utilisés de la main gauche par les gauchers, LR : outils utilisés de la main droite par les gauchers, RL : outils utilisés de la main gauche par les droitiers, RR : outils utilisés de la main droite par les droitiers.

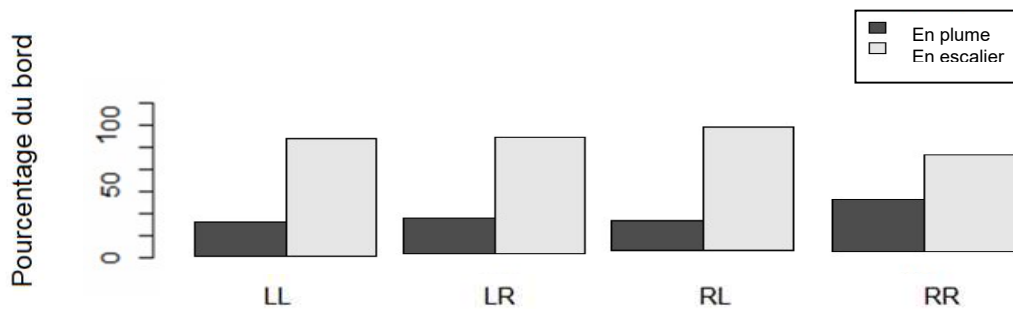


Figure 31 : Taux de micro-écaillures pour les deux types de terminaison (« en escalier », « en plume ») selon la préférence manuelle de l'utilisateur et la main utilisée, pour les faces internes. LL : outils utilisés de la main gauche par les gauchers, LR : outils utilisés de la main droite par les gauchers, RL : outils utilisés de la main gauche par les droitiers, RR : outils utilisés de la main droite par les droitiers.

3.1.3.2 Identification de la face externe

Graphiquement, aucune tendance n'est observée quant à l'envahissement des micro-écaillures entre les faces internes et externes des outils et en fonction de leur localisation sur le tranchant.

Pour 12 outils sur 16 (T001, T002, T003, T005, T006, T007, T008, T010, T013, T014, T015, T016 vs. T004, T009, T011 et T012), la face externe présente **plus de micro-écaillures** dues à l'utilisation que la face interne, indépendamment de la main utilisée ou de la préférence manuelle de l'utilisateur (Tab. 8). 75% des outils présentent donc plus de micro-écaillures sur leur face externe. Cependant, le test U de Mann-Whitney a montré que **cette tendance n'est pas statistiquement significative** ($W = 151.5$, $p\text{-value} = 0.3859$).

N° outil	Nombre de micro-écaillures sur la face externe	Nombre de micro-écaillures sur la face interne
T001	82	42
T002	94	40
T003	105	68
T004	61	103
T005	156	117
T006	105	86
T007	109	86
T008	166	151
T009	65	84
T010	25	19
T011	72	114
T012	63	72
T013	96	54
T014	277	111
T015	73	71
T016	104	88

Tableau 8 : Nombre de micro-écaillures par face d'outil. En rouge : outils dont la face interne présente plus de micro-écaillures que la face externe.

Six tranchants d'outils présentent pour une de leurs faces **une micro-écaillure sur leurs deux extrémités**. Parmi ces pièces, 83% soit dans 5 cas sur 6 (outils T005, T011, T012, T014, T016 vs. T008), il s'agit de la face externe.

Dix outils présentent **une face avec plus d'extrémités affectées par une micro-écaillure que l'autre face** (1 extrémité avec micro-écaillure sur une face vs 0 sur l'autre face ; 2 extrémités avec micro-écaillure sur une face vs 1 ou 0 sur l'autre face). Pour 8 cas sur 10, la face comportant le plus d'extrémités affectées par les micro-écaillures est la face externe (outil T003, T005, T006, T007, T011, T012, T014, T016, vs. T008 et T013).

Les 6 autres outils présentent le même nombre d'extrémités affectées par des micro-écaillures : pour 3 outils (T002, T004, T009), aucune des extrémités ne présente de micro-écaillures et pour 3 autres (T001, T010, T015), une micro-écaillure est présente sur une seule extrémité de chaque face. Ainsi pour 80% des outils dont une face comporte plus d'extrémités altérées par une micro-écaillure que l'autre, la face avec le plus d'extrémités altérées est la face externe.

Pour 10 outils sur 16 (T001, T002, T004, T005, T008, T011, T012, T013, T015, T016 vs. T003, T006, T007, T009, T010 et T014), c'est sur la face externe que se trouve la **micro-écaillure la plus envahissante** du tranchant (Tab. 9). Cependant, le test U de Mann-Whitney a montré que **cette tendance n'est pas statistiquement** significative ($W = 138$, $p\text{-value} = 0.724$).

N° outil	Envahissement de la micro-écaillure la plus envahissante de la face Externe	Envahissement de la micro-écaillure la plus envahissante de la face Interne
T001	2253	1715
T002	1750	921
T003	544	1201
T004	1570	1454
T005	2168	1664
T006	3036	4362
T007	2482	3969
T008	5769	4379
T009	2991	3165
T010	966	1026
T011	1915	1219
T012	3920	1430
T013	953	913
T014	916	4278
T015	2077	1581
T016	4593	2808

Tableau 9 : Envahissement de la micro-écaillure la plus envahissante des faces externe et interne pour chaque outil. En rouge : envahissement de la micro-écaillure la plus envahissante plus important pour la face interne que la face externe.

Concernant les **paramètres qualitatifs**, un test du X^2 de Pearson montre que les différences observées entre les pourcentages des différents types d'orientation de micro-écaillures selon qu'elles se trouvent sur la face interne ou externe **ne sont pas significatives** ($X\text{-squared} = 0.1352$, $df=2$, $p\text{-value} = 0.9347$), de même pour les types de terminaison ($X\text{-squared} = 1.85e-30$, $df = 1$, $p\text{-value} = 1$).

3.2.1 Identification de la face externe : synthèse des données

Pour 5 outils sur les 8 utilisés de la main gauche par les gauchers, la face ventrale a été placée en position externe au cours de l'utilisation. Onze des 16 outils utilisés de la main droite par les droitiers (incluant les outils de l'expérimentation réalisée en 2017) ont pour face externe la face dorsale. Les outils utilisés de la main non préférentielle ont pour face externe la face ventrale dans 6 cas sur 8 (3 outils sur 4 utilisés de la main gauche par les droitiers, 3 outils sur 4 utilisés de la main droite par les gauchers).

Les différences observées entre la face interne et la face externe sont statistiquement non significatives pour la totalité des paramètres (i.e. test U de Mann-Whitney donnant systématiquement une p-value $> 0,05$). Cependant, étant donné la taille restreinte du corpus, nous proposons tout de même une analyse de ces résultats. **La probabilité que chacune des deux faces de l'outil soit la face externe, au regard des paramètres d'intérêt identifiés précédemment, a été testée.** Seuls les paramètres possiblement discriminants d'après les statistiques descriptives sont conservés dans cette approche (4 paramètres : face présentant le plus de micro-écaillures, pourcentage de la longueur du tranchant altéré par les polissures, face avec une microécaillure sur les deux extrémités à la fois, face avec plus d'extrémités altérées par les microécaillures que l'autre).

Pour chaque outil, la fréquence à laquelle le paramètre d'intérêt se retrouve dans le corpus expérimental de référence (exemple : la face de l'outil comportant le plus de micro-écaillures est la face externe dans 75% des cas, soit une fréquence de 0.75) est associée à la face de l'outil qui porte ce paramètre dans le tableau récapitulatif ci-dessous (Tab. 10). La fréquence complémentaire est attribuée à l'autre face (exemple : la face de l'outil T001 comportant le plus de micro-écaillures est la face ventrale : une fréquence de 0.75 est attribuée à la case tandis qu'une fréquence de 0,25 est attribuée à la face dorsale). Deux paramètres sont applicables sur tous les outils (face avec le plus de micro-écaillures et pourcentage de la longueur du tranchant altéré par des polissures) et deux paramètres sont « complémentaires » (face avec une micro-écaillure sur les deux extrémités et face avec le plus d'extrémités altérées par une micro-écaillure), absents pour certains outils mais

augmentant la probabilité de bonne classification de l'outil lorsqu'ils sont présents. Ces deux paramètres sont seulement pris en compte lorsqu'ils sont présents, un tiret étant attribué aux cases correspondant aux deux faces s'ils sont absents. Les fréquences obtenues pour tous les paramètres et pour chaque face d'outil sont ensuite additionnées, puis convertie en pourcentage.

Par exemple, pour l'outil T001 :

- La face ventrale présente plus de micro-écaillures que la face dorsale : la fréquence 0.75 est ajoutée dans la case correspondant à la face ventrale et 0.25 dans la case correspondant à la face dorsale.
- Le pourcentage de la longueur du tranchant altéré par les polis est plus important sur la face ventrale que la face dorsale : la fréquence 0.81 est attribuée à la face ventrale et 0.19 à la face dorsale.
- Aucune des deux faces ne présente une micro-écaillure sur les deux extrémités à la fois pour une même face : des tirets sont attribués dans les cases correspondant aux deux faces de l'outil.
- Les deux faces présentent le même nombre d'extrémités de tranchant altérées par les micro-écaillures : des tirets sont attribués pour les deux faces.

Les fréquences attribuées respectivement à la face ventrale et à la face dorsale sont ensuite additionnée : pour l'outil T001, le score totale de la face ventrale est de 1.56 et celui de la face dorsale de 0.44. Après conversion de ces scores en pourcentages, la probabilité que la face ventrale soit la face externe est de 78%, la probabilité que la face dorsale soit la face externe est de 22%. Puisque l'outil a été utilisé dans un cadre expérimental, nous pouvons confirmer que la face ventrale dans ce cas était bien la face externe.

N° outil	Paramètres présents sur tous les outils testés				Paramètres complémentaires				TOTAL		Probabilité que la face soit la face externe (%)	
	Face avec le plus de micro-écaillures		Pourcentage de la longueur du tranchant altéré par des polis		Face avec une micro-écaillure sur les 2 extrémités		Face avec le plus d'extrémités altérées par une micro-écaillure					
	V	D	V	D	V	D	V	D	V	D	V	D
T001	0.75	0.25	0.81	0.19	-	-	-	-	1.56	0.44	78	22
T002	0.25	0.75	0.19	0.81	-	-	-	-	0.44	1.56	22	78
T003	0.75	0.25	0.81	0.19	-	-	0.8	0.2	2.36	0.64	79	21
T004	0.25	0.75	0.81	0.19	-	-	-	-	1.06	0.94	53	47
T005	0.75	0.25	0.19	0.81	0.83	0.17	0.8	0.2	2.38	1.43	64	36
T006	0.25	0.75	0.19	0.81	-	-	0.2	0.8	0.64	2.36	21	79
T007	0.25	0.75	0.19	0.81	-	-	0.2	0.8	0.64	2.36	21	79
T008	0.25	0.75	0.19	0.81	0.83	0.17	0.8	0.2	2.07	1.93	52	48
T009	0.75	0.25	0.19	0.81	-	-	-	-	0.94	1.06	47	53
T010	0.75	0.25	0.19	0.81	-	-	-	-	0.94	1.06	47	53
T011	0.75	0.25	0.81	0.19	0.17	0.83	0.2	0.8	1.73	2.07	48	52
T012	0.25	0.75	0.81	0.19	0.83	0.17	0.8	0.2	2.69	1.31	67	33
T013	0.25	0.75	0.19	0.81	0	0	0.8	0.2	1.24	1.76	41	59
T014	0.75	0.25	0.81	0.19	0.83	0.17	0.8	0.2	3.19	0.81	80	20
T015	0.25	0.75	0.19	0.81	-	-	-	-	0.44	1.56	22	78
T016	0.75	0.25	0.81	0.19	0.83	0.17	0.8	0.2	3.19	0.81	80	20

Tableau 10 : Combinaison des résultats après l'analyse des paramètres d'intérêt pour la détermination de la face externe de l'outil. En vert : détermination correcte de la face externe, en rouge : mauvaise détermination de la face externe, V : face ventrale de l'outil, D : face dorsale de l'outil

Bien que les différences observées entre les faces internes et externes des outils ne soient pas statistiquement significatives, **la combinaison de ces paramètres permet ici de déterminer la face externe pour 14 outils sur 16, soit dans 87.5% des cas.**

3.2.2 Analyses en composantes principales et analyse bi-variée

Des ACP ont été réalisées pour l'analyse des données quantitatives, en combinant différents paramètres d'intérêt déterminés précédemment à partir des statistiques descriptives. Dans un premier temps, les 16 outils utilisés lors de l'expérimentation de 2018 ont été testés pour six variables (Fig. 32). **Aucun lien particulier n'est observé entre les outils utilisés d'une même main et/ou par des personnes de même préférence manuelle.** La variable de la localisation de la micro-écaillure la plus envahissante est celle qui a le plus d'influence sur la dimension 1 dans ce test (représentant 44.3% de la variabilité de l'échantillon), viennent ensuite les variables du pourcentage de la longueur du bord altéré par les polis (36% de la variabilité de l'échantillon) et par les résidus (19.6% de la variabilité de l'échantillon). Les

variables correspondant au nombre d'extrémités altérées variables du nombre d'extrémités altérées par les résidus, micro-écaillures et polis (par face) sont très proches du centre du repère, elles n'ont que très peu d'influence sur la construction des axes.

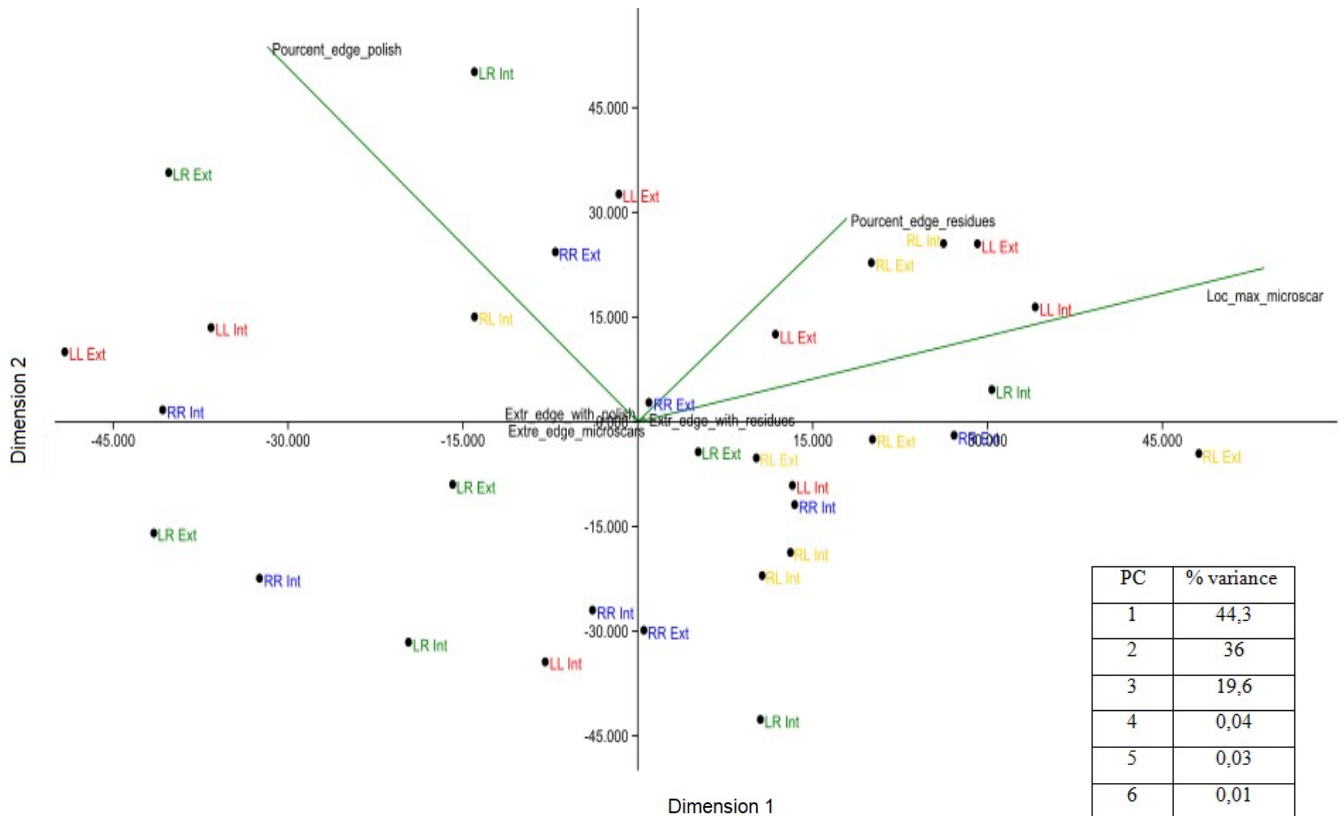


Figure 32 : ACP combinant les données des deux faces de 16 outils utilisés de la main préférentielle de l'utilisateur, pour 6 variables. En rouge : outils utilisés de la main gauche par les gauchers, en vert : outils utilisés de la main droite par les gauchers, en bleu : outils utilisés de la main droite par les droitiers, en jaune : outils utilisés de la main gauche par les droitiers.

Les mêmes variables ont été testées en gardant seulement les 8 outils utilisés de la main préférentielle de l'utilisateur : aucune distinction entre les outils utilisés de la main droite par les droitiers et de la main gauche par les gauchers n'a été possible non plus.

Si le paramètre de la localisation de la micro-écaillure la plus envahissante est retiré pour garder seulement les cinq autres variables, des regroupements entre outils utilisés par les droitiers de la main droite et par les gauchers de la main gauche semblent se former mais restent encore largement superposés et les points très dispersés (Fig. 33). Dans ce cas les paramètres du pourcentage de la longueur du bord altéré par les polis et par les résidus sont responsables de la quasi-totalité de la variabilité de l'échantillon (respectivement à 56.6% et à 43.3%). Les trois autres paramètres sont très proches du centre du repère et n'ont pas d'influence sur la variabilité de l'échantillon.

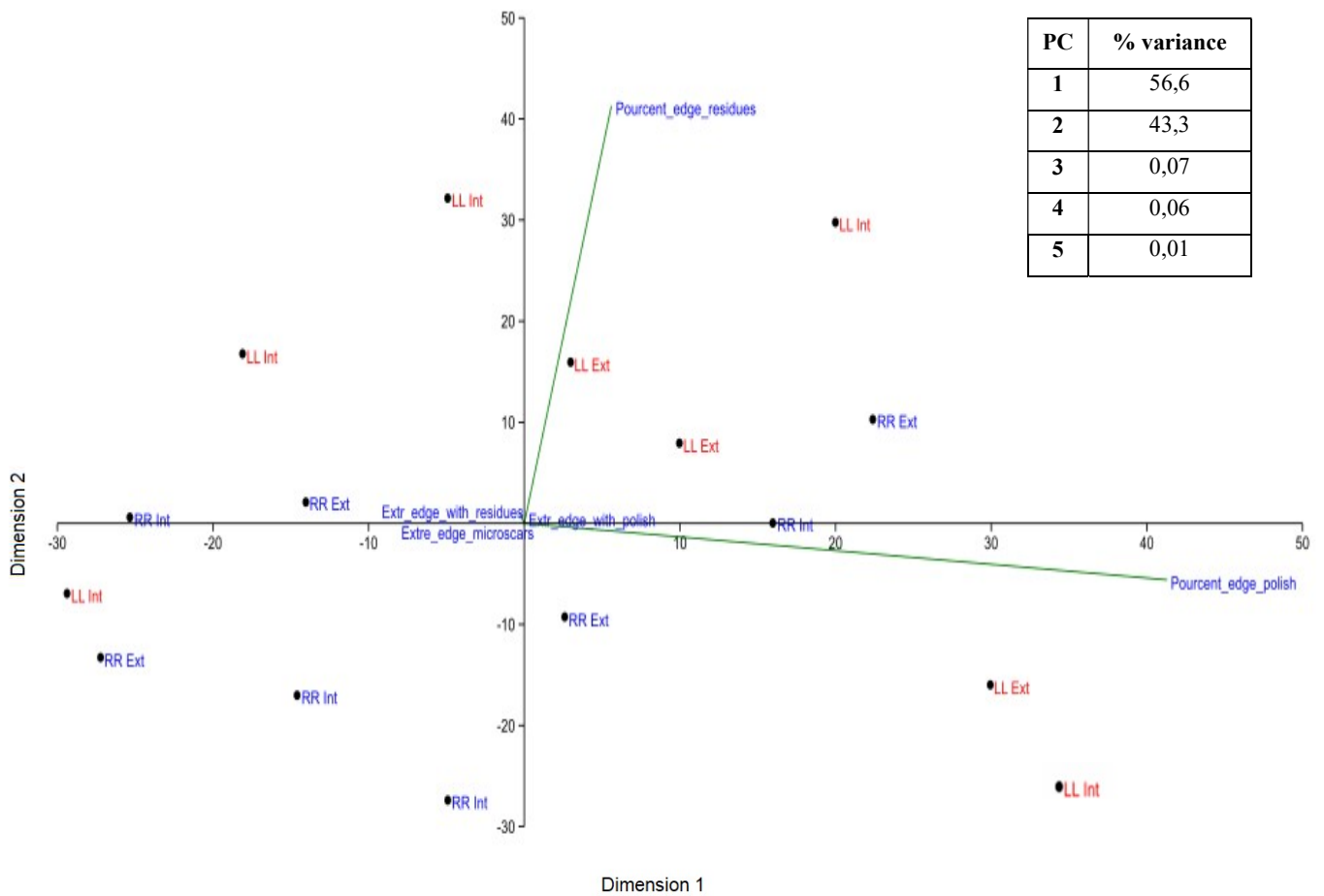


Figure 33 : ACP combinant les données des deux faces de 8 outils utilisés de la main préférentielle de l'utilisateur (4 droitiers, 4 gauchers), pour 5 variables. En rouge : outils utilisés par les gauchers de la main gauche, en bleu : outil utilisés de la main droite par les droitiers.

Sur l'ACP combinant trois paramètres d'intérêt pour les 8 outils utilisés de la main préférentielle (Fig. 34), des regroupements sont observés pour les pièces utilisées respectivement de la main gauche par les gauchers et de la main droite par les droitiers, mais les points restent très éparés et les groupes se superposent. Les paramètres ayant le plus de poids dans la construction des axes sont le nombre d'extrémités altérées par les micro-écaillures (par face) et le nombre d'extrémités altérées par les poliss (par face).

Les variables du pourcentage de la longueur du bord affecté par les résidus (par face) et du nombre d'extrémités altérées par les poliss d'utilisation (par face) ont été identifiées précédemment comme possiblement discriminantes par les statistiques descriptives. Une analyse bi-variée pour ces deux paramètres (Fig. 35) permet la distinction de 3 groupes : un regroupement des outils utilisés de la main gauche par les gauchers (pour X=1), et deux regroupements distincts pour les outils utilisés de la main droite par les droitiers (pour X=0 et X=2). Sur ce graphique, le pourcentage du bord affecté par les résidus ne semble pas être discriminant, contrairement au paramètre du nombre d'extrémités altérées par les poliss.

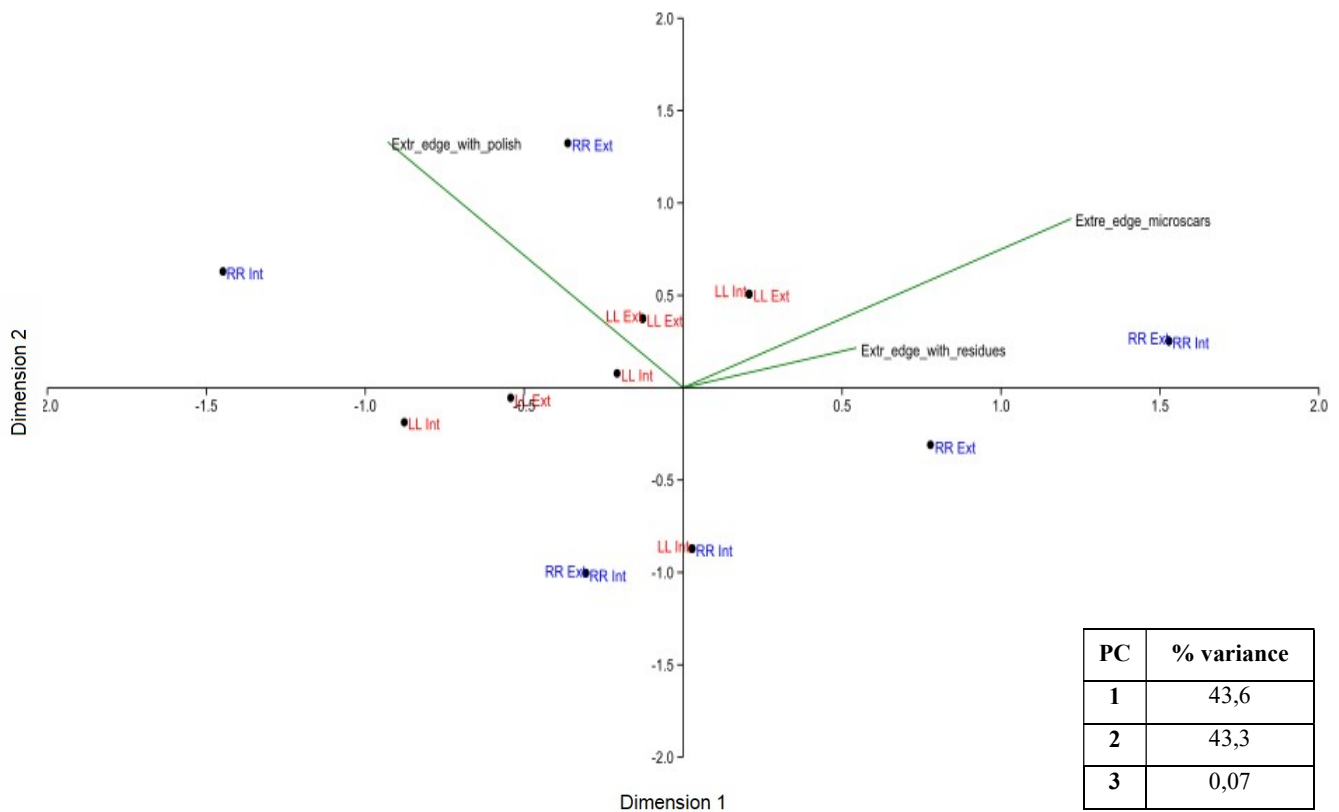


Figure 34 : ACP combinant les données des deux faces de 8 outils utilisés de la main préférentielle de l'utilisateur (4 droitiers, 4 gauchers), pour 3 variables. En rouge : outils utilisés par les gauchers de la main gauche, en bleu : outil utilisés de la main droite par les droitiers.

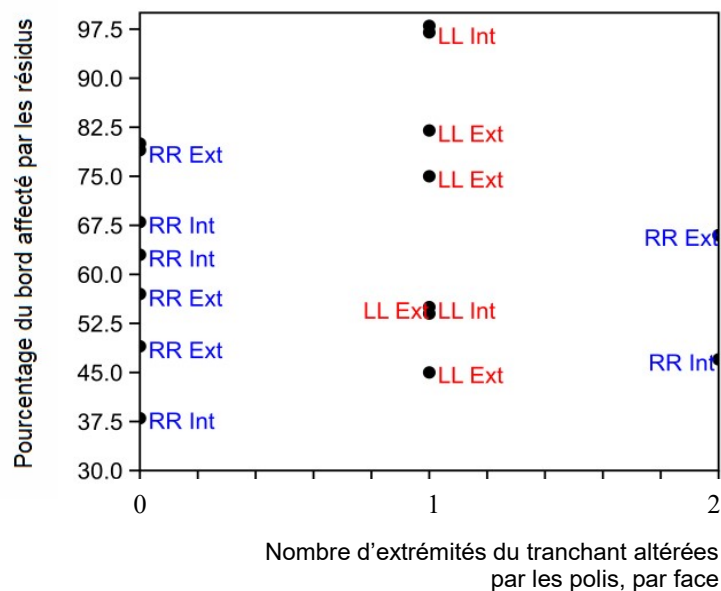


Figure 35 : Analyse bi-variée pour les deux paramètres les plus discriminants identifiés. En rouge : outils utilisés de la main gauche par les gauchers, en bleu : outils utilisés de la main droite par les droitiers. Ext : face externe, Int : face interne.

3.2.3 METHODE D'ATTRIBUTION DE SCORE

Afin de tester le potentiel et l'applicabilité du modèle, la probabilité de bonne classification des 16 pièces du corpus a été testée à partir de la probabilité d'observer chaque résultat pour tous les paramètres d'intérêt, selon la main ayant utilisé l'outil et la préférence manuelle de l'utilisateur. Cette méthode sera nommée « méthode d'attribution de score » dans la suite de l'étude.

En effet, pour chacun de ces paramètres, différents résultats sont observés selon la préférence manuelle de l'utilisateur et la main utilisée. Ces résultats sont récapitulés dans un tableau en annexe (Annexe 4) pour les 4 cas possibles :

- utilisateur gaucher tenant l'outil de la main gauche (LL),
- utilisateur gaucher tenant l'outil de la main droite (LR),
- utilisateur droitier tenant l'outil de la main gauche (RL),
- utilisateur droitier tenant l'outil de la main droite (RR).

La probabilité d'observer un résultat plutôt qu'un autre pour les différents paramètres, en fonction de la préférence manuelle de l'utilisateur et de la main utilisée, est calculée pour les 4 cas possibles (LL, LR, RL, RR) d'après la base de données issue de l'analyse des outils du corpus de référence. Ces probabilités sont listées en annexe (Annexe 5).

Ainsi lorsqu'un outil est analysé, pour le résultat observé à chaque paramètre, les 4 possibilités de combinaison (LL, LR, RL, RR) sont prises en compte et reportées dans un tableau, ce pour les 5 paramètres.

Enfin, les probabilités pour les 5 paramètres sont additionnées, pour les 4 cas possibles. Celui des 4 scores totaux le plus élevé détermine la main utilisée et la préférence manuelle de l'utilisateur. Par exemple, pour l'outil T001 (Tab. 11):

- 1 extrémité du tranchant est altérée par les polissures pour au moins une face,
- Plus de 80% de la longueur du tranchant est altérée par les polissures,
- La micro-écaillage la plus envahissante est l'une des plus proches des extrémités,
- Absence de micro-écaillures sur les deux extrémités du tranchant pour les 2 faces,
- Plus de 80% de la longueur du tranchant altérée par les résidus.

Les 4 probabilités correspondant à chacun de ces résultats (probabilité que l'outil ait été utilisé de la main droite par un droitier, de la main gauche par un gaucher, de la main gauche par un gaucher, de la main droite par un droitier), disponible dans la liste en annexe (Annexe 5), sont reportées dans le tableau comme ci-dessous puis additionnées. Le score total pour les 4 cas est ensuite converti en pourcentage.

	T001			
	Outil utilisé de la main gauche par un gaucher	Outil utilisé de la main droite par un gaucher	Outil utilisé de la main gauche par un droitier	Outil utilisé de la main droite par un droitier
Présence/absence de polis sur une ou plusieurs extrémités du tranchant	0,57	0,14	0,29	0
Pourcentage de la longueur du tranchant altérée par les polis	1	0	0	0
Numéro de la micro-écaillage la plus envahissante	0,75	0,25	0	0
Présence/absence d'une micro-écaillage sur les deux extrémités du tranchant	0,4	0,2	0,2	0,2
Pourcentage de la longueur du tranchant altérée par les résidus	1	0	0	0
TOTAL	3,72	0,59	0,49	0,2
Probabilité (en %) de bonne classification de l'outil	74,4%	11,8%	9,8%	4%

Tableau 11 : Probabilité (en pourcentage) de classification de l'outils T001 pour chacune des quatre catégories définies selon la préférence manuelle de l'utilisateur et la main utilisée. En vert : probabilité maximale et classement correct de l'outil.

Ainsi l'outil T001 a 74% de chance d'avoir été utilisé de la main gauche par un gaucher. Cette méthode est appliquée aux 16 pièces du corpus. Les probabilités d'appartenance des 16 outils à chacune des 4 catégories d'après l'analyse des 5 paramètres d'intérêt sont récapitulées dans les tableaux ci-dessous (Tab. 12). Le détail du calcul de ces probabilités est disponible en annexe (Annexe 6).

T001				T002				T003				T004			
LL	LR	RL	RR	LL	LR	RL	RR	LL	LR	RL	RR	LL	LR	RL	RR
74,4	11,8	9,8	4	12,6	26,6	27,4	33,6	57,4	16,4	16	10,2	57,4	16,4	16	10,2

T005				T006				T007				T008			
LL	LR	RL	RR	LL	LR	RL	RR	LL	LR	RL	RR	LL	LR	RL	RR
4,6	25,6	31	38,2	12,6	23	28,4	35,6	61	11,8	16,4	10,6	4,6	28,6	30	36,2

T009				T010				T011				T012			
LL	LR	RL	RR	LL	LR	RL	RR	LL	LR	RL	RR	LL	LR	RL	RR
12,6	31,8	28,4	26,8	4,6	37,4	30	27,4	24	20,8	29,2	25,6	4,6	25,6	31	38,2

T013				T014				T015				T016			
LL	LR	RL	RR	LL	LR	RL	RR	LL	LR	RL	RR	LL	LR	RL	RR
24	20,8	29,2	25,6	4,6	28,6	30	36,2	37,4	20,8	20,6	19	1,6	52,8	23,8	21,2

Tableau 12 : Probabilité (en pourcentage) d'identification de la préférence manuelle et de la main ayant tenu l'outil pour les 16 pièces LL : outil utilisé de la main gauche par un gaucher, LR : outil utilisé de la main droite par un gaucher, RL : outil utilisé de la main gauche par un droitier, RR : outil utilisé de la main droite par un droitier. En vert : probabilité maximale et classement correct de l'outil, en rouge : probabilité maximale et classement incorrect de l'outil.

Douze outils ont ainsi été classés correctement ; 4 outils utilisés de la main non préférentielle n'ont pas été bien classés.

Afin de tester l'efficacité de la méthode pour retrouver la **préférence manuelle de l'utilisateur**, les données des outils utilisés par les individus d'une même préférence manuelle sont fusionnées. Le tableau détaillant les probabilités de détermination de la préférence manuelle de l'utilisateur pour chaque outil est disponible en annexe (Annexe 7). La préférence manuelle de l'utilisateur a été correctement identifiée pour 14 outils sur les 16. Les deux outils dont la préférence manuelle de l'utilisateur n'a pas été correctement identifiée (T009, T014) ont été utilisés de la main non préférentielle, par des gauchers.

De même pour tester l'efficacité de la méthode pour la bonne **détermination de la main (gauche ou droite) ayant utilisé l'outil**, les données concernant les outils utilisés d'une même main, indépendamment de la préférence manuelle de l'utilisateur, ont été fusionnées. Le tableau récapitulatif des probabilités d'identification de la main ayant utilisé l'outil est disponible en annexe (Annexe 8). La main ayant utilisé l'outil a été correctement identifiée pour 13 outils. Les 3 outils classés dans la mauvaise catégorie (T010, T012, T015) ont été utilisés de la main non préférentielle de l'utilisateur (2 gauchers, 1 droitier).

Enfin, les outils utilisés de la main non préférentielle des utilisateurs sont retirés de la base de données pour tester uniquement les outils utilisés de la main préférentielle. Les probabilités d'observer chaque résultat pour les différents paramètres, en fonction de la main utilisée (main droite par les droitiers, main gauche par les gauchers) ont été recalculées. Ces nouvelles probabilités sont listées en annexe (Annexe 9).

Dans un premier temps, les outils ont été testés pour les 5 paramètres d'intérêt. Les probabilités de bon classement des 8 outils sont résumées dans le tableau suivant (Tab. 13) et détaillées en annexe (Annexe 10) :

T001		T002		T003		T004		T005		T006		T007		T008	
LL	RR	LL	RR	LL	RR	LL	RR	LL	RR	LL	RR	LL	RR	LL	RR
93,4	6,6	24	76	80	20	80	20	13,2	86,8	26,6	73,4	77	22	11	89

Tableau 13 : Probabilité (en pourcentage) d'identification de la main ayant utilisé l'outil pour les 8 pièces. LL : outil utilisé de la main gauche par un gaucher, RR, outil utilisé de la main droite par un droitier. En vert si le classement obtenu est correct.

Les 8 outils ont été correctement classés, avec des probabilités comprises entre 73,4% (outil T006) et 93,4% (outil T001).

Les paramètres les moins discriminants ont ensuite été retirés au fur et à mesure de la base de données pour tenter d'améliorer la probabilité de bonne classification des outils. Finalement seuls les deux paramètres les plus discriminants sont conservés : « nombre d'extrémités altérées par les pols d'utilisation (par face) » et « pourcentage de la longueur du tranchant affecté par les résidus (par face) ». Les probabilités de classification correcte des outils pour les deux catégories sont présentées ci-dessous (Tab. 14) et le détail des calculs sont disponibles en annexe (Annexe 11). **Tous les outils ont été correctement classés avec une probabilité estimée à 100%.**

T001		T002		T003		T004		T005		T006		T007		T008	
LL	RR	LL	RR	LL	RR	LL	RR	LL	RR	LL	RR	LL	RR	LL	RR
100	0	0	100	100	0	100	0	0	100	0	100	100	0	0	100

Tableau 14 : Probabilité (en pourcentage) d'identification de la main ayant utilisé l'outil pour les 8 pièces. LL : outil utilisé de la main gauche par un gaucher, RR, outil utilisé de la main droite par un droitier. En vert si le classement obtenu est correct.

3.2.4 Tests du plus proche voisin (k-NN : *k nearest neighbours*)

Un test k-NN (mode *Repeated k-fold cross validation method*) a d'abord été effectué sur l'ensemble de la base de données, soit pour les 16 outils du corpus et les 5 paramètres d'intérêt. La probabilité de bonne identification de la main ayant utilisé l'outil et la préférence manuelle de l'utilisateur est de 50%, avec un Kappa très faible de -0.111 ($k = 7$, Accuracy = 0.50, Kappa = -0.111, AccuracySD = 0.200, KappaSD = 0.3333) (Tab. 15).

k	Accuracy	Kappa	AccuracySD	KappaSD
5	0.33	-0.1111	0.2000	0.3333
7	0.50	-0.0000	0.3536	0.5345
9	0.39	-0.0000	0.2205	0.0000

Tableau 15.: Résultats du test k-NN pour les 16 outils issus de l'expérimentation de 2018 et pour la totalité des paramètres d'intérêt.

Le test a ensuite été appliqué aux 16 outils, seulement pour les deux paramètres les plus intéressants identifiés précédemment (« nombre d'extrémités du tranchant altérées par les polissures (par face) » et « pourcentage de la longueur du tranchant altéré par les résidus (par face) »). **La probabilité d'identification correcte de la main ayant utilisé l'outil et de la préférence manuelle de l'utilisateur est de 35%** avec un Kappa très faible de 0.1524 ($k = 9$, Accuracy = 0.35, Kappa = 0.1524, AccuracySD = 0.2317, KappaSD = 0.2682) (Tab. 16).

k	Accuracy	Kappa	AccuracySD	KappaSD
5	0.24	-0.0018	0.2529	0.4205
7	0.27	-0.0018	0.2081	0.3901
9	0.35	-0.1524	0.2317	0.2681

Tableau 16.: Résultats du test k-NN pour les 16 outils issus de l'expérimentation de 2018 pour les deux paramètres d'intérêt ayant le plus de potentiel

Si les données relatives aux outils utilisés de la main non préférentielle sont retirées de la base, **une probabilité de 87% de bonne identification de la main ayant tenu l'outil (main droite par un droitier vs. main gauche par un gaucher) est calculée avec un**

Kappa acceptable de 0.7383 (k = 7, Accuracy = 0.87, Kappa = 0.7383, AccuracySD = 0.1032, KappaSD = 0.4560) (Tab. 17).

k	Accuracy	Kappa	AccuracySD	KappaSD
5	0.85	-0.6998	0.1635	0.3880
7	0.87	-0.7383	0.1032	0.4560
9	0.78	-0.5599	0.3535	0.4409

Tableau 17 : Résultats du test k-NN pour les 8 outils issus de l'expérimentation de 2018 et utilisés de la main préférentielle des utilisateurs, pour les deux paramètres d'intérêt ayant le plus de potentiel.

Une simulation de rééchantillonnage a été réalisée avec la fonction *bootstrap* qui augmente artificiellement l'échantillon (ici multiplication de l'échantillon par 10) par tirage avec remise d'observation déjà réalisées. **Une probabilité d'identification correcte de la main ayant utilisé l'outil (main droite par un droitier vs. main gauche par un gaucher) de 97% (+/- 4,15%) est estimée avec un Kappa excellent de 0.948 (+/- 0,0839) (k = 5, Accuracy = 0.97, Kappa = 0.948, AccuracySD = 0.0415, KappaSD = 0.0839) (Tab. 18).**

k	Accuracy	Kappa	AccuracySD	KappaSD
5	0.97	-0.9480	0.0415	0.0839
7	0.92	-0.8437	0.0868	0.1714
9	0.83	-0.6792	0.1387	0.2781

Tableau 18 : Résultats du test k-NN pour les 8 outils issus de l'expérimentation de 2018 utilisés de la main préférentielle de l'utilisateur, pour les deux paramètres ayant le plus de potentiel.

4. DISCUSSION

4.1 EFFICACITE DE LA METHODE : VERS UNE IDENTIFICATION DE LA MAIN AYANT UTILISE L'OUTIL

Les résultats ont mis en évidence des spécificités quant aux traces d'utilisation sur les bords des outils employés de la main gauche ou de la main droite. **Deux paramètres en particulier semblent intéressants** dans la détermination correcte de la main ayant utilisé l'outil :

- Le nombre d'extrémités du tranchant altérées par les polis d'utilisation (par face),
- Le pourcentage de la longueur du tranchant affecté par les résidus (par face).

Les différents tests appliqués (k-NN et méthode d'attribution des scores) ont classé les outils selon la main utilisée avec une probabilité plus importante lorsque seuls ces deux paramètres étaient pris en compte.

Pour ces deux paramètres, la méthode de classification par attribution de score **classe correctement les 8 outils du corpus tenus de la main préférentielle avec une probabilité de 100%**. Ce résultat, bien que prometteur, doit être considéré avec précaution car l'échantillon analysé est de petite taille et les outils testés sont ceux à partir desquels les probabilités de référence ont été construites. Nous proposons donc ici une méthode qui pourrait être appliquée facilement mais augmenter l'échantillon de référence est indispensable pour vérifier ces résultats. Des tests à l'aveugle permettront aussi de mieux évaluer les limites du modèle en vue d'une application sur du matériel archéologique.

Le test k-NN, appliqué aux outils utilisés de la main préférentielle pour les deux paramètres les plus discriminant, estime à **87% (+/- 10.32%) la probabilité d'identification correcte de la main ayant utilisé l'outil**, avec un Kappa acceptable de 0.7383 (+/- 0.4560).

La différence entre le résultat obtenu avec la méthode d'attribution de score (probabilité de bonne classification des outils = 100%) et le résultat du k-NN (probabilité de bonne classification des outils = 87%) peut s'expliquer par le fait que le test k-NN retire chaque outil de la base de données avant de le tester, contrairement à l'autre méthode qui pour le moment n'a pu être testée qu'avec les pièces ayant servi à construire la base de référence. Un plus grand panel d'outil est également nécessaire pour obtenir des résultats plus représentatifs de la variabilité possible dans un échantillon archéologique et proposer un modèle plus stable et plus fiable.

Afin de simuler un échantillonnage dix fois plus grand, un test k-NN a été réalisé avec la fonction *bootstrap*. Dans ce cas, pour les outils utilisés de la main préférentielle, **la**

probabilité de bonne identification de la main ayant tenu l'outil est de 97% (+/- 4,15%) avec un Kappa de 0,9480 (+/- 0,0839). Il s'agit seulement de simuler le résultat qu'il serait possible d'obtenir si la variabilité des outils utilisés dans cette étude resterait semblable dans un échantillonnage plus important.

L'un des deux paramètres les plus intéressants concerne **les résidus, qui sont rarement conservés en contexte archéologique** et peuvent avoir des origines diverses : un enchâssement de l'outil, la matière travaillée ou encore le mode de préhension (avec une peau ou une feuille par exemple pour ne pas se couper). Leur origine reste souvent complexe à déterminer, les résidus persistants susceptibles d'être observés en contexte archéologique pourraient donc ne pas correspondre à des traces d'utilisation. Si ce paramètre semble expérimentalement intéressant pour distinguer les outils utilisés d'une main ou de l'autre, **il apparaît cependant difficilement applicable à un assemblage archéologique.**

Concernant le second paramètre, relatif aux polissures d'utilisation, une application sur un panel d'outils plus important est nécessaire pour vérifier la significativité des résultats obtenus. **L'identification d'autres paramètres d'intérêt semble indispensable pour améliorer l'applicabilité du modèle en contexte archéologique.**

La probabilité (obtenue par la méthode d'apprentissage machine des k-NN) de bonne identification de la main ayant tenu l'outil étant inférieure à 90%, seuil que nous nous étions fixé pour considérer le modèle expérimental comme satisfaisant, il est nécessaire de continuer l'exploitation de ces données pour identifier de nouveaux paramètres de classification. Les résultats sont néanmoins encourageants et démontrent le potentiel de la méthode et de certains paramètres testés.

4.2 IDENTIFICATION DE LA PREFERENCE MANUELLE VS. IDENTIFICATION DE LA MAIN AYANT UTILISE L'OUTIL

Une grande variabilité de type et d'organisation des traces est constatée pour des outils utilisés de la main préférentielle et ceux utilisés de la main non préférentielle, pour des individus de même préférence manuelle. **Distinguer un outil utilisé de la main non préférentielle apparaît ainsi très complexe** car les différences observées avec les outils tenus de la main préférentielle ne sont pas significatives (e.g. type de polis « proche » ou « éloigné » du bord, nombre d'extrémités altérées par les polis, par les micro-écaillures, par les résidus, etc.).

La probabilité de classer correctement les outils selon la préférence manuelle de l'utilisateur et la main (droite ou gauche) ayant utilisé l'objet **est toujours plus faible lorsque les outils employés de la main non préférentielle sont inclus dans l'analyse.**

Pour les test k-NN, lorsque tous les outils sont testés pour les deux paramètres de traces les plus intéressants, **la probabilité de bon classement des outils s'élève seulement à 35%** (+/- 23.17%) avec un Kappa faible de 0.1524 (+/-0.682), ce qui est plus mauvais qu'un classement dû au hasard. **Si seuls les outils utilisés de la main préférentielle sont testés, la probabilité de bon classement des outils est de 87%** (+/- 10.32%) avec un Kappa de 0.7383 (+/- 0.4560).

La même tendance est observée avec la méthode d'attribution de score. Lorsque tous les outils sont testés pour la totalité des paramètres d'intérêt, la probabilité de bon classement de l'outil est de 74.4%, et reste inférieure à 40% pour 11 outils sur 16 (dont 4 outils mal classés : T010, T012, T014, T015). Si les outils utilisés de la main non préférentielle sont retirés de la base de données, les 8 outils utilisés de la main préférentielle sont correctement classés, avec une probabilité minimum d'identification correcte de 73.4% et un maximum de 93.4%.

L'analyse des traces d'outils utilisés par des personnes de même préférence manuelle, indépendamment de la main ayant tenu l'outil durant son utilisation, a permis d'étudier **la variabilité des traces pour l'identification de la préférence manuelle de l'utilisateur.** La préférence manuelle des utilisateurs a été correctement évaluée pour 14 pièces sur 16, avec des probabilités qui cependant sont faibles : 6 outils sur les 8 utilisés de la main non préférentielle ont une probabilité de bon classement inférieure à 60%. Les probabilités de bon

classement pour les outils utilisés de la main préférentielle sont plus élevées, comprises entre 61% et 86,2%. Ces résultats suggèrent que **la préférence manuelle des utilisateurs est moins bien identifiable lorsque l'outil a été utilisé de la main non préférentielle de l'utilisateur.**

Cette observation pourrait s'expliquer par une influence des caractéristiques individuelle des utilisateurs et par le fait qu'ils n'ont pas l'habitude d'utiliser leur main non préférentielle. Leur geste est donc probablement plus variable et le « signal » lié à la préférence manuelle serait donc altéré.

L'analyse des traces d'outils utilisés d'une même main par des personnes de différente préférence manuelle a permis d'analyser **la variabilité des traces pour une même main (droite ou gauche) ayant utilisé l'outil.** Lorsque tous les paramètres d'intérêt sont pris en compte, les probabilités de bonnes identifications de la main ayant tenu l'outil sont généralement plus élevées pour les pièces utilisées de la main préférentielle (comprises entre 59% et 84,5%) que ceux utilisés de la main non préférentielle (comprises entre 53,5% et 75%). **La main ayant utilisé l'outil semble donc plus difficile à déterminer lorsque l'utilisateur a tenu l'objet de sa main non préférentielle.**

Les analyses statistiques (ACP, k-NN) et probabilistes confirment que **la variabilité des traces pour les outils utilisés de la main non préférentielle altère la bonne identification de la main ayant tenu l'outil pour les pièces utilisées de la main préférentielle, lorsqu'ils sont inclus dans l'analyse.** Cependant, nous pouvons penser que l'utilisation des outils de la main non préférentielle paraît peu probable en contexte archéologique, si l'individu utilisant l'outil dispose d'une main préférentielle et donc plus spécialisée. Il ne serait donc pas incohérent de postuler au départ, pour la construction du modèle, que les utilisateurs (de la Préhistoire) n'ont pas utilisé leur main non préférentielle.

Toutefois, une majorité des participants pour les deux séries d'expérimentation a exprimé une fatigue et des douleurs à la main durant l'activité de sciage. La tâche répétitive endolorissait leur main, leur donnant envie d'en changer, mais le contrôle des variables liées à l'expérimentation a rendu impératif l'utilisation de la même main tout au long de l'expérimentation. Réaliser une tâche de sciage à l'aide d'une lame en silex n'est plus une tâche habituelle de nos jours, ce qui pourrait expliquer ce besoin de changer de main chez les expérimentateurs. En contexte archéologique il est envisageable que les utilisateurs des outils aient utilisé leurs deux mains en cas de douleur ou de fatigue, ce qui complexifierait encore l'identification des outils utilisés d'une main ou de l'autre. D'autre part, même si des

différences conséquentes entre les traces produites par une utilisation de l'outil de la main droite ou de la main gauche étaient identifiées, un assemblage archéologique resterait très difficile à analyser par les seules traces d'utilisation, étant donné qu'un même outil a pu servir à des activités diverses, être utilisé à plusieurs reprises et par des individus différents. De plus, **cela n'indiquerait que le choix d'une main pour un type de tâche, pas nécessairement la préférence manuelle de l'utilisateur.**

La préférence manuelle d'un individu et la main utilisée pour une tâche donnée peuvent en effet être différentes. Lors de l'expérimentation réalisée en 2017, l'individu 1 s'était par exemple décrit comme gaucher puisqu'il utilise la main gauche pour écrire, cependant il a privilégié sa main droite pour réaliser la tâche de sciage de bois pendant toute la séance.

Cela ajouté à la grande variabilité des traces entre les outils utilisés par des personnes de même préférence manuelle avec des mains différentes, **il paraît préférable de parler de la détermination de la main ayant utilisé l'outil plutôt que de la préférence manuelle de l'utilisateur.**

4.3 IDENTIFICATION DE LA FACE EXTERNE DE L'OUTIL AU MOMENT DE SON UTILISATION

En contexte archéologique, la façon dont l'outil a été tenu est inconnue. La tracéologie permet d'identifier les zones de l'outil ayant été utilisées et d'élaborer des hypothèses quant aux modes de préhension potentiels de l'outil. Une étude quantitative des traces d'utilisation pourrait fournir de précieuses informations sur l'orientation de l'objet lors de son utilisation et sur la main ayant manié l'outil.

Etant donné la petite taille de l'échantillon, la base de données a été analysée par des statistiques descriptives. Des tests statistiques non paramétriques ont aussi été appliqués afin de tester la significativité des tendances observées mais la quasi-totalité des différences entre les faces internes et externes se sont révélées non significatives. Cela peut s'expliquer par la trop petite taille du corpus. Dans ce sens, une analyse des données à partir des statistiques descriptives à tout de même été proposée pour tester la bonne détermination de la face externe par l'analyse des paramètres d'intérêts. Ainsi **la face externe des outils du corpus a pu être identifiée dans 87.5% des cas, avec des probabilités comprises entre 52% et 80%.**

Cela constitue un résultat encourageant qui pourrait encore être amélioré par l'identification d'autres paramètres discriminants la face externe de la face interne. Ces résultats démontrent aussi que bien que non significatifs, les paramètres testés ne doivent pas forcément être mis de côté, plutôt testés sur un plus grand nombre d'outils.

Les résultats n'ont **pas permis d'identifier de caractère spécifique permettant la détermination de la face externe qui soit statistiquement significatif.**

Si le choix de la face externe (dorsale ou ventrale) dépend de la main utilisée et que la face externe est identifiée, la main ayant utilisé l'outil pourrait être déterminée en contexte archéologique. Ici, les utilisateurs droitiers utilisant l'outil de la main droite semblent préférer placer la face dorsale en externe (pour 11 outils sur 16) et les gauchers la face ventrale (5 outils sur 8), tout comme lors d'une utilisation de la main non préférentielle (6 outils sur 8). Cependant, ces observations se rapprochent d'un choix aléatoire de la face externe par les utilisateurs, qui ne serait donc pas influencé par la préférence manuelle ou la main utilisant l'outil.

Si la face externe de la pièce est connue, **identifier l'avant et l'arrière de l'outil au moment de son utilisation permettrait de déterminer la main ayant utilisé l'outil**. La méthode mise en place dans cette étude pourrait permettre d'identifier des paramètres spécifiques aux traces sur la première moitié du tranchant de l'outil et sur la seconde moitié, par exemple en scindant la base de données en deux parties : une première partie rassemblant les données relatives aux traces situées entre 0% et 50% du tranchant, et une seconde partie les traces localisées entre 51% et 100% du tranchant. L'application de la méthode sur ces deux bases de données distinctes pourrait permettre de mettre en évidence des paramètres spécifiques à l'avant et l'arrière de l'outil.

L'analyse des traces (particulièrement, les types d'orientation et de terminaison des micro-écaillures) selon leur distance par rapport aux extrémités du tranchant pourraient informer sur **la direction du mouvement lors de l'utilisation**.

L'étude de paramètres relatifs aux stries d'utilisation, qui permettent notamment d'indiquer le sens du mouvement lors de l'utilisation de l'outil, pourrait être intégrée au modèle et apporter des informations pertinentes quant à la détermination de l'orientation de l'outil et la direction du mouvement au moment de l'utilisation. Ce type de trace n'a cependant pas été documenté de façon systématique car il s'est avéré qu'après nettoyage, la surface des outils ne portait que de très rares stries pouvant être reliées à l'utilisation.

4.4 INFLUENCE DES PARAMETRES INDIVIDUELS ET DES PARAMETRES LIES A L'OUTIL SUR LES RESULTATS

Dans le cadre de cette étude, les paramètres liés à la tâche effectuée étaient contrôlés mais les outils n'étaient pas standardisés. Cela implique une influence potentielle de **variables liées à l'outil** sur les traces observées, telles que **la forme et la taille de l'objet**. En effet, la taille de l'outil pourrait avoir un impact sur la dimension des micro-écaillures ou la distribution des traces sur le tranchant. On pourrait supposer qu'un petit tranchant concentrerait moins de micro-écaillures qu'un grand du fait de sa largeur, cependant une petite taille impliquerait davantage de friction sur le tranchant car la tâche est la même pour une longueur de bord plus petite. Le mouvement s'effectue donc plus rapidement et créerait des micro-écaillures potentiellement aussi nombreuses, peut-être chevauchantes. La distribution des traces sur le tranchant d'un outil plus petit s'étendrait potentiellement sur un plus grand pourcentage de la longueur du tranchant en raison de sa petite taille. C'est aussi pour limiter l'influence de ces variables sur les résultats que nous avons comparé les « tendances » de ces résultats (e.g. : comparaison des faces en fonction de celle qui a le plus ou le moins de micro-écaillures, peu importe la différence entre le nombre de micro-écaillures entre les deux faces) en plus des valeurs absolues.

De plus, la distinction entre une écaillure due à une retouche ou à une utilisation de l'outil reste complexe. Le modèle, en cours de développement dans cette étude, devra inclure des outils retouchés afin de vérifier si la retouche modifie ou non les résultats de détermination de la main tenant l'outil.

La forme de l'objet pourrait de même avoir des conséquences sur les traces car elle influence le mode de préhension de l'outil et donc la portion du tranchant qui va être utilisé. Les bords des outils plus fins sont aussi susceptibles de se fracturer plus facilement. Les coordonnées des traces le long des tranchants ont été relevées par « projection » du bord sur l'axe des abscisses (dans la grille d'orientation de l'outil). Ce mode de mesure ne prend pas en compte les irrégularités du tranchant. Un test avait été réalisé dans le cadre d'un travail antérieur (expérience de laboratoire de Master 1). pour évaluer la différence entre les coordonnées des traces relevées par projection et une localisation le long du bord : aucune différence notable n'avait été mise en évidence, bien que la délinéation de l'outil testé ait été très irrégulière. C'est pourquoi le choix a été fait de localiser les traces par projection dans le bus de simplifier le processus d'acquisition des données. **Cependant, un indice de délinéation pourrait être créé et inclus** dans le modèle (longueur du tranchant mesurée le

long du bord divisée par la longueur du tranchant en projection), avec une limite au-dessus de laquelle un biais dû à la délinéation du tranchant fausserait les localisations des traces. Au-dessus de cette limite, les traces devraient être localisées le long du bord et non en projection.

La force de l'expérimentateur pourrait avoir une influence importante sur les traces d'utilisation. « L'efficacité » de l'utilisateur dans la tâche effectuée pourrait aussi influencer les traces, notamment l'envahissement des stigmates le long du tranchant : plus l'utilisateur est efficace, plus la baguette de bois est sciée en profondeur et plus le tranchant de l'outil est altéré loin du bord. Un utilisateur efficace pourrait donc produire des traces plus envahissantes. Une étude des traces sur les baguettes de bois sciées permettrait d'établir ou non une corrélation entre ces deux paramètres. L'analyse morphométrique des mains des utilisateurs (les circonférences et longueurs des doigts ayant été relevés ainsi que les mesures et contours de la main) pourrait être réalisée afin de tester la corrélation avec les traces d'utilisation. Une expérimentation où les individus utiliseraient plusieurs outils chacun (de la même main) pourrait aussi être réalisée afin de tester l'influence des paramètres individuels sur la formation des traces. Un tel type d'étude a déjà été réalisée dans le cadre du projet PrémHo pas Alice Rodriguez, pour l'étude des micro-écaillures : l'influence des paramètres individuels s'était en effet révélée prépondérante sur la formation des traces.

La plupart des expérimentateurs de cette étude étaient des débutants et n'avaient pas de connaissance spécifique en technologie lithique. Cette absence d'expérience peut avoir eu un impact sur la manipulation de l'outil pendant l'utilisation. A la préhistoire, l'ubiquité de ce type d'activité et d'outils pourrait laisser supposer un savoir-faire et une transmission de ce savoir d'une façon ou d'une autre, donc une certaine standardisation dans l'utilisation et la technique de préhension. Dans le cadre des expérimentations, **une utilisation et un maintien personnel de l'outil ont pu influencer la production de traces spécifiques à chaque utilisateur et augmenter la variabilité des traces potentiellement liées à la main ayant utilisé l'outil.** Il serait intéressant de réaliser une expérimentation avec seulement des utilisateurs ayant déjà utilisé des outils préhistoriques à plusieurs reprises et ayant des connaissances en technologie lithique, pour permettre une sorte de régularisation de l'utilisation et de la préhension. Dans le cadre de l'expérimentation de 2018, le mode de maintien de l'outil avait été imposé afin d'éviter la grande variabilité de posture et de préhension, mais en général les utilisateurs n'étaient pas à l'aise avec ce mode de préhension « contraint » (naturellement adopté par les experts), peut-être par manque d'expérience.

4.5 PERSPECTIVES METHODOLOGIQUES

Ce travail a donc permis de localiser et de caractériser quantitativement les polis, micro-écaillures et résidus sur les tranchants d'outils en pierre par le biais d'une nouvelle méthode d'acquisition, de visualisation et d'analyse des traces. L'applicabilité et le potentiel de cette méthode ont été testés sur un panel de 16 à 32 outils (selon les types de traces), pour tenter d'identifier la main ayant tenu l'outil durant son utilisation. **Une étude statistique sur un plus grand panel d'outil est essentielle afin d'estimer si les différences observées entre les outils utilisés de la main droite ou gauche sont réellement une conséquence de l'utilisation de l'outils par une main ou l'autre. Plusieurs tests à l'aveugle sont également nécessaires avant de valider ou non le modèle.**

Une base de données statistiquement représentative des stigmates devra être réalisée pour des outils ayant été utilisés dans d'autres tâches et avec d'autres matières utilisées, pas seulement pour le sciage de bois, et pour différents types d'outils (racloirs, grattoirs...). Les stigmates seront en effet potentiellement très différents en fonction de la combinaison de ces paramètres.

Pour la caractérisation des polis d'utilisation, relever les mesures et les localisations des traces sur une image du tranchant complet serait idéal, au lieu d'images des polis individuels qui compliquent la géolocalisation des traces et le traitement dans le logiciel QGIS. Des systèmes automatisés produisant des mosaïques de qualité et de grandes dimensions comme certains microscopes interférométriques pourraient solutionner cette difficulté. Ces systèmes sont cependant encore rares et difficiles d'accès, notamment à cause de leur coût. La méthode proposée avec le microscope numérique Hirox est certes plus laborieuse mais permet d'obtenir des résultats satisfaisant, tout en restant relativement accessible.

Pour la localisation des micro-écaillures, celles qui se chevauchent ont fait l'objet d'une localisation groupée pour ne pas biaiser les mesures en pourcentage du tranchant et rendre moins complexe le traitement des données. Des mesures spécifiques de la localisation de chaque micro-écaillure pourraient toutefois donner une meilleure représentation de la dispersion sur le tranchant. Les mesures étaient certes moins subjectives mais peut-être moins représentatives de l'intensité des altérations, car cette méthode implique de ne pas prendre en compte les aires des micro-écaillures qui se superposent. Les zones ayant subi plusieurs

enlèvements sont alors représentées de la même manière que les zones à enlèvement unique ce qui constitue une perte d'information. De futurs tests permettraient de vérifier si cette information est porteuse de sens quant à l'identification de la main ayant utilisé l'outil. Le pourcentage de la longueur du tranchant altérée par les micro-écaillures pourrait aussi être un paramètre intéressant à analyser.

L'étude combinée des trois types de traces (résidus, polis et micro-écaillures), notamment de leur organisation le long du tranchant, pourrait aussi apporter des informations intéressantes, par exemple en superposant graphiquement les répartitions des trois types de traces pour chaque tranchant d'outil et en réalisant des ACP.

La méthode de caractérisation quantitative des traces mise en place pourra être utilisée dans d'autres études que l'identification de la main ayant utilisé l'outil. La base de données référentielle constituée ici pourrait être utile dans toute étude impliquant des outils ayant scié du bois, par exemple, elle pourrait constituer un corpus référentiel pour une analyse de variabilité des traces sur les outils ayant scié du bois. Il pourrait aussi être intéressant d'utiliser la base de données dans l'étude de la différenciation des traces dues à une activité de sciage et de raclage, en étudiant la répartition des traces sur les deux faces de l'outil pour mettre en évidence des spécificités dues aux angles de contact. La méthode mise en place ne servirait donc pas seulement à caractériser la préférence manuelle des utilisateurs d'outils en pierre, mais pourra être **applicable dans toute étude tracéologique pour une description quantifiée des traces et de leurs localisations.**

5. CONCLUSION

Pour conclure, cette étude a permis de mettre en place, d'appliquer, de tester et d'évaluer une nouvelle méthode d'analyse quantitative (et qualitative) des traces pour l'identification de la main ayant utilisé l'outil. Pour les 8 outils testés (tenus de la main préférentielle), la main utilisée a été identifiée avec une probabilité de 87% (+/- 10.32%). Ce résultat étant inférieur à 90%, seuil que nous nous sommes préalablement fixé pour considérer ce modèle expérimental comme satisfaisant, il est nécessaire de poursuivre l'analyse de ces données pour déterminer de nouveaux paramètres de classification. Les résultats restent néanmoins encourageants et démontrent le potentiel de la méthode et de certains paramètres testés.

Bien-sûr, il est important maintenant de confirmer ces résultats et de les améliorer en intégrant plus de pièces à la base de données et en testant plus d'outils. Un échantillon regroupant au minimum 50 outils utilisés de la main gauche et 50 outils utilisés de la main droite permettrait de mieux tester les limites du modèle. Il faudrait aussi évaluer précisément l'influence des paramètres individuels (expérience de l'individu, force, taille de la main, poids...), des paramètres liés à l'outil (forme, taille, matériau...) et à la matière travaillée sur la formation des traces en réalisant de nouvelles expérimentations. Connaître l'influence de ces variables sur la formation des traces permettra de recontextualiser peu à peu le modèle vers les conditions d'un assemblage archéologique.

L'identification de la face externe des outils doit devenir une problématique à part entière du modèle. Si la face externe peut être déterminée, cela ouvrirait de nouvelles possibilités pour la détermination correcte de la main ayant utilisé l'outil, par exemple, en déterminant l'avant et l'arrière de l'outil ou le sens du mouvement au moment de l'utilisation. Ces deux dernières hypothèses pourraient être testées en appliquant la méthode de localisation des traces développée ici, par exemple pour analyser la distance entre les traces selon leurs caractéristiques (en particulier le type d'orientation et de terminaison des micro-écaillures) et les extrémités du tranchant, ou en comparant les caractéristiques des traces sur la première moitié du tranchant et les traces situées sur la deuxième moitié. Dans cette étude, la face externe des outils a pu être identifiée dans 14 cas sur 16, avec des probabilités cependant non significatives.

Enfin, la base de données référentielles constituée pourrait être utile dans toute analyse de traces sur des outils ayant scié du bois. Il pourrait être intéressant d'utiliser ce référentiel dans l'étude de la distinction des traces dues à une activité de raclage et de sciage, ou bien pour une analyse de la variabilité des traces sur les outils ayant scié du bois. De plus, la méthode d'acquisition et d'analyse développée ici n'est pas spécifique à l'identification de la préférence manuelle des utilisateurs d'outils en pierre, mais pourra être appliquée dans toute étude des traces pour une description quantifiée des traces et de leur localisation.

BIBLIOGRAPHIE

ANNETT M. 1985. *Left, Right, Hand and Brain: the Right Shift Theory*. Lawrence Erlbaum Associates, London, 474p.

ARSLAN O. E. 2016. Computational Basis of Neural Elements. In: Puri M., Pathak Y., Sutariya V. K., Tipparaju S., Moreno W. (dir.). *Artificial Neural Network for Drug Design*. Academic Press, 29-82.

BALZEAU A., GILISSEN E., GRIMAUD-HERVE D. 2012. Shared Pattern of Endocranial Shape Asymmetries among Great Apes, Anatomically Modern Humans, and Fossil Hominins [en ligne]. *PloS ONE* 7(1), e29581 [Consulté le 7/11/2018]. URL : doi:10.1371/journal.pone.0029581

BARDO A., POUYDEBAT E., MEUNIER H. 2015. Do bimanual coordination, tool use, and body posture contribute equally to hand preferences in bonobos? *Journal of Human Evolution*, 82, 159-169.

BARGALLÓ A., MOSQUERA M. 2014. Can hand laterality be identified through lithic technology? Laterality: Asymmetries of Body. *Brain and Cognition*, 19, 37-63.

BARGALLÓ A., MOSQUERA M., LORENZO C. 2018. Identifying handedness at knapping; an analysis of the scatter pattern of lithic remains. *Archaeological and Anthropological Sciences*, 10, 587-598.

BARGALLÓ A., MOSQUERA M., LOZANO S. 2017. In pursuit of our ancestors' hand laterality. *Journal of Human Evolution*, 111, 18-32.

BERMUDEZ DE CASTRO J. M., BROMAGE T., FERNANDEZ-JALVO Y. 1988. Buccal striations on fossil human anterior teeth: evidence of handedness in the middle and early Upper Pleistocene. *Journal of Human Evolution*, 17, 403-412

BOREL A., CHÈZE L., POUYDEBAT E. 2017. Sequence Analysis of Grip and Manipulation During Tool Using Tasks: a New Method to Analyze Hand Use Strategies and Examine Human Specificities. *Journal of Archaeological Method and Theory*, 24, 751-775.

BRACCINI S., CAINE, N. G. 2009. Hand preference predicts reactions to novel foods and predators in marmosets (*Callithrix geoffroyi*). *Journal of Comparative Psychology*, 123(1), 18-25.

BRACCINI S., LAMBETH S., SCHAPIRO S., FITCH W. T. 2010. Bipedal tool use strengthens chimpanzee hand preferences. *Journal of Human Evolution*, 58(3), 234-241.

BRADSHAW J.L. 1991. Animal asymmetry and human heredity: Dextrality, tool use and language in evolution—10 years after Walker (1980). *British Journal of Psychology*, 82(1), 39-59.

CABANES J. 2018. *Initiation à la tracéologie : traces d'utilisation et préférence manuelle. Développement d'une nouvelle méthode d'analyse des résidus et micro-fractures issus d'une expérimentation de sicage de bois par des gauchers et des droitiers*. Mémoire de Master 1, Muséum National d'Histoire Naturelle.

CAHEN D., KEELEY L.H., VAN NOTEN F.L. 1979. Stone tools, toolkits, and human behavior in prehistory. *Current Anthropology*, 20, 661-683.

CANNING C., CRAIN D., EATON T. S., NUESSELY K., FRIEDLAENDER A., HURST T., PARKS S., WARE C., WILEY D., WEINRICH M. 2011. Population-level lateralized feeding behaviour in North Atlantic humpback whales, *Megaptera novaeangliae*. In: *Animal Behaviour*, 82, 901-909.

CLOT A., MENU M., WALTER P. 1995. Manières de peindre des mains à Gargas et Tibiran (Hautes-Pyrénées). *L'Anthropologie*, 99(2/3), 221-225.

CORBALLIS M. C. 1987. Straw monkeys. *Behavioral and Brain Sciences*, 10, 169-270.

CORBALLIS M. C. 2003. From mouth to hand: gesture, speech, and the evolution of right handedness. *Behavioral and Brain Sciences*, 26, 199-208.

CRAST J., FRAGASZY D., HAYASHI M., MATSUZAMA T. 2009. Dynamic in-hand movements in adult and young juvenile chimpanzees (*Pan troglodytes*). *American Journal of Physical Anthropology*, 138, 274-285.

DELLUC B., DELLUC G. 1993. Images de la main dans notre préhistoire. *Les dossiers d'archéologie*, 178, 32-45.

D'ERRICO F. 1988. A study of Upper Paleolithic and Epipalaeolithic engraved pebbles, In: OLSEN, S.L. (Ed.), *Scanning electron microscopy in archaeology*, B.A.R. International Series 452, Oxford, 169-184.

EUSTACHE F., LECHEVALIER B., VIADEZ F. 2008. *Traité de neuropsychologie clinique. Neurosciences cognitives et cliniques de l'adulte*. De Boeck Supérieur, Paris, 1016p.

FAGOT J., VAUCLAIR, J. 1991. Manual laterality in nonhuman primates: A distinction between handedness and manual specialization. *Psychological Bulletin*, 109, 76-89.

FIGLIO I., BONDIOLI L., RADOVICIC J., FRAYER D. W. 2015. Handedness in the Krapina Neandertals: A Re-Evaluation. *PaleoAnthropology*, 19-36.

FITCH W. T., BRACCINI S. N. 2013. Primate laterality and the biology and evolution of human handedness: a review and synthesis. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1288, 70-85.

FORRESTER G. S., QUARESMINI C., LEAVENS D. A., VALLORTIGARA G. 2011. Target animacy influences gorilla handedness. *Animal Cognition*, 14(6), 903-907.

FORRESTER G. S., QUARESMINI C., LEAVENS D. A., MARESCHAL D., THOMAS M. S. C. 2013. Human handedness: an inherited evolutionary trait. *Behavioural Brain Research*, 237, 200-206.

FORTUYN J. D. 1982. On the organization of spatial behaviour. *Human Neurobiology*, 2, 145-151.

FRAYER D. W., CLARKE R. J., FIGLIO I., BLUMENSCHINE R. J., PEREZ-PEREZ A., MARTINEZ L. M., ESTEBARANZ F., HOLLOWAY R., BONDIOLI L. 2016. OH-65: The earliest evidence for right-handedness in the fossil record. *Journal of Human Evolution*, 100, 65-72.

GÜNTÜRKÜN O. 1997. Avian visual lateralization: A review. *Neuroreport: An International Journal for the Rapid Communication of Research in Neuroscience*, 8(6), 3-11.

HARDWICK R. M., ROTTSCHY C., MIALL C., EICKHOFF S. B. 2013. A quantitative meta-analysis and review of motor learning in the human brain. *NeuroImage*, 67, 283-297.

HARMAND S., LEWIS J.E., FEIBEL C.S., LEPRE C.J., PRAT S., LENOBLE A., BOËS X. QUINN R.L., BRENET M., ARROYO A., TAYLOR N., CLEMENT S., DAVER G., BRUGAL J. P., LEAKEY L., MORTLOCK R. A., WRIGHT J. D., LOKORODI S., KIRWA C., KENT D. V., ROCHE H. 2015. 3.3-million-year-old stone tools from Lomekwi 3, West Turkana, Kenya. *Nature*, 521, 310-315.

HOPKINS W. D., PHILLIPS K. A., BANIA A., CALCUTT S. E., GARDNER M., RUSSELL J., SCHAEFFER J., LONSDORF E. V., ROSS S. R., SCHAPIRO S. J., 2011. Hand preferences for coordinated bimanual actions in 777 great apes: implications for the evolution of handedness in hominins. *Journal of human evolution*, 60(5), 605-611.

JOBSON R. W. 1986. Stone tool morphology and rabbit butchering. *Lithic Technology*, 15(1), 9-20.

KEELEY L. H. 1977. The functions of Paleolithic flint tools. *Scientific American*, 237, 108-126.

KEERTHIPRIYA P., TEWARI R., VIDYA T. N. C. 2015. Lateralization in trunk and forefoot movements in a population of free-ranging Asian elephants (*Elephas maximus*). *Journal of Comparative Psychology*, 129, 377-387.

KEY A. J. M., LYCETT S. J. 2018. Investigating interrelationships between lower Palaeolithic stone tool effectiveness and tool user biometric variation: Implications for technological and evolutionary change. *Archaeological and Anthropological Sciences*, 10(5), 989-1006.

KING J. E., LANDRAU V. I. 1993. Manual preference in varieties of reaching in squirrel monkeys. In: WARD J. P. and HOPKINS W. D. (Eds.), *Primate laterality. Current behavioural evidence of primate asymmetries*. Springer-Verlag, New-York, 107-124.

LLORENTE M., FABRÉ M., MOSQUERA M. 2008. Lateralización cerebral en chimpancés: una aproximación filogenética al estudio del cerebro humano. *Estudios de Psicología*, 29(2), 147-161.

LOZANO M., MOSQUERA M., BERMUDEZ J. M., ARSUAGA J.L., CARBONELL E. 2009. Right handedness of *Homo heidelbergensis* from Sima de los Huesos (Atapuerca, Spain) 500,000 years ago. *Evolution of Human Behaviour*, 30, 369-376.

MACNEILAGE P.F., STUDDERT-KENNEDY M.G., LINDBLOM B. 1987. Primate handedness reconsidered. *Behavioral and Brain Sciences*, 10(2), 247-263.

MEGUERDITCHIAN A., CALCUTT S. E., LONSDORF E. V., ROSS S. R., HOPKINS W. D. 2010. Captive gorillas are right-handed for bimanual feeding. *American Journal of Physical Anthropology* 141(4), 638.

MOSQUERA M., GERIBÀS N., BARGALLÓ A., LLORENTE M., RIBA, D. 2012. Complex tasks force hand laterality and technological behaviour in naturalistically housed

chimpanzees: inferences in hominin evolution [en ligne]. *The Scientific World Journal* [Consulté le 18 /10/2018]. URL : <https://www.hindawi.com/journals/tswj/2012/514809/>

OLSON, D. A., ELLIS J. E., NADLER R. D. 1990. Hand preferences in captive gorillas, orangutans and gibbons. *American Journal of Primatology*, 20, 83–94.

PATTERSON L.W., SOLLBERGER J.B. 1986. Comments on Toth's right-handedness study. *Lithic Technology*, 15, 109-111.

PRASCIUNAS M. M. 2007. Bifacial cores and flake production efficiency: An experimental test of technological assumptions. *American Antiquity*, 72(2), 334-48.

POBINER B.L. 1999. The use of stone tools to determine handedness in hominids. *Current Anthropology*, 40, 90-92.

POUYDEBAT E., BOREL A., CHOTARD H., FRAGASZY D. 2014. Hand preference in fast-moving versus slow-moving actions in capuchin, *Sapajus spp.*, and squirrel monkeys, *Saimiri sciureus*. *Animal Behaviour*, 97, 113-123.

POUYDEBAT E., REGHEM E., GORCE P., BELS V. 2010. Influence of the task on hand preference: individual differences among gorillas (*Gorilla gorilla gorilla*). *Folia Primatologica*, 81(5), 273-281.

POZA-REY E. M., LOZANO M., ARSUAGA J. L. 2015. Brain asymmetries and handedness in the specimens from the Sima de los Huesos site (Atapuerca, Spain). *Quaternary International*, 433, 32-44.

QUARESMINI C., FORRESTER G. S., SPIEZIO C., VALLORTIGARA G. 2014. Social environment elicits lateralized behaviours in gorillas (*Gorilla gorilla gorilla*) and chimpanzees (*Pan troglodytes*). *Journal of Comparative Psychology*, 128(3), 276-284.

REGHEM E. 2012. *Stratégies comportementales et cinématiques de la préhension chez les primates*. Thèse, Aix-Marseille Université.

RODRIGUEZ A. 2016. *Traces d'utilisation et préférence manuelle : étude des micro-fractures issues d'une expérimentation de sciage de bois en conditions contrôlées par des gauchers et des droitiers*. Mémoire de Master 2, Muséum National d'Histoire Naturelle.

ROGERS L. J. 2009. Hand and paw preferences in relation to the lateralized brain. *Philosophical Transactions of the Royal Society B. Biological Sciences*, 364, 943-954.

RUCK L., BROADFIELD D.C., BROWN C.T. 2015. Determining hominid handedness in lithic debitage: a review of current methodologies. *Lithic Technology*, 40(3), 171-188.

RUGG G., MULLANE M. 2001. Inferring handedness from lithic evidence, Laterality: Asymmetries of Body. *Brain and Cognition*, 6, 247-259.

SANFORD C., GUIN K., WARD J.P. 1984. Posture and laterality in the bushbaby (*Galago senegalensis*). *Brain, Behavior and Evolution*, 25(4), 217-224.

SEMENOV S.A. 1964. *Prehistoric Technology : an experimental study of the oldest tools and artefacts from traces of manufacture and wear.* Adams & Mackay, London, 211p.

SPINOZZI G., GRAZIA CASTORINA M., TRUPPA V. 1998. Hand Preferences in Unimanual and Coordinated-Bimanual Tasks by Tufted Capuchin Monkeys (*Cebus apella*). *Journal of Comparative Psychology*, 112, 183-191

STEELE J. 2000. Handedness in past human populations: skeletal markers. *Laterality: Asymmetries of Body, Brain and Cognition*, 5, 193-220.

STEELE J., UOMINI N. 2005. Humans, tools and handedness. In: Roux V. & Brit B., *Stone knapping: the necessary conditions for a uniquely hominin behaviour.* David Brown Book CO., Oakville, 217-239.

THOT N. 1985. Archaeological evidence for preferential right-handedness in the Lower and Middle Pleistocene, and its possible implications. *Journal of Human Evolution*, 14, 607-614.

UOMINI N. 2009. The prehistory of handedness: Archaeological data and comparative ethology. *Journal of Human Evolution*, 57, 411-419.

UOMINI N., GOWLETT J. A. 2013. Prehistoric handedness, tools and language. In : De Beaune S. A. Coolidge F. L., Wynn T. *The emergence of cognitive abilities, the contribution of neuropsychology to archaeology.* Editors: Cambridge University Press, Cambridge, 37-55.

UOMINI N., MEYER T., FRIEDRICH G. 2013. *Shared Brain Lateralization Patterns in Language and Acheulean Stone Tool Production: A Functional Transcranial Doppler Ultrasound Study* [en ligne]. *PLoS ONE* 8(8), e72693 [Consulté le 2/11/2018]. URL : 10.1371/journal.pone.0072693

VAUCLAIR J., MEGUERDITCHIAN A., HOPKINS W. D. 2005. Hand preferences for unimanual and coordinated bimanual tasks in baboons (*Papio anubis*). *Cognitive Brain Research*, 25, 210-216.

WALKER P. L. 1978, Butchering and stone tool function. *American Antiquity*, 43(4), 710-15.

TABLES DES ILLUSTRATIONS

TABLE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Nombre d'extrémités du tranchant affectées par les résidus (par face). L : main gauche, R : main droite. En gris clair : outils pour lesquels aucune extrémité du tranchant n'est altérée par les résidus pour les deux faces, en gris foncé : outils pour lesquels une extrémité du tranchant est affectée par les résidus pour chaque face.....p.44

Tableau 2 : Pourcentage du tranchant portant des résidus, selon la préférence manuelle de l'utilisateur, la main utilisée et la face de l'outil (interne ou externe). L : main gauche, R : main droite. En gris : outils dont le pourcentage de longueur du tranchant altéré par les polis est supérieur à 80% pour au moins une face.....p.45

Tableau 3 : Envahissements moyens des résidus selon la préférence manuelle de l'utilisateur, de la main utilisée et la face (interne ou externe de l'outil). LL : outil utilisé de la main gauche par un gaucher, LR : outil utilisé de la main droite par un gaucher, RL : outil utilisé de la main gauche par un droitier, RR : outil utilisé de la main droite par un droitier.....p.47

Tableau 4 : Pourcentage de la longueur du tranchant altéré par les polis d'utilisation pour les faces externes et internes des outils. En gris foncé : outils avec un pourcentage de longueur du tranchant altéré supérieur à 80% et différents de 100%, en gris clair : outils avec un pourcentage de longueur du tranchant altéré égal à 100%.....p.52

Tableau 5 : Envahissements moyens des polis d'utilisation selon la préférence manuelle de l'utilisateur, de la main utilisée et la face (interne ou externe de l'outil). LL : outil utilisé de la main gauche par un gaucher, LR : outil utilisé de la main droite par un gaucher, RL : outil utilisé de la main gauche par un droitier, RR : outil utilisé de la main droite par un droitier.....p.54

Tableau 6 : Comparaison des pourcentages de longueur des tranchants altérés par les polis d'utilisation, entre les face externe et interne d'un même outil. En rouge : pourcentage supérieur pour la face interne que pour la face externe.....p.54

Tableau 7 : Localisation du début de la micro-écaillure la plus envahissante sur les tranchants des faces internes et externe des outils. Les longueurs des tranchants et localisation des début de micro-écaillures sur le tranchant sont converties en pourcentages. En gris : micro-écaillures localisées sur à moins de 10% du début/de la fin du tranchant.....p.59

Tableau 8 : Nombre de micro-écaillures par face d'outil. En rouge : outils dont la face interne présente plus de micro-écaillures que la face externe.....p.62

Tableau 9 : Envahissement de la micro-écaillure la plus envahissante des faces externe et interne pour chaque outil. En rouge : envahissement de la micro-écaillure la plus envahissante plus important pour la face interne que la face externe.....p.63

Tableau 10 : Combinaison des résultats après l'analyse des paramètres d'intérêt pour la détermination de la face externe de l'outil. En vert : détermination correcte de la face externe, en rouge : mauvaise détermination de la face externe, V : face ventrale de l'outil, D : face dorsale de l'outil.....p.66

Tableau 11 : Probabilité (en pourcentage) de classification de l'outils T001 pour chacune des quatre catégories définies selon la préférence manuelle de l'utilisateur et la main utilisée. En vert : probabilité maximale et classement correct de l'outil.....p.71

Tableau 12 : Probabilité (en pourcentage) d'identification de la préférence manuelle et de la main ayant tenu l'outil pour les 16 pièces LL : outil utilisé de la main gauche par un gaucher, LR : outil utilisé de la main droite par un gaucher, RL : outil utilisé de la main gauche par un droitier, RR : outil utilisé de la main droite par un droitier. En vert : probabilité maximale et classement correct de l'outil, en rouge : probabilité maximale et classement incorrect de l'outil.....p.72

Tableau 13 : Probabilité (en pourcentage) d'identification de la main ayant utilisé l'outil pour les 8 pièces. LL : outil utilisé de la main gauche par un gaucher, RR, outil utilisé de la main droite par un droitier. En vert : probabilité maximale et classement correct de l'outil.....p.73

Tableau 14 : Probabilité (en pourcentage) d'identification de la main ayant utilisé l'outil pour les 8 pièces. LL : outil utilisé de la main gauche par un gaucher, RR, outil utilisé de la main droite par un droitier. En vert : probabilité maximale et classement correct de l'outil.....p.73

Tableau 15 : Résultats du test k-NN pour les 16 outils issus de l'expérimentation de 2018 et pour la totalité des paramètres d'intérêt.....p.74

Tableau 16 : Résultats du test k-NN pour les 16 outils issus de l'expérimentation de 2018 pour les deux paramètres d'intérêt ayant le plus de potentiel.....p.74

Tableau 17 : Résultats du test k-NN pour les 8 outils issus de l'expérimentation de 2018 et utilisés de la main préférentielle des utilisateurs, pour les deux paramètres d'intérêt ayant le plus de potentiel.....p.75

Tableau 18 : Résultats du test k-NN pour les 8 outils issus de l'expérimentation de 2018 utilisés de la main préférentielle de l'utilisateur, pour les deux paramètres ayant le plus de potentiel.....p.75

TABLE DES FIGURES

Figure 1 : Chimpanzé utilisant un outil en pierre lors d'une tâche unimanuelle. ©Cyril Ruoso / Biosphoto.....p.11

Figure 2 : Positionnement d'un individu droitier lors de la première expérimentation (Százhalombatta, Hongrie). ©Lauriane Vieli.....p.21

Figure 3 : Outil utilisé par une droitrière avec la face interne tournée vers l'individu et la face externe tournée vers l'extérieur. ©Lauriane Vieli.....p.23

Figure 4 : Photographies macroscopiques des faces ventrale (à gauche) et dorsale (à droite) de l'outil T007. Les résidus à l'aspect brillant sont visibles à l'œil nu sur les tranchants.....p.24

Figure 5 : Panorama du tranchant de la face ventrale de l'outil T016. Photographies prises au microscope numérique Hirox RH-2000 équipé de la lentille MXB 2016 Z, au grossissement x40. La reconstitution du panorama a été réalisée dans le logiciel ICE en mode structuré.....p.26

Figure 6 : Tests d'éclairage pour l'acquisition des polis d'utilisation. A : lumière coaxiale totale, B : mélange de lumière coaxiale et annulaire (2^e cran de l'anneau de contrôle du microscope), C : mélange de lumière coaxiale et annulaire (5^e cran), D : lumière annulaire totale. Objectif MXB-5000REZ : Mid-Range : x200, équipement RH-2000, LED 255, vitesse d'obturation automatique, gamma contraste élevé, CV=1515,38µm.....p.27

Figure 7 : Panorama d'un poli sur la face dorsale de l'outil T009. Objectif MXB-5000REZ : Mid-Range : x200, microscope Hirox RH-2000.....p.28

Figure 8 : Grille de mesure avec des mailles espacées de 2500 µm, placée sur la photographie géoréférencée de la face ventrale de l'outil T003. En rouge : mesures de l'envahissement le long des mailles de la grille. QGIS 2.18.16.....p.30

Figure 9 : Polygone représentant la zone de résidus de la face dorsale de l'outil T001. QGIS 2.18.16.....	p.30
Figure 10 : Illustration des deux manières de relever la longueur des tranchants.....	p.31
Figure 11 : Documentation quantitative des micro-écaillures à l'aide de polygones superposés aux microenlèvements. Points oranges : localisation de début des micro-écaillures, points noirs : localisation de fin des micro-écaillures.....	p.32
Figure 12 : Description de l'orientation des micro-écaillures. © Alice Rodriquez.....	p.32
Figure 13 : Typologie de terminaison des micro-écaillures, définie par le Ho Ho Commitee (1979).....	p.33
Figure 14 : Représentation de la localisation du début et de la fin de chaque poli sur le tranchant d'un outil (dans la grille d'orientation) par de petits segments rouges. Encadré : zoom du tranchant dans le logiciel Inkscape.....	p.34
Figure 15 : Quadrillage aux mailles espacées de 100µm, superposées au panorama d'un poli dans le logiciel de l'Hirox. Segments blanc : mesures de l'envahissement des polis tous les 100µm le long des mailles de la grille.....	p.34
Figure 16 : Illustration des différents types de polis. Objectif MXB-5000REZ : Mid-Range : x200, microscope Hirox RH-2000. A : trame lâche, B : trame serrée, C : trame lâche près du bord et serrée en-dessous, D: trame serrée près du bord et lâche en-dessous, E : trame mixte, F : trame unie.....	p.35
Figure 17 : Photographie d'un poli éloigné du bord et d'un poli proche du bord, sur la face ventrale de l'outil T012. Objectif MXB-5000REZ : Mid-Range : x200, équipement Hirox RH-2000, LED 255.	p.35
Figure 18 : Représentations des envahissements des résidus en fonction de leurs distribution sur la longueur du tranchant (en pourcentage), selon la préférence manuelle de l'utilisateur et la main utilisée (droite ou gauche). En rose : face dorsale, en bleu : face ventrale. Graphique au-dessus de l'axe des abscisses : face interne, graphique en-dessous de l'axe des abscisses : face externe.....	p.42
Figure 19 : Représentations des moyennes des envahissements des résidus en fonction de leurs distribution sur la longueur du tranchant (en pourcentage), selon la préférence manuelle de l'utilisateur et la main utilisée (droite ou gauche). En rose : face externe, en bleu : face interne.....	p.43
Figure 20 : Moyennes des aires et des périmètres des zones de résidus pour les faces externes des outils, selon la préférence manuelle de l'utilisateur et la main ayant tenu l'outil . LL : outils utilisés de la main gauche par les gauchers, LR : outils utilisés de la main droite par les gauchers, RL : outils utilisés de la main gauche par les droitiers, RR : outils utilisés de la main droite par les droitiers.....	p.46
Figure 21 : Moyennes des aires et des périmètres des zones de résidus pour les faces internes des outils, selon la préférence manuelle de l'utilisateur et la main ayant tenu l'outil . LL : outils utilisés de la main gauche par les gauchers, LR : outils utilisés de la main droite par les gauchers, RL : outils utilisés de la main gauche par les droitiers, RR : outils utilisés de la main droite par les droitiers.....	p.46
Figure 22 : Représentations des envahissements des polis d'utilisation en fonction de leurs distribution sur la longueur du tranchant (en pourcentage), selon la préférence manuelle de l'utilisateur et la main utilisée (droite ou gauche). En rose : face dorsale, en bleu : face ventrale. Graphique au-dessus de l'axe des abscisses : face interne, graphique en-dessous de l'axe des abscisses : face externe.....	p.50
Figure 23 : Représentations des moyennes des envahissements des polis d'utilisation en fonction de leurs distribution sur la longueur du tranchant (en pourcentage), selon la préférence manuelle de l'utilisateur et la main utilisée (droite ou gauche). En rose : face externe, en bleu : face interne.....	p.51
Figure 24 : Distribution des polis éloignés du bord (en noir) vs. proches du bord (en rouge) selon que l'outil est tenu de la main préférentielle de l'utilisateur ou non.....	p.53

Figure 25: Pourcentage des types de trame de poli en fonction de la préférence manuelle de l'utilisateur et de la main ayant utilisé l'outil. LL : gaucher tenant l'outil de la main gauche, RR : droitier tenant l'outil de la main droite, LR : gaucher tenant l'outil de la main droite, RL : droitier tenant l'outil de la main gauche.p.53

Figure 26: Représentations des envahissements des micro-écaillures en fonction de leur distribution sur la longueur du tranchant (en pourcentage), selon la préférence manuelle de l'utilisateur et la main utilisée (droite ou gauche). En rose : face dorsale, en bleu : face ventrale. Graphique au-dessus de l'axe des abscisses : face interne, graphique en-dessous de l'axe des abscisses : face externe.....p.56

Figure 27: Représentations des moyennes des envahissements des micro-écaillures en fonction de leur distribution sur la longueur du tranchant (en pourcentage), selon la préférence manuelle de l'utilisateur et la main utilisée (droite ou gauche). En rose : face externe, en bleu : face interne.....p.57

Figure 28: Taux de micro-écaillures pour les trois types d'orientation (« vers l'arrière », « perpendiculaire », « vers l'avant ») selon la préférence manuelle de l'utilisateur et la main utilisée, pour les faces externes. LL : outils utilisés de la main gauche par les gauchers, LR : outils utilisés de la main droite par les gauchers, RL : outils utilisés de la main gauche par les droitiers, RR : outils utilisés de la main droite par les droitiers.....p.60

Figure 29: Taux de micro-écaillures pour les trois types d'orientation (« vers l'arrière », « perpendiculaire », « vers l'avant ») selon la préférence manuelle de l'utilisateur et la main utilisée, pour les faces internes. LL : outils utilisés de la main gauche par les gauchers, LR : outils utilisés de la main droite par les gauchers, RL : outils utilisés de la main gauche par les droitiers, RR : outils utilisés de la main droite par les droitiers.....p.60

Figure 30: Taux de micro-écaillures pour les deux types de terminaison (« en escalier », « en plume ») selon la préférence manuelle de l'utilisateur et la main utilisée, pour les faces externes. LL : outils utilisés de la main gauche par les gauchers, LR : outils utilisés de la main droite par les gauchers, RL : outils utilisés de la main gauche par les droitiers, RR : outils utilisés de la main droite par les droitiers.....p.61

Figure 31: Taux de micro-écaillures pour les deux types de terminaison (« en escalier », « en plume ») selon la préférence manuelle de l'utilisateur et la main utilisée, pour les faces internes. LL : outils utilisés de la main gauche par les gauchers, LR : outils utilisés de la main droite par les gauchers, RL : outils utilisés de la main gauche par les droitiers, RR : outils utilisés de la main droite par les droitiers.....p.61

Figure 32: ACP combinant les données des deux faces de 16 outils utilisés de la main préférentielle de l'utilisateur, pour 6 variables. En rouge : outils utilisés de la main gauche par les gauchers, en vert : outils utilisés de la main droite par les gauchers, en bleu : outils utilisés de la main droite par les droitiers, en jaune : outils utilisés de la main gauche par les droitiers.....p.67

Figure 33: ACP combinant les données des deux faces de 8 outils utilisés de la main préférentielle de l'utilisateur (4 droitiers, 4 gauchers), pour 5 variables. En rouge : outils utilisés par les gauchers de la main gauche, en bleu : outils utilisés de la main droite par les droitiers.....p.68

Figure 34: ACP combinant les données des deux faces de 8 outils utilisés de la main préférentielle de l'utilisateur (4 droitiers, 4 gauchers), pour 3 variables. En rouge : outils utilisés par les gauchers de la main gauche, en bleu : outils utilisés de la main droite par les droitiers.....p.69

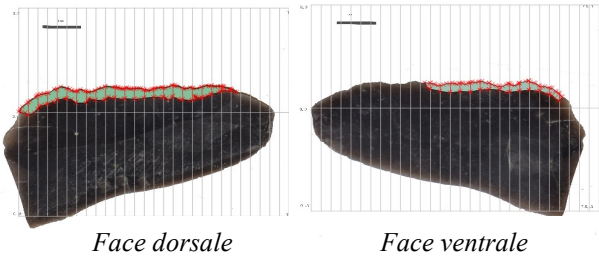
Figure 35: Analyse bi-variée pour les deux paramètres les plus discriminants identifiés. En rouge : outils utilisés de la main gauche par les gauchers, en bleu : outils utilisés de la main droite par les droitiers. Ext : face externe, Int : face interne.....p.69

TABLE DES ANNEXES

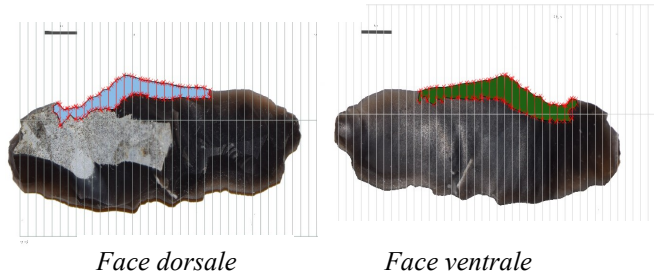
<u>Annexe 1</u> : Traitement des tranchants pour les deux faces de 32 outils dans le logiciel QGIS pour la caractérisation résidus.....	p.99
<u>Annexe 2</u> : Traitement des tranchants pour les deux faces des 16 outils issus de la seconde série expérimentale dans le logiciel QGIS pour la caractérisation micro-écaillures.....	p.102
<u>Annexe 3</u> : Liste des outils, indiquant la préférence manuelle de l'utilisateur, la main ayant utilisé l'outil et sa face externe (dorsale ou ventrale).....	p.104
<u>Annexe 4</u> : Tableau résumé des principaux résultats, selon la main utilisée et la préférence manuelle de l'utilisateur.....	p.105
<u>Annexe 5</u> : Probabilité d'observation des résultats suite à l'analyse des paramètres d'intérêt selon la préférence manuelle de l'utilisateur et de la main utilisée, pour les 16 outils issus de la seconde série expérimentale.....	p.107
<u>Annexe 6</u> : Tableaux récapitulatifs des calculs de probabilités de bonne identification de la main ayant utilisé l'outil et de la préférence manuelle de l'utilisateur, pour les 16 outils de la seconde série expérimentale.....	p.109
<u>Annexe 7</u> : Tableaux récapitulatifs des calculs de probabilités de bonne identification de la préférence manuelle de l'utilisateur, pour les 16 outils de la seconde série expérimentale.....	p.111
<u>Annexe 8</u> : Tableaux récapitulatifs des calculs de probabilités de bonne identification de la main ayant utilisé l'outil, pour les 16 outils de la seconde série expérimentale.....	p.112
<u>Annexe 9</u> : Probabilité d'observation des résultats suite à l'analyse des paramètres d'intérêt selon la préférence manuelle de l'utilisateur et de la main utilisée, pour les 24 outils utilisés de la main préférentielle.....	p.113
<u>Annexe 10</u> : Tableaux récapitulatifs des calculs de probabilités de bonne identification de la main ayant utilisé l'outil (5 paramètres testés), pour les 8 outils issus de la seconde série expérimentale utilisés de la main préférentielle.....	p.115
<u>Annexe 11</u> : Tableaux récapitulatifs des calculs de probabilités de bonne identification de la main ayant utilisé l'outil (2 paramètres testés), pour les 8 outils issus de la seconde série expérimentale utilisés de la main préférentielle.....	p.116

ANNEXE 1 - Traitement des tranchants pour les deux faces de 32 outils dans le logiciel QGIS pour la caractérisation résidus

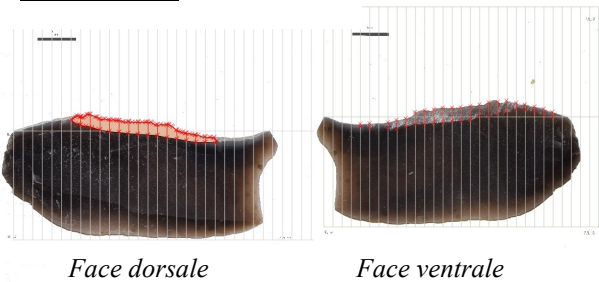
Outil T001 :



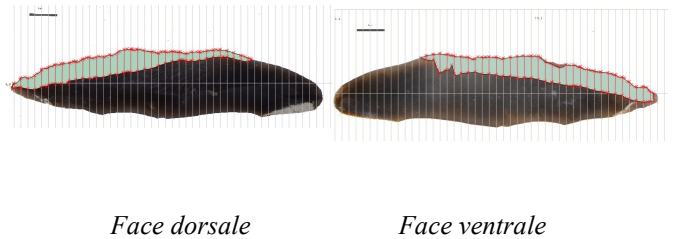
Outil T002 :



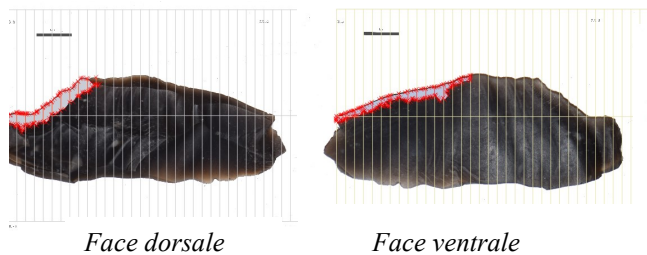
Outil T003 :



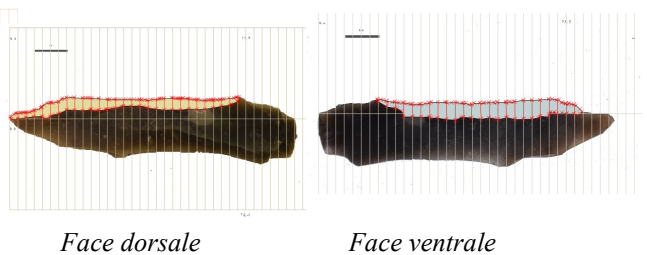
Outil T004 :



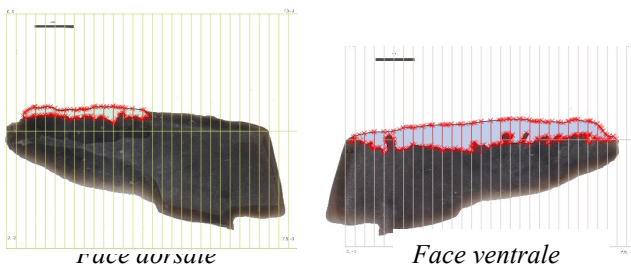
Outil T005 :



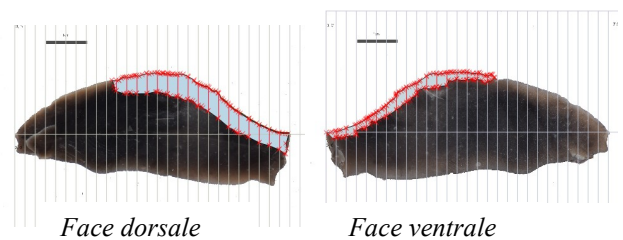
Outil T006 :



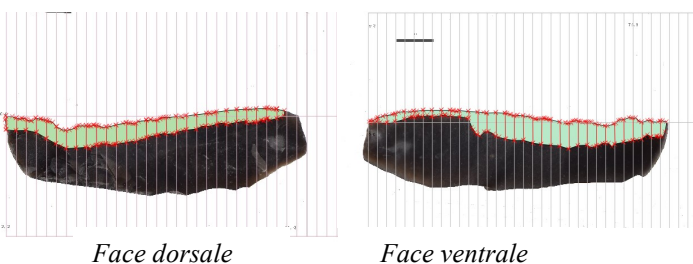
Outil T007 :



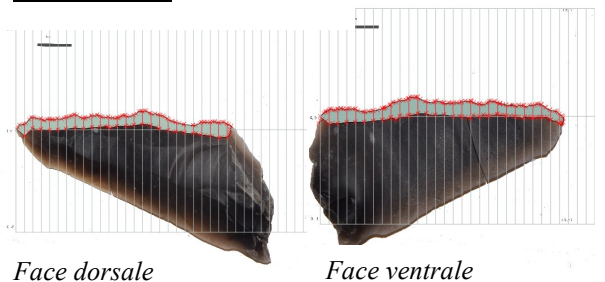
Outil T008 :



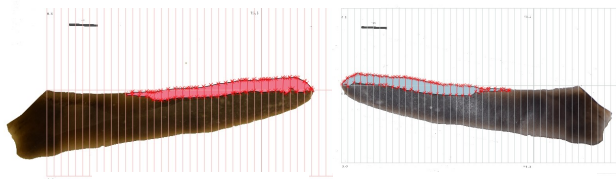
Outil T009 :



Outil T010 :



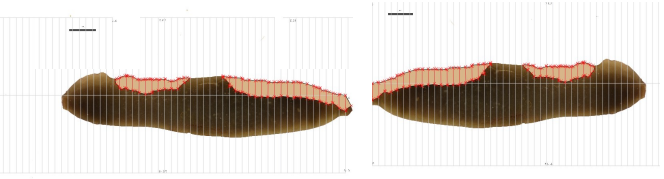
Outil T011 :



Face dorsale

Face ventrale

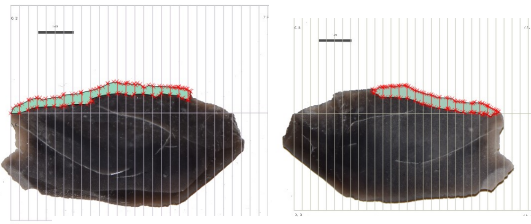
Outil T012 :



Face dorsale

Face ventrale

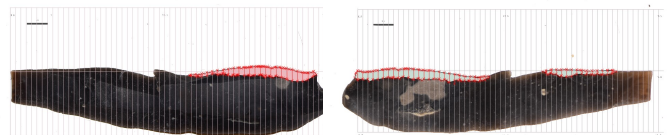
Outil T013 :



Face dorsale

Face ventrale

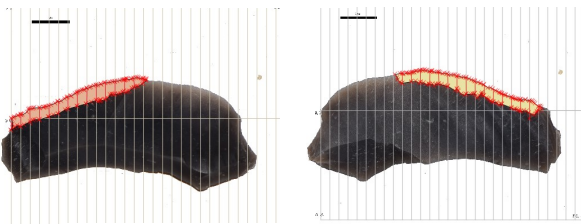
Outil T014 :



Face dorsale

Face ventrale

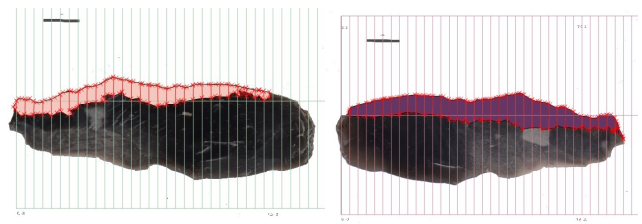
Outil T015 :



Face dorsale

Face ventrale

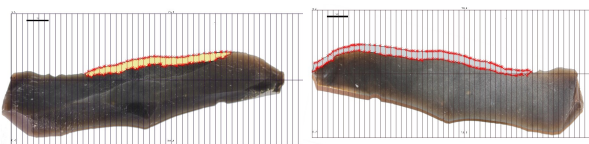
Outil T016 :



Face dorsale

Face ventrale

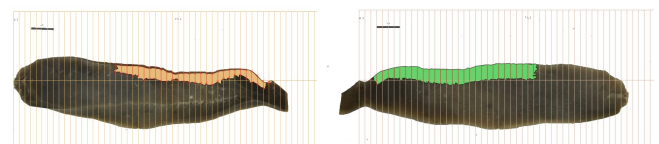
Outil T038 :



Face dorsale

Face ventrale

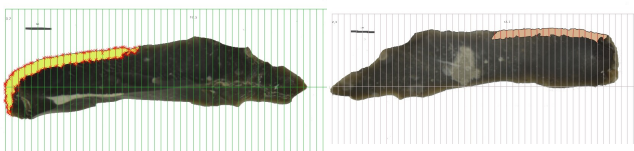
Outil T042 :



Face dorsale

Face ventrale

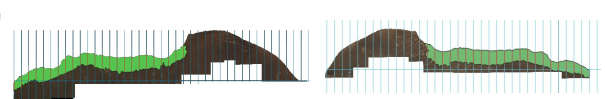
Outil T044 :



Face dorsale

Face ventrale

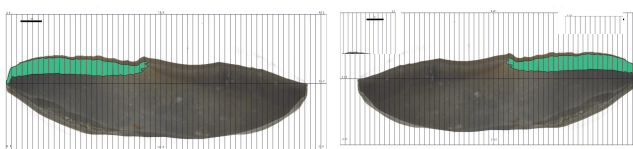
Outil T045 :



Face dorsale

Face ventrale

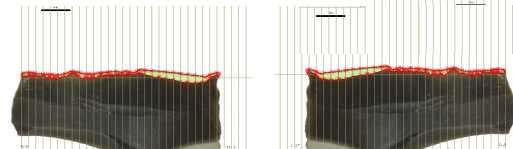
Outil T046 :



Face dorsale

Face ventrale

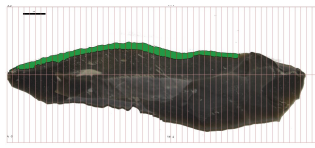
Outil T047 :



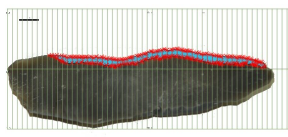
Face dorsale

Face ventrale

Outil T048 :

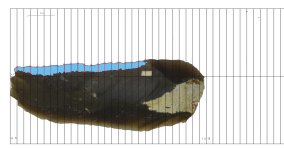


Face dorsale

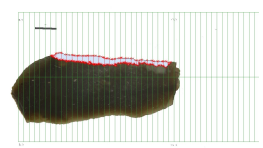


Face ventrale

Outil T055 :

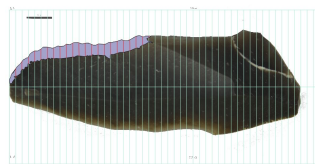


Face dorsale

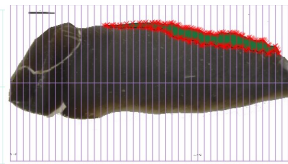


Face ventrale

Outil T056 :

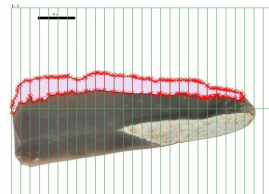


Face dorsale

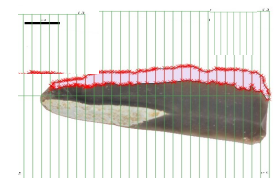


Face ventrale

Outil T057 :



Face dorsale

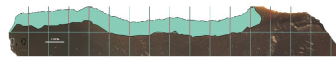


Face ventrale

Outil T082 :

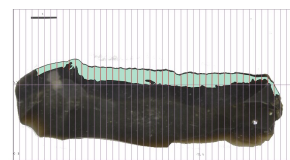


Face dorsale

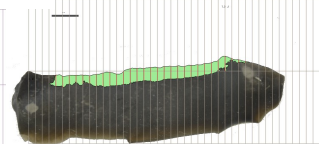


Face ventrale

Outil T087 :

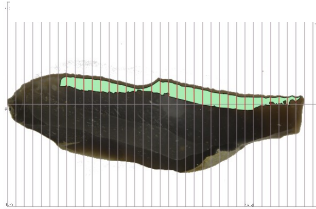


Face dorsale

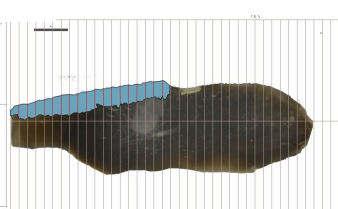


Face ventrale

Outil T106 :

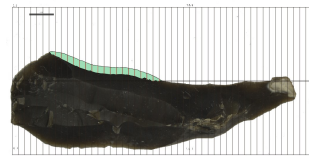


Face dorsale

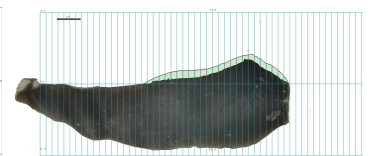


Face ventrale

Outil T131 :

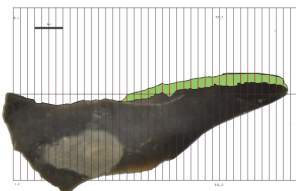


Face dorsale

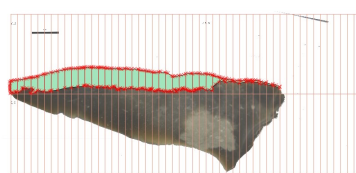


Face ventrale

Outil T132 :

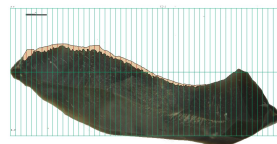


Face dorsale

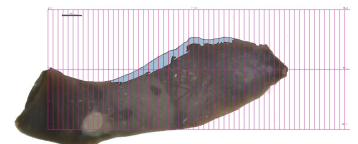


Face ventrale

Outil T132 :



Face dorsale



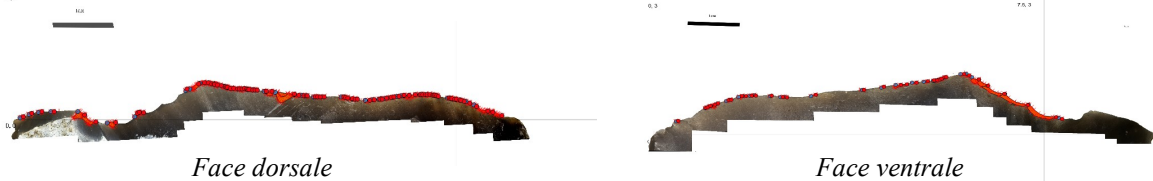
Face ventrale

ANNEXE 2 - Traitement des tranchants pour les deux faces des 16 outils issus de la seconde série expérimentale dans le logiciel QGIS pour la caractérisation micro-écaillures

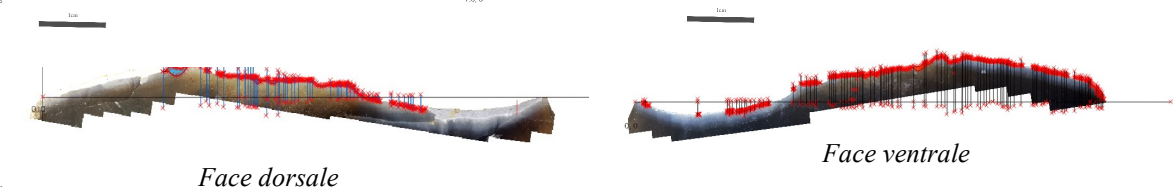
Outil T001 :



Outil T002 :



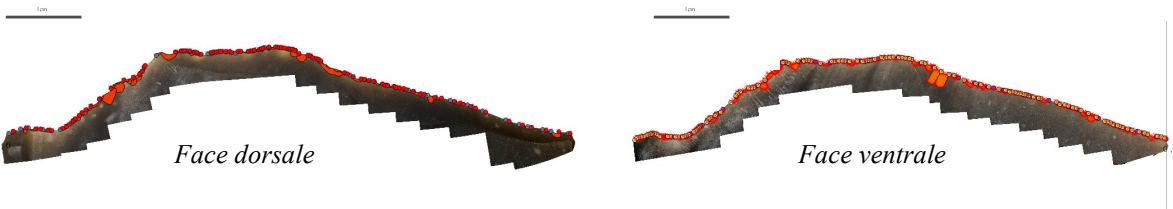
Outil T003 :



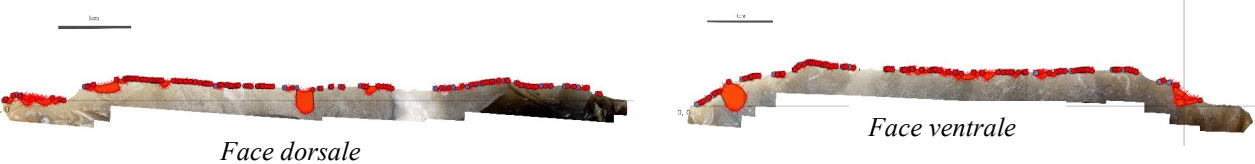
Outil T004 :



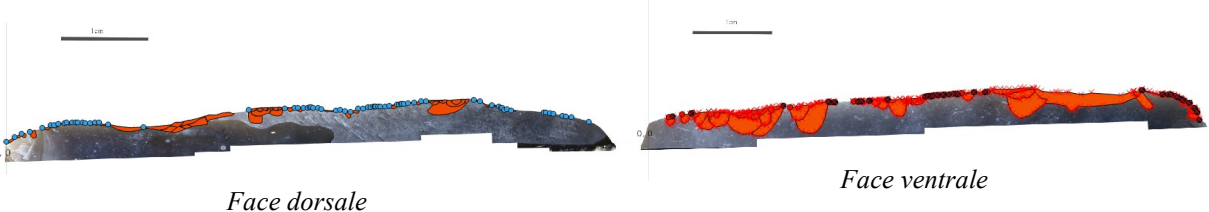
Outil T005 :



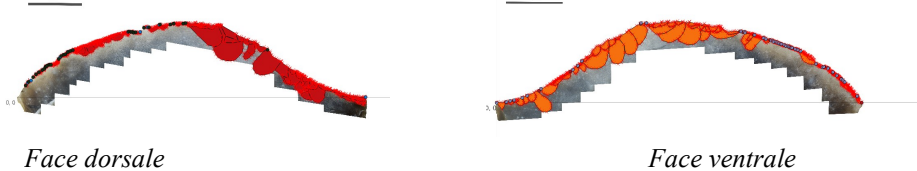
Outil T006 :



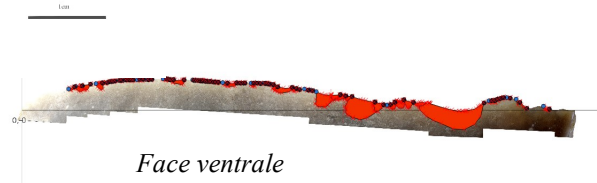
Outil T007 :



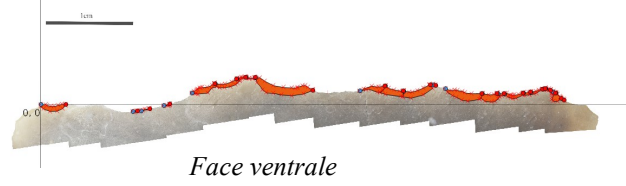
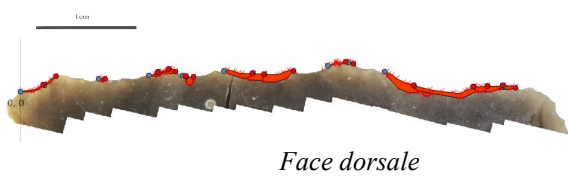
Outil T008 :



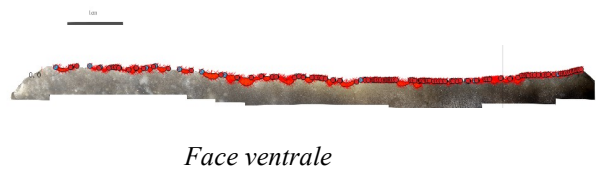
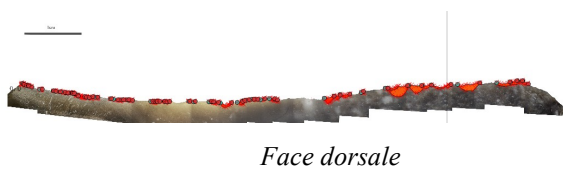
Outil T009 :



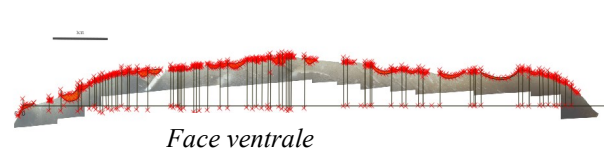
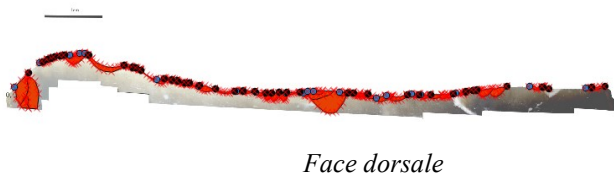
Outil T010 :



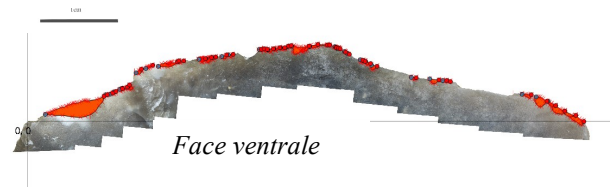
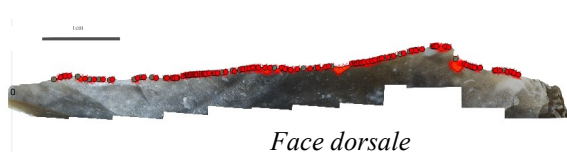
Outil T011 :



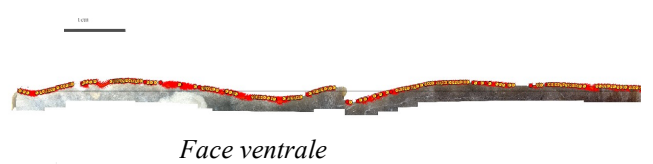
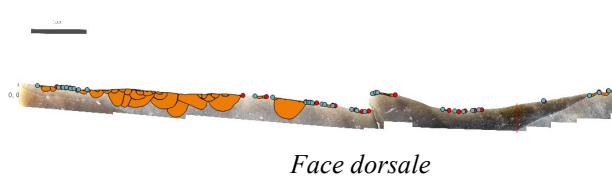
Outil T012 :



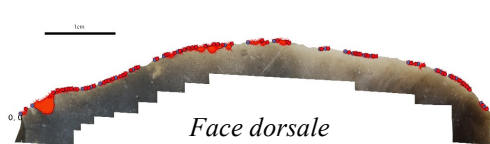
Outil T013 :



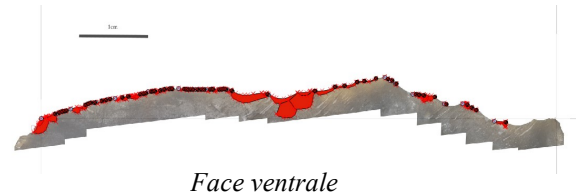
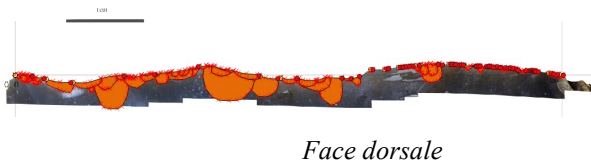
Outil T014 :



Outil T015 :



Outil T016 :



ANNEXE 3 – Liste des outils, indiquant la préférence manuelle de l'utilisateur, la main ayant utilisé l'outil et sa face externe (dorsale ou ventrale)

L : main gauche

R : main droite

N° de l'outil	Préférence manuelle de l'utilisateur	Main tenant l'outil durant son utilisation	Face externe
T001	L	L	Ventrale
T002	R	R	Dorsale
T003	L	L	Ventrale
T004	L	L	Ventrale
T005	R	R	Ventrale
T006	R	R	Dorsale
T007	L	L	Dorsale
T008	R	R	Dorsale
T009	L	R	Dorsale
T010	R	L	Ventrale
T011	R	L	Dorsale
T012	R	L	Ventrale
T013	R	L	Dorsale
T014	L	R	Ventrale
T015	L	R	Dorsale
T016	L	R	Ventrale
T038	L	L	Dorsale
T043	R	R	Dorsale
T044	R	R	Dorsale
T045	L	L	Ventrale
T046	R	R	Dorsale
T047	L	L	Dorsale
T048	R	R	Dorsale
T055	R	R	Dorsale
T056	R	R	Dorsale
T057	R	R	Dorsale
T082	R	R	Ventrale
T087	L	L	Ventrale
T106	R	R	Ventrale
T131	R	R	Dorsale
T132	R	R	Ventrale
T155	R	R	Dorsale

ANNEXE 4 - Tableau résumé des principaux résultats, selon la main utilisée et la préférence manuelle de l'utilisateur

En rouge : paramètres les plus intéressants au vue des statistiques descriptives

Paramètre d'intérêt	GAUCHERS		DROITIERS	
	Main gauche	Main droite	Main gauche	Main droite
Présence/absence des polis sur une ou plusieurs extrémités	1 seule extrémité du tranchant altérée par les polis pour au moins une face de l'outil (4 outils/4)	- 0 extrémité altérée par les polis pour les 2 faces de l'outil (1/4) - 2 extrémités altérées par les polis pour au moins une face de l'outil (2/4) - 1 extrémité altérée par les polis pour une face de l'outil, 0 pour l'autre face (1/4)	- 0 extrémité altérée par les polis pour les 2 faces de l'outil (1/4) - 2 extrémités altérées par les polis pour au moins une face de l'outil (1/4) - 1 extrémité altérée par les polis pour au moins une face de l'outil (2/4)	- 0 extrémités altérées par les polis pour les 2 faces (2/4) - 2 extrémités altérées par les polis pour une face de l'outil (2/4)
Pourcentage de la longueur du tranchant altéré par les polis	- Plus de 80% de la longueur du tranchant altérée par les polis (et différent de 100%) (2/4) - Moins de 80% de la longueur du tranchant altérée par les polis pour les 2 faces (2/4)	- Moins de 80% de la longueur du tranchant altérée par les polis pour les 2 faces (3/4) - 100% de la longueur du tranchant altérée par les polis pour au moins une face de l'outil (1/4)	Moins de 80% de la longueur du tranchant altérée par les polis pour les 2 faces (4/4)	Moins de 80% de la longueur du tranchant altérée par les polis pour les 2 faces (4/4)
« Rang » de la micro-écaillage la plus envahissante	- La micro-écaillage la plus envahissante est l'une des plus proches de l'une des 2 extrémités du tranchant (3/4) - La micro-écaillage la plus envahissante n'est pas l'une des plus proches de l'une des 2 extrémités du tranchant (1/4)	- La micro-écaillage la plus envahissante est l'une des plus proches de l'une des 2 extrémités du tranchant (1/4) - La micro-écaillage la plus envahissante n'est pas l'une des plus proches de l'une des 2 extrémités du tranchant (3/4)	La micro-écaillage la plus envahissante n'est pas l'une des plus proches de l'une des 2 extrémités du tranchant (4/4)	La micro-écaillage la plus envahissante n'est pas l'une des plus proches de l'une des 2 extrémités du tranchant (4/4)

Paramètre d'intérêt	GAUCHERS		DROITIERS	
	Main gauche	Main droite	Main gauche	Main droite
Présence/absence d'une micro-écaillage sur une/deux extrémité(s) du tranchant pour chaque face	Absence de micro-écaillures sur les 2 extrémités de chaque face d'outil (4/4)	Une micro-écaillage présente sur les 2 extrémités d'une face de l'outil (2/4) - Absence de micro-écaillures sur les 2 extrémités de chaque face d'outil (2/4)	Une micro-écaillage présente sur les 2 extrémités d'une face de l'outil (2/4) - Absence de micro-écaillures sur les 2 extrémités de chaque face d'outil (2/4)	Une micro-écaillage présente sur les 2 extrémités d'une face de l'outil (2/4) - Absence de micro-écaillures sur les 2 extrémités de chaque face d'outil (2/4)
Pourcentage de la longueur du tranchant envahi par les résidus	- Plus de 80% de la longueur du tranchant envahie par les résidus pour au moins une face de l'outil (différent de 100%) (7/8) - 100% de la longueur du tranchant envahie par les résidus pour au moins une face de l'outil (1/8)	- Moins de 80% de la longueur du tranchant envahie par les résidus pour au moins une face de l'outil (2/4) - 100% de la longueur du tranchant envahie par les résidus pour au moins une face de l'outil (2/4)	- Moins de 80% de la longueur du tranchant envahie par les résidus pour au moins une face de l'outil (3/4) - 100% de la longueur du tranchant envahie par les résidus pour au moins une face de l'outil (1/4)	- Moins de 80% de la longueur du tranchant envahie par les résidus pour au moins une face de l'outil (14/16) - 100% de la longueur du tranchant envahie par les résidus pour au moins une face de l'outil (2/16)

ANNEXE 5 - Probabilité d'observation des résultats suite à l'analyse des paramètres d'intérêt selon la préférence manuelle de l'utilisateur et de la main utilisée, pour les 16 outils issus de la seconde série expérimentale

POLIS D'UTILISATION

Nombre d'extrémités du tranchant altérées par les polissages, par face :

0 extrémité altérée par les polissages pour les deux faces de l'outil, pour 4 outils :

- LL : 0/4 → 0
- LR : 1/4 → 0,25
- RL : 1/4 → 0,25
- RR : 2/4 → 0,5

1 extrémité altérée par les polissages pour au moins une face de l'outil, pour 7 outils :

- LL : 4/7 → 0,57
- LR : 1/7 → 0,14
- RL : 2/7 → 0,29
- RR : 0/7 → 0

2 extrémités altérées par les polissages pour au moins une face de l'outil, pour 5 outils :

- LL : 0/5 → 0
- LR : 2/5 → 0,4
- RL : 1/5 → 0,2
- RR : 2/5 → 0,4

Pourcentage de la longueur du tranchant altéré par les polissages, par face :

100% de la longueur du tranchant altéré par les polissages pour au moins une face de l'outil, pour 1 outil :

- LL : 0/1 → 0
- LR : 1/1 → 1
- RL : 0/1 → 0
- RR : 0/1 → 0

Plus de 80% de la longueur du tranchant altéré par les polissages (et différent de 100%), pour 2 outils :

- LL : 2/2 → 1
- LR : 0/2 → 0
- RL : 0/2 → 0
- RR : 0/2 → 0

Moins de 80% de la longueur du tranchant altéré par les polissages, pour 13 outils :

- LL : 2/13 → 0,15
- LR : 3/13 → 0,23
- RL : 4/13 → 0,31
- RR : 4/13 → 0,31

MICROÉCAILLURES

Rang de la micro-écaillure la plus envahissante :

La micro-écaillure la plus envahissante est l'une des plus proches de l'une des deux extrémités, pour 4 outils :

- LL : 3/4 → 0,75
- LR : 1/4 → 0,25
- RL : 0/4 → 0
- RR : 0/4 → 0

La micro-écaillure la plus envahissante n'est pas l'une des plus proches de l'une des 2 extrémités du tranchant, pour 12 outils :

- LL : 1/12 → 0,08
- LR : 3/12 → 0,25
- RL : 4/12 → 0,33
- RR : 4/12 → 0,33

Présence/absence d'une micro-écaillure sur les deux extrémités du tranchant pour une ou deux face(s) :

Absence de micro-écaillures sur les 2 extrémités à la fois de chaque face d'outil, pour 10 outils :

- LL : 4/10 → 0,4
- LR : 2/10 → 0,2
- RL : 2/10 → 0,2
- RR : 2/10 → 0,2

Une micro-écaillure est présente sur les 2 extrémités d'une face de l'outil, pour 6 outils :

- LL : 0/6 → 0
- LR : 2/6 → 0,33
- RL : 2/6 → 0,33
- RR : 2/6 → 0,33

RESIDUS

Pourcentage de la longueur du tranchant envahi par les résidus :

100% de la longueur du tranchant envahi par les résidus pour au moins une face de l'outil, pour 3 outils :

- LL : 0/3 → 0
- LR : 2/3 → 0,66
- RL : 1/3 → 0,33
- RR : 0/3 → 0

Plus de 80% de la longueur du tranchant envahi par les résidus pour au moins une face de l'outil (et différent de 100%), pour 4 outils :

- LL : 4/4 → 1
- LR : 0/4 → 0
- RL : 0/4 → 0
- RR : 0/4 → 0

Moins de 80% de la longueur du tranchant envahi par les résidus pour au moins une face de l'outil, pour 9 outils :

- LL : 0/9 → 0
- LR : 2/9 → 0,22
- RL : 3/9 → 0,33
- RR : 4/9 → 0,44

ANNEXE 6 – Tableaux récapitulatifs des calculs de probabilités de bonne identification de la main ayant utilisé l’outil et de la préférence manuelle de l’utilisateur, pour les 16 outils de la seconde série expérimentale

A : Nombre d’extrémités du tranchant altérées par les polissages d’utilisation, par face.

B: Pourcentage de la longueur du tranchant altéré par les polissages d’utilisation, par face.

C : Rang de la micro-écaillure la plus envahissante, par face.

D : Nombre d’extrémités du tranchant altérées par les micro-écaillures, par face.

E : Pourcentage de la longueur du tranchant affectée par les résidus, par face.

LL : outils utilisés de la main gauche par les gauchers.

LR : outils utilisés de la main droite par les gauchers.

RL : outils utilisés de la main gauche par les droitiers.

RR : outils utilisés de la main droite par les droitiers.

En vert : classification correcte de l’outil.

En rouge : classification incorrecte de l’outil.

	T001				T002			
	LL	LR	RL	RR	LL	LR	RL	RR
A	0,57	0,14	0,29	0	0	0,4	0,2	0,4
B	1	0	0	0	0,15	0,23	0,31	0,31
C	0,75	0,25	0	0	0,08	0,25	0,33	0,33
D	0,4	0,2	0,2	0,2	0,4	0,2	0,2	0,2
E	1	0	0	0	0	0,22	0,33	0,44
TOTAL	3,72	0,59	0,49	0,2	0,63	1,3	1,37	1,68
Pourcentage total	74,4	11,8	9,8	4	12,6	26,6	27,4	33,6

	T003				T004			
	LL	LR	RL	RR	LL	LR	RL	RR
A	0,57	0,14	0,29	0	0,57	0,14	0,29	0
B	0,15	0,23	0,31	0,31	0,15	0,23	0,31	0,31
C	0,75	0,25	0	0	0,75	0,25	0	0
D	0,4	0,2	0,2	0,2	0,4	0,2	0,2	0,2
E	1	0	0	0	1	0	0	0
TOTAL	2,87	0,82	0,8	0,51	2,87	0,82	0,8	0,51
Pourcentage total	57,4	16,4	16	10,2	57,4	16,4	16	10,2

	T005				T006			
	LL	LR	RL	RR	LL	LR	RL	RR
A	0	0,25	0,25	0,5	0	0,25	0,25	0,5
B	0,15	0,23	0,31	0,31	0,15	0,23	0,31	0,31
C	0,08	0,25	0,33	0,33	0,08	0,25	0,33	0,33
D	0	0,33	0,33	0,33	0,4	0,2	0,2	0,2
E	0	0,22	0,33	0,44	0	0,22	0,33	0,44
TOTAL	0,23	1,28	1,55	1,91	0,63	1,15	1,42	1,78
Pourcentage total	4,6	25,6	31	38,2	12,6	23	28,4	35,6

	T007				T008			
	LL	LR	RL	RR	LL	LR	RL	RR
A	0,57	0,14	0,29	0	0	0,4	0,2	0,4
B	1	0	0	0	0,15	0,23	0,31	0,31
C	0,08	0,25	0,33	0,33	0,08	0,25	0,33	0,33
D	0,4	0,2	0,2	0,2	0	0,33	0,33	0,33
E	1	0	0	0	0	0,22	0,33	0,44
TOTAL	3,05	0,59	0,82	0,53	0,23	1,43	1,5	1,81
Pourcentage total	61	11,8	16,4	10,6	4,6	28,6	30	36,2

	T009				T010			
	LL	LR	RL	RR	LL	LR	RL	RR
A	0	0,25	0,25	0,5	0	0,4	0,2	0,4
B	0,15	0,23	0,31	0,31	0,15	0,23	0,31	0,31
C	0,08	0,25	0,33	0,33	0,08	0,25	0,33	0,33
D	0,4	0,2	0,2	0,2	0	0,33	0,33	0,33
E	0	0,66	0,33	0	0	0,66	0,33	0
TOTAL	0,63	1,59	1,09	1,34	0,23	1,87	1,5	1,37
Pourcentage total	12,6	31,8	28,4	26,8	4,6	37,4	30	27,4

	T011				T012			
	LL	LR	RL	RR	LL	LR	RL	RR
A	0,57	0,14	0,29	0	0	0,25	0,25	0,5
B	0,15	0,23	0,31	0,31	0,15	0,23	0,31	0,31
C	0,08	0,25	0,33	0,33	0,08	0,25	0,33	0,33
D	0,4	0,2	0,2	0,2	0	0,33	0,33	0,33
E	0	0,22	0,33	0,44	0	0,22	0,33	0,44
TOTAL	1,2	1,04	1,46	1,28	0,23	1,28	1,55	1,91
Pourcentage total	24	20,8	29,2	25,6	4,6	25,6	31	38,2

	T013				T014			
	LL	LR	RL	RR	LL	LR	RL	RR
A	0,57	0,14	0,29	0	0	0,4	0,2	0,4
B	0,15	0,23	0,31	0,31	0,15	0,23	0,31	0,31
C	0,08	0,25	0,33	0,33	0,08	0,25	0,33	0,33
D	0,4	0,2	0,2	0,2	0	0,33	0,33	0,33
E	0	0,22	0,33	0,44	0	0,22	0,33	0,44
TOTAL	1,2	1,04	1,46	1,28	0,23	1,43	1,5	1,81
Pourcentage total	24	20,8	29,2	25,6	4,6	28,6	30	36,2

	T015				T016			
	LL	LR	RL	RR	LL	LR	RL	RR
A	0,57	0,14	0,29	0	0	0,4	0,2	0,4
B	0,15	0,23	0,31	0,31	0	1	0	0
C	0,75	0,25	0	0	0,08	0,25	0,33	0,33
D	0,4	0,2	0,2	0,2	0	0,33	0,33	0,33
E	0	0,22	0,33	0,44	0	0,66	0,33	0
TOTAL	1,87	1,04	1,13	0,95	0,08	2,64	1,19	1,06
Pourcentage total	37,4	20,8	22,6	19	1,6	52,8	23,8	21,2

ANNEXE 7 – Tableaux récapitulatifs des calculs de probabilités de bonne identification de la préférence manuelle de l'utilisateur, pour les 16 outils de la seconde série expérimentale

A : Nombre d'extrémités du tranchant altérées par les pols d'utilisation, par face.

B: Pourcentage de la longueur du tranchant altéré par les pols d'utilisation, par face.

C : Rang de la micro-écaillure la plus envahissante, par face.

D : Nombre d'extrémités du tranchant altérées par les micro-écaillures, par face.

E : Pourcentage de la longueur du tranchant affectée par les résidus, par face.

En vert : classification correcte de l'outil.

En rouge : classification incorrecte de l'outil.

	T001		T002		T003		T004	
	Gaucher	Droitier	Gaucher	Droitier	Gaucher	Droitier	Gaucher	Droitier
A	0,71	0,29	0,4	0,6	0,71	0,29	0,71	0,29
B	1	0	0,38	0,62	0,38	0,62	0,38	0,62
C	1	0	0,33	0,66	1	0	1	0
D	0,6	0,4	0,6	0,4	0,6	0,4	0,6	0,4
E	1	0	0,22	0,77	1	0	1	0
TOTAL	4,31	0,69	1,93	3,05	3,69	1,31	3,69	1,31
Pourcentage total	86,2	13,8	39	61	73,8	26,2	73,8	26,2

	T005		T006		T007		T008	
	Gaucher	Droitier	Gaucher	Droitier	Gaucher	Droitier	Gaucher	Droitier
A	0,25	0,75	0,25	0,75	0,71	0,29	0,4	0,6
B	0,38	0,62	0,38	0,62	1	0	0,38	0,62
C	0,33	0,66	0,33	0,66	0,33	0,66	0,33	0,66
D	0,33	0,66	0,6	0,4	0,6	0,4	0,33	0,66
E	0,22	0,77	0,22	0,77	1	0	0,22	0,77
TOTAL	1,51	3,46	1,78	3,2	3,64	1,35	1,66	3,31
Pourcentage total	30	70	36	64	73	27	33,2	66,8

	T009		T010		T011		T012	
	Gaucher	Droitier	Gaucher	Droitier	Gaucher	Droitier	Gaucher	Droitier
A	0,25	0,75	0,4	0,6	0,71	0,29	0,25	0,75
B	0,38	0,62	0,38	0,62	0,38	0,62	0,38	0,62
C	0,33	0,66	0,33	0,66	0,33	0,66	0,33	0,66
D	0,6	0,4	0,33	0,66	0,6	0,4	0,33	0,66
E	0,66	0,33	0,66	0,33	0,22	0,77	0,22	0,77
TOTAL	2,22	2,43	2,1	2,87	2,24	2,74	1,51	3,46
Pourcentage total	44	56	42	58	45	55	30	69

	T013		T014		T015		T016	
	Gaucher	Droitier	Gaucher	Droitier	Gaucher	Droitier	Gaucher	Droitier
A	0,71	0,29	0,4	0,6	0,71	0,29	0,4	0,6
B	0,38	0,62	0,38	0,62	0,38	0,62	1	0
C	0,33	0,66	0,33	0,66	1	0	0,33	0,66
D	0,6	0,4	0,33	0,66	0,6	0,4	0,33	0,66
E	0,22	0,77	0,22	0,77	0,22	0,77	0,66	0,33
TOTAL	2,24	2,74	1,66	3,31	2,91	2,08	2,72	2,25
Pourcentage total	45	55	33,8	66,2	58,2	41,8	55	45

ANNEXE 8 – Tableaux récapitulatifs des calculs de probabilités de bonne identification de la main ayant utilisé l’outil, pour les 16 outils de la seconde série expérimentale

A : Nombre d’extrémités du tranchant altérées par les polis d’utilisation, par face.

B: Pourcentage de la longueur du tranchant altéré par les polis d’utilisation, par face.

C : Rang de la micro-écaillure la plus envahissante, par face.

D : Nombre d’extrémités du tranchant altérées par les micro-écaillures, par face.

E : Pourcentage de la longueur du tranchant affectée par les résidus, par face.

En vert : classification correcte de l’outil.

En rouge : classification incorrecte de l’outil.

	T001		T002		T003		T004	
	Main gauche	Main droite	Main gauche	Main droite	Main gauche	Main droite	Main gauche	Main droite
A	0,86	0,14	0,2	0,8	0,86	0,14	0,86	0,14
B	1	0	0,46	0,54	0,46	0,54	0,46	0,54
C	0,75	0,25	0,41	0,58	0,75	0,25	0,75	0,25
D	0,6	0,4	0,6	0,4	0,6	0,4	0,6	0,4
E	1	0	0,33	0,66	1	0	1	0
TOTAL	4,21	0,79	2	2,98	3,67	1,33	3,67	1,33
Pourcentage total	84,2	15,8	40	60	73,4	26,6	73,4	26,6

	T005		T006		T007		T008	
	Main gauche	Main droite	Main gauche	Main droite	Main gauche	Main droite	Main gauche	Main droite
A	0,25	0,75	0,25	0,75	0,86	0,14	0,2	0,8
B	0,46	0,54	0,46	0,54	1	0	0,46	0,54
C	0,41	0,58	0,41	0,58	0,41	0,58	0,41	0,58
D	0,33	0,66	0,6	0,4	0,6	0,4	0,33	0,66
E	0,33	0,66	0,33	0,66	1	0	0,33	0,66
TOTAL	1,78	3,19	2,05	2,93	3,87	1,12	1,73	3,24
Pourcentage total	36	64	41	59	77,5	22,5	35	65

	T009		T010		T011		T012	
	Main gauche	Main droite	Main gauche	Main droite	Main gauche	Main droite	Main gauche	Main droite
A	0,25	0,75	0,2	0,8	0,86	0,14	0,25	0,75
B	0,46	0,54	0,46	0,54	0,46	0,54	0,46	0,54
C	0,41	0,58	0,41	0,58	0,41	0,58	0,41	0,58
D	0,6	0,4	0,33	0,66	0,6	0,4	0,33	0,66
E	0,33	0,66	0,33	0,66	0,33	0,66	0,33	0,66
TOTAL	1,72	2,93	1,73	3,24	2,66	2,32	1,78	3,19
Pourcentage total	41	59	35	65	54	46	36	64

	T013		T014		T015		T016	
	Gaucher	Droitier	Gaucher	Droitier	Gaucher	Droitier	Gaucher	Droitier
A	0,71	0,29	0,4	0,6	0,71	0,29	0,4	0,6
B	0,38	0,62	0,38	0,62	0,38	0,62	1	0
C	0,33	0,66	0,33	0,66	1	0	0,33	0,66
D	0,6	0,4	0,33	0,66	0,6	0,4	0,33	0,66
E	0,22	0,77	0,22	0,77	0,22	0,77	0,66	0,33
TOTAL	2,24	2,74	1,66	3,31	2,91	2,08	2,72	2,25
Pourcentage total	45	55	33,8	66,2	58,2	41,8	55	45

ANNEXE 9 - Probabilité d'observation des résultats suite à l'analyse des paramètres d'intérêt selon la préférence manuelle de l'utilisateur et de la main utilisée, pour les 24 outils utilisés de la main préférentielle

POLIS D'UTILISATION

Nombre d'extrémités du tranchant altérées par les pols d'utilisation, par face :

0 extrémité altérée par les pols pour les deux faces de l'outil :

- LL : 0/2 → 0

- RR : 2/2 → 1

1 extrémité altérée par les pols pour au moins une face de l'outil :

- LL : 4/4 → 1

- RR : 0/4 → 0

2 extrémités altérées par les pols pour au moins une face de l'outil :

- LL : 0/2 → 0

- RR : 2/2 → 1

Pourcentage de la longueur du tranchant altéré par les pols :

Plus de 80% de la longueur du tranchant altéré par les pols (et différent de 100%) :

- LL : 2/2 → 1

- RR : 0/2 → 0

Moins de 80% de la longueur du tranchant altérée par les pols :

- LL : 2/6 → 0,33

- RR : 4/6 → 0,67

MICROECAILLURES :

Rang de la micro-écaillure la plus envahissante :

La micro-écaillure la plus envahissante est l'une des plus proches de l'une des deux extrémités :

- LL : 3/3 → 1

- RR : 0/3 → 0

La micro-écaillure la plus envahissante n'est pas l'une des plus proches de l'une des 2 extrémités du tranchant :

- LL : 1/5 → 0,2

- RR : 4/5 → 0,8

Présence/absence d'une micro-écaillure sur les deux extrémités du tranchant pour une ou deux face(s) :

Absence de micro-écaillures sur les 2 extrémités à la fois de chaque face d'outil :

- LL : 4/6 → 0,67

- RR : 2/6 → 0,33

Une micro-écaillure est présente sur les 2 extrémités d'une face de l'outil :

- LL : 0/2 → 0

- RR : 2/2 → 1

RESIDUS :

Pourcentage de la longueur du tranchant envahi par les résidus :

100% de la longueur du tranchant envahi par les résidus pour au moins une face de l'outil :

- LL : $1/3 \rightarrow 0,33$

- RR : $2/3 \rightarrow 0,67$

Plus de 80% de la longueur du tranchant envahi par les résidus pour au moins une face de l'outil (et différent de 100%) :

- LL : $7/7 \rightarrow 1$

- RR : $0/7 \rightarrow 0$

Moins de 80% de la longueur du tranchant envahie par les résidus pour au moins une face de l'outil :

- LL : $0/14 \rightarrow 0$

- RR : $14/14 \rightarrow 1$

ANNEXE 10 – Tableaux récapitulatifs des calculs de probabilités de bonne identification de la main ayant utilisé l’outil (5 paramètres testés), pour les 8 outils issus de la seconde série expérimentale utilisés de la main préférentielle

A : Nombre d’extrémités du tranchant altérées par les pols d’utilisation, par face.

B: Pourcentage de la longueur du tranchant altéré par les pols d’utilisation, par face.

C : Rang de la micro-écaillure la plus envahissante, par face.

D : Nombre d’extrémités du tranchant altérées par les micro-écaillures, par face.

E : Pourcentage de la longueur du tranchant affectée par les résidus, par face.

LL : outils utilisés de la main gauche par les gauchers.

RR : outils utilisés de la main droite par les droitiers.

En vert : classification correcte de l’outil.

	T001		T002		T003		T004	
	LL	RR	LL	RR	LL	RR	LL	RR
A	1	0	0	1	1	0	1	0
B	1	0	0,33	0,67	0,33	0,67	0,33	0,67
C	1	0	0,2	0,8	1	0	1	0
D	0,67	0,33	0,67	0,33	0,67	0,33	0,67	0,33
E	1	0	0	1	1	0	1	0
TOTAL	4,67	0,33	1,2	3,8	4	1	4	1
Pourcentage total	93,4	6,6	24	76	80	20	80	20

	T005		T006		T007		T008	
	LL	RR	LL	RR	LL	RR	LL	RR
A	0	1	0	1	1	0	0	1
B	0,33	0,67	0,33	0,67	1	0	0,33	0,67
C	0,33	0,67	0,33	0,67	0,2	0,8	0,2	0,8
D	0	1	0,67	0,33	0,67	0,33	0	1
E	0	1	0	1	1	0	0	1
TOTAL	0,66	4,34	1,33	3,67	3,87	1,13	0,53	4,47
Pourcentage total	13,2	86,8	26,6	73,4	77,4	22,6	10,6	89,4

ANNEXE 11– Tableaux récapitulatifs des calculs de probabilités de bonne identification de la main ayant utilisé l’outil (2 paramètres testés), pour les 8 outils issus de la seconde série expérimentale utilisés de la main préférentielle.

A : Nombre d’extrémités du tranchant altérées par les polis d’utilisation, par face.

B : Pourcentage de la longueur du tranchant affectée par les résidus, par face.

LL : outils utilisés de la main gauche par les gauchers.

RR : outils utilisés de la main droite par les droitiers.

En vert : classification correcte de l’outil.

	T001		T002		T003		T004	
	LL	RR	LL	RR	LL	RR	LL	RR
A	1	0	0	1	1	0	1	0
B	1	0	0	1	1	0	1	0
TOTAL	2	0	0	2	2	0	2	0
Pourcentage total	100	0	0	100	100	0	100	0

	T005		T006		T007		T008	
	LL	RR	LL	RR	LL	RR	LL	RR
A	0	1	0	1	1	0	0	1
B	0	1	0	1	1	0	0	1
TOTAL	0	2	0	2	2	0	0	2
Pourcentage total	0	100	0	100	100	0	0	100

