



**HAL**  
open science

# Au fondement de l'apprentissage des habiletés de taille : des référentiels interdisciplinaires destinés à l'interprétation archéologique

Blandine Bril, Valentine Roux

## ► To cite this version:

Blandine Bril, Valentine Roux. Au fondement de l'apprentissage des habiletés de taille : des référentiels interdisciplinaires destinés à l'interprétation archéologique. Hiatus, lacunes et absences : identifier et interpréter les vides archéologiques, Apprendre et comprendre : de la transmission des savoirs à la structuration des sociétés, Société préhistorique française, pp.3-24, 2024. hal-04694245

**HAL Id: hal-04694245**

**<https://hal.science/hal-04694245v1>**

Submitted on 11 Sep 2024

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

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



Open licence - etalab

## **Au fondement de l'apprentissage des habiletés de taille : des référentiels interdisciplinaires destinés à l'interprétation archéologique**

### ***At the Foundation of Learning the Stone Knapping Skills: Interdisciplinary Reference Frameworks for Archaeological Interpretation***

Blandine BRIL et Valentine ROUX

**Résumé :** Dans cet article, nous rappelons, en guise d'introduction, d'une part que l'interprétation des pièces lithiques en matière de niveau de savoir-faire nécessite de faire appel à des régularités, à savoir des phénomènes récurrents sous certaines conditions ; nous rappelons d'autre part que seules des études interdisciplinaires menées en contexte actualiste peuvent aboutir à la compréhension des mécanismes qui génèrent et fondent ces régularités. Cette compréhension est indispensable pour fonder, en retour, nos interprétations archéologiques. Dans un second temps, nous évoquons des études que nous avons menées depuis maintenant plus de vingt ans sur les difficultés impliquées dans l'acquisition des habiletés de taille et les relations consécutives entre qualité des pièces lithiques, niveau de savoir-faire et stade d'apprentissage (les régularités).

Un premier préalable à ces études a été le choix d'un cadre théorique, car les questions posées et les méthodes utilisées varient selon celui-ci. À cet effet, les principes des approches cognitiviste et écologique/dynamique sont rappelés, de même que les hypothèses sur les habiletés de taille élaborées selon chacune d'elles. Contrairement à l'approche cognitiviste qui met l'accent sur les processus internes à l'acteur, donnant à l'activité cérébrale un rôle causal, l'approche écologique/dynamique postule que l'organisme, c'est-à-dire ici l'acteur, participe à la dynamique d'un environnement en perpétuel changement. Cette approche a été privilégiée au vu de sa capacité à expliquer ce qui est en jeu dans l'acquisition des habiletés de taille. L'hypothèse est que la maîtrise de la technique est déterminante dans la réussite de l'action de taille, tandis que la connaissance du déroulé des différentes étapes, à savoir la méthode, est insuffisante à cette réussite. Cette connaissance peut être assimilée à la notion de « planification » et peut être facilement acquise par imitation. En revanche, la technique, à savoir la capacité à produire l'éclat envisagé et/ou à rectifier, par l'enlèvement d'un nouvel éclat, l'erreur précédente, est difficile à maîtriser et nécessite des répétitions de milliers de coups.

Dans la suite de l'article, nous argumentons en faveur de cette hypothèse à partir des résultats d'une part d'expérimentations de terrain réalisées sur la taille de perles de cornaline en Inde, d'autre part d'expérimentations portant plus spécifiquement sur l'enlèvement d'éclats selon une technique de percussion directe. Nous montrons que les paramètres fonctionnels de la taille sont régulés à partir de stratégies individuelles au moyen de patterns de mouvement qui varient d'une personne à l'autre, car ce qui doit être appris n'est pas le mouvement en tant que tel, mais comment satisfaire aux contraintes de la tâche. Nous montrons donc que l'objet de l'apprentissage se rapporte à la construction de la capacité individuelle à trouver des solutions sensori-motrices permettant d'atteindre le but, à savoir détacher « le bon éclat ». La maîtrise du cours d'action est, quant à elle, subordonnée à la maîtrise du geste élémentaire. Les habiletés de taille s'acquièrent ainsi nécessairement progressivement par une pratique où se joue une interaction dynamique entre mouvements fonctionnels, perception et planification.

Ce résultat explique pourquoi il existe des corrélations entre caractères techniques et morphologiques, niveaux de savoir-faire et stades d'apprentissage, et pourquoi ces corrélations correspondent à des régularités stables dans le temps que l'on peut donc transférer aux données archéologiques avec, en retour, l'obtention d'interprétations archéologiques validées empiriquement. Il explique également

pourquoi il existe un calendrier universel d'apprentissage que l'on retrouve pour toute activité motrice, et dont témoignent les assemblages lithiques, toutes périodes confondues, marqué par une exploitation de nodules de plus en plus grands dans les débitages. Enfin, ce résultat explique pourquoi l'apprentissage d'activités motrices complexes ne sollicite pas nécessairement d'instructions orales. La construction de même que la robustesse de ce résultat illustrent la nécessité de collaborations entre spécialistes des différents domaines dès lors qu'il s'agit de bâtir un savoir extérieur à l'archéologie qui soit fondé.

**Mots-clés :** apprentissage, taille de la pierre, habileté technique, transmission, théorie cognitive, théorie écologique/système dynamique

**Abstract:** In this article, we first recall on the one hand that the interpretation of lithic pieces in terms of skill level requires the use of regularities, i.e. recurrent phenomena under certain conditions, and on the other hand that only interdisciplinary studies, combining specifically archaeology, psychology and movement sciences, can lead to the understanding of the mechanisms that generate and found these regularities. This understanding is necessary to underpin, in return, archaeological interpretations. In a second step, we report on studies we have conducted for more than 20 years on the difficulties involved in the learning of stone knapping, and the consequent univocal links between qualities of lithic pieces, levels of know-how and learning stages (the regularities).

A first prerequisite for studying skills involved in tool use was the choice of a theoretical framework, since the questions addressed and the methods used vary accordingly. Nowadays, it is common to contrast two different approaches to action. One approach, referred to as the computational or cognitive approach, postulates that action depends upon an internal preexisting representation. According to this theoretical position, the actor's activity is directly caused by some kind of planning that control the production of behavioural sequences. The second theoretical approach referred to as the ecological/dynamical systems approach stresses the reciprocal role of the organism and the environment acting as a set of constraints from which behaviour emerges. This perspective emphasizes the nature of action by focusing on the goal. With reference to the well-known distinction between technique and method, it assumes that the technique is at the heart of any goal-oriented action, the method guiding the general process towards reaching the goal. In the case of stone knapping, the technique designates the physical modalities according to which the action is performed, whose goal is to fracture the raw material, the stone, by initiating it at a point and whose success depends on the kinetic energy delivered at the time of contact. Subsequently, the method acts as a guide towards the goal, being regarded as the knowledge necessary to go through the different needed sub-goals. This notion corresponds to what is often referred as "planning representation". The "functional approach" to stone knapping permits to differentiate what has to be controlled by the knapper (the weight of the hammer and the velocity vector of the hammer-head at contact time) from the how to produce it, that is the body movement of the knapper.

Two sets of extended experiments with actors of different levels of skill were conducted and analysed according to this approach. The first set of experiments took place in Cambay (India), one of the few places in the world where stone knapping is still practiced within the bead industry. Four groups of craftsmen participated in several experiments, including learners. These experiments consisted in the production of beads of different shapes knapped from two raw materials, carnelian and glass. The whole process was videotaped, and the movements of the upper arms were recorded with electromagnetic devices. In addition, each bead was analysed. These experiments avowed two main outcomes. First, almost all craftsmen knew the methods for making the different types of beads, very few errors were detected even in the less skilled craftsmen. In this regard, the method appeared as easy to master, most of the time through imitation of other craftsmen. However, a look at the knapped pieces immediately revealed differences in skill, suggesting that the variability in workmanship had to come from a lack of control of the technique whose mastering takes years to acquire and necessitate thousands of repetitions of the elementary action (performing the technique). The importance of the mastery of the technique in the success of the knapping was also visible in the course of action which was shown to be subordinated to the mastery of the elementary movements. The second finding concerned the important interindividual variability in the movement performed, at the level of joints amplitude and their contribution to the hammer movement, and at the level of the initial arm position which may vary from one actor to another. In addition, these variations across knappers appeared irrespective of experience and performance of the craftsmen.

These results led to the second set of experiments that focused exclusively on flaking with knappers of different levels of expertise which confirmed and clarified the results from the bead craftsmen from the previous study. Across situations where mass of the hammer and size of the flake to be removed varied, we showed that only high-level experts were able to adjust the velocity vector to the demand of the task. When knappers were queried about the flake they intended to produce, only high-level experts were able to produce a flake close to what they predicted in terms of dimensions, and to generate a value of kinetic energy correlated with the dimensions of the flake predicted. These results suggest that one reason why the outcome of the flaking process do not always meet the desired goal in terms of the characteristics of the bead manufactured is due to the inability to produce a succession of flakings that meet the requirements of the predicted shape.

In brief, our results show that skill acquisition is based on the individual development of the fine tuning of the functional parameters of the percussive task through individual movement strategies. In accord with the ecological/dynamical framework, the learning process proves thus to be the result from the progressive mastering of the dynamic interaction between functional movements, perception and planning.

This result explains why correlations exist between technical and morphological characteristics, levels of know-how and stages of learning, and why these correlations correspond to stable regularities over time that can be transferred to the archaeological data with, in return, the obtaining of empirically validated archaeological interpretations. It also explains why there is a universal learning schedule that can be found for any motor activity, and to which the lithic assemblages of all periods bear witness, marked by an exploitation of increasingly large nodules in the debitage. Finally, the result showing idiosyncrasy of body movements dismisses imitation as a mode of learning, as well as the necessity for explicit verbal teaching.

As the innovative results of our long-term collaboration between archaeology, psychology and more generally movement sciences (neurosciences and biomechanics) have shown, the take home message of this paper is also a recommendation to develop true interdisciplinary collaborations in order to build new founded knowledge through the contribution of each discipline.

**Keywords:** Learning, stone knapping, technical skills, transmission, cognitive theory, ecological psychology/dynamical system.

## INTRODUCTION

Dans la postface de l'ouvrage édité par L. Klaric (2018) sur l'apprentissage de la taille de la pierre, C. Perlès pose la question « de la validation des liens entre caractères observés (maladresses, erreurs, accidents, morphologie des produits) et inférences en termes de savoir-faire, voire de classes d'âge » (Perlès, 2018, p. 340). Elle poursuit : « Certes chaque auteur précise quels sont les critères sur lesquels il se base pour distinguer les différents niveaux de compétence. Mais comment ces critères sont-ils validés ? Au-delà du sens commun ou de l'expérience des tailleurs, comment affirmer la validité des échelles de progressions proposées ? » (Perlès, 2018, p. 341).

Ces questions, qui touchent à l'interprétation des pièces lithiques en matière de niveaux de savoir-faire et de stades d'apprentissage, peuvent trouver réponse à la fois dans les principes de validation des interprétations archéologiques et dans les études interdisciplinaires menées ces dernières années sur la caractérisation des habiletés de taille.

À cet effet, nous rappellerons tout d'abord la procédure selon laquelle les interprétations archéologiques peuvent être validées empiriquement. Cette procédure implique de faire appel à des référentiels situés nécessairement en dehors du domaine de l'archéologie. Dans le cas des référentiels sur les habiletés de taille, leur construction et les hypothèses afférentes s'inscrivent dans différents cadres théoriques ancrés dans les neurosciences et la psychologie expérimentale. Les résultats obtenus selon l'approche écologique/dynamique permettent d'expliquer en quoi le processus d'apprentissage de la taille de la pierre est déterminé par des principes universaux. Ils permettent ainsi de fonder la relation entre qualité des pièces lithiques, niveau de savoir-faire et stade d'apprentissage. Ils expliquent, par ailleurs, pourquoi il existe un calendrier universel d'apprentissage et pourquoi des instructions orales ne sont pas nécessaires à l'apprentissage d'habiletés motrices. Ils convergent avec les résultats d'études récentes menées par d'autres équipes sur le sujet (Pargeter *et al.*, 2019 et 2020).

## RÉFÉRENTIELS ET INTERPRÉTATIONS ARCHÉOLOGIQUES

Toute interprétation archéologique est le fruit d'un raisonnement par analogie qui suit les trois étapes suivantes (Gardin, 1979, 1991 et 2001 ; Gardin *et al.*, 1981) : description de l'objet archéologique, comparai-

son de l'objet avec un autre objet porteur d'une signification connue et, enfin, interprétation de l'objet par transfert de la signification connue sur la base d'une analogie déclarée. Le transfert d'attributs est en effet à la base de l'ensemble de nos constructions interprétatives. En l'occurrence, lorsqu'une pièce lithique est caractérisée par sa qualité de taille, l'interprétation de cette qualité du point de vue de l'habileté procède selon deux étapes : une comparaison formelle (par le biais de grilles descriptives) avec des pièces dont on sait qu'elles ont été exécutées par des tailleurs plus ou moins expérimentés ; puis une interprétation en termes de tailleur débutant, apprenti, confirmé ou expert par simple transfert de l'attribut connu.

Pour autant, cette opération de transfert n'est pas simple en ce qu'elle soulève la question de l'analogie et des conditions pour la réaliser. Elle a fait l'objet de nombreux débats compte tenu du caractère multivoque des objets archéologiques. Ils se sont résolus en termes épistémologiques (Gardin, 1990 ; Gallay, 2011). Le transfert d'un référentiel sur l'objet archéologique est valide si à la fois le référentiel et l'analogie sont fondés. Un référentiel est considéré comme fondé s'il a une valeur de régularité, ici définie comme un phénomène récurrent sous certaines conditions. Ces conditions peuvent être mises en évidence par comparaison entre situations différentes ou par compréhension du mécanisme qui en explique la genèse. L'analogie est déclarée fondée lorsque les traits descriptifs observables dans le présent et le passé sont comparables (pour exemple, mêmes traces sur même type de matériau).

Mettre en évidence des régularités mobilise le plus souvent des explications situées hors du domaine de l'archéologie. Pour exemple, les associations entre caractères descriptifs et techniques de taille peuvent être considérées comme des régularités stables dans le temps, quel que soit le contexte culturel, étant donné une explication qui fait appel à la physique des matériaux : ce sont les propriétés physiques et mécaniques des pierres dures soumises à différents types de forces qui expliquent les associations récurrentes entre caractères et techniques. Dans le cas d'une interprétation d'objets selon le niveau de savoir-faire, la construction de régularités, transférables sur les pièces archéologiques, implique deux étapes : 1) l'observation d'une corrélation entre traits descriptifs et niveaux de savoir-faire (corrélation entre maladresses, erreurs, accidents, morphologie et niveaux de savoir-faire), 2) la démonstration que cette corrélation est stable dans le temps et donc valable quels que soient les périodes, les cultures, les individus, la matière première, la technique utilisée, c'est-à-dire quelles que soient les conditions dans lesquelles la taille de l'objet a été exécutée. Cette démonstration implique de s'interroger sur le

processus d'acquisition des habiletés de taille et donc de quitter le domaine de l'archéologie pour se tourner vers la discipline de référence, à savoir la psychologie expérimentale, cela au même titre que, pour expliquer les traits diagnostiques des techniques de taille, nous nous étions tournés vers la physique des matériaux. Autrement dit, dans les deux cas, le changement d'échelle dans l'objet d'étude (qui touche alors à la formation des caractères observés) impose de se tourner vers un domaine extérieur à l'archéologie et donc vers une autre discipline. C'est à ce stade qu'il est souhaitable d'engager une collaboration avec des chercheurs du domaine afin de construire un savoir selon les règles scientifiques de la discipline en question (Roux et Bril, 2002b)<sup>[1]</sup>.

L'interprétation des pièces lithiques en termes de niveau de savoir-faire selon la procédure décrite est schématisée dans la figure 1. Elle fait appel à des régularités associant caractères lithiques et niveaux de savoir-faire. L'explication à ces régularités est à rechercher dans les difficultés d'acquisition des habiletés de taille. Elle permet de justifier le transfert de la régularité sur les données archéologiques et de valider ainsi l'interprétation obtenue sachant que l'attribut transféré n'est pas observable archéologiquement (on ne peut pas observer des préhistoriques tailler, mais on peut observer les traits diagnostiques de niveaux de savoir-faire ou de techniques de taille). A contrario, l'utilisation d'une corrélation non expliquée entre caractères et attributs à des fins interprétatives ne permet pas de valider l'interprétation obtenue. D'où la pertinence des questions de C. Perlès évoquées en introduction.

## ÉTUDES DES HABILÉTÉS MOTRICES COMPLEXES

Avant même d'étudier le processus d'acquisition des habiletés de taille (qui doit permettre de fonder l'association entre caractères lithiques et niveaux de

savoir-faire), la première question à poser est la suivante : comment décrire l'activité technique en question afin de comprendre ce que sera l'objet de l'apprentissage (Bril, 2019) ? Ensuite, il s'agira de s'interroger sur les habiletés impliquées dans l'activité technique, puis sur leur mode d'apprentissage.

### Description de l'activité technique : technique et méthode

Afin d'ancrer notre propos dans la tradition de l'anthropologie française des techniques, nous situons notre approche relativement à la notion de chaîne opératoire. C'est sans doute la proposition d'observation et d'analyse d'H. Balfet dans son article introductif à l'ouvrage *Observer l'action technique : des chaînes opératoires, pour quoi faire ?* (1991) qui souligne le mieux la différence, essentielle, entre ce qu'elle appelle « observation vivante » et « reconstitution de la série logique ». Cette distinction fait écho à l'un des problèmes majeurs rencontrés dans l'analyse du geste technique, entre ce que l'on peut observer sur le terrain empreint d'une très grande diversité (diversité dans la succession des opérations et leur explication par les acteurs) et la conceptualisation que l'on peut en faire et qui est supposée exprimer l'ensemble des faits observables. Le découpage de la chaîne opératoire que propose alors H. Balfet est simple : au niveau qu'elle considère le plus réduit, se trouve l'unité de base, ou plus petite unité d'action sur la matière, désignée par le terme d'opération. Ces opérations sont regroupées en séquences pour donner des sous-ensembles d'unités plus grandes, les phases (de la chaîne opératoire).

On retrouve ici la distinction fondamentale entre technique et méthode, introduite par J. Tixier (Tixier, 1967 ; Tixier *et al.*, 1980 ; Pelegrin, 2005). La technique fait référence au mode physique d'action sur la matière et donc à la plus petite unité d'action, ou unité de base, alors que la méthode renvoie à la manière dont la « technique » est mise en œuvre dans le processus de transformation de

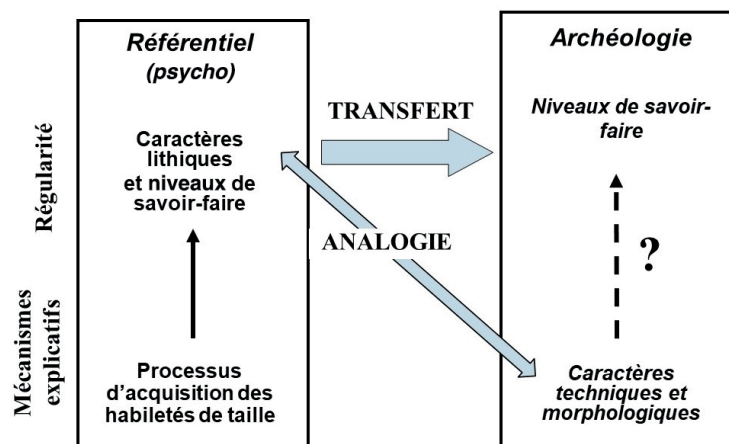


Fig. 1 – Représentation schématique du raisonnement scientifique mis en œuvre pour interpréter des pièces lithiques en termes de niveaux de savoir-faire (d'après Gardin, 1979 et Gallay, 2011).

Fig. 1 – Schematic representation of the scientific reasoning used to interpret lithic pieces in terms of levels of expertise (after Gardin, 1979 and Gallay, 2011).

la matière. Ainsi, la succession d'opérations d'une chaîne opératoire peut n'utiliser qu'une seule technique – comme dans la taille des perles de cornaline à Cambay – ou plusieurs – de même que dans l'utilisation du moulage et du colombin dans la fabrication de récipients céramiques en Afrique de l'Ouest. La technique est le niveau d'action à la base de toute maîtrise de l'action technique et constitue le nœud de l'apprentissage (Roux *et al.*, 1995 ; Bril *et al.*, 2012 ; Bril, 2015 et 2021). De ce point de vue, la distinction entre technique et méthode revêt toute son importance dans la compréhension des activités techniques et de leur apprentissage.

**De l'importance du cadre théorique dans l'étude des habiletés techniques**

L'explication des habiletés impliquées dans une activité technique et des modalités de leur acquisition va dépendre de l'approche théorique utilisée. En effet, les questions posées et les méthodes utilisées seront différentes selon le cadre théorique de référence, et, corrélativement, les explications et les prédictions obtenues pourront varier sensiblement<sup>(2)</sup>.

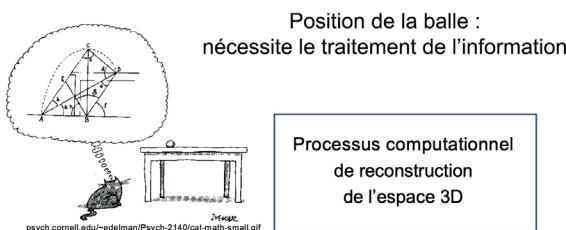
Depuis plusieurs décennies, l'environnement scientifique offre deux grands courants théoriques pour étudier les comportements moteurs (fig. 2). Le courant actuellement dominant, l'approche cognitive, est basé sur une étude des processus mentaux qui s'appuie sur un dualisme « mind-body » et considère les mécanismes cérébraux comme éléments causaux dans l'explication du comportement. *A contrario*, l'approche « ecological psychology/dynamic systems » est basée sur le principe d'une adaptation et d'une dualité fonctionnelle entre l'organisme et

l'environnement (Gibson, 1979). Ces deux courants se retrouvent en archéologie avec d'un côté l'archéologie cognitive qui se concentre sur les habiletés cognitives impliquées dans la taille de la pierre (Wynn, 1985 et 1993 ; Pelegrin, 1990 et 1991 ; Wynn *et al.*, 2021), et de l'autre l'archéologie inspirée de la critique écologique qui rejette le dualisme “mind-body” et argumente, sur la base d'études expérimentales, que la coordination perceptivo-motrice et le contrôle des actions fonctionnelles élémentaires associées à la technique sont essentiels au développement des habiletés de taille (Roux *et al.*, 1995 ; Stout et Chaminade, 2007 ; Nonaka *et al.*, 2010 ; Williams *et al.*, 2014 ; Hecht *et al.*, 2015 ; Bril *et al.*, 2000, 2005 et 2012 ; Pargeter *et al.*, 2020 ; Baber et Janulis, 2021). Les principes à la base de ces deux courants de pensée (fig. 2) ainsi que les hypothèses sur les habiletés de taille élaborées selon chacun d'eux sont résumés et discutés ci-après.

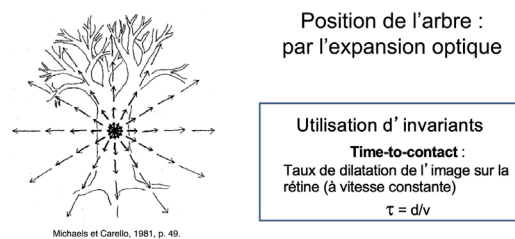
*Théorie cognitive*

Il est courant en sciences cognitives d'attribuer la réalisation d'une action à un module intelligent, une fonction exécutive qui serait à l'origine de la production de la succession cohérente et bien ordonnée d'actions, de postures et de mouvements. Cette approche « prescriptive » stipule que le comportement observable est le résultat de l'activation de représentations, de modèles internes ou de programmes. Au cours du développement, le cerveau construirait un modèle interne du monde extérieur. Les phénomènes mentaux qui sous-tendent le comportement seraient ainsi issus de calculs sur les représentations internes porteuses d'informations. Le cerveau serait en

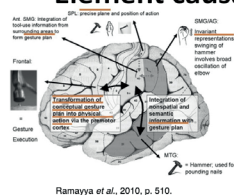
**Perspective cognitive**



**Perspective écologique/ systèmes dynamiques**



**Élément causal : le cerveau**



- ✓ Modèles internes
- ✓ Représentation
- ✓ Primitives motrices
- ✓ Schémas moteurs
- ✓ Plan d'actions
- ✓ Etc.

**Élément causal : dynamique du système individu/environnement + auto-organisation**

- ✓ Perception directe
- ✓ Sélection de l'information, détection d'invariants
- ✓ Initialisation des conditions d'auto-organisation du système (ensembles de contraintes : organisme, tâche, environnement)

**Fig. 2 –** Illustration des deux courants théoriques explicatifs de l'action motrice.  
**Fig. 2 –** An illustration of the two main theoretical framework explaining motor activity.

quelque sorte un système de traitement de l'information, c'est-à-dire un système qui prend de l'information en entrée, la traite en fonction des représentations présentes dans le cerveau, puis en sortie produit de l'information nécessaire au comportement. Quels sont alors les calculs qui interviennent entre ce que l'on perçoit et ce que l'on produit ? Selon cette perspective une action gestuelle par exemple serait codée de différentes manières, en coordonnées cinétiques, en trajectoire, ou encore en séquence d'activation de certains muscles (Ramus, 2017). Le chat de la figure 2 illustre clairement cette perspective : ce dernier regarde sa cible, l'objet à saisir, calcule/évalue sa distance, puis élabore une stratégie de saisie à partir d'un répertoire de programmes moteurs stockés quelque part dans le cerveau.

Ces représentations tiennent ainsi un rôle essentiel dans toute planification et réalisation d'actions, et seraient situées dans des régions spécifiques du cerveau. C'est ainsi que S. H. Johnson-Frey considère que « la capacité d'utilisation d'outils provient de réseaux fonctionnellement spécialisés (dans le cerveau) impliquant les aires temporales, pariétales et frontales dans l'hémisphère gauche du cerveau » (Johnson-Frey, 2004, p. 71). Le développement du contrôle préfrontal exécutif serait essentiel à l'émergence de la cognition humaine moderne (Stout *et al.*, 2015). Une question reste cependant en suspens : selon quels mécanismes les aires frontales interviennent-elles dans le comportement observable ? En d'autres termes, si effectivement les aires frontales sont activées au cours de l'action de percussion, quelles sont les dimensions de cette action, dont l'on verra la complexité, qui seraient contrôlées par ces aires frontales, et comment ?

### *Les habiletés de taille selon l'approche cognitive*

En archéologie, des hypothèses ont été élaborées sur les habiletés de taille selon l'approche cognitive. Ces habiletés mettraient en jeu des savoir-faire et des connaissances. Sur ce sujet, on citera J. Pelegrin, l'un des premiers à avoir introduit cette distinction dans le domaine de la préhistoire :

« Les connaissances regroupent d'une part les représentations mentales des formes jugées idéales et des matériaux en jeu (concepts), et un registre de modalités d'action (gestes associés à leur résultat pratique). Ces connaissances correspondent à des mémorisations de formes et d'actions élémentaires, et peuvent être acquises pour l'essentiel par simple observation des aînés, en s'inscrivant dans la mémoire des faits. Les savoir-faire, eux, reviennent à la capacité d'effectuer des opérations mentales et à des estimations sur les résultats de ces opérations. Le savoir-faire idéatoire correspond à la construction et l'évaluation critique de la situation présente, à l'évocation des suites possibles selon diverses modalités imaginées, suites virtuelles chacune qualifiée selon ses avantages et risques respectifs. Le savoir-faire moteur correspond à la programmation plus ou moins fine des gestes de taille, c'est-à-dire à des opérations intuitives

sur les paramètres sensoriels et proprioceptifs en jeu [...]. À l'opposé des connaissances, les savoir-faire [...] sont du ressort de la mémoire procédurale [...]. » (Pelegrin, 1991 ; 3).

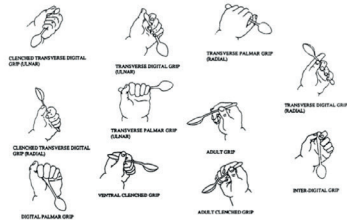
L'approche de J. Pelegrin fut largement inspirée des travaux de neurosciences sur les patients atteints d'apraxie et chez qui on observe des perturbations à intégrer leur connaissance de l'utilisation d'outils à un comportement moteur fonctionnel efficace. En effet, des difficultés conceptuelles peuvent s'accompagner d'une utilisation normale de l'outil ou, à l'opposé, une connaissance normale de l'outil peut donner lieu à une utilisation erronée, ce qu'illustrent les cas d'utilisation d'une cuillère pour couper du pain ou d'un peigne pour se brosser les dents. Ces observations ont par la suite donné lieu à de très nombreux travaux en neurosciences, suggérant que la connaissance sémantique de l'objet pouvait être dissociée de la capacité d'exécution de l'action, en d'autres termes les représentations conceptuelles de l'outil et de l'action associée seraient représentées indépendamment des transformations sensori-motrices nécessaires à l'exécution des mouvements. En effet, des lésions du cortex frontal gauche entraîneraient une production de l'action impropre mais une bonne connaissance sémantique des outils, alors qu'une lésion temporale gauche aurait pour conséquence une mauvaise identification de l'outil (voir par exemple Ramayya *et al.*, 2010 ; Le Gall *et al.*, 2012 ; Osiurak *et al.*, 2016). C'est semble-t-il cette dissociation entre connaissance sémantique et exécution de l'action qui est à la base de la distinction entre savoir-faire idéatoire et savoir-faire moteur, que l'on trouve chez J. Pelegrin.

### *Pourquoi l'approche cognitive n'est pas satisfaisante*

Toutefois, ces hypothèses sont loin de faire l'unanimité. En effet, de nombreuses questions sont apparues, en particulier sur la notion de programme moteur, son absence de mesure objective, ce qu'il contient, et comment et où il est créé (Summers et Anson, 2009). L'ensemble des notions utilisées telles que la notion de représentations mentales, de modalités imaginées, de mémoire procédurale ou encore d'opérations mentales ou intuitives ont posé des questions analogues.

Un exemple simple et familier pour beaucoup, manger sa soupe avec une cuillère, illustre la difficulté d'utiliser ces notions pour expliquer la maîtrise et l'apprentissage d'une activité quotidienne. Malgré son apparente simplicité, cette activité peut s'avérer beaucoup plus complexe et multidimensionnelle qu'il n'y paraît : observons un enfant et un adulte manger leur soupe (fig. 3). Trivial peut-être, mais il faudra plusieurs années à l'enfant pour maîtriser ce geste technique patent et dont l'acquisition semble aller de soi. Les rares études analysant cet apprentissage montrent qu'il n'en est rien (Connolly et Dalglish, 1989). Que doit maîtriser et donc acquérir « le mangeur de soupe » ? Pour le savoir, commençons par observer et rendre compte du comportement du/de

Novice/apprenant



Connolly et Dalgeish, 1989.

Expert



**Fig. 3 –** Utilisation d'une cuillère par un jeune enfant (novice apprenant) et un adulte (expert maîtrisant cette habileté technique ; d'après Connolly et Dalgeish, 1989).

**Fig. 3 –** Acquisition of eating with a spoon contrasting a child and an expert adult eating cream or soup ( from Connolly et Dalgeish, 1989).

la soupeur(e) : un flux continu de signaux (postures et mouvements) donne corps à cette activité. Une fois l'outil choisi, la main active sélectionnée, la posture stabilisée, la séquence d'actions peut être décrite de la manière suivante : localiser la nourriture dans le contenant ; prélever une portion adéquate de nourriture avec la cuillère ; porter la cuillère à la bouche, cette dernière devant s'ouvrir de manière synchronisée avec le mouvement du bras et de la main ; verser la nourriture dans la bouche ; retirer la cuillère ; la redescendre dans le conteneur, puis recommencer, etc.

Il est à noter toutefois que jusque-là rien n'a été dit sur la configuration de la saisie de la cuillère par la main, ni sur l'orientation de la cuillère, ni sur sa trajectoire, sa vitesse et son accélération/décélération au cours du mouvement de montée et descente (Van der Kamp et Steenbergen, 1999 ; Van Roon *et al.*, 2003 ; Van Roon *et al.*, 2004). Il faudrait également prendre en considération la posture et la configuration des mouvements articulaires du bras et de la main ainsi que des doigts, mais aussi la stratégie de coordination entre le mouvement de la cuillère et celui des lèvres et de la langue, le contrôle visuel du contenu de la cuillère en mouvement, la maîtrise des propriétés inertielles du bras en mouvement, etc. De plus, ce système et ses coordinations dépendent du contexte culturel, des caractéristiques de l'outil (la cuillère), ou encore du type d'aliment et bien sûr de la forme physique et psychologique du mangeur.

La question est alors la suivante : dans quelle mesure les différents concepts avancés, tels que les représentations mentales ou le programme moteur, permettent d'expliquer ce qui est en jeu dans la maîtrise et donc dans l'acquisition de ce type d'activité technique ? Que doit acquérir l'enfant pour parvenir à un comportement consi-

déré par son groupe social comme maîtrisé ? La question n'est pas simple, l'activité étant multidimensionnelle.

*Théorie écologique/dynamique*

L'approche écologique récuse le point de vue selon lequel il est nécessaire de modéliser les processus neurologiques cognitifs « in the head » avant de modéliser le contexte dans lequel siège le cerveau. D'emblée multidisciplinaire, cette approche est celle de l'étude des systèmes vivants, de leur environnement et de leurs relations mutuelles et réciproques, ceux-ci formant une unité fonctionnelle, ou écosystème. En d'autres termes, cette approche considère que ces deux entités, corps et environnement, forment un tout et sont interdépendantes et inséparables (Chan et Shaw, 1996).

Alors que l'approche cognitiviste met l'accent sur les processus internes à l'acteur, donnant à l'activité cérébrale un rôle causal, l'approche écologique/dynamique postule que l'organisme, c'est-à-dire ici l'acteur, participe à la dynamique d'un environnement en perpétuel changement, mais ne le contrôle pas directement. C'est donc à un système associant l'acteur, l'environnement et la tâche à effectuer, ainsi qu'à la dynamique du couplage entre ces différents éléments que l'on s'intéressera. Cette perspective conduit à considérer que l'organisation de toute action – temporelle et spatiale – peut être interprétée comme la résultante d'un certain nombre de contraintes liées aux spécificités de l'organisme, de l'environnement et de la tâche à effectuer, et constitue en quelque sorte une propriété émergente du système (Newell, 1991 et 1996) :

- l'organisme définit une personne (ou un animal) ayant un certain potentiel de base issu du développement anatomique (taille, poids, masse musculaire et gras-



seuse, etc.), physiologique (maturation du système nerveux, des systèmes sensoriels...), cognitif (perception, mémoire, connaissances...), affectif (motivation, peur...), etc. ;

- l'environnement inclut aussi bien les éléments matériels en jeu, en particulier les outils, que le contexte physique, social ou affectif dans lequel se déroule l'action ;
- la tâche se définit par ses propriétés fonctionnelles.

Il en ressort que des variations dans l'un des trois ensembles de contraintes peuvent avoir pour conséquence des variations importantes au niveau des propriétés émergentes.

Ainsi, le poids, la taille et les matériaux dont est fait le marteau sont autant de propriétés des éléments en jeu qui imposent à l'action certaines caractéristiques. Cela ne veut pas dire pour autant que l'action est totalement organisée par le jeu des contraintes. Il revient en fait à l'acteur, dans la réalisation de l'action, d'être capable de choisir, d'initialiser les caractéristiques des éléments en jeu, jouant en quelque sorte sur l'ensemble des contraintes en présence, et donc sur certaines propriétés émergentes.

### *Les habiletés de taille selon l'approche écologique*

Selon cette perspective théorique, l'analyse du comportement prend comme point de départ non pas l'activité cognitive à priori de l'acteur, mais la tâche elle-même (Biryukova et Sirotkina, 2020). Cette approche s'apparente en quelque sorte à celle d'un ingénieur qui travaille à la construction d'un pont ou d'un bâtiment, et qui se pose la question de savoir quelles vont être les contraintes qu'il va falloir satisfaire afin que le pont ou le bâtiment ne s'effondre pas et résiste quelles que soient les conditions extérieures. De manière analogue, l'approche écologique analyse l'action en termes de contraintes fonctionnelles, c'est-à-dire de force et d'énergie nécessaires à la transformation de la matière. En effet, comme nous l'avons vu dans le cas du soupeur, l'objectif premier de l'acteur n'est pas de produire des mouvements, mais de créer les forces qui lui permettent de porter sa cuillère à la bouche tout en satisfaisant des contraintes d'espace et de temps.

Cette perspective met ainsi l'accent sur la nature de l'action, le but recherché, et non pas sur le mouvement corporel qui en est de toute évidence le médiateur. Dans le cas de la taille de la pierre, l'hypothèse est que la technique est au cœur de la maîtrise de l'action de taille. Quant à la méthode, elle agit comme un guide vers le but, et peut être considérée comme la connaissance nécessaire au déroulé des différentes étapes impliquées. Ce sont ces connaissances qui peuvent être assimilées à la notion de « planification », fonctionnant comme un guide vers le but (Agre et Chapman, 1990). De telles connaissances sont supposées être faciles à acquérir, car elles peuvent être enseignées verbalement ou encore acquises par observation (par ex. Byrne et Russon, 1998). De fait, la succession des étapes nécessaires à la réalisation d'un artefact lithique peut être déchiffrée en observant le processus de fabrication. Cependant, et cela est essentiel, une

bonne connaissance de la méthode ne préfigure en rien la réussite de la tâche. En effet, ce qui va être déterminant dans la réussite est la capacité à produire l'éclat envisagé et/ou à rectifier, par l'enlèvement d'un nouvel éclat, l'erreur précédente.

Dans la suite de ce texte, nous illustrerons ces hypothèses à partir des résultats d'une part d'expérimentations de terrain réalisées sur la taille de perles de cornaline selon une technique de percussion par contre-coup (définition dans Pelegrin, 2000), d'autre part d'expérimentations portant plus spécifiquement sur l'enlèvement d'éclats selon une technique de percussion directe (Tixier *et al.*, 1980). La technique de percussion par contre-coup est une technique récente dans l'histoire des techniques de taille. Néanmoins, elle fournit un référentiel approprié car, dans la taille de la pierre, ce sont les paramètres stables de la fracture conchoïdale qui doivent être contrôlés. On peut donc supposer que ce sont des habiletés du même ordre qui sont impliquées dans toute technique de taille.

L'ensemble des résultats obtenus montrent non seulement la nécessité d'une excellente maîtrise de la technique pour obtenir un bon résultat, mais aussi la complexité d'une action souvent considérée comme immédiate et simple puisqu'un apprenti tailleur peut après quelques essais produire des éclats.

### *La taille des perles de cornaline*

Une série d'expérimentations avec des tailleurs de perles en calcédoine dans la ville de Cambay (Gujarat, Inde) ont été menées lors de deux missions successives. L'objectif était de comprendre ce que recouvrait la notion d'expertise caractérisée, en l'occurrence, par le très long apprentissage de la taille de perles de grandes dimensions. Ces expérimentations avaient deux particularités essentielles caractéristiques de toute expérimentation de terrain. D'une part, elles étaient basées sur une analyse de l'activité réelle quotidienne des artisans qui étaient placés dans des conditions habituelles de travail relativement contrôlées, tous les artisans devant réaliser les mêmes tâches avec une matière première aux propriétés comparables. D'autre part, les enregistrements de l'activité étaient réalisés avec des techniques de laboratoire permettant d'enregistrer non seulement des séries temporelles d'images de la totalité des processus de fabrication – à partir de vidéos –, mais aussi le mouvement du marteau – à l'aide d'un accéléromètre –, ainsi que le mouvement des membres supérieurs – à partir d'un système de capteurs électromagnétiques<sup>(3)</sup>. Ce projet était ainsi d'emblée pluridisciplinaire, impliquant psychologie, archéologie, biomécanique, neurosciences et informatique<sup>(4)</sup>.

Les expérimentations ont été menées avec des artisans répartis en quatre groupes selon un niveau de savoir-faire reconnu socialement – experts de haut niveau, experts de bas niveau, apprentis et débutants –, tous néanmoins très impliqués, car gagnant leur vie grâce à leur production. Aux cours des différentes expériences, les artisans devaient réaliser une série d'ébauches de plusieurs formes

plus ou moins familières. La consigne était de prendre son temps afin de produire un résultat de haute qualité. Afin d'évaluer le rôle des propriétés du contexte de la tâche, à savoir les caractéristiques de la matière première (sa dureté) et des outils (poids et longueur du manche du marteau), deux ensembles d'ébauches de différentes dimensions et matériaux ont été proposés aux tailleurs : un ensemble en cornaline et un ensemble en verre. Par ailleurs, les marteaux variaient en poids et en longueur de manche.

La taille de perles de cornaline étant un processus en deux étapes, les expérimentations ont porté sur chacune des étapes : de la matière première à l'ébauche, puis de l'ébauche à la préforme. Les premières avaient comme objectif de travailler sur la connaissance de la méthode à partir d'une analyse fine du cours d'action, à savoir la succession des actions réalisées au regard du but à atteindre : l'ébauche à produire (Roux et David, 2005). Les secondes abordaient le lien entre la maîtrise de la technique et celle de la méthode, permettant une analyse simultanée du cours d'action (méthode), du mouvement de percussion (technique) et du résultat (qualité de la perle ; Roux *et al.*, 1995 ; Bril *et al.*, 2000 et 2005).

Les résultats obtenus à partir des différents niveaux d'analyse pris en compte ont permis de montrer d'une part que la qualité des produits finis, définie par des caractères techniques et morphologiques, variait significativement selon le niveau d'habileté, et d'autre part que les différences de qualité s'expliquaient par des différences d'habiletés motrices et cognitives, plus particulièrement par des différences dans la maîtrise de la technique (Roux et David, 2005 ; Roux *et al.*, 1995).

En effet, la maîtrise de l'action élémentaire, à savoir le geste de percussion, est apparue comme déterminante pour ensuite mener à bien la succession des opérations fonctionnelles et donc la planification au regard à la fois du produit fini recherché et des propriétés de la matière première. A contrario, la méthode est apparue comme connue de tous, indépendamment de toute pratique de taille, y compris dans le cas de la taille de pièces de dimensions inhabituelles pour les artisans les moins experts. En effet, ces derniers connaissaient les principales étapes à suivre pour réaliser les ébauches ou les préformes. Ces connaissances avaient été acquises par simple observation de tailleurs confirmés dans les ateliers. Autrement dit, les résultats obtenus ont montré que les méthodes correspondent à des schémas principes mémorisés qui, tout en préexistant à l'action, ne sont en aucun cas suffisants pour que l'artisan agisse efficacement. On peut connaître la méthode et être incapable de la mettre en œuvre dès lors que le geste élémentaire n'est pas maîtrisé.

L'autre résultat important concerne le geste élémentaire, c'est-à-dire le mouvement effectué lors de la percussion. Les résultats ont en effet montré une très grande diversité interindividuelle dans l'exécution du mouvement (Biryukova *et al.*, 2005 ; Biryukova et Bril, 2008). Nous verrons que ce résultat revêt une importance toute particulière dans l'explication du processus d'apprentissage.

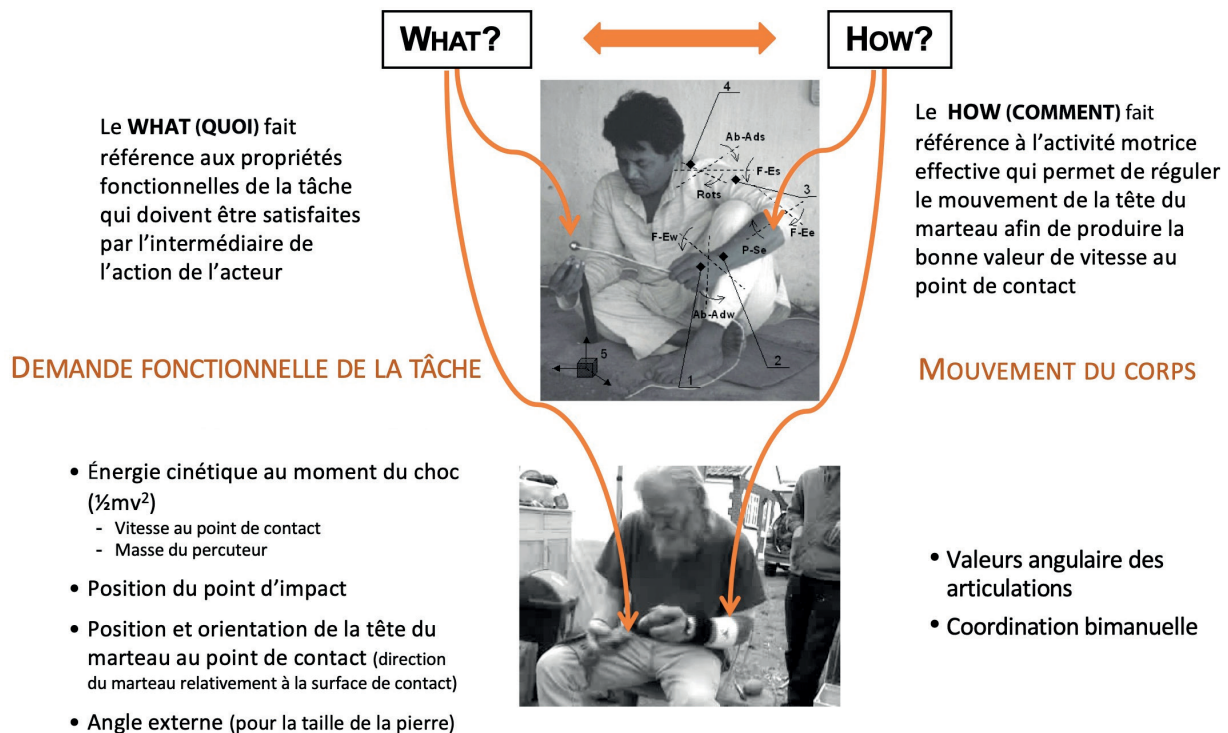
### *Le geste de percussion*

Les résultats obtenus à Cambay ont conduit à une seconde étape de recherche portant essentiellement sur le geste de percussion, et donc sur la technique, abordée cette fois-ci à partir de la percussion directe avec percuteur dur, lors d'expérimentations auxquelles ont participé des tailleurs de niveau d'expérience allant de l'expert au débutant en passant par un niveau intermédiaire. L'étude du geste de percussion proprement dit a conduit à l'élaboration d'un modèle permettant de différencier l'action sur la matière à l'origine de la fracture conchoïdale, correspondant donc à la technique proprement dite, de l'action correspondant au mouvement corporel effectué par le tailleur qui en est, en quelque sorte, le médiateur (fig. 4). Cette distinction rejoint la proposition de N. Bernstein de différencier dans la performance du geste de percussion, le WHAT, l'objectif (ici produire un éclat), du HOW, qui fait référence au moyen d'obtenir ce résultat par l'intermédiaire du mouvement (Bernstein, 1996 ; Biryukova et Bril, 2008 ; Bril, 2015).

S'agissant du WHAT de Bernstein (fig. 4), l'analyse du comportement du tailleur a eu pour objectif de comprendre si et comment ce dernier réussit à contrôler les différentes dimensions fonctionnelles de cette action mécanique sur la matière, à savoir les contraintes de la tâche technique. L'action mécanique correspond ici à un choc élastique. L'essentiel se passe au niveau du percuteur et de la pierre percutée, ce qui correspond à un transfert d'énergie (énergie cinétique,  $\frac{1}{2}mv^2$ ) au moment du choc. Ainsi, une fois l'objectif défini (enlever un éclat grand ou petit, épais ou mince, etc.), et le marteau choisi, ce que le tailleur doit produire, au niveau du percuteur, est la quantité d'énergie cinétique requise, et ce qu'il doit contrôler est le vecteur vitesse (intensité, direction, point de percussion).

À cela s'ajoute une question subsidiaire mais essentielle : comment l'acteur parvient-il à produire et à contrôler cette énergie cinétique dans le cadre d'une activité sensori-motrice bimanuelle (Nonaka et Bril, 2012 ; Bril *et al.*, 2015) ancrée dans une posture stable ? Cette question revient à poser celle de l'acquisition de la maîtrise d'une coordination posturo-motrice qui donne naissance au mouvement du marteau dont les propriétés sont dictées par le projet d'éclat à enlever. Or, nous avons vu que les tailleurs de perles de Cambay montrent une grande diversité de mouvements, ce qui a été confirmé par les expérimentations sur le flaking proprement dit (Bril *et al.*, 2010 ; Rein *et al.*, 2013 et 2014 ; Parry *et al.*, 2014). La conclusion est qu'il n'y a pas de relation consubstantielle entre le mouvement de l'acteur et le mouvement du percuteur, qui est, répétons-le, le paramètre causal dans l'enlèvement d'éclat.

Voyons maintenant le HOW de Bernstein (fig. 4). L'acteur peut élaborer des stratégies d'action variées – trajectoire ample ou au contraire petite, utilisation de l'énergie potentielle ou au contraire d'une importante énergie musculaire, etc. Ces différentes stratégies d'action donneront naissance, là encore, à des activités



**Fig. 4** – Illustration de la relation réciproque entre le WHAT de l'action et le HOW, montrant la relation entre l'action du marteau qui va causer la fracture et le mouvement du tailleur qui donne au mouvement du marteau les caractéristiques voulues (adaptée d'une diapositive de L. Biryukova lors d'une présentation orale à l'EHESS, octobre 2011).

**Fig. 4** – Illustration of the reciprocal relation between the WHAT and the HOW. It shows the the relationship between the hammer movement that generate the fracture, and the kinematics of the arm which engender the hammer strike (adapted from a slide from L. Biryukova's presentation, EHESS, October 2011).

motrices produisant des mouvements pouvant être fort différents. On constate donc qu'un même « geste technique » peut être réalisé de multiples façons, pourvu que la stratégie utilisée – et donc les mouvements réalisés – produise les bonnes valeurs des paramètres fonctionnels, condition de la réussite de la tâche. Ainsi, par exemple, selon l'acteur, les gestes pourront nécessiter plus ou moins d'énergie musculaire pour produire une même vitesse au contact du percuteur avec la pierre. Ces gestes, qui correspondent à des mouvements différents du membre supérieur, auront la même efficacité fonctionnelle.

Comment des variations de mouvement d'un individu à l'autre sont-elles possibles ? Si d'un point de vue biomécanique on prend l'exemple de la percussion, qu'il s'agisse d'un coup de marteau où de l'enlèvement d'un éclat, cela nécessite un ensemble de rotations au niveau des articulations de l'épaule, du coude et du poignet. Pour le bras, sept rotations sont possibles, trois au niveau de l'épaule, deux au niveau du coude et deux pour le poignet<sup>(5)</sup>. Ces rotations sont indépendantes les unes des autres, ce qui fait référence à la notion de degré de liberté. Dès lors que l'on considère le mouvement du bras, ces degrés de liberté donnent une importante redondance dont l'avantage est la grande flexibilité de mouvement associé (Biryukova et Brill, 2008). Prenons la trajectoire du percuteur au cours du mouvement de percussion. Dès lors que l'on a deux, ou plus, degrés de liberté, le percuteur peut

décrire un nombre infini de trajectoires, puisque pour une position donnée du percuteur, différentes configurations articulaires sont possibles (fig. 5a), ce qui pourra ainsi engendrer une large variété de trajectoires du percuteur (fig. 5b)<sup>(6)</sup>.

Cette importante redondance permet une grande adaptation des mouvements aux changements de l'environnement et/ou à la demande de la tâche, mais permet aussi un style de mouvement personnel (Biryukova et Brill, 2008 ; Parry *et al.*, 2014) ou même culturel (Brill, 2018).

Cela nous ramène à notre objectif premier : ce que doit apprendre un novice pour devenir expert n'est pas d'abord un mouvement des membres ou du corps tout entier, mais la capacité, par l'intermédiaire d'une stratégie de mouvement qui lui est propre, de satisfaire aux contraintes de la tâche (Nonaka *et al.*, 2010 ; Parry *et al.*, 2014 ; Brill, 2015 et 2021 ; ici fig. 5).

### Pourquoi la maîtrise de la technique est-elle si longue à acquérir ?

Un regard sur la manière dont les tailleurs de différents niveaux d'expertise maîtrisent la production des paramètres fonctionnels (le WHAT de l'action de taille) d'une part et celle des paramètres de mouvement (le HOW) d'autre part permet de comprendre en quoi la technique de taille est difficile à maîtriser, et ce qui doit être acquis au cours de l'apprentissage.

*Les paramètres fonctionnels*

À la question de savoir si, quel que soit son niveau d'expertise, un tailleur peut satisfaire une requête d'éclats aux dimensions particulières, la réponse se révèle négative. En effet, autant les productions des experts différencient clairement les grands éclats des petits, autant les débutants produisent des éclats extrêmement variables, sans contrôle de leurs dimensions (Bril *et al.*, 2010).

Quelle distance alors peut-on observer entre l'éclat souhaité et l'éclat produit (Nonaka *et al.*, 2010) ? Une expérience proposait aux tailleurs de dessiner sur un nucléus les éclats qu'ils souhaitaient produire ; une fois détaché, l'éclat était mesuré et comparé à celui qui avait été dessiné. Les résultats ont montré que seuls les experts parvenaient à produire un éclat dont les dimensions étaient corrélées avec celles de l'éclat dessiné. En outre, alors qu'aucune consigne n'était donnée sur les dimensions des éclats à produire, les experts produisaient des éclats significativement plus grands. Plus significatif encore : alors que la formation d'un éclat implique une interdépendance entre les dimensions de l'éclat, la profondeur de la plateforme et l'angle externe (Dibble, 1997), seuls les éclats d'experts montraient une corrélation entre l'angle externe et la longueur de l'éclat ou la profondeur de la plateforme. De plus, la précision du point d'impact entre prédiction et production était significativement meilleure chez les experts. Ces disparités entre ce qui est souhaité et ce qui est produit s'expliquent en partie par l'inadéquation entre l'énergie cinétique produite et les dimensions de l'éclat souhaité. En effet, alors qu'il existe une relation linéaire entre les dimensions de l'éclat et la valeur de l'énergie cinétique (Bril *et al.*, 2010), seuls les experts ont produit une énergie

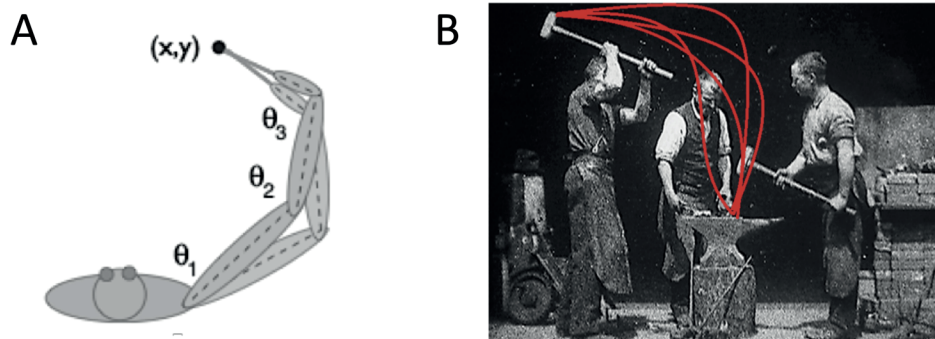
cinétique corrélée avec les dimensions non seulement de l'éclat souhaité mais aussi de l'éclat produit (Nonaka *et al.*, 2010). Il est en outre remarquable que seuls les experts ajustent de manière optimale la valeur de l'énergie cinétique au poids du percuteur. En effet, la production d'énergie cinétique est caractérisée par une relation inverse entre poids du percuteur et vitesse, puisque pour une même quantité d'énergie cinétique produite si le poids du percuteur augmente, sa vitesse à l'instant du choc diminue (Bril *et al.*, 2010 ; Nonaka *et al.*, 2010).

L'ensemble de ces résultats suggère que la grande difficulté dans le contrôle de la configuration d'un éclat consiste à appréhender les possibilités d'enlèvement à partir de la morphologie du nucléus, puisque seules les performances des experts, ayant plus d'une vingtaine d'années d'expérience, montrent une capacité non seulement à prédire la forme de l'éclat mais aussi à en contrôler la production, cette capacité s'appuyant sur les propriétés de la fracture conchoïdale (Bril *et al.*, 2010 ; Nonaka *et al.*, 2010).

*Les paramètres de mouvement*

L'observation des tailleurs de perles de cornaline a montré l'existence d'importantes variations interindividuelles des mouvements associés à la taille, et cela quelle que soit l'expérience du tailleur. Qu'il s'agisse de l'amplitude articulaire au cours du mouvement, de la position initiale des segments du bras (Rein *et al.*, 2013), de la contribution de chaque articulation au mouvement du marteau (Biryukova et Bril, 2008 ; Parry *et al.*, 2014), on retrouve systématiquement ces variations interindividuelles. Ainsi, la multitude de configurations de mouvements observée montre que chaque tailleur construit une solution senso-

## Équivalence motrice



**Fig. 5 – Exemples d'équivalence motrice.** A. Redondance au niveau du membre supérieur : différentes configurations segmentaires peuvent correspondre à une même position du marteau (d'après Schöner *et al.*, 2008). B. Illustration du concept d'équivalence motrice à partir de différentes trajectoires possibles du marteau pour un même point d'impact (d'après Szabados, 2017 ; p. 27, fig. 2.2).  
**Fig. 5 – Examples of motor redundancy.** A. Upper arm redundancy: different joints configurations can be associated with the same position of the hammer (from Schöner *et al.*, 2008). B. Motor equivalence illustrated by the different trajectories of the hammer ending with the same striking location (from Szabados, 2017, p. 27, fig. 2.2).

ri-motrice individuelle préférentielle qui dépend de son expérience et de sa configuration anatomique.

Parmi ce nombre immense de possibilités de formes de mouvements, peut-on alors mettre en évidence des configurations de mouvements permettant un haut degré d'expertise ? Une analyse comparée entre tailleurs de différents niveaux d'habileté a montré que, à Cambay, les artisans les plus experts présentaient des configurations de mouvements articulaires plus variées et plus flexibles (Biryukova et Bril, 2008 ; Biryukova *et al.*, 2015). Plus précisément, la fonctionnalité d'un mouvement peut être évaluée en termes de dynamique des changements de configuration articulaire en distinguant celle qui produit une déviation de la percussion et celle qui n'a pas d'effet. Cette dernière est considérée comme neutre d'un point de vue fonctionnel (pour plus de détails, voir Schölz *et al.*, 2000). Que ce soit chez les tailleurs de perles de coralline à Cambay ou chez les expérimentalistes lors de l'enlèvement d'éclats, on observe chez les plus experts une moindre importance des configurations articulaires qui diminueraient la fonctionnalité de la percussion (Biryukova *et al.*, 2015 ; Rein *et al.*, 2013).

En bref, un haut niveau d'expertise est caractérisé par une importante stabilité des composantes fonctionnelles du mouvement, associée à une large variété de solutions sensori-motrices, ce que synthétise le modèle présenté par la figure 6.

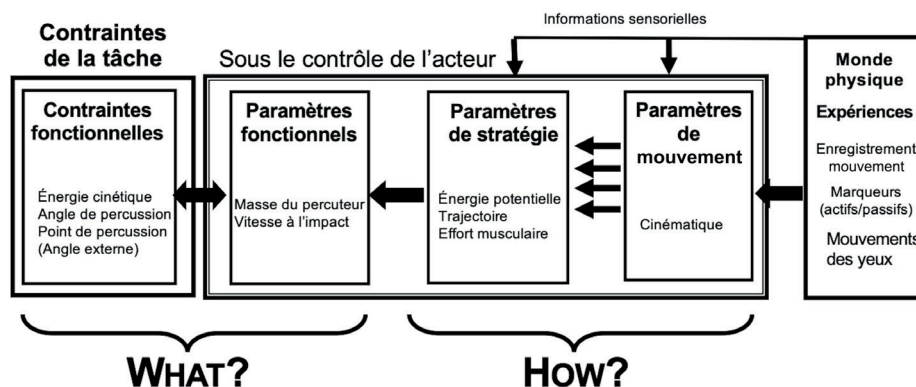
Ce modèle, qui peut être adapté à toute technique, spécifie ce qui, dans le geste technique, relève des contraintes de l'action sur la matière en imposant en quelque sorte le type d'action que doit effectuer l'acteur. Il est important de rappeler ici que ces contraintes ne dépendent pas de l'acteur, mais des propriétés mécaniques d'action sur la matière. Ce sont ces contraintes qui vont déterminer les paramètres que l'acteur doit contrôler (le WHAT). Dans l'exemple de la taille de la pierre, il s'agit de choisir le percuteur – donc son poids – et de lui donner une certaine vitesse au moment du choc, et cela en fonction de

l'objectif que l'acteur poursuit (enlever un éclat grand ou petit, épais ou mince, etc.). Les stratégies motrices pour y parvenir (le HOW), et par conséquent les caractéristiques des mouvements qui seront produits par l'acteur, pourront être très variées et exprimer des particularités individuelles ou culturelles.

### L'apprentissage ou la nécessaire découverte des caractéristiques fonctionnelles de la tâche

Comme discuté ci-dessus, l'analyse des tailleurs de coralline à Cambay, de même que celle des tailleurs modernes, montre que les paramètres fonctionnels de la taille sont régulés à partir de stratégies individuelles au moyen de patterns de mouvement qui varient d'une personne à l'autre (Biryukova et Bril, 2008 ; Rein *et al.*, 2013 ; Parry *et al.*, 2014). En conséquence, ce qui doit être appris n'est pas le mouvement en tant que tel (le HOW), mais comment satisfaire aux contraintes de la tâche (le WHAT ; Vereijken *et al.*, 1992 ; Bernstein, 1996). L'objet de l'apprentissage sera donc la construction de la capacité individuelle à trouver des solutions sensori-motrices permettant d'atteindre le but, à savoir détacher « le bon éclat ».

Il n'est pas rare d'entendre que l'imitation joue un rôle important dans la transmission culturelle (par ex. Cavalli-Sforza *et al.*, 1982) et les apprentissages des pratiques techniques. Toutefois, un rapide tour de la littérature sur l'imitation montre que ce terme ne renvoie pas à un mécanisme d'apprentissage à proprement parler. Ainsi, la présence d'un modèle n'implique pas nécessairement de l'imitation, mais, une situation d'émulation : l'observateur repère le résultat de l'action et essaie de le reproduire, sans se soucier du détail du comportement du modèle (Byrne et Russon, 1998). De manière plus générale, de nombreuses études suggèrent que, en présence d'un modèle, ce n'est pas le détail du mouvement effectué qui est reproduit, mais le but de l'action (Desmur-



**Fig. 6** – De l'action au mouvement, des contraintes de la tâche aux gestes de l'acteur : le cas de la taille de la pierre. À l'exception de l'angle externe, tous les paramètres sont présents, quel que soit le type de percussion. Seuls les paramètres de mouvement peuvent être enregistrés et permettront de calculer les valeurs des paramètres de stratégie et des paramètres fonctionnels (adapté de Bril *et al.*, 2012 et Bril, 2018).

**Fig. 6** – From action to movement in the case of stone knapping. Except for the exterior platform angle, all the parameters in some way or another have to be controlled in any percussive task. Only movement parameters are recorded and allow for computation of regulatory and control parameters (adapted from Bril *et al.* 2012 and Bril, 2018).

get, 2006), le déroulé de l'action du modèle ne faisant qu'attirer l'attention de l'acteur sur certains éléments particuliers de la situation et le conduire à modifier son comportement.

La découverte chez le singe macaque de neurones dits « neurones miroirs », actifs aussi bien lorsque l'animal observe un expérimentateur prendre un objet posé sur un support que lorsqu'il exécute lui-même cette action (Rizzolatti *et al.*, 2001), avait généré beaucoup d'espoirs quant à l'explication du rôle de l'imitation dans l'apprentissage. Il fut cependant démontré que ce phénomène ne fonctionne que si l'action fait déjà partie du répertoire de l'observateur (Calvo-Merino *et al.*, 2006). Ces résultats confirment ainsi que l'imitation proprement dite du mouvement ne peut être à la base de l'apprentissage du geste technique. L'ensemble des résultats sur la taille discutés ci-dessus va dans ce sens. La présence systématique d'importantes variations interindividuelles dans l'exécution du geste de percussion proprement dit montre que la solution motrice est à chaque fois une solution individuelle, il ne peut donc s'agir d'imitation au sens strict du terme. Transposés à l'apprentissage de la taille, ces résultats suggèrent que ce qui serait imité ne se situe pas au niveau de l'action élémentaire, la technique, mais au niveau de l'élaboration de séquences d'action, la méthode.

Ainsi, si l'on peut apprendre la méthode en observant la pratique d'autres personnes, en revanche, l'imitation n'est que de peu d'utilité pour le processus de maîtrise de la technique. Qu'est-ce qui sous-tend alors le processus d'apprentissage ? Pour N. Bernstein, l'apprenant doit concentrer toute son attention et sa volonté sur le résultat du mouvement (le WHAT), le comment (HOW) viendra plus tard, de lui-même (1996, p. 233-234). C'est ce qui ressort de travaux expérimentaux sur les types de pédagogie utilisés dans des situations d'apprentissage d'habiletés complexes, telles que le jonglage (Zentgraf et Munzert, 2009) ou le ski (Vereijken et Whiting, 1990 ; Wulf *et al.*, 2010). Ces travaux ont montré l'existence d'un effet différentiel selon que l'on encourage l'apprenant à porter son attention sur les paramètres internes (son corps) ou externes (l'outil ou plus généralement le système matériel impliqué). Porter son attention sur le mouvement de son corps se révèle nettement moins efficace que se concentrer sur l'interaction outil-environnement.

Face à toute action orientée vers un but, l'acteur doit créer les conditions favorables à la réalisation de ce but, ce qui nécessite un apprentissage de la perception optimale des informations nécessaires à la réalisation de la tâche (Hayhoe et Ballard, 2005 ; Nonaka *et al.*, 2010). Par conséquent, nous interprétons le processus d'apprentissage comme un processus de découverte et de maîtrise progressive des propriétés de la tâche (Foucart *et al.*, 2005 ; Foucart, 2006) qui nécessite de développer la capacité à détecter les contraintes et les opportunités liées à l'action. Cette perspective, « discovery learning », met l'accent sur le processus exploratoire qui consiste à mettre en relation informations, action et mouvement (Vereijken et Whiting, 1990 ; Vereijken *et al.*, 1992).

## INTERPRÉTATION DES PIÈCES ARCHÉOLOGIQUES EN TERMES DE NIVEAUX DE SAVOIR-FAIRE

Dès lors, nos résultats sur les habiletés de taille et leur processus d'acquisition expliquent pourquoi il existe des corrélations entre caractères techniques et morphologiques, et niveaux de savoir-faire. Autrement dit, ils expliquent pourquoi ces corrélations correspondent à des régularités fondées, stables dans le temps, que l'on peut donc transférer aux données archéologiques avec, en retour, l'obtention d'interprétations archéologiques validées empiriquement.

Comme souligné par C. Perlès (2018), différentes échelles de progression ont été identifiées en préhistoire de manière récurrente, à travers le temps et l'espace, c'est-à-dire quelle que soit la tradition technique. Ces échelles sont les suivantes :

a) des pièces non abouties marquées d'une part par de multiples cônes incipients sur n'importe quel type de surface, d'autre part par des débitages non productifs sur des nucléus déjà débités, des matières premières médiocres ou des supports inappropriés ;

b) des pièces maladroites que caractérise, en particulier, une mauvaise gestion des volumes, avec néanmoins une compréhension des objectifs des différents stades de la chaîne opératoire ;

c) des pièces maîtrisées que caractérise une chaîne opératoire maîtrisée ;

d) des pièces exceptionnelles que caractérisent des produits hors norme ou encore des produits avec une prise de risque témoignant d'une parfaite maîtrise des techniques et méthodes.

Ces quatre catégories de pièces indiquent différentes qualités d'exécution décrites en termes techniques et morphologiques au regard des produits recherchés. Elles ont été interprétées en termes de niveau de savoir-faire et de stade d'apprentissage : les pièces non abouties correspondent à des tailleurs débutants, les pièces maladroites à des tailleurs apprentis, les pièces maîtrisées à des tailleurs confirmés et les pièces exceptionnelles à des tailleurs experts.

Les pièces non abouties peuvent être, en effet, associées à des débutants, car elles témoignent de coups de percussion qui ne sont pas maîtrisés du point de vue des gestes élémentaires, sachant que l'entraînement à la maîtrise du geste élémentaire demande la répétition de milliers de coups et, donc, correspond nécessairement à une première étape pour ensuite développer une maîtrise du cours d'action. Les pièces maladroites sont le stade suivant, faites par des apprentis, car elles témoignent d'une amélioration des gestes élémentaires, sans pour autant les maîtriser complètement, ce qui a pour conséquence des fautes dans la gestion des volumes. Ces fautes sont attendues, non pas en raison d'une méconnaissance de la chaîne opératoire qui, rappelons-le, s'acquiert rapidement, mais parce que sa mise en œuvre dépend de la maîtrise des gestes élémentaires. Autrement dit, l'absence de

maîtrise des gestes élémentaires et l'absence de maîtrise du cours d'action vont de pair, et leur cooccurrence est le marqueur de ce stade d'apprentissage. Vient ensuite le stade suivant avec des pièces dites « maîtrisées », caractérisées par une maîtrise des gestes élémentaires et du cours d'action. On retrouve ici la cooccurrence entre qualité des gestes élémentaires et du cours d'action, dont la maîtrise indique par conséquent des tailleurs expérimentés. Enfin, il reste les pièces exceptionnelles qui se caractérisent par une maîtrise remarquable de la technique et un cours d'action optimal au regard de l'intention. Elles sont nécessairement le produit d'experts, car seule une maîtrise exceptionnelle des gestes élémentaires, maîtrise ô combien difficile et longue à acquérir, permet une mise en œuvre optimale du cours d'action dont la ligne directrice est, rappelons-le, donnée par la méthode.

Précisons que, au sein de chaque échelle de progression et donc au sein de chaque niveau de savoir-faire, il existe des variations interindividuelles, visibles sur les produits finis. L'explication à ces variations est à rechercher dans le mécanisme d'apprentissage : si les méthodes sont apprises selon un modèle donné par le tuteur, en revanche, les mouvements relèvent d'un style individuel pouvant entraîner des variations dans les produits finis. Autrement dit, l'apprentissage des habiletés de taille est nécessairement un apprentissage individuel, même si socialement médiatisé. Il en résulte des variations interindividuelles dans les produits finis, déterminées en particulier par les contraintes de l'apprentissage. Ces contraintes sont valables quels que soient l'habileté motrice et le contexte culturel (Bril, 2018 ; Gandon *et al.*, 2020). Une étude récente sur la transmission de gestes de tournage montre ainsi que les récipients fabriqués de manière traditionnelle par des experts ne sont pas des copies parfaites mais une combinaison de traits individuels et culturels (Gandon *et al.*, 2021). Il en résulte une variabilité interindividuelle sur des formes néanmoins standardisées fabriquées à partir d'un même matériau argileux.

### UN CALENDRIER UNIVERSEL D'APPRENTISSAGE

Outre les différents niveaux d'habiletés dont témoignent les assemblages lithiques, toutes périodes confondues, l'exploitation de nodules de plus en plus grands dans les débitages au fur et à mesure de la progression dans les niveaux d'habiletés indique un véritable calendrier d'apprentissage (Klaric, 2018). En effet, les différents niveaux d'habiletés montrent une corrélation avec la taille des nodules exploités, ce qui signifie que les nodules donnés à tailler étaient sélectionnés en fonction du niveau du tailleur ; les nodules les plus petits pour les débutants, les plus grands pour les tailleurs expérimentés. Cela s'explique une fois encore par la progression nécessaire dans la maîtrise des gestes élémentaires, les coups de percussion associés aux éclats les plus grands étant les plus difficiles à maîtriser, comme démontré précédem-

ment. Donc aux débutants, les plus petits éclats à débiter ; aux confirmés, les plus grands. Cette sélection des nodules en fonction du niveau d'habiletés suggère une forme de « calibration » de la tâche : on donne à faire en fonction de ce que peut faire le tailleur. Une nouvelle tâche à exécuter sera donnée lorsque la tâche propre au stade précédent aura été maîtrisée. Elle nécessitera à son tour un nouvel apprentissage par la répétition de milliers de coups.

Il s'agit donc en quelque sorte d'un « calendrier d'apprentissage » (Roux et Bril, 2002a) qui suit des principes communs à la base de l'acquisition de toute habileté motrice (Newell, 1996). Cet apprentissage consiste pour l'apprenant, quel que soit son âge, à progressivement apprécier les propriétés du corps, de l'outil, du matériau et de la tâche motrice, l'amenant ainsi à découvrir et à maîtriser la dynamique dans l'action entre ces différents éléments.

Le passage d'une étape d'apprentissage à l'autre se fait en fonction des produits finis réalisés, lesquels révèlent les capacités développées. Cela a été observé en Inde aussi bien pour l'apprentissage du tournage que celui de la taille de la pierre. Dans ces deux cas, l'apprentissage commence vers l'âge de 8 ans et dure plusieurs années selon les produits finis fabriqués. Toutefois, si l'âge des apprenants est plus tardif, pour autant, on retrouvera une progression correspondant à l'intégration progressive des différentes solutions motrices permettant de satisfaire aux contraintes fonctionnelles de l'action. Cet apprentissage progressif a été également observé pour les tâches domestiques par différents auteurs dans un nombre considérable de cas ethnographiques. Ceux-ci notent un échelonnement inhérent à la difficulté ou à la complexité de la tâche : « [...] there is a step-wise or ratchet-like relationship between the child's understanding, strength, skill and the demands of the task » (Bock, 2002, p. 166 cité par Lancy, 2010, p. 88).

Dans tous les cas, « la succession des demandes envers l'apprenant s'ajuste à des principes intrinsèques à la difficulté sensori-motrice et cognitive en jeu dans l'activité » (Roux et Bril, 2002a, p. 240). Les scènes d'apprentissage préhistoriques dévoilées dans le cadre de contextes socio-économiques aujourd'hui disparus confirment l'universalité des principes qui sous-tendent l'organisation de l'apprentissage de toute activité motrice.

### LE CONTEXTE DE L'APPRENTISSAGE : UN ESPACE D' ACTIONS ENCOURAGÉES

La découverte des propriétés de l'action et la capacité à les satisfaire de manière optimale ne se font pas hors contexte. La particularité même des situations d'apprentissage relève de l'existence de médiateur(s) dont le rôle est de rendre possible la perception de possibilités d'action. Cette médiation s'opère dans un espace d'actions caractérisé par deux dimensions principales et décisives sur l'expérience de l'apprenant (Reed et Bril, 1996) :

- l'organisation matérielle de l'environnement, et donc la mise à disposition pour l'apprenant d'objets, d'opportunités d'actions, etc. ;

- les modes d'interaction tuteur/apprenant, et en particulier le comportement d'étayage ou de guidage, ou encore de modèle de la part du tuteur.

Le terme d'interaction fait ici référence à un ensemble de processus mettant en œuvre, chez les différents protagonistes (apprenant et tuteur principalement), des degrés de collaboration et de niveau d'expertise variés (Rogoff et Lave, 1984). Deux ensembles de situations d'apprentissage peuvent se présenter. Dans le premier ensemble, l'apprenant est dans une situation ajustée à ses capacités où la tâche à effectuer est calibrée – simplification de la tâche, intervention d'un modèle –, créant ainsi un environnement qui réduit l'erreur ou l'échec. Les débuts de l'apprentissage correspondent à une version simplifiée de la tâche « ultime ». C'est ce que décrit le calendrier d'apprentissage présenté ci-dessus. Cette situation des « petits pas » est construite sur un développement progressif des capacités de l'apprenant. Elle peut être opposée à un second ensemble de situations où l'apprenant collabore à la réalisation de la tâche « ultime », mais n'a pas les capacités qui lui permettraient de la réaliser seul par lui-même. Ce cas de travail collaboratif a été très bien décrit par C. Childs et P. Greenfield (1980) dans le cas du tissage où l'apprenant participe à la fabrication d'une pièce importante. Ce qui caractérise ces situations est l'importance de la prise en main de l'activité de l'apprenant par le tuteur au début de l'apprentissage, cette prise en main diminuant progressivement alors que l'habileté de l'apprenant se développe. Cette diminution va de pair avec une transformation des modalités d'interaction, physiques et/ou verbales qui, de même, évoluent et se modifient au cours du processus d'apprentissage. Ces situations se rencontrent fréquemment par exemple dans le cadre de la construction d'éléments collectifs de grandes dimensions (maisons, fours, silos, foyers...).

Quelle que soit la situation, ces deux modes de collaboration impliquent une relation de guidage asymétrique (en termes de connaissance et d'expertise) entre deux (ou plusieurs) partenaires : d'un côté, le tuteur qui guide en s'accommodant des capacités de l'apprenant et en assistant pas à pas à la construction de ses connaissances et savoir-faire ; de l'autre, l'apprenant qui est orienté dans son apprentissage. Ces modes d'interaction, qui évoluent au cours du processus d'acquisition, témoignent d'intentions pédagogiques qui peuvent être différentes selon les contextes.

### **Modalités de transmission des habiletés motrices complexes : le rôle du langage**

La question du rôle du langage comme élément fondamental dans le processus d'apprentissage et de transmission de la taille en particulier a donné lieu récemment à de nombreux travaux expérimentaux (Ohnuma *et al.*, 1997 ; Putt *et al.*, 2014 ; Morgan *et al.*, 2015 ; Lombao *et al.*, 2017 ; Pargeter *et al.*, 2020).

À Cambay, l'enseignement peut être minimal et se réduire à quelques observations orales ou gestuelles sur la façon de tenir la pierre et de frapper le galet, ou bien

à quelques commentaires sur la qualité de la production. Autrefois, dans les ateliers qui prenaient pour apprentis des enfants, le formateur faisait part de son éventuelle insatisfaction en passant les ébauches des petites perles rondes sur les joues de l'apprenant. Si des arêtes avaient été laissées, elles écorchaient leur joue, preuve de la qualité médiocre de la taille et de la nécessité de faire des éclats plus fins. Jamais aucune instruction n'était donnée sur le cours d'action. Cet enseignement minimal, ayant trait essentiellement à la technique et non à la méthode, a été observé y compris dans le cadre d'une « école » subventionnée par l'État pour pérenniser l'activité de taille à Cambay. Inayat, expert de haut niveau, en était l'enseignant. Nous avons assisté à quelques-unes des scènes d'enseignement. Les remarques avaient trait essentiellement au positionnement de la pièce sur la barre de fer, au placement de la main qui tenait la pièce ou au plan de frappe. Elles s'accompagnaient de gestes qui, le plus souvent, se suffisaient à eux-mêmes. Aucune instruction verbale sur le déroulé du cours d'action n'était donnée. Cette même modalité d'enseignement a été observée pour d'autres activités artisanales exercées en milieu traditionnel, comme le tournage.

Nos résultats précédemment présentés expliquent pourquoi l'apprentissage d'activités motrices complexes ne requiert pas nécessairement d'instructions orales : d'une part, la maîtrise du geste élémentaire relève d'un apprentissage individuel (il n'y a pas imitation des gestes), d'autre part, la connaissance de la méthode peut être acquise par simple observation d'un modèle (observation des principales étapes à suivre pour mettre en forme un objet), et, enfin, la maîtrise du cours d'action est subordonnée à la maîtrise du geste élémentaire, s'acquérant ainsi progressivement par une pratique où se joue une interaction dynamique entre mouvements fonctionnels, perception et planification (Roux et David, 2005).

Des hypothèses ont été faites sur une évolution possible des modalités de transmission au cours de la préhistoire par P. Gärdenfors et A. Högberg (2017 et 2021). Ces auteurs soutiennent qu'un enseignement par la démonstration suffit à l'apprentissage de la technologie oldowayenne, tandis que la communication de concepts est nécessaire à l'apprentissage de la technologie des bifaces acheuléens. A. Högberg écrit à propos de la technologie acheuléenne : « Le processus de fabrication suit des séquences complexes de techniques et de méthodes qui reposent en partie sur la connaissance de concepts précis. Ces derniers ne peuvent s'acquérir en tentant de copier ces séquences, pas plus que par les seuls essais et erreurs des individus » (Högberg, 2020, p. 82). D'après lui, la complexité du processus de fabrication s'illustre dans la préparation du plan de frappe (opérations de biseautage et d'abrasion pour lui donner une forme particulière et faciliter la percussion). Cette notion de plan de frappe, centrale pour la séquence, ne pourrait être appréhendée sans en avoir un concept. Il s'agirait donc d'expliquer à l'apprenant en quoi ce plan de frappe est important, comment l'obtenir, et pourquoi il prépare à un éclat particulier. L'enseignant aura ainsi dû développer



un point de vue global du processus de taille tout en le décomposant en sous-objectifs pour ensuite les communiquer à l'apprenant. Et P. Högberg de poursuivre : « On peut en conclure qu'à des époques antérieures à *Homo sapiens* existait un enseignement par la communication de concepts, via des paroles ou des gestes. Cela ne nécessite pas qu'une faculté linguistique pleine et entière soit en place, mais *a minima* que les tailleurs de l'Acheuléen puissent se référer à des entités absentes » (Högberg, 2020, p. 83-84).

La taille des perles en calcédoine de Cambay peut être également qualifiée de complexe si l'on considère l'existence de sous-objectifs qui conditionnent l'ébauchage et la mise en forme de galets permettant, pour les perles allongées, d'obtenir successivement une pièce de la forme d'un bâtonnet à quatre crêtes de section grossièrement quadrangulaire, puis une pièce de section circulaire (Pelegrin, 2000). Comme nous l'avons décrit ci-dessus, cette complexité n'est pas enseignée. Il n'y a pas de « concepts » en tant que tel, mais une méthode apprise par observation (n'impliquant pas nécessairement de pratique) et un ordonnancement des sous-objectifs maîtrisés progressivement au cours d'une pratique organisée par les stades successifs d'apprentissage et pendant laquelle les éventuels conseils portent sur la technique et non sur les sous-buts. Pour exemple, il n'y a pas d'enseignement du « concept de calibration » des arêtes d'une pièce à des fins de flutage. La maîtrise de la manière de faire des objets, et la compréhension de cette manière de faire, émerge de la pratique elle-même et, en aucun cas, d'un enseignement de « concepts » quelle que soit la complexité de la chaîne opératoire. Cette conclusion est aussi, d'une certaine manière, celle à laquelle sont arrivés d'autres auteurs selon lesquels au fur et à mesure que l'apprenant effectue davantage d'explorations (apprentissage individuel), il perçoit des aspects des cours d'action réalisés par d'autres tailleurs (apprentissage social) qu'il ne percevait pas au début du processus d'apprentissage (par ex. Lombao *et al.*, 2017).

Par ailleurs, il est à noter que la question de l'instruction orale pour faciliter l'apprentissage de la taille est posée selon des termes biaisés. En effet, d'une part, les situations empiriques témoignant de l'absence d'instruction orale, mais d'un apprentissage néanmoins socialement médiatisé, ne sont ni évoquées, encore moins étudiées. D'autre part, l'étude de l'apprentissage d'habiletés de taille avec ou sans instruction orale est menée avec des sujets occidentaux, éduqués, issus d'une société « WEIRD » (Western, Educated, Industrialized, Rich, Democratic, Henrich *et al.*, 2010) où la pédagogie active directe est survalorisée, contrairement à ce qui est observé dans les sociétés prémodernes (Lancy, 2010 et 2015). En effet, D. Lancy démontre à partir d'une importante analyse de la littérature sur la transmission culturelle que l'idée d'enseignement, et plus particulièrement d'enseignement verbal, est, si ce n'est récente historiquement, très peu présente dans les processus de transmission culturelle. Qui plus est, les sujets soumis à expérimentation sont le plus souvent placés dans des

situations qui ne reproduisent pas l'apprentissage progressif traditionnel. Les résultats annoncent en général que l'instruction orale est plus efficace que l'imitation, l'émulation, l'enseignement par gestes ou la démonstration (Morgan *et al.*, 2015 ; Lombao *et al.*, 2017 ; néanmoins, pour des résultats plus mitigés, voir Putt *et al.*, 2014 ; Ohnuma *et al.*, 1997).

Mais de tels résultats ne démontrent pas la nécessité, et donc l'existence, du langage pour enseigner la taille de la pierre : la supériorité d'une technique ou d'un type de transmission n'est pas une preuve de son utilisation ! Enfin, les résultats obtenus sur les propriétés des habiletés de taille sont ignorés : les capacités de planification sont ainsi réduites à des capacités mentales de résolution de problèmes en les déconnectant des effets dynamiques des interactions entre planification, action et perception.

## CONCLUSION

Depuis quelque temps, les études sur les habiletés de taille reconnaissent les limites de l'approche cognitive à la lumière de l'approche écologique. Quelles que soient les variables observées, elles s'accordent pour conclure que le raisonnement « technique » est guidé par le couplage perception/action (Osiurak et Reynaud, 2020), que les concepts technologiques sont plus rapidement appris que les habiletés perceptivo-motrices (Stout *et al.*, 2015), que l'acquisition de l'habileté perceptivo-motrice est une condition préalable pour développer savoir-faire et savoir (Pargeter *et al.*, 2020), ou encore, à partir de ces résultats, que les habiletés d'adaptation sensorimotrice et de perception sont primordiales à la compréhension des premiers stades de l'évolution technologique humaine, plus que ne le sont la conceptualisation et la planification abstraite (Stout et Chaminade, 2007). Ces résultats, obtenus selon des procédures analytiques et disciplinaires complémentaires, convergent avec nos études, sachant que certains protocoles expérimentaux s'en sont directement inspirés, par exemple dans le cas de l'étude menée par D. Stout et collègues (2015).

Cette caractérisation renouvelée des habiletés de taille a permis d'en préciser le processus d'acquisition et d'expliquer les expressions lithiques des différents niveaux de savoir-faire. Les hypothèses associant caractères lithiques et stades d'apprentissage sont ainsi validées. Par ailleurs, l'archéologie confirme le caractère universel d'un calendrier d'apprentissage, tandis que les études actualistes soulignent l'impossibilité d'associer à la taille de la pierre des modalités de transmission spécifiques, avec ou sans instruction orale.

Nous concluons à la nécessité de collaborations entre spécialistes des différents domaines dès lors que l'on cherche à construire un savoir extérieur à l'archéologie. Ces collaborations restent malheureusement rares. Le risque est une construction de savoirs qui ne sont pas soumis aux principes de validation des disciplines-mères et qui échappent par conséquent à toute règle scientifique.

**NOTES**

- (1) Pour des exemples de collaborations interdisciplinaires sur l'étude des habiletés de taille, voir : Roux et Bril, 2005 ; « La perle de la pluridisciplinarité », *Journal du CNRS*, 122, février 2000.
- (2) Soulignons, en outre, que toute théorie peut être remise en question, puisque par définition une théorie est réfutable, mais présente néanmoins, à un moment donné, un système explicatif d'un phénomène particulier permettant de faire des prédictions (Vorms, 2013).
- (3) Ces moyens d'enregistrement ont évolué depuis les années 1990, mais ils permettaient un enregistrement du signal très fin (240 hz pour l'accéléromètre ; 30 à 120, puis 240 hz pour les capteurs électromagnétiques). Ces expérimentations ont été les premières à enregistrer le mouvement du tailleur et de son percuteur, en temps réel, dans des situations de terrain.
- (4) Cinq chercheurs ont participé à ces expérimentations : E. Biryukova et A. Roby Brami, pour les neurosciences ; G. Dietrich, pour l'informatique et la biomécanique ; B. Bril, pour la psychologie expérimentale ; et V. Roux, pour l'ethnoarchéologie.
- (5) Flexion Extension (F-Es), Abduction-Adduction (Ab-Ads) et Rotation (Rots) au niveau de l'épaule ; Flexion-Extension (F-Ee) et Prono-Supination (P-Se) au niveau du coude ; Flexion-Extension (F-Ew) et Abduction-Adduction (Ab-Adw) au niveau du poignet.
- (6) Pour une discussion détaillée voir Biryukova et Bril, 2002.

**Blandine BRIL**  
EHESS, Paris, France  
Blandine.bril@ehess.fr

**Valentine ROUX**  
CNRS, UMR 8068 TEMPS,  
université Paris Nanterre, Nanterre, France  
Valentine.roux94@proton.me

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AGRE P. E., CHAPMAN D. (1990) – What Are Plans for?, in P. Maes (dir.), *Designing Autonomous Agents*, Cambridge, Elsevier, p. 17-34.
- BABER C., JANULIS K. (2021) – Purposeful Tool Use in Early Lithic Technologies, *Adaptive Behavior*, 29, 2, p. 169-180.
- BALFET H. (1991) – *Observer l'action technique : des chaînes opératoires, pour quoi faire ?*, Paris, éditions du CNRS.
- BERNSTEIN N. A. (1996) – On Dexterity and Its Development, in M. L. Latash et M. T. Turvey (dir.), *Dexterity and Its Development*, Mahwah, Erlbaum Associates, p. 1-244.
- BIRYUKOVA E. V., BRIL B. (2002) – Bernstein et le geste technique, in B. Brill et V. Roux (dir.), *Le geste technique. Réflexions méthodologiques et anthropologiques*, Ramonville-Saint-Agne, éditions Érès (Technologies/ Idéologies/ Pratiques), p. 49-68.
- BIRYUKOVA E. V., BRIL B. (2008) – Organization of Goal-Directed Action at a High Level of Motor Skill: The Case of Stone Knapping in India, *Motor control*, 12, 3, p. 181-209.
- BIRYUKOVA E. V., SIROTKINA I. (2020) – Forward to Bernstein: movement complexity as a new frontier, *Frontiers in Neuroscience*, 14, 553, DOI: 10.3389/fnins.2020.00553.
- BIRYUKOVA E. V., BRIL B., DIETRICH G., ROBY-BRAMI A., KULIKOV M. A., MOLCHANOV P. E. (2005) – The Organization of Arm Kinetic Synergies: The Case of Stone Bead Knapping in Khambhat, in V. Roux et B. Brill (dir.), *Stone Knapping: The Necessary Conditions for a Uniquely Hominin Behaviour*, Cambridge, MacDonal Institute for Archaeological Research, p. 73-90.
- BIRYUKOVA E. V., BRIL B., FROLOV A. A., KOULIKOV M. A. (2015) – Movement Kinematics as an Index of the Level of Motor Skill: The Case of Indian Craftsmen Stone Knapping, *Motor Control*, 19, 1, p. 34-59.
- BOCK J. (2002) – Learning, Life History and Productivity: Children's Lives in the Okavango Delta, *Human Nature*, 13, p. 161-197.
- BRIL B. (2015) – Learning to Use Tools: A Functional Approach to Action, in L. Filletaz et S. Billet (dir.), *Learning through and for Practice: Contributions from Francophone Perspectives*, Dordrecht, Heidelberg, Londres, Springer International Publishing, p. 95-118.
- BRIL B. (2018) – Action, Movement, and Culture: Does Culture Shape Movement?, *Kinesiology Review*, 7, 1, p. 79-87.
- BRIL B. (2019) – Comment aborder la question du geste technique pour en comprendre l'expertise et l'apprentissage ?, *Techniques & Culture*, 71, 1, p. 78-91.
- BRIL B. (2021) – Cognition Demonstrated by Artifacts: Tool-Use Expertise and Tool-Use Learning, in T. B. Henly et M. J. Rossano (dir.), *Psychology and Cognitive Archaeology: An Interdisciplinary Approach to the Study of the Human Mind*, Abington, Routledge.
- BRIL B., ROUX V., DIETRICH G. (2000) – Habilités impliquées dans la taille des perles en calcédoine: caractéristiques motrices et cognitives d'une action située complexe, in V. Roux (dir.), *Cornaline de l'Inde. Des pratiques techniques de Cambay aux techno-systèmes de l'Indus*, Paris, éditions de la MSH, p. 207-332.
- BRIL B., ROUX V., DIETRICH G. (2005) – Stone Knapping: Khambhat (India), a Unique opportunity?, in V. Roux et B. Brill (dir.), *Stone Knapping: The Necessary Conditions for a Uniquely Hominin Behaviour*, Cambridge, Mc Donald Institute for Archaeological Research, p. 53-72.
- BRIL B., REIN R., NONAKA T., WENBAN-SMITH F., DIETRICH G. (2010) – The Role of Expertise in Tool Use: Skill Differences in Functional Action Adaptations to Task Constraints, *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 36, 4, p. 825-839.
- BRIL B., SMAERS J., STEELE J., REIN R., NONAKA T., DIETRICH G., BIRYUKOVA E., HIRATA S., ROUX V. (2012) – Functional Mastery of Percussive Technology in Nut-Cracking and Stone-Flaking Actions: Experimental Comparison and Implications for the Evolution of the Human Brain, *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 367, 1585, p. 59-74.
- BRIL B., PARRY R., DIETRICH G. (2015) – How Similar Are Nut-Cracking and Stone-Flaking? A Functional Approach to Percussive Technology, *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 370, 1682, p. 20140355.
- BYRNE R. W., RUSSON A. E. (1998) – Learning by Imitation: A Hierarchical Approach, *Behavioral and Brain Sciences*, 21, 5, p. 667-684.
- CALVO-MERINO B., GRÉZES J., GLASER D. E., PASSINGHAM R. E., HAGGARD P. (2006) – Seeing or doing? Influence of Visual and Motor Familiarity in Action Observation, *Current Biology*, 16, p. 1905-1910.
- CAVALLI-SFORZA L. L., FELDMAN M. W., CHEN K. H., DORN-BUSCH S. M. (1982) – Theory and Observation in Cultural Transmission, *Science*, 218, p. 19-27.
- CHAN T. C., SHAW R. E. (1996) – What Is Ecological Psychology?, *Psychologia*, 39, p. 1-16.
- CHILDS C. P., GREENFIELD P. M. (1980) – Informal Modes of Learning and Teaching: The Case of Zinacanteco Weaving, *Studies in Cross-Cultural Psychology*, 2, p. 269-316.
- CONNOLLY K., DALGLEISH M. (1989) – The Emergence of a Tool-Using Skill in Infancy, *Developmental Psychology*, 25, p. 894-912.
- DESMURGET M. (2006) – *Imitation et apprentissages moteurs : des neurones miroirs à la pédagogie du geste sportif*, Marseille, Solal.
- DIBBLE H. L. (1997) – Platform Variability and Flake Morphology: A Comparison of Experimental and Archaeological Data and Implications for Interpreting Prehistoric Lithic Technological Strategies, *Lithic Technology*, 22, 2, p. 150-170.
- FOUCART J. (2006) – *Étude comparée des habilités opératoires et motrices de l'homme et du chimpanzé pour une utilisation d'outils trans-primatique : le cassage de noix*, thèse de doctorat, EHESS, Paris.

- FOUCART J., BRIL B., HIRATA S., MORIMURA N., HOUKI C., UENO Y., MATSUZAWA T. (2005) – A Preliminary Analysis of Nut-Cracking Movements in a Captive Chimpanzee: Adaptation to the Properties of Tools and Nuts, in V. Roux et B. Bril (dir.), *Stone Knapping: the Necessary Conditions for a Uniquely Hominin Behaviour*, Cambridge, Mc Donald Institute for Archaeological Research, p. 147-158.
- GALLAY A. (2011) – *Pour une ethnoarchéologie théorique*, Paris, éditions Errance.
- GANDON E., NONAKA T., ENDLER J. A., COYLE T., BOOTSMA R. J. (2020) – Traditional Craftspeople are not Copycats: Potter Idiosyncrasies in Vessel Morphogenesis, *PLoS one*, 15, 9, p. e0239362.
- GANDON E., NONAKA T., COYLE T., COYLE E., SONABEND R., OGBONNAYA C., ENDLER J., ROUX V. (2021) – Cultural Transmission and Perception of Vessel Shapes among Hebron Potters, *Journal of Anthropological Archaeology*, 63, p. 101334.
- GÄRDENFORS P., HÖGBERG A. (2017) – The Archaeology of Teaching and the Evolution of Homo Docens, *Current Anthropology*, 58, 2, p. 188-208.
- GÄRDENFORS P., HÖGBERG A. (2021) – Evolution of Intentional Teaching, in N. Gontier, A. Lock et C. Sinha (dir.), *The Oxford Handbook of Human Symbolic Evolution*, Oxford, Oxford University Press.
- GARDIN J.-C. (1979) – *Une archéologie théorique*, Paris, Hachette.
- GARDIN J.-C. (1990) – The Structure of Archaeological Theories, in A. Voorrips (dir.), *Mathematics and information Science in Archaeology: A Flexible Framework*, Bonn, Holos, p. 7-28.
- GARDIN J.-C. (1991) – *Le calcul et la raison. Essais sur la formalisation du discours savant*, Paris, éditions de l'EHESS, 296 p.
- GARDIN J.-C. (2001) – Entre modèle et récit : les flottements de la troisième voie, in J.-Y. Grenier et C. Grignon (dir.), *Le modèle et le récit*, Paris, éditions de la MSH, p. 457-488.
- GARDIN J.-C. et al. (1981) – *La logique du plausible*, Paris, éditions de la MSH.
- GIBSON J. J. (1979) – *The Ecological Approach to Perception*, Londres, Lawrence Erlbaum.
- HAYHOE M., BALLARD D. (2005) – Eye Movements in Natural Behavior, *Trends in Cognitive Sciences*, 9, 4, p. 188-194.
- HECHT E. E., GUTMAN D. A., KHREISHEH N., TAYLOR S. V., KILNER J., FAISAL A. A., BRADLEY B. A., CHAMINADE T., STOUT D. (2015) – Acquisition of Paleolithic Toolmaking Abilities Involves Structural Remodeling to Inferior Frontoparietal Regions, *Brain Structure and Function*, 220, 4, p. 2315-2331.
- HENRICH J., HEINE S. J., NORENZAYAN A. (2010) – The Weirdest People in the World?, *Behavioral and Brain Sciences*, 33, 2-3, p. 61-83.
- HÖGBERG A. (2020) – Evolution de l'enseignement intentionnel, in P. Pion et N. Schlanger (dir.), *Apprendre. Archéologie de la transmission des savoirs*, Paris, La Découverte, p. 73-86.
- JOHNSON-FREY S. H. (2004) – The Neural Bases of Complex Tool Use in Humans, *Trends in Cognitive Sciences*, 8, 2, p. 71-78.
- KLARIC L. (2018) – *The Prehistoric Apprentice. Investigating Apprenticeship, Know-How and Expertise in Prehistoric Technologies*, Brno, The Czech Academy of Sciences, Institute of Archaeology.
- LANCY D. F. (2010) – Learning 'from Nobody': The Limited Role of Teaching in Folk Models of Children's Development, *Childhood in the Past*, 3, 1, p. 79-106.
- LANCY D. F. (2015) – Teaching Is so WEIRD, *Behavioral and Brain Sciences*, 38, p. 31.
- LE GALL D., ETCHARRY-BOUYX F., OSIURAK F. (2012) – Les apraxies : synthèse et nouvelles perspectives', *Revue de neuropsychologie*, 4, 3, p. 174-185, doi:10.3917/rne.043.0174
- LOMBAO D., GUARDIOLA M., MOSQUERA M. (2017) – Teaching to Make Stone Tools: New Experimental Evidence Supporting a Technological Hypothesis for the Origins of Language, *Scientific reports*, 7, 1, p. 1-14.
- MORGAN T. J., UOMINI N. T., RENDELL L. E., CHOUINARD-THULY L., STREET S. E., LEWIS H. M., CROSS C. P., EVANS C., KEARNEY R., DE LA TORRE I. (2015) – Experimental Evidence for the Co-Evolution of Hominin Tool-Making Teaching and Language, *Nature Communications*, 6, 1, p. 1-8.
- NEWELL K. M. (1991) – Motor Skill Acquisition, *Annual Review of Psychology*, 42, p. 213-237.
- NEWELL K. M. (1996) – Changes in Movement and Skills: Learning Retention and Transfer, in M. L. Latash and M. T. Turvey (dir.), *Dexterity and its Development*, Mahwah, L.E.A., p. 393-429.
- NONAKA T., BRIL B. (2012) – Nesting of Asymmetric Functions in Skilled Bimanual Action: Dynamics of Hammering Behavior of Bead Craftsmen, *Human Movement Science*, 31, 1, p. 55-77.
- NONAKA T., BRIL B., REIN R. (2010) – How Do Stone Knappers Predict and Control the Outcome of Flaking? Implications for Understanding Early Stone Tool Technology, *Journal of Human Evolution*, 59, 2, p. 155-167.
- OHNUMA K., AOKI K., AKAZAWA T. (1997) – Transmission of Tool-Making through Verbal and Non-verbal Communication: Preliminary Experiments in Levallois Flake Production, *Anthropological Science*, 105, 3, p. 159-168.
- OSIURAK F., REYNAUD E. (2020) – The Elephant in the Room: What Matters Cognitively in Cumulative Technological Culture, *Behavioral and Brain Sciences*, 43, e156, <https://doi.org/10.1017/S0140525X1900323>
- OSIURAK F., JARRY C., ETCHARRY-BOUY F., BAUMARD J., LESOURD M., LE GALL D. (2016) Bases neurocognitives de l'utilisation d'outils, *Revue de neuropsychologie*, 8, 2, p. 99-103, <https://doi.org/10.3917/rne.082.0099>
- PARGETER J., KHREISHEH N., STOUT D. (2019) – Understanding Stone Tool-Making Skill Acquisition: Experimental Methods and Evolutionary Implications, *Journal of Human Evolution*, 133, p. 146-166.
- PARGETER J., KHREISHEH N., SHEA J. J., STOUT D. (2020) – Knowledge vs. Know-How? Dissecting the Foundations of

- Stone Knapping Skill, *Journal of Human Evolution*, 145, p. 102807.
- PARRY R., DIETRICH G., BRIL B. (2014) – Tool Use Ability Depends on Understanding of Functional Dynamics and not Specific Joint Contribution Profiles, *Frontiers in Psychology*, 5, doi.org/10.3389/fpsyg.2014.00306
- PELEGRIN J. (1990) – Prehistoric Lithic Technology: Some Aspects of Research, *Archaeological Review from Cambridge*, 9, p. 116-125.
- PELEGRIN J. (1991) – Les savoir-faire : une très longue histoire, *Terrain. Anthropologie & sciences humaines*, 16, p. 106-113.
- PELEGRIN J. (2000) – Technique et méthodes de taille pratiquées à Cambay, in V. Roux (dir.), *Cornaline de l'Inde : des pratiques techniques de Cambay aux techno-systèmes de l'Indus*, Paris, éditions de la MSH, p. 53-93.
- PELEGRIN J. (2005) – Remarks about Archaeological Techniques and Methods of Knapping: Elements of a Cognitive Approach to Stone Knapping, in V. Roux et B. Bril (dir.), *Stone Knapping: The Necessary Conditions for a Uniquely Hominin Behaviour*, Cambridge, Mc Donald Institute for Archaeological Research, p. 23-34.
- PERLÈS C. (2018) – Postface. Apprenticeship and Know-How: The Renewal of a Classical Approach, in L. Klaric (dir.), *The Prehistoric Apprentice. Investigating apprenticeship, know-how and expertise in prehistoric technologies*. Brno, The Czech Academy of Sciences, Institute of Archaeology, p. 333-344.
- PUTT S. S., WOODS A. D., FRANCISCUS R. G. (2014) – The Role of Verbal Interaction during Experimental Bifacial Stone Tool Manufacture, *Lithic Technology*, 39, 2, p. 96-112.
- RAMAYYA A. G., GLASSER M. F., RILLING J. K. (2010) – A DTI Investigation of Neural Substrates Supporting Tool Use, *Cerebral cortex*, 20, 3, p. 507-516.
- RAMUS F. (2017) – Introduction aux sciences cognitives, <https://www.youtube.com/watch?v=-6uS33iRZ0A>
- REED E. S., BRIL B. (1996) – The Primacy of Action in Development, in *Dexterity and Its Development*, in M. L. Latash et M. T. Turvey (dir.), *Dexterity and Its Development*, Mahwah, Erlbaum Associates, p. 431-451.
- REIN R., BRIL B., NONAKA T. (2013) – Coordination Strategies Used in Stone Knapping, *American Journal of Physical Anthropology*, 150, 4, p. 539-550.
- REIN R., NONAKA T., BRIL B. (2014) – Movement Pattern Variability in Stone Knapping: Implications for the Development of Percussive Traditions, *PLOS ONE*, 9, 11, p. e113567.
- RIZZOLATTI G., FOGASSI L., GALLESE V. (2001) – Neurophysiological Mechanisms Underlying the Understanding and Imitation of Action, *Nature Reviews Neuroscience*, 2, 9, p. 661-670.
- ROGOFF B. E., LAVE J. E. (1984) – *Everyday Cognition: Its Development in Social Context*, Cambridge (Mas.), Harvard University Press.
- ROUX V., BRIL B. (2002a) – Des « programmes » d'apprentissage comparables pour des actions techniques différentes, in B. Bril et V. Roux (dir.), *Le geste technique. Réflexions méthodologiques et anthropologiques*, Ramonville-Saint-Agne, éditions Érès (Technologies/ Idéologies/ Pratiques), p. 231-242.
- ROUX V., BRIL B. (2002b) – Observation et expérimentation de terrain : des collaborations fructueuses pour l'analyse de l'expertise technique. Le cas de la taille de pierre en Inde., in Bril B. et Roux V. (dir.), *Le geste technique. Réflexions méthodologiques et anthropologiques*, Ramonville-Saint-Agne, éditions Érès (Technologies/Idéologies/Pratiques), p. 29-48.
- ROUX V., BRIL B. (2005) – *Stone Knapping: The Necessary Conditions for a Uniquely Hominin Behaviour*, Cambridge, The MacDonald Institute for Archaeological research.
- ROUX V., DAVID E. (2005) – Planning Abilities as a Dynamic Perceptual-Motor Skill: An Actualist Study of Different Levels of Expertise Involved in Stone Knapping, in V. Roux et B. Bril (dir.), *Stone Knapping: A Uniquely Hominin Behaviour*, Cambridge, McDonald Institute for Archaeological Research, p. 91-108.
- ROUX V., BRIL B., DIETRICH G. (1995) – Skills and Learning Difficulties Involved in Stone Knapping: The Case of Stone-Bead Knapping in Khambhat, India, *World Archaeology*, 27, 1, p. 63-87.
- SCHOLZ J. P., SCHÖNER G., LATASH M. L. (2000) – Identifying the Control Structure of Multijoint Coordination during Pistol Shooting, *Experimental Brain Research*, 135, 3, p. 382-404.
- SCHÖNER G., MARTIN V., REIMANN H., SCHOLZ J. P. (2008) – Motor Equivalence and the Uncontrolled Manifold, in R. Sock, S. Fuchs et Y. Laprie, *Proceedings of the International Seminar on Speech Production 2008 (Strasbourg, 8-12 août 2008)*, Vandœuvre, Institut national de Lorraine, p. 23-28.
- STOUT D., CHAMINADE T. (2007) – The Evolutionary Neuroscience of Tool Making, *Neuropsychologia*, 45, 5, p. 1091-1100.
- STOUT D., HECHT E., KHREISHEH N., BRADLEY B., CHAMINADE T. (2015) – Cognitive Demands of Lower Paleolithic Toolmaking, *PLoS One*, 10, 4, p. e0121804.
- SUMMERS J. J., ANSON J. G. (2009) – Current Status of the Motor Program: Revisited, *Human Movement Science*, 28, 5, p. 566-577.
- SZABADOS A. (2017) – *Uncontrolled Manifolds and Short-Delay Reflexes in Speech Motor Control: A Modeling study*, thèse de doctorat, université Grenoble Alpes, Grenoble.
- TIXIER J. (1967) – Procédés d'analyse et questions de terminologie dans l'étude des ensembles industriels du Paléolithique récent et de l'épipaléolithique en Afrique du Nord-Ouest, in *Background to Evolution in Africa*, Chicago, Londres, The University Press of Chicago, p. 771-820.
- TIXIER J., INIZAN M.-L., ROCHE H. (1980) – *Préhistoire de la pierre taillée : terminologie et technologie*, Antibes, CREP, 120 p.
- VAN DER KAMP J., STEENBERGEN B. (1999) – The Kinematics of Eating with a Spoon: Bringing the Food to the Mouth, or the Mouth to the Food?, *Experimental Brain Research*, 129, 1, p. 68-76.
- VAN ROON D., VAN DER KAMP J., STEENBERGEN B. (2003) – Constraints in Children's Learning to Use Spoons, *Development of Movement Coordination in Children: Application*

- tions in the Field of Ergonomics, Health Sciences and Sport, Abingdon, New York, Routledge, p. 75-93.
- VAN ROON D., STEENBERGEN B., MEULENBROEK R. G. (2004) – Trunk Recruitment during Spoon Use in Tetraparetic Cerebral Palsy, *Experimental Brain Research*, 155, 2, p. 186-195.
- VEREIJKEN B., WHITING H. T. (1990) – In Defence of Discovery Learning, *Canadian Journal of Sport Sciences*, 15, 2, p. 99-106.
- VEREIJKEN B., WHITING H. T. A., BEEK W. J. (1992) – A Dynamical Systems Approach to Skill Acquisition, *The Quarterly Journal of Experimental Psychology Section A*, 45, 2, p. 323-344.
- VORMS M. (2013) – Theorizing and Representational Practices in Classical Genetics, *Biological Theory*, 7, 4, p. 311-324.
- WILLIAMS E. M., GORDON A. D., RICHMOND B. G. (2014) – Biomechanical Strategies for Accuracy and Force Generation during Stone Tool Production, *Journal of Human Evolution*, 72, p. 52-63.
- WULF G., SHEA C., LEWTHWAITE R. (2010) – Motor Skill Learning and Performance: A Review of Influential Factors, *Medical Education*, 44, 1, p. 75-84.
- WYNN T. (1985) – Piaget, Stone Tools and the Evolution of Human Intelligence, *World Archaeology*, 17, p. 32-43.
- WYNN T. (1993) – Layers of Thinking in Tool Behavior, in *Tools, Language and Cognition in Human Evolution*, Cambridge, Cambridge University Press, p. 389-406.
- WYNN T., OVERMANN K. A., MALAFOURIS L. (2021) – 4E Cognition in the Lower Palaeolithic: An Introduction, *Adaptive Behavior*, 29, 2, p. 99-106.
- ZENTGRAF K., MUNZERT J. (2009) – Effects of Attentional-Focus Instructions on Movement Kinematics, *Psychology of Sport and Exercise*, 10, 5, p. 520-525.

